

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO REFORÇO HÍBRIDO DE VIGAS “T” DE
CONCRETO ARMADO COM COLAGEM EXTERNA DE COMPÓSITOS
DE FIBRA DE CARBONO E DE VIDRO**

MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO REFORÇO HÍBRIDO DE VIGAS
“T” DE CONCRETO ARMADO COM COLAGEM EXTERNA DE
COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO E DE VIDRO**

MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO

ORIENTADOR: ANTÔNIO CARLOS DE OLIVEIRA MIRANDA, DSc.

CO-ORIENTADOR: GUILHERME SALES S. DE A. MELO, Ph.D.

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO REFORÇO HÍBRIDO DE VIGAS
“T” DE CONCRETO ARMADO COM COLAGEM EXTERNA DE
COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO E DE VIDRO**

MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof. Antônio Carlos de Oliveira Miranda, D.Sc. (UnB)
(Orientador)**

**Prof. Yosiaki Nagato, D.Sc. (UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Mauricio de Pina Ferreira, D.Sc. (UFPA)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 24 DE AGOSTO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

MANZANO, MANUEL ALEJANDRO ROJAS

Análise experimental do reforço híbrido de vigas “T” de concreto armado com colagem externa de compósitos de fibras de carbono e de vidro [Distrito Federal] 2012.

xxii, 146p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2012).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Flexão

3.Reforço

I. ENC/FT/UnB

2.Compósito

4. Híbrido

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MANZANO, M. A. R. (2012). Análise experimental do reforço híbrido de vigas “T” de concreto armado com colagem externa de compósitos de fibras de carbono e de vidro. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-014A/12 , Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Manuel Alejandro Rojas Manzano

TÍTULO: Análise experimental do reforço híbrido de vigas “T” de concreto armado com colagem externa de compósitos de fibras de carbono e de vidro.

GRAU: Mestre

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Manuel Alejandro Rojas Manzano
SQN 406 Bloco A apto. 106, Asa Norte.
CEP: 708470010 – Brasília – DF – Brasil.
malroma81@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Lucy Manzano e Gustavo Rojas pelo exemplo e pelo amor,
a minha esposa Lorena Medina pelo apoio incondicional,
aos meus irmãos Gustavo Arnulfo, Pablo Andrés e Catalina.*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Antônio Carlos de Oliveira Miranda, Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo e Yosiaki Nagato pela paciência, apoio, dedicação e orientação para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília pelos conhecimentos transmitidos.

Ao meu amigo o doutorando Juliano Rodrigues pela colaboração e amizade.

Aos companheiros do grupo de pesquisa Análise Experimental de Estruturas da UnB, pelo apoio, companheirismo e paciência durante os ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, Leandro, Júlio e Magno pela colaboração durante a realização dos ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais da Universidade de Brasília, Washington e Severino pelo apoio.

À Eva Veloso, secretária do PECC pelo apoio diário e sua amizade.

Aos colegas do mestrado pelo companheirismo, amizade, solidariedade.

Ao CNPq e Capes pelo apoio financeiro e pela oportunidade de estudar no Brasil.

À empresa *Master Builders Technologies* do Brasil, pelo fornecimento dos tecidos de CFRP e dos adesivos de epóxi utilizados no reforço das vigas.

Aos meus pais, Lucy e Gustavo, pelo exemplo, pelo amor e pela educação. A minha esposa Lorena por acreditar sempre em mim. Aos meus irmãos pela confiança e pela força e a toda minha família pelo apoio.

A Deus pela oportunidade e pelas coisas boas que ele me deu.

RESUMO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO REFORÇO HÍBRIDO DE VIGAS “T” DE CONCRETO ARMADO COM COLAGEM EXTERNA DE COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO E DE VIDRO

Autor: Manuel Alejandro Rojas Manzano

Orientador: Antônio Carlos de Oliveira Miranda

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Agosto de 2012.

Neste trabalho foi estudado e avaliado o comportamento estrutural do reforço híbrido à flexão de vigas em concreto armado com seção transversal “T” com a técnica de materiais compósitos colados externamente na superfície do concreto, submetidas a carregamentos estáticos até a ruptura. O programa experimental consistiu no ensaio de 5 vigas “T” simplesmente apoiadas submetidas a duas cargas concentradas aplicadas a 1,50 m do apoio e com um vão de 4,00 m, sendo de 0,63% a taxa de armadura das vigas. Uma viga sem reforço foi ensaiada como referência e quatro vigas foram reforçadas com duas camadas de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) e de vidro (PRFV) em diferentes sequências na superfície do concreto.

A análise foi realizada com os resultados da carga última, modos de ruptura, deslocamento vertical, deformação específica na armadura de flexão e cisalhamento, deformação específica do concreto, deformação específica do compósito e o desenvolvimento da fissuração. Além disso, foram feitas adaptações nas normas ACI 440.2R:2008 e *Bulletin* 14 FIB:2001, para calcular a carga última das vigas reforçadas e realizar as comparações com os resultados experimentais.

O incremento da carga última das vigas reforçadas em relação à viga de referência variou entre 15,3 % e 20,3 %. A viga que apresentou o melhor resultado foi a reforçada primeiro com uma camada de PRFV e depois com uma camada de PRFC. Os modos de ruptura apresentados nas vigas reforçadas foram descolamento do PRF (primeira camada de PRFC) e delaminação do cobrimento (primeira camada de PRFV). Estes resultados mostram a influência da sequência de colagem do PRF no comportamento das vigas.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF HYBRID STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE "T" BEAMS WITH EXTERNALLY BONDED COMPOSITES OF CARBON AND GLASS FIBER

Author: Manuel Alejandro Rojas Manzano

Supervisor: Antônio Carlos de Oliveira Miranda

Post-Graduate Program on Structures and Construction

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Brasília, Brazil

Brasília, August of 2012

In this work it was studied and evaluated the structural behavior of flexural hybrid strengthening of reinforced concrete beams with "T" cross section with the technique of externally bonded composite materials on the surface of concrete under static loading up to failure. The experimental program consisted of 5 simply supported "T" beam tested under two concentrated loads applied to 1,50 m from the support and with a span of 4,00 m and with 0.63% of flexural reinforcement ratio. One unstrengthened beam was tested as reference and 4 beams were reinforced with two layers of carbon and glass fiber reinforced polymers in different sequences on the surface of the concrete.

The analysis was performed with the results of ultimate load, failure modes, vertical deflection, strain in flexure and shear steel, strain in the concrete, strain in the composite and cracking pattern. In addition, adaptations were made in the codes ACI 440.2R:2008 and Bulletin 14 FIB:2001, for calculate the ultimate load of strengthened beams and make comparisons with the experimental results.

The increase in the ultimate load of the beams strengthened in relation to the reference beam varied between 15,3 % and 20,3 %. The beam that showed the best result was the reinforced beam with a first layer of GFRP and then with a layer of CFRP. The failure modes presented in the strengthened beams were PRF debonding (first layer of CFRP) and cover delamination (first layer of GFRP). These results show the influence of the sequence of bonding of the PRF in the behavior of beams.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	2
1.3 - OBJETIVOS DA PESQUISA	3
1.3.1 - Objetivo Geral	3
1.3.2 – Objetivos Específicos	3
1.4 – METODOLOGIA	3
1.5 – ESTRUTURA DA PESQUISA	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 – PRELIMINARES	6
2.2 – REFORÇO COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA	6
2.2.1 – Polímeros reforçados com fibra (PRF)	7
2.2.2 – Reforço com PRF colados na superfície do concreto	9
2.3 - PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	11
2.3.1 - <i>ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally bonded PRF Systems for Strengthening Concrete Structures</i>	11
2.3.2 - <i>Bulletin 14 FIB-01 Externally bonded PRF reinforcement for RC structures</i>	19
2.4 - TRABALHOS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO REFORÇO HÍBRIDO COLADO NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO	25
2.4.1- Pesquisas realizadas no Exterior	25
2.4.2 - Pesquisas realizadas no Brasil	39
3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	58
3.2 - DETALHAMENTO DAS VIGAS	59
3.2.1 – Características geométricas das vigas	59
3.2.2 - Esquema estático de carregamento	59
3.2.3 - Dimensionamento das vigas	61
3.3 – DETALHAMENTO DA ARMADURA E ANCORAGEM	62
3.3.1 – Detalhamento das armaduras de flexão e cisalhamento	62
3.3.2 – Ancoragem e cobrimento da armadura de flexão	63
3.4 - REFORÇO DAS VIGAS	64
3.4.1 - Propriedades do material de reforço	64
3.4.2 – Cálculo da resistência à flexão após o reforço	65
3.5 – INSTRUMENTAÇÃO	65
3.5.1 – Deformações específicas no aço, concreto e reforço	65

3.5.2 – Deslocamento vertical	70
3.6 – PROCESSO EXECUTIVO	71
3.6.1 - Montagem e concretagem das vigas	71
3.6.2 – Aplicação do reforço	73
4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
4.1 - PRELIMINARES	76
4.2 - MATERIAIS	76
4.2.1 - Aço	76
4.2.1 - Concreto	78
4.3 - ENSAIO DAS VIGAS.....	79
4.3.1 - Resultados Gerais.....	79
4.3.2 - Ensaio da viga de referência VR1 – RF	80
4.3.3 - Ensaio da viga reforçada VA1 – CC.....	84
4.3.4 - Ensaio da viga reforçada VA2 – CV.....	88
4.3.5 - Ensaio da viga reforçada VA3 – VV	92
4.3.6 - Ensaio da viga reforçada VA4 – VC.....	96
5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	101
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	101
5.2 – COMPORTAMENTO DAS VIGAS ENSAIADAS	101
5.2.1 – Carga última e modo de ruptura	101
5.2.2 – Deformação na armadura de flexão.....	102
5.2.3 – Deformação na armadura de cisalhamento	106
5.2.4 – Deformação no concreto	107
5.2.5 – Deformação no reforço.....	108
5.2.6 – Deslocamentos verticais	109
5.2.7 - Contribuição do reforço de PRF	112
5.3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS RESULTADOS CALCULADOS PELA NORMA ABNT NBR 6118:2007, PELA NORMA ACI 440.2R:2008 E PELO <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001.....	113
5.3.1 - Carga última estimada pela norma ACI 440.2R:2008	113
5.3.2 - Carga última estimada pela norma <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001	114
5.3.3 - Comparação entre os resultados experimentais, o código ACI 440-2R:2008 e o <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001	115
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	117
6.2 – CONCLUSÕES	117

6.2.1 - Desempenho do reforço à flexão	117
6.2.2 - Modos de ruptura	118
6.2.3 - Influência no comportamento das vigas reforçadas da sequência de colagem dos compósitos de carbono (PRFC) e de vidro (PRFV) na superfície de concreto	118
6.2.4 - Comparação entre os resultados experimentais e os estimados segundo as normas...	119
6.3 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
A – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS VIGAS ENSAIADAS	125
A.1 – VIGA VR1 – RF	125
A.2 – VIGA VA1 – CC	128
A.3 – VIGA VA2 – CV	131
A.4 – VIGA VA3 – VV	134
A.5 – VIGA VA4 – VC	137
B – MEMORIAL DE CÁLCULO	140
B.1 – NORMA ABNT NBR 6118:2007	140
B.2 – CÓDIGO ACI 440:2R:2008.....	141
B.3 – <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001.....	143
C – ENSAIOS DO CONCRETO	145
C.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	145
C.2 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	145
C.2 – MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades das fibras (<i>Bulletin</i> 14 FIB:2001)	8
Tabela 2.2 – Propriedades dos materiais compósitos (Xiong et al., 2004).....	26
Tabela 2.3 – Detalhes das vigas ensaiadas (Xiong et al., 2004).....	27
Tabela 2.4 – Resultados das vigas ensaiadas (Xiong et al., 2004)	27
Tabela 2.5 – Esquema de reforço das vigas (Hosny et al., 2006).....	29
Tabela 2.6 – Resultados das vigas ensaiadas (Lenwari e Thepchatri, 2009).....	33
Tabela 2.7 – Esquema de reforço das vigas (Sun Kim e Soo Shin, 2010)	36
Tabela 2.8 – Propriedades dos materiais compósitos (Sun Kim e Soo Shin, 2010).....	36
Tabela 2.9 – Propriedades do concreto (Araújo, 2002).....	40
Tabela 2.10 – Resultados teóricos da resistência à flexão das vigas (Araújo, 2002)	41
Tabela 2.11 – Características das vigas (Castro, 2004).....	42
Tabela 2.12 – Resultados experimentais dos ensaios (Castro, 2004).....	44
Tabela 2.13 – Distribuição do reforço das vigas (Sallaberry, 2005)	46
Tabela 2.14 – Propriedades do concreto (Sallaberry, 2005).....	47
Tabela 2.15 – Resultados da resistência à flexão das vigas (Sallaberry, 2005)	47
Tabela 2.16 – Valores teóricos e experimentais das vigas retangulares reforçadas a flexão (Gamino e Nogueira, 2006).....	51
Tabela 2.17 – Valores teóricos e experimentais das vigas “T” reforçadas a flexão (Gamino e Nogueira, 2006)	51
Tabela 2.18 – Valores teóricos e experimentais das vigas “T” reforçadas ao cisalhamento (Gamino e Nogueira, 2006).....	51
Tabela 2.19 – Propriedades mecânicas das fibras (Meneghetti, 2007)	53
Tabela 2.20 – Denominação das vigas do grupo IIB (Meneghetti, 2007).....	54
Tabela 2.21 – Cargas e modos de ruptura do grupo II.A (Meneghetti, 2007).....	55
Tabela 2.22 – Cargas e modos de ruptura do grupo II.B (Meneghetti, 2007).....	56
Tabela 3.1 – Características das Vigas	58
Tabela 3.2 – Cálculo preliminar à flexão	61
Tabela 3.3 – Verificação da resistência ao cisalhamento	62
Tabela 3.4 – Características dos materiais de reforço (dados do fabricante)	64
Tabela 3.5 – Resistência estimada à flexão pelo ACI 440.2R:2008	65
Tabela 3.6 – Resistência estimada à flexão pelo <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001	65

Tabela 3.7 – Nomenclatura dos extensômetros	66
Tabela 4.1 – Propriedades da armadura de aço	78
Tabela 4.2 – Características do concreto	79
Tabela 4.3 – Resultados Experimentais das vigas	79
Tabela 5.1 – Resultados da carga última e modo de ruptura das vigas	101
Tabela 5.2 – Deformação máxima da armadura de flexão no vão meio e cargas	103
Tabela 5.3 – Deformação máxima medida na armadura de flexão próxima aos apoios ...	105
Tabela 5.4 – Deformações máximas da armadura de cisalhamento	106
Tabela 5.5 – Deformações máximas do concreto	107
Tabela 5.6 – Deformações máximas do reforço	109
Tabela 5.7 – Deslocamentos verticais no meio do vão das vigas nas cargas de fissuração, de escoamento da armadura de flexão e na carga última	111
Tabela 5.8 – Deslocamentos verticais máximos - defletômetros LVDT02, LVDT06, LVDT03 e LVDT05	112
Tabela 5.9 – Comparação entre carga última experimental e carga teórica (ACI 440.2R:2008)	113
Tabela 5.10 – Comparação entre carga última experimental e carga teórica (<i>Bulletin</i> 14 FIB:2001)	114
Tabela 5.11 – Comparação entre os resultados experimentais e as normas	115
Tabela A.1 – Deformações da armadura de flexão da viga VR1 - RF	125
Tabela A.2 – Deformações da armadura de cisalhamento da viga VR1 - RF	126
Tabela A.3 – Deformações no concreto da viga VR1 - RF	126
Tabela A.4 – Deslocamentos verticais da viga VR1 - RF	127
Tabela A.5 – Deformações da armadura de flexão da viga VA1 - CC	128
Tabela A.6 - Deformação da armadura de cisalh. viga VA1 - CC	129
Tabela A.7 - Deformação no concreto da viga VA1 - CC	129
Tabela A.8 - Deformação no reforço de PRF viga VA1 - CC	129
Tabela A.9 – Deslocamentos verticais da viga VA1 – CC	130
Tabela A.10 – Deformações da armadura de flexão da viga VA2 – CV	131
Tabela A.11 - Deformação da armadura de cisalh. viga VA2 - CV	132
Tabela A.12 - Deformação no concreto da viga VA2 - CV	132
Tabela A.13 - Deformação no reforço de PRF viga VA2 - CV	132
Tabela A.14 – Deslocamentos verticais da viga VA2 – CV	133

Tabela A.15 – Deformações da armadura de flexão da viga VA3 – VV	134
Tabela A.16 - Deformação da armadura de cisalh. viga VA3 - VV.....	135
Tabela A.17 - Deformação no concreto da viga VA3 - VV	135
Tabela A.18 - Deformação no reforço de PRF viga VA3 - VV	135
Tabela A.19 – Deslocamentos verticais da viga VA3 – VV	136
Tabela A.20 – Deformações da armadura de flexão da viga VA4 – VC	137
Tabela A.21 - Deformação da armadura de cisalh. viga VA4 - VC.....	138
Tabela A.22 - Deformação no concreto da viga VA4 - VC	138
Tabela A.23 - Deformação no reforço de PRF viga VA4 - VC	138
Tabela A.24 – Deslocamentos verticais da viga VA4 – VC	139
Tabela B.1 – Dimensionamento à flexão da viga VR1 – RF segundo a norma ABNT NBR 6118:2007, com os dados fornecidos pelos fabricantes	140
Tabela B.2 – Dimensionamento à flexão da viga VR1 – RF segundo a norma ABNT NBR 6118:2007, com os resultados experimentais	140
Tabela B.3 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o ACI 440.2R:2, com os dados fornecidos pelos fabricantes	141
Tabela B.4 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o ACI 440.2R:2, com os resultados experimentais	142
Tabela B.5 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001, com os dados fornecidos pelos fabricantes	143
Tabela B. 6 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001, com os resultados experimentais	144
Tabela C.1 – Dados experimentais do ensaio de resistência à compressão	145
Tabela C.2 – Dados experimentais do ensaio de tração por compressão diametral	145
Tabela C.3 – Dados experimentais do ensaio de módulo de elasticidade	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação dos materiais compósitos (Callister, 2007).....	6
Figura 2.2 – Gráficos tensão-deformação das fibras (<i>Bulletin</i> 14 FIB:2001)	8
Figura 2.3 – Descolamento e delaminação de sistemas de PRF externamente colados (ACI 440.2R:2008, Fig. 10.1).....	12
Figura 2.4 – Deformação interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sobre flexão no estado limite último (modificado - ACI 440.2R:2008, Fig. 10.5).....	14
Figura 2.5 – Distribuição conceitual de tensões interfacial de cisalhamento e normais ao longo do comprimento de um laminado de PRF colado (ACI 440.2R:2008, Fig. 12.1).....	17
Figura 2.6 – Delaminação causada pela tensão de ruptura do cobrimento do concreto (ACI 440.2R:2008, Fig. 13.2).....	18
Figura 2.7 – Diferentes interfaces para a ruptura por aderência. (<i>Bulletin</i> 14 FIB:2001, Fig. 4-3)	20
Figura 2.8 – Diferentes modos de ruptura vigas CA. (<i>Bulletin</i> 14 FIB:2001, Fig. 4-9).....	22
Figura 2.9 – Análise da seção transversal para o estado limite último de flexão: (a) geometria, (b) distribuição de deformação e (c) distribuição de tensões. (<i>Bulletin</i> 14 FIB:2001, Fig. 4-11).....	23
Figura 2.10 – Dimensões em mm e detalhamento das vigas (Xiong et al., 2004)	26
Figura 2.11 – Curvas carga-deflexão das vigas (Xiong et al., 2004)	28
Figura 2.12 – Dimensões em mm e detalhamento das vigas T (Hosny et al., 2006)	29
Figura 2.13 – Detalhe de esquema de reforço das vigas (Hosny et al., 2006).....	30
Figura 2.14 – Esquema do ensaio (Hosny et al., 2006).....	31
Figura 2.15 – Dimensões em mm e detalhamento das vigas (Lenwari e Thepchatri, 2009)	32
Figura 2.16 – Delaminação do reforço (Lenwari e Thepchatri, 2009).....	33
Figura 2.17 – Gráficos carga-deflexão no vão meio: (a) viga CF-GF1 e (b) viga CF-GF2 (Lenwari e Thepchatri, 2009).....	34
Figura 2.18 – Detalhe de esquema de reforço das vigas (Sun Kim e Soo Shin, 2010).....	35
Figura 2.19 – Relações de carga-deflexão vigas não precarregadas: (a) reforçadas com duas camadas de PRFs (b) reforçadas com três camadas (Sun Kim e Soo Shin, 2010).....	37
Figura 2.20 – Relações de carga-deflexão vigas pré-carregadas: (a) VC amostras (b) CV amostras (Sun Kim e Soo Shin, 2010).....	37

Figura 2.21 – O modo de ruptura A (Sun Kim e Soo Shin, 2010)	38
Figura 2.22 – O modo de ruptura B (Sun Kim e Soo Shin, 2010)	38
Figura 2.23 – Detalhamento da armadura das vigas (Araújo, 2002).....	39
Figura 2.24 – Esquema de reforço das vigas (Araújo, 2002)	40
Figura 2.25 – Diagrama carga-flecha das vigas em todos os ciclos de carregamento (Araújo, 2002)	41
Figura 2.26 – Detalhe das dimensões e armadura das vigas da série I (Castro, 2004).....	43
Figura 2.27 – Detalhe das dimensões e armadura das vigas da série II (Castro, 2004)	43
Figura 2.28 – Gráficos carga- flecha das vigas VE 2.1 e VE 2.2 (Castro, 2004).....	45
Figura 2.29 – Detalhe das dimensões e armadura das vigas (Sallaberry, 2005)	46
Figura 2.30 – Diagramas carga- flecha das vigas ensaiadas (Sallaberry, 2005)	48
Figura 2.31 – Detalhe das vigas retangulares ensaiadas (Gamino e Nogueira, 2006)	49
Figura 2.32 – Detalhe das vigas “T” reforçadas a flexão (Gamino e Nogueira, 2006).....	50
Figura 2.33 – Detalhe das vigas “T” reforçadas ao cisalhamento (Gamino e Nogueira, 2006).....	50
Figura 2.34 – Fluxograma do programa experimental (Meneghetti, 2007)	52
Figura 2.35 – Detalhes e esquema de carregamento das vigas do grupo IIA (Meneghetti, 2007).....	53
Figura 2.36 – Detalhes e esquema de carregamento das vigas do grupo IIB (Meneghetti, 2007).....	54
Figura 2.37 – Diagrama carga-deslocamento para as vigas do grupo IIA ensaiadas estaticamente (Meneghetti, 2007).....	55
Figura 2.38 – Diagrama carga-deslocamento para as vigas do grupo IIB ensaiadas estaticamente (Meneghetti, 2007).....	56
Figura 3.1 – Seção transversal das vigas	59
Figura 3.2 – Esquema estático de carregamento	60
Figura 3.3 – Esquema de ensaio	60
Figura 3.4 – Diagramas de esforços das vigas.....	61
Figura 3.5 – Detalhamento da armadura das vigas.....	63
Figura 3.6 – Detalhamento das chapas de ancoragem.....	64
Figura 3.7 – Sistema de aquisição de dados (Spider8).....	66
Figura 3.8 – Localização dos extensômetros elétricos na armadura de flexão e de cisalhamento	67
Figura 3.9 – Processo de colagem dos Extensômetro no aço	68

Figura 3.10 – Localização dos extensômetros elétricos na superfície superior da viga.....	69
Figura 3.11 – Colagem do extensômetro elétrico no concreto	69
Figura 3.12 – Localização dos extensômetro elétrico na fibra	70
Figura 3.13 – Colagem do extensômetro elétrico na fibra	70
Figura 3.14 – Vista dos defletômetros	71
Figura 3.15 – Posicionamento dos defletômetros.....	71
Figura 3.16 – Detalhe das formas Figura 3.17 – Concretagem	72
Figura 3.18 – Ensaio de tronco de cone Figura 3.19 – Corpos de Prova	72
Figura 3.20 – Processo para aplicação do reforço	74
Figura 3.21 – Configuração de colagem da fibra viga VA1 - CC	75
Figura 3.22 – Configuração de colagem da fibra viga VA2 - CV.....	75
Figura 3.23 – Configuração de colagem da fibra viga VA3 - VV	75
Figura 3.24 – Configuração de colagem da fibra viga VA4 – VC	75
Figura 4.1 – Ensaio de caracterização do aço.....	76
Figura 4.2 – Diagrama tensão x deformação do aço de ϕ 6,3 mm	77
Figura 4.3 – Diagrama tensão x deformação do aço de ϕ 8,0 mm	77
Figura 4.4 – Diagrama tensão x deformação do aço de ϕ 20 mm	78
Figura 4.5 – Viga VR1 - RF após o ensaio.....	80
Figura 4.6 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VR1 - RF	80
Figura 4.7 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VR1 - RF .	81
Figura 4.8 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VR1 - RF	82
Figura 4.9 – Gráfico carga-deslocamento da viga VR1 - RF	82
Figura 4.10 – Evolução da fissuração na viga VR1 - RF	83
Figura 4.11 – Viga reforçada VA1 - CC após o ensaio.....	84
Figura 4.12 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA1 – CC	84
Figura 4.13 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA1 – CC	85
Figura 4.14 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA1 – CC.....	86
Figura 4.15 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA1 – CC	86
Figura 4.16 – Gráfico carga-deslocamento da viga VA1 – CC.....	87
Figura 4.17 – Evolução da fissuração na viga VA1 - CC	88
Figura 4.18 – Viga reforçada VA2 - CV após o ensaio.....	89
Figura 4.19 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA2 – CV	89

Figura 4.20 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA2 – CV	90
Figura 4.21 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA2 – CV.....	90
Figura 4.22 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA2 – CV	91
Figura 4.23 – Gráfico carga-deslocamento da viga VA2 – CV.....	91
Figura 4.24 – Evolução da fissuração na viga VA2 - CV	92
Figura 4.25 – Viga reforçada VA3 - VV após o ensaio	93
Figura 4.26 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA3 – VV.....	93
Figura 4.27 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA3 – VV	94
Figura 4.28 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA3 – VV	94
Figura 4.29 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA3 – VV	95
Figura 4.30 – Gráfico carga-deslocamento da viga VA3 – VV	95
Figura 4.31 – Evolução da fissuração na viga VA3 - VV	96
Figura 4.32 – Viga reforçada VA4 - VC após o ensaio.....	97
Figura 4.33 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA4 – VVC	97
Figura 4.34 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA4 – VC	98
Figura 4.35 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA4 – VC.....	98
Figura 4.36 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA4 – VC	99
Figura 4.37 – Gráfico carga-deslocamento da viga VA4 – VC.....	99
Figura 4.38 – Evolução da fissuração na viga VA4 – VC.....	100
Figura 5.1 – Acréscimo de resistência das vigas reforçadas	102
Figura 5.2 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 03	103
Figura 5.3 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 02	104
Figura 5.4 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 01	104
Figura 5.5 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 04	105
Figura 5.6 – Deformação na armadura de cisalhamento - extensômetros EAC - 01	106
Figura 5.7 – Deformação no concreto - extensômetros EC01 e EC02.....	107
Figura 5.8 – Deformação no reforço - extensômetros EFFC01	108
Figura 5.9 – Deformação no reforço - extensômetro EFFC02	108
Figura 5.10 – Deformação no reforço - extensômetro EFFC03	109
Figura 5.11 – Deslocamento vertical no meio do vão da viga - defletômetro LVDT04...	110
Figura 5.12 – Deslocamento vertical - defletômetros LVDT03 e LVDT05	110

Figura 5.13 – Deslocamento vertical - defletômetros LVDT02 e LVDT06	111
Figura 5.14 – Gráfico carga-força do PRF das vigas reforçadas.....	112
Figura 5.15 – Comparação dos resultados pela norma ACI 440.2R:2008	114
Figura 5.16 – Comparação dos resultados pela norma <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001	115
Figura 5.17 – Comparação dos resultados experimentais e as normas ACI 440.2R:2008 e <i>Bulletin</i> 14 FIB:2001	116

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

a - Comprimento do vão de corte

A_c - Área de concreto

ACI - American Concrete Institute

A_f - Área de reforço com FRP

A_s - Área da seção transversal da armadura tracionada

A'_s - Área da seção transversal da armadura comprimida

A_{sw} - Área da seção transversal da armadura de cisalhamento

b_f - Largura da mesa da viga T

b_w - Largura da alma da viga T

C - Força de compressão no concreto

CFRP - Polímeros reforçados com fibra de carbono

CSC - Colagem na superfície do concreto

d - Altura útil da viga

d_f - Distância do reforço até a borda mais comprimida

d'_s - Distância da armadura de compressão até a borda mais comprimida

E_c - Módulo de elasticidade do concreto

E_{ci} - Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto

E_f - Módulo de elasticidade do reforço de FRP

E_s - Módulo de elasticidade do aço

f_c - Resistência à compressão do concreto

f_{cd} - Resistência à compressão do concreto de cálculo

f_{ck} - Resistência característica à compressão do concreto

f_{ct} - Resistência à tração do concreto

f_{fe} - Resistência efetiva à tração do FRP

f_{fu} - Resistência última à tração do FRP

f_r - Tensão de fissuração

f_s - Tensão no aço

f_u - Tensão de ruptura do aço

f_y - Tensão de escoamento do aço

f_{yd} - Tensão de escoamento do aço de cálculo

f_{yw} - Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento

f_{ywd} - Tensão de escoamento de cálculo da armadura de cisalhamento
GFRP - Polímeros reforçados com fibra de vidro
h - Altura da viga
 h_f - Altura da mesa da viga
 k_m - Coeficiente que limita as tensões no reforço de FRP
 L_b - Comprimento de ancoragem
 l_{df} - Comprimento crítico de ancoragem do PRF
 M_a - Momento aplicado
 M_{cr} - Momento fletor de fissuração
 M_d - Momento fletor de cálculo
 M_n - Momento fletor nominal
 M_{Rd} - Momento resistente de projeto
 M_u - Momento fletor último
 M_y - Momento fletor de início do escoamento do aço
n - Número de camadas de PRF
N - Norte
 n_f - Razão entre o módulo de elasticidade do aço e do FRP
 n_s - Razão entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto
P - Carga aplicada
PRF - Polímeros reforçados com fibra
PRFC - Polímeros reforçados com fibra de carbono
PRFV - Polímeros reforçados com fibra de vidro
 $P_{u,exp}$ - Carga última experimental
 $P_{u,teor}$ - Carga última teórica
S - Sul
 t_f - Espessura de uma camada de FRP
 V_c - Parcela de esforço cortante resistida pelos mecanismos complementares ao de treliça pelo concreto
 V_s - Parcela de esforço cortante resistida pela armadura transversal
 V_u - Valor total do esforço cortante
x - Altura da linha neutra em relação à borda mais comprimida
 δ_u - Flecha última
 δ_{exp} - Flecha experimental

ε_{bi} - Deformação no substrato do concreto no momento da aplicação do reforço de PRF
 ε_c - Deformação no concreto
 ε_{ct} - Deformação no concreto na face tracionada
 ε_{cu} - Deformação última no concreto
 ε_s - Deformação na armadura de tração do aço
 ε_{sy} - Deformação do escoamento do aço
 ε'_s - Deformação na armadura de compressão do aço
 ε_t - Deformação no aço no estado limite último
 ε_y - Deformação de escoamento do aço
 ε_{yd} - Deformação de escoamento do aço de cálculo
 ε_{fd} - Deformação do reforço de cálculo
 ε_{fu} - Deformação última do reforço de PRF
 ε_{fe} - Deformação efetiva do reforço de PRF
 $\varepsilon_{fu,exp}$ - Deformação última do reforço de FRP experimental
 ρ - Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração
 ϕ - Fator de redução de resistência
 ψ_f - Fator de redução adicional à parcela do PRF do ACI 440

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto armado é o material estrutural mais utilizado no mundo sendo um dos materiais mais importantes na construção civil. Todas as estruturas de concreto armado têm uma vida útil estimada em função de sua finalidade e utilização, que se pode ampliar com manutenção preventiva.

No entanto, segundo Soares (2006) as estruturas também podem sofrer problemas como: a deterioração com o tempo, agentes agressivos por ações físicas e químicas, falhas no projeto e na execução, aumento das cargas inicialmente projetadas, mudanças na utilização da estrutura ou emprego de materiais de baixa qualidade. Estes problemas podem comprometer a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Pelo exposto, algumas vezes é necessário aumentar a capacidade de carga de uma estrutura, sendo indispensável o planejamento de um tipo de intervenção que dependerá do uso futuro da estrutura. Feito o estudo em função de sua atual condição estrutural e de sua utilização específica, a intervenção pode ser do tipo:

- **Reparo:** conjunto de ações visando à recuperação de funcionalidade e aparência ou o restabelecimento da capacidade resistente inicial da estrutura.
- **Reforço:** estabelecimento de capacidade resistente superior à inicial da estrutura.
- **Substituição:** demolição e reconstrução de elementos fortemente danificados.

Foram desenvolvidas várias técnicas no mercado para a reparação ou reforço de estruturas de concreto armado, entre elas podem ser citadas: ampliação da seção transversal com adição de aço e concreto através do encamisamento, adição de elementos extras, aplicação de protensão interna ou externa e colagem ou aparafusamento de chapas de aço na superfície do concreto.

Como alternativa ao uso de materiais tradicionais para o reforço de estruturas de concreto armado, surgiu a utilização de materiais com polímeros reforçados com fibras (PRF). Segundo Machado (2002), estes materiais começaram a ser usados no início dos anos 50

do século passado. O Japão foi um dos países que mais impulsionou o desenvolvimento desta técnica, procurando, através do reforço estrutural antecipado, garantir que importantes estruturas permanecessem utilizáveis em situações de emergência, após a ocorrência em 1995 do terremoto de Kobe.

Os materiais de polímeros reforçados com fibras (PRF) são constituídos por fibras que podem ser de: carbono (PRFC), vidro (PRFV) ou aramida (PRFA), e a matriz polimérica (resina ou poliéster), que protege e permite que os materiais funcionem como um só. Existem diferentes tipos de materiais compósitos como barras, cabos, telas e laminados. Esses materiais são utilizados para reforço à flexão, à compressão ou ao cisalhamento de vigas, pilares, lajes e paredes.

A técnica de colagem de polímeros reforçados com fibras na superfície do concreto apresenta muitas vantagens em comparação com as técnicas tradicionais. Os PRF têm uma elevada relação resistência-peso e durabilidade excelente em ambientes agressivos; são termicamente estáveis e são particularmente adequados para estruturas em que o peso é uma variável importante no processo de projeto. Além disso, eles podem exceder as propriedades de resistência última e rigidez do aço. O seu coeficiente de expansão é compatível com o concreto. A sua instalação é simples, menos complexa e destrutiva comparada com o reforço de aço.

1.2 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Nas últimas décadas muitas pesquisas sobre o comportamento da técnica de reforço de estruturas de concreto armado submetidas à flexão através da colagem de polímeros reforçados com fibras na superfície do concreto, foram desenvolvidas com sucesso no mundo e no Brasil. No entanto, a maioria das pesquisas tem sido destinada a estudar o reforço com os materiais isoladamente, sobretudo com a fibra de carbono. Este material tem um módulo de elasticidade maior que a fibra de vidro, o que pode influenciar no desempenho da resistência e da ductilidade do elemento estrutural. É por isso que a principal motivação desta dissertação é estudar o comportamento do reforço híbrido com fibra de carbono e fibra de vidro, e deste modo, ampliar as pesquisas sobre esta técnica de reforço à flexão no Brasil.

Além disso, um fator determinante na importância deste estudo é o custo. Apesar de as fibras de carbono ter o custo superior, elas têm sido as mais utilizadas para o reforço de estruturas. Isso é atribuído ao fato de que elas têm durabilidade elevada, alto módulo de elasticidade e alta resistência. As fibras de vidro também têm sido muito utilizadas, embora a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade sejam menores (apenas um terço até um quinto do módulo do aço). Por isso esta variável torna-se importante para projetos de reforço, porque o custo da fibra de vidro é de aproximadamente 5 a 10% do custo da fibra de carbono.

1.3 - OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 - Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar e avaliar o comportamento estrutural do reforço híbrido à flexão de vigas em concreto armado com seção transversal “T” com a técnica de materiais compósitos colados externamente na superfície do concreto, submetidas a carregamentos estáticos até a ruptura.

1.3.2 – Objetivos Específicos

- Analisar o desempenho do reforço híbrido à flexão com materiais compósitos de fibra de carbono e fibra de vidro colados externamente ao concreto em vigas de seção transversal “T”.
- Estudar o tipo de ruptura apresentado pelas vigas de concreto armado reforçadas.
- Estudar a influência, no comportamento das vigas reforçadas, da sequência de colagem das fibras de carbono (PRFC) e de vidro (PRFV) na superfície de concreto.
- Comparar os dados encontrados experimentalmente das vigas com as diferentes normas.

1.4 – METODOLOGIA

Esta pesquisa de mestrado foi desenvolvida paralelamente à pesquisa de doutorado do Eng. Juliano Rodrigues da Silva em cuja tese, os resultados desta pesquisa serão incorporados. Após a revisão bibliográfica foram planejados cinco ensaios de vigas de seção transversal

“T” de concreto armado. As vigas foram moldadas e ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília.

As cinco vigas ensaiadas têm as seguintes características: uma sem reforço que serve como referência, uma reforçada com duas camadas de fibra de carbono, uma reforçada com uma camada de fibra de carbono e uma camada de fibra de vidro, uma reforçada com duas camadas de fibra de vidro e finalmente uma reforçada com uma camada de fibra de vidro e uma camada de fibra de carbono. Todas as vigas têm as mesmas dimensões e taxa de armadura ($\rho = 0,63\%$). O ensaio mecânico foi realizado nas vigas sob flexão de quatro pontos.

Os resultados experimentais são estudados e analisados, pelos seguintes aspectos: carga última, tipo de ruptura, fissuração, deformação da armadura, deformação do concreto, deformação do material compósito e verificação do deslocamento vertical. Os dados experimentais são comparados com os dados estimados segundo as normas: ACI 440.2R:2008, *Bulletin* 14 FIB:2001 e ABNT NBR 6118:2007.

1.5 – ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, seguidos das referências bibliográficas e apêndices.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica que mostra primeiro uma visão geral dos polímeros reforçados com fibras (PRF), após uma descrição da técnica de reforço utilizada na pesquisa, além de uma revisão da metodologia de cálculo proposta pelas normas internacionais. Finalmente, são mostrados alguns trabalhos internacionais e nacionais referentes ao reforço híbrido.

No capítulo 3 descreve-se o programa experimental desenvolvido no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília como o detalhamento das vigas, instrumentação utilizada nos ensaios, descrição da técnica de reforço e o processo executivo.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios dos materiais utilizados na pesquisa, da viga de referência e das vigas reforçadas.

No capítulo 5 é feita uma análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais e apresenta-se uma comparação entre os resultados experimentais obtidos e os estimados pelas normas ACI 440.2R:2008, *Bulletin* 14 FIB:2001 e ABNT NBR 6118:2007.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – PRELIMINARES

Neste capítulo apresenta-se primeiro a caracterização dos materiais que compõem os polímeros reforçados com fibras (PRF). Em seguida descreve-se a técnica de reforço por colagem externa de polímeros reforçados com fibras na superfície do elemento estrutural. Além disso, são apresentadas as recomendações de algumas normas sobre reforço à flexão de vigas de concreto armado usando polímeros reforçados com fibras (PRF): o código ACI 440-2R:2008 e o *Bulletin* 14 FIB:2001. Finalmente, apresentam-se as diferentes pesquisas experimentais e numéricas sobre o reforço híbrido à flexão de vigas de concreto armado realizadas no exterior e no Brasil.

2.2 – REFORÇO COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA

O material compósito pode ser definido como uma combinação de materiais compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço ou modificador), exibindo uma significativa proporção de propriedades de ambas as fases constituintes de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é realizada. As propriedades dos materiais compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. A classificação destes materiais pode-se observar na Figura 2.1.

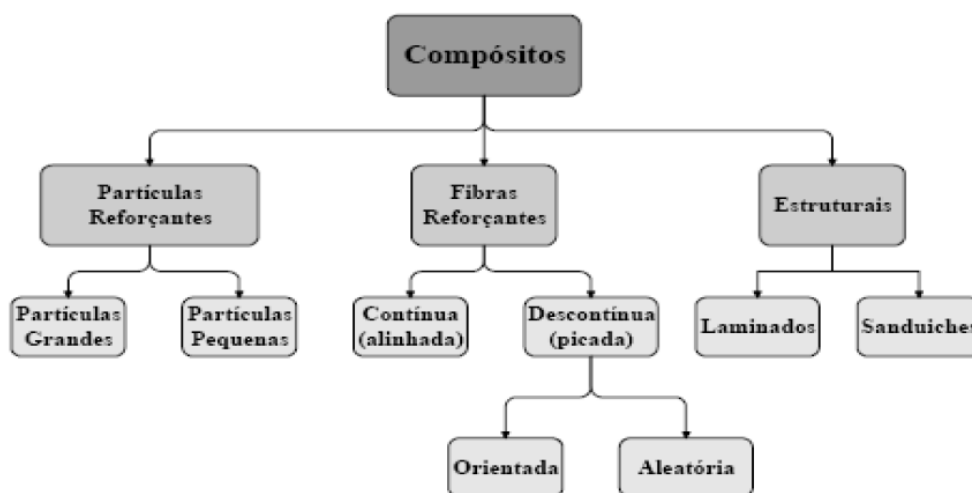


Figura 2.1 – Classificação dos materiais compósitos (Callister, 2007)

2.2.1 – Polímeros reforçados com fibra (PRF)

São os materiais compósitos mais importantes, porque são fabricados para ter alta resistência e rigidez com uma baixa densidade. Os compósitos reforçados com fibra são subclassificados pelo comprimento da fibra que podem ser contínuas ou descontínuas. Segundo Levy Neto e Pardini (2006), os diferentes tipos de compósitos apresentam características bem diversas entre si. As diferentes aplicações dependem de vários fatores, tais como desempenho estrutural, preço, disponibilidade das matérias-primas e cadência do processo de fabricação, entre outros parâmetros. Adiante, são descritos os componentes dos materiais compósitos reforçados com fibras (PRF).

2.2.1.1 – Fase Dispersa (reforço ou modificador)

O material de reforço dos compósitos são as fibras, responsáveis pela resistência e rigidez do compósito, por sua alta relação comprimento-diâmetro e à reduzida quantidade de defeitos. Elas podem ser produzidas de forma contínua ou descontínua. Neste estudo, as fibras contínuas são usadas, pois são mais apropriadas ao reforço de estruturas, devido a sua excelente capacidade de transferência de carga, sua alta resistência à tração e ao melhor aproveitamento de suas propriedades.

Segundo Callister (2007) as fibras são classificadas dependendo de seu diâmetro e características em: filamentos (*whiskers*), fibras e fios. Os filamentos são monocristais muito finos (grande relação comprimento-diâmetro) com um alto grau de perfeição cristalina e são virtualmente isentos de defeitos. Por isso, têm elevadas resistências mecânicas. Não obstante são pouco utilizados, pois tem valor elevado. As fibras são policristalinas ou amorfas e têm pequenos diâmetros. Geralmente são poliméricas ou cerâmicas (aramida, vidro, carbono, boro e óxido de alumínio). Os fios têm diâmetros relativamente grandes; materiais típicos que se empregam são aço, molibdênio e tungstênio.

As fibras mais utilizadas no sistema de reforço de estruturas de concreto com polímeros reforçados com fibras (PRF) são: as fibras de carbono, as fibras de vidro e as fibras de aramida. Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais propriedades de tração e na Figura 2.2 se ilustra uma comparação dos gráficos de tensão deformação de diferentes tipos de fibras.

Tabela 2.1 – Propriedades das fibras (*Bulletin 14 FIB:2001*)

Tipo de Fibra		Resistência a Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação Específica Última (%)
Carbono	Alta resistência	3.500-4.800	215-235	1,4-2,0
	Ultra-alta resistência	3.500-6.000	215-235	1,5-2,3
	Alto módulo de elasticidade	2.500-3.100	350-500	0,5-0,9
	Ultra-alto módulo de elasticidade	2.100-2.400	500-700	0,2-0,4
Aramida	Com módulo de elasticidade intermédio (IM)	3.500-4.100	70-80	4,3-5,0
	Com alto módulo de elasticidade (HM)	3.500-4.000	115-130	2,5-3,5
Vidro	Aluminoborosilicato de cálcio (E)	1.900-3.000	70	3,0-4,5
	Aluminosilicato de magnésio (S)	3.500-4.800	85-90	4,5-5,5

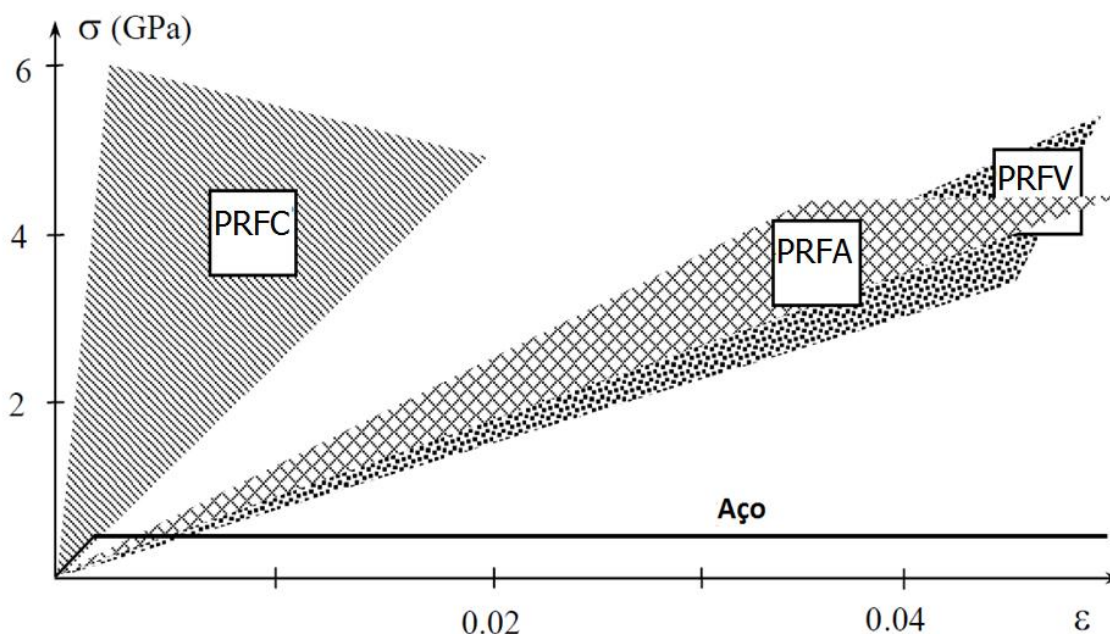


Figura 2.2 – Gráficos tensão-deformação das fibras (*Bulletin 14 FIB:2001*)

Como se pode observar na tabela 2.1, as fibras de carbono têm um alto módulo de elasticidade e uma alta resistência à tração comparadas com o aço. Além disso, elas têm uma durabilidade elevada. Por tal motivo elas são muito utilizadas para o reforço de estruturas de concreto armado. As fibras de vidro e aramida também são muito usadas, embora elas tenham menor tensão de ruptura e módulo de elasticidade baixo.

2.2.1.2 – Fase Dispersa (Matriz)

A matriz ou resina desempenha varias funções. Primeiro ela liga as fibras entre si e atua como o meio pelo qual uma tensão externamente aplicada é transmitida e distribuída entre as fibras; apenas uma pequena fração de uma carga aplicada é resistida pela fase matriz. A segunda função da matriz é proteger as fibras da deterioração superficial que pode resultar da abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente. Tais interações podem introduzir falhas (defeitos) superficiais capazes de formar fissuras que podem conduzir à falha a baixos níveis de tensão de tração. Finalmente, quando o polímero é submetido a carregamento a matriz se separa das fibras e previne a propagação de fissuras frágeis de uma fibra à outra, que poderia resultar numa falha catastrófica; ou seja, que serve como uma barreira que evita a propagação de fissuras.

Atualmente, as resinas são classificadas em resinas termoplásticas ou em resinas termoendurecíveis. Com as resinas termoendurecíveis o compósito é curado pela ação de calor ou de tratamento químico e se transforma num produto substancialmente infusível e insolúvel, diferentemente de um compósito termoplástico que pode se tornar, repetidamente, num produto plástico quando aquecido e num produto rígido quando arrefecido.

Devido às funções da matriz descritas anteriormente, as resinas termoendurecíveis do tipo epoxídico, no caso dos sistemas de PRF, são as mais utilizadas na técnica de reforço por colagem. Além disso, elas têm uma excelente aderência junto à fibra e pequena contração durante o processo de cura.

2.2.2 – Reforço com PRF colados na superfície do concreto

Segundo o *Bulletin* 14 FIB:2001, as razões pelas quais os materiais compósitos são cada vez mais utilizados como materiais de reforço de elementos de concreto armado podem ser resumidas como se segue:

- Imunidade à corrosão.

- Baixo peso (cerca de $\frac{1}{4}$ do aço), resultando em mais fácil aplicação no espaço confinado, com a eliminação da necessidade de andaimes e redução de custos de trabalho.
- Resistência à tração muito elevada.
- Rigidez que pode ser adaptada às exigências do projeto.
- Grande capacidade de deformação
- Disponibilidade praticamente ilimitada de PRF em tamanho, geometria e dimensões.

Esse sistema é usado para elementos de concreto armado em: reabilitação ou recuperação da resistência de uma estrutura, reforço estrutural ou melhoramento para correção de anomalias ou incremento de cargas e implementação de resistência à ação sísmica. Essas características podem ser alcançadas com a intervenção na resistência à flexão, ao cisalhamento, à compressão ou à tração dos elementos, além da ductilidade.

Existem diferentes sistemas de PRF colados externamente. Eles estão relacionados com os materiais constituintes e com a forma e técnica do reforço de PRF. Em geral, estes podem ser subdivididos em "curados *in-situ*" e sistemas de "pré-fabricados". A técnica para a utilização de ambos os reforços envolve a aplicação manual por meio de colagem com adesivo e curado a frio. As recomendações para a execução feitas pelo fabricante são:

- Preparo da superfície: o concreto deve estar totalmente curado, isento de partículas soltas, sem contaminação de óleos, agentes desmoldantes ou cura química e totalmente seco. A limpeza do substrato deve ser com meios mecânicos ou por jato de areia, até se obter a total eliminação de impurezas ou contaminações superficiais.
- Distribuição uniforme do imprimador (*MBrace Primer*) sobre toda a superfície com a ajuda de uma trincha ou de um rolo, garantindo uma impregnação completa da porosidade e dos ocos do suporte, para estabelecer uma ponte de aderência entre o substrato de concreto e sistema compósito.
- Aplicação uniforme da argamassa epoxídica (*MBrace Putty*) na superfície devidamente preparada, utilizando desempenadeira para nivelar a superfície. Com a finalidade de corrigir imperfeições no substrato do concreto.

- Distribuição uniforme da primeira camada de resina saturante (*MBrace Saturant*). Sobre toda a superfície do concreto, com a ajuda de uma trincha ou de um rolo para iniciar a saturação das fibras.
- Colocação da primeira camada de tecido de fibra sobre a resina saturante aplicada ainda fresca, pressionando com um rolo de ranhuras metálicas. Até conseguir uma impregnação perfeita da fibra com o conjunto.
- Aplicação uniforme da segunda camada de resina saturante (*MBrace Saturant*) sobre toda a superfície da fibra com a ajuda de uma trincha ou de um rolo.

2.3 - PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

2.3.1 - ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally bonded PRF Systems for Strengthening Concrete Structures

As recomendações apresentadas baseiam-se nos princípios tradicionais de projeto do concreto armado estabelecidas nos requisitos da Norma ACI 318:2008 e o conhecimento do comportamento mecânico específico de reforço PRF. Estas recomendações de projeto são baseadas nos princípios dos estados limites, que definem níveis aceitáveis de segurança para a ocorrência dos estados limites de utilização (deflexões excessivas e fissuras) e dos estados limites último (falha, ruptura e fadiga). Ao avaliar a resistência nominal de um membro, os possíveis modos de ruptura e posteriores deformações e tensões em cada material devem ser avaliados.

Para o dimensionamento do reforço à flexão, o momento resistente minorado do elemento deve exceder o momento solicitado requerido ($\phi Mn \geq Mu$). Além disso, um fator de redução adicional de força para PRF, ψ_f , deve ser aplicado para a contribuição à flexão do reforço PRF sozinho. A resistência nominal de flexão de elementos de concreto reforçados com PRF pode ser determinada com base na compatibilidade de deformação, o equilíbrio das forças internas, e o controle do modo de ruptura.

Nos subtítulos a seguir estão indicados os itens correspondentes da norma.

2.3.1.1 - Modos de ruptura de elementos reforçados com PRF (item 10.1.1)

A resistência à flexão de uma seção depende do controle do modo de ruptura. Os seguintes modos de ruptura de flexão devem ser investigados para uma seção reforçada com PRF:

- Esmagamento do concreto à compressão antes do escoamento da armadura interna.
- Escoamento do aço em tração, seguido pela ruptura do laminado PRF.
- Escoamento do aço em tração, seguido pelo esmagamento do concreto.
- Delaminação por cisalhamento / tração da camada de concreto (delaminação do cobrimento).
- Descolamento do PRF a partir do substrato de concreto (descolamento do PRF).

A delaminação do cobrimento ou o descolamento do PRF pode ocorrer se a força no PRF não pode ser resistida pelo substrato, como é mostrado na Figura 2.3. Este comportamento é geralmente referido como descolamento, independentemente de onde o plano de ruptura se propaga no interior da região de PRF-adesivo-substrato.

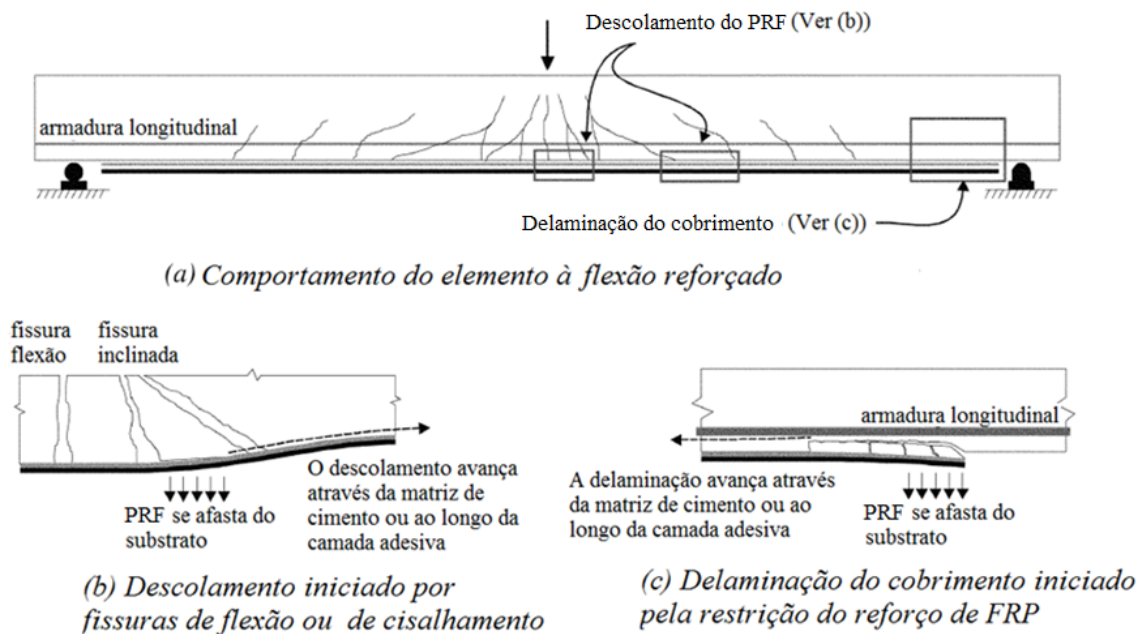


Figura 2.3 – Descolamento e delaminação de sistemas de PRF externamente colados (ACI 440.2R:2008, Fig. 10.1)

A confiabilidade da contribuição do PRF para a resistência à flexão é dirigida através da incorporação de um fator de redução de resistência adicional para o PRF ψ_f , além do fator de redução da resistência ϕ da norma ACI 318:2008 para o concreto estrutural.

2.3.1.2 - Peças de concreto armado (item 10.2)

Esta seção apresenta orientações sobre o cálculo do efeito do reforço à flexão pela adição de reforço do PRF longitudinal para a face em tração de uma peça de concreto armado. As seguintes hipóteses são feitas no cálculo da resistência à flexão de uma seção reforçada com o sistema de PRF colado externamente:

- Os cálculos de projeto são baseados nas dimensões, posicionamento interno do aço e propriedades dos materiais da peça a ser reforçada.
- As deformações na armadura e no concreto são diretamente proporcionais à distância do eixo neutro. Ou seja, uma seção plana antes do carregamento permanece plana após o carregamento.
- Perfeita aderência entre o PRF e o concreto; não há deslizamento relativo entre o reforço externo de PRF e o concreto.
- A deformação de corte na camada adesiva é desprezada porque a camada de adesivo é muito fina, com pequenas variações na sua espessura.
- A deformação de compressão máxima utilizável no concreto é 0,003.
- A resistência à tração do concreto é desprezada.
- O reforço de PRF tem uma relação tensão-deformação elástico linear até a ruptura.

a) Fator de redução da resistência

O uso de reforço PRF colado externamente para reforço à flexão vai reduzir a ductilidade da peça original. Para manter um grau suficiente de ductilidade, o nível de deformação no aço no estado limite último deve ser verificado. Uma ductilidade adequada é alcançada se a deformação no aço no ponto de esmagamento do concreto ou a ruptura do PRF, incluindo delaminação ou descolamento, é de pelo menos 0,005, de acordo com a definição de uma seção com tensão controlada conforme indicado na norma ACI 318:2008. Um fator de redução da força dada pela Equação 2.1 deve ser usado.

$$\Phi = \begin{cases} 0.90 & \text{para } \varepsilon_t \geq \varepsilon_{sy} \\ 0.65 + \frac{0.25 (\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (2.1)$$

onde:

ε_t - deformação no aço no estado limite último;

ε_{sy} - deformação do escoamento do aço.

2.3.2.1 - Resistência última de uma seção retangular reforçada (item 10.2.10)

O procedimento de cálculo utilizado para chegar à resistência final deve satisfazer compatibilidade de deformações e o equilíbrio das forças, além disso, deve considerar o modo de ruptura a governar. A Figura 2.4 ilustra a deformação interna e a distribuição de tensões para uma seção retangular submetida à flexão no estado limite último.

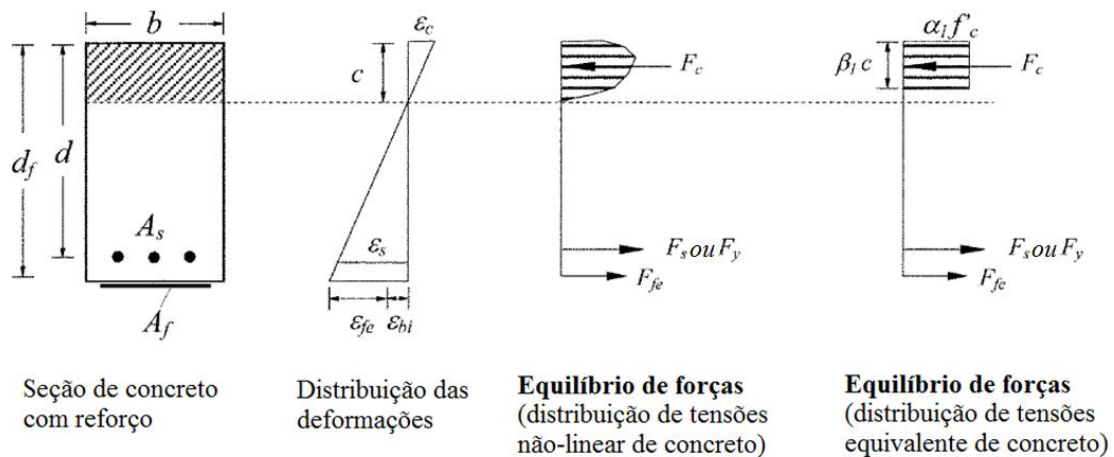


Figura 2.4 – Deformação interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sobre flexão no estado limite último (modificado - ACI 440.2R:2008, Fig. 10.5)

O procedimento de cálculo descrito a seguir ilustra um método de tentativa e erro. Primeiro é assumida uma profundidade do eixo neutro c , calculando-se a deformação em cada material usando a compatibilidade de deformações; e a verificação do equilíbrio das forças internas. Se as resultantes das forças internas não equilibram, a profundidade em relação ao eixo neutro deve ser revista e o procedimento repetido.

Para qualquer profundidade assumida do eixo neutro c , o nível de deformação no reforço de PRF (ε_{fe}) pode ser calculado a partir da Equação 2.2. Esta equação considera o modo de ruptura que governa a profundidade do eixo neutro assumida.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2.2)$$

onde:

ε_{cu} - deformação última do concreto;

ε_{bi} - deformação no substrato do concreto no momento da aplicação do reforço de PRF;

Para evitar que o deslocamento seja o modo de ruptura governante, a deformação efetiva no reforço de PRF deve ser limitada através de ε_{fd} , ela se pode calcular com a equação 2.3.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu}, \quad \text{no SI de unidades} \quad (2.3)$$

onde:

f'_c - resistência específica à compressão do concreto;

n - número de camadas do reforço de PRF (MPa);

E_f - módulo de elasticidade do PRF (MPa);

t_f - espessura nominal de uma camada do reforço de PRF (mm);

ε_{fu} - deformação de ruptura do reforço de PRF.

O nível de tensão efetiva no reforço de PRF (f_{fe}) pode ser determinado a partir do nível de deformação no PRF (ε_{fe}), assumindo um comportamento perfeitamente elástico e usando a Equação 2.4.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2.4)$$

Com base no nível de deformação no reforço de PRF, o nível de deformação na armadura (ε_s) pode ser encontrado a partir da Equação 2.5 usando a compatibilidade de deformações.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (2.5)$$

A tensão no aço (f_s) é determinada a partir do nível da deformação na armadura usando a sua curva de tensão-deformação (Equação 2.6).

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.6)$$

onde:

E_s - módulo de elasticidade do aço;

ε_s - deformação no aço;

f_y - tensão de escoamento do aço.

Com o nível de deformação e tensão no reforço de PRF e aço determinados para a profundidade do eixo neutro assumido (c), o equilíbrio de forças internas pode ser verificado usando a Equação 2.7.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (2.7)$$

onde:

A_s - área da armadura de tração;

A_f - área do reforço de PRF.

Os termos α_1 e β_1 na Equação 2.7 são parâmetros que definem o bloco retangular de tensão no concreto equivalente para a distribuição não-linear das tensões. Os valores calculados e assumidos para c são então comparados. Se eles concordarem, então o valor adequado de c é atingido. Se os valores calculados e assumidos não concordar, outro valor para c será selecionado, e o processo é repetido até que a convergência seja atingida.

Finalmente, a resistência nominal de flexão da seção reforçada com PRF externamente é calculada a partir da Equação 2.8. Um fator de redução adicional para PRF, ψ_f , é aplicado à contribuição da resistência à flexão do reforço de PRF. O valor recomendado de ψ_f é de 0,85. Este fator de redução baseia-se num análise de confiabilidade, que foi fundamentado nas propriedades experimentalmente calibradas e estatísticas da resistência à flexão.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.8)$$

2.3.1.4 - Aderência e delaminação (item 13.1)

A distribuição real de tensão de aderência em um laminado de PRF torna-se complexa pela fissuração do concreto do substrato. A distribuição das tensões interfaciais de cisalhamento e das tensões normais de tração (perpendiculares ao plano do reforço), desenvolvidas ao longo da interface de um laminado de PRF colado ao concreto sem fissuração é mostrada na Figura 2.5.

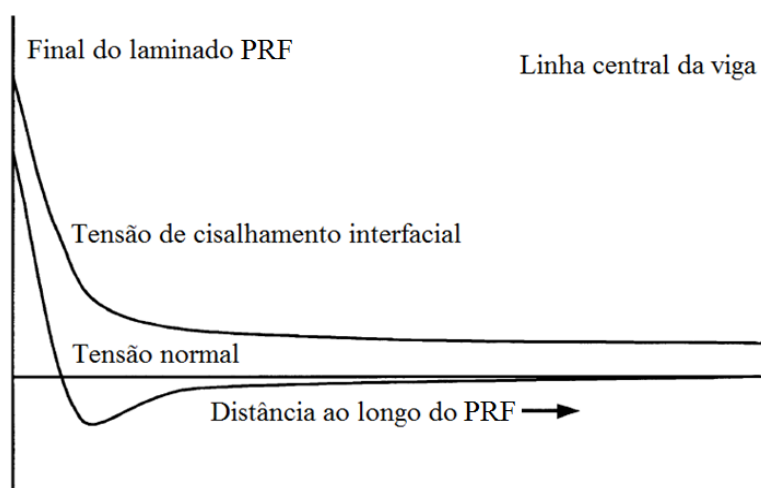


Figura 2.5 – Distribuição conceitual de tensões interfaciais de cisalhamento e normais ao longo do comprimento de um laminado de PRF colado (ACI 440.2R:2008, Fig. 12.1)

O ponto fraco na interface concreto / PRF é o concreto. A solidez e resistência à tração do substrato de concreto irá limitar a eficácia global do sistema de PRF colado externamente.

- Descolamento do PRF

Em peças de concreto armado com vãos de cisalhamento relativamente longos, ou quando a delaminação do cobrimento foi efetivamente mitigada, o descolamento pode se iniciar com fissuras de flexão, fissuras de flexão / cisalhamento, ou ambas, próximas da região de momento máximo. Sob carga, estas fissuras abrem e induzem tensões de cisalhamento interfaciais elevadas que fazem com que o descolamento do PRF se propague em todo o vão de cisalhamento na direção decrescente de momento. Tipicamente, esta ruptura não envolve o agregado do concreto, progredindo-se através da camada de argamassa que compreende a superfície da viga de concreto. Ancoragens mecânicas podem ser eficazes para o aumento da transferência de tensões.

- Delaminação do cobrimento

O processo de delaminação pode ocorrer a partir das tensões normais interfaciais desenvolvidas nas extremidades do reforço do PRF externamente colado. Com este tipo de delaminação, o aço existente de armadura interna atua essencialmente como um separador de ligação num plano horizontal e o cobrimento do concreto se afasta do resto da viga, como mostra a Figura 2.6.

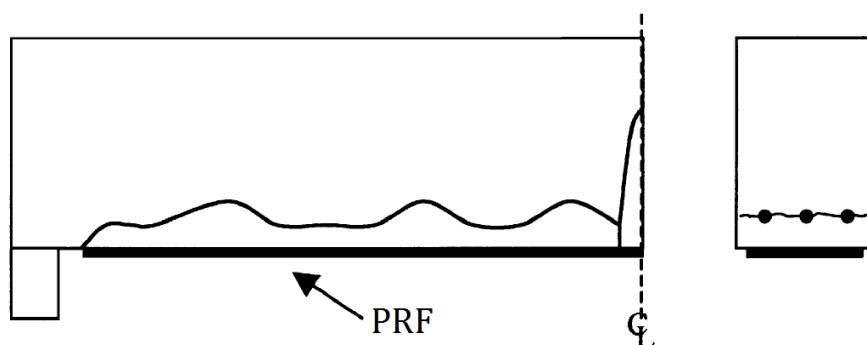


Figura 2.6 – Delaminação causada pela tensão de ruptura do cobrimento do concreto (ACI 440.2R:2008, Fig. 13.2)

O modo de ruptura de separação por tração do cobrimento do concreto é controlado, em parte, pelo nível de tensão no ponto de terminação do PRF. Em geral, pode ser mitigado pelo uso de ancoragem (gravatas transversais de PRF), minimizando a tensão ao localizar o ponto do corte do PRF tão perto da região de momento nulo quanto possível, ou por ambos.

Para prevenir os modos de ruptura prematuros deve-se instalar ancoragem transversal de PRF em forma de U nas extremidades do reforço. A largura da ancoragem pode ser calculada com a Equação 2.9.

$$A_{f,anchor} = \frac{(A_f f_{fu})_{longitudinal}}{(E_f k_v \varepsilon_{fu})_{anchor}} \quad (2.9)$$

onde:

k_v - coeficiente de redução de colagem

- Comprimento mínimo de ancoragem

A capacidade de ligação do PRF é desenvolvida ao longo de um comprimento crítico l_{df} . Para desenvolver a tensão efetiva do PRF em uma seção, o comprimento de ancoragem disponível de PRF deve exceder o valor dado pela Equação 2.10.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad \text{SI de unidades} \quad (2.10)$$

2.3.2 - *Bulletin 14 FIB-01 Externally bonded PRF reinforcement for RC structures*

O projeto do reforço colado externamente com PRF (CEC) tem de refletir os efeitos de reforço adicional fornecido para a seção (assumindo ação compósita completa) e a capacidade de transferência de forças por meio da interface de ligação (verificação da descolagem). O procedimento de projeto deve consistir de uma verificação tanto do estado limite de serviço (ELS) como do estado limite último (ELU). Em ELU, os diferentes modos de ruptura que podem ocorrer têm de ser considerados.

A análise para o estado limite último de elementos estruturais submetidos à flexão pode seguir procedimentos bem estabelecidos para estruturas de concreto armado, desde que: (a) a contribuição do reforço de PRF externo seja levada em conta adequadamente, e (b) uma atenção especial seja dada a questão da ligação entre o concreto e o PRF. A análise deve ser feita a partir do estado limite último da resistência dos elementos de concreto reforçado em flexão e a identificação de todos os modos possíveis de ruptura. O efeito da carga inicial antes do reforço deve ser considerado no cálculo do reforço do elemento.

2.3.2.1 - Modos de ruptura - ELU (item 4.3)

Os modos de ruptura de um elemento de concreto reforçado à flexão com PRF ligado externamente pode ser dividida em duas classes: (a) aqueles em que a ação composta completa entre o concreto e o PRF é mantida até que o concreto atingia o esmagamento em compressão ou o PRF rompe em tensão (modos de ruptura “clássica”) e (b) aqueles em que a ação composta é perdida antes do tipo de ruptura (a) do PRF.

a) Ação composta completa

- Aço escoando seguido do esmagamento do concreto: a resistência à flexão pode ser alcançada com o escoamento da armadura de aço à tração seguido do esmagamento do concreto na zona de compressão, enquanto o PRF está intacto.
- Aço escoando seguido por ruptura do PRF: para quantias relativamente baixas de aço e PRF, a ruptura à flexão pode ocorrer com o escoamento da armadura de aço à tração seguido pela ruptura à tração do PRF.
- Esmagamento do concreto: para quantias de reforço relativamente elevadas, a ruptura do elemento de concreto armado (CA) pode ser causada pelo esmagamento do concreto antes do escoamento do aço. Este modo é frágil e, certamente, indesejável. O PRF neste caso tem pouco efeito, e os meios de aumentar a capacidade de compressão do concreto devem ser considerados.

b) Perda de ação composta: modos de ruptura por descolamento e aderência

A ruptura por aderência no caso de CEC implica a perda completa de ação composta entre o concreto e do reforço PRF, e ocorre na interface entre o CEC e o substrato de concreto. Quando se propagam descolamentos localizados, e a ação composta é perdida de tal maneira que o reforço de PRF não é capaz de suportar mais cargas. Esta ruptura é chamada descolamento. Rupturas de adesão podem ocorrer em diferentes interfaces entre o concreto e o reforço PRF, como mostra a Figura 2.7.

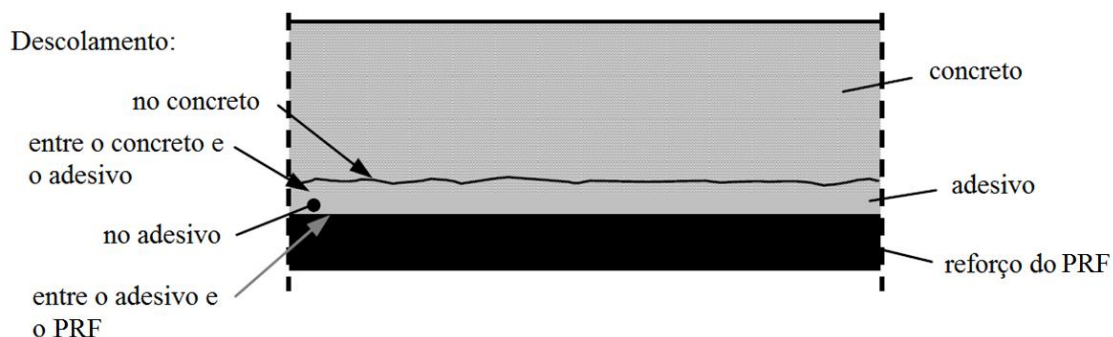


Figura 2.7 – Diferentes interfaces para a ruptura por aderência. (*Bulletin* 14 FIB:2001, Fig. 4-3)

- Descolamento no concreto perto da superfície ou ao longo de uma camada enfraquecida do mesmo, por exemplo, ao longo da linha da armadura de aço incorporado.
- Descolamento no adesivo (ruptura de coesão): pode ocorrer só se a resistência do adesivo desce abaixo daquela do concreto (por exemplo, a temperaturas elevadas ou quando a resistência de concreto é excepcionalmente alta).
- Descolamento nas interfaces entre o adesivo e o concreto ou o adesivo e o PRF (ruptura de adesão): só ocorrerá se houver preparação da superfície insuficiente durante o processo de aplicação do PRF, porque a resistência de coesão das resinas epóxi é menor do que a resistência de adesão.
- Descolagem no interior do PRF (ruptura de cisalhamento interlaminar): pode ser explicado pela mecânica da fratura, que ocorrerá uma vez que a propagação de fissuras no PRF é energeticamente mais conveniente do que no concreto. Este pode ser o caso com concretos de alta resistência.

c) Comportamento de membros de concreto armado reforçados com PRF

A maioria das rupturas observadas em testes de membros CA de flexão com CEC são causadas por descolamento do elemento de reforço colado externamente CEC. Dependendo do ponto de partida do processo de descolamento, os modos de ruptura seguintes podem ser identificados e são apresentados na Figura 2.8:

- Modo 1: descolamento em uma zona de ancoragem sem fissuração.
- Modo 2: descolamento causado por fissuras de flexão.
- Modo 3: descolamento causado por fissuras de cisalhamento.
- Modo 4: descolamento causado pela irregularidade da superfície de concreto.

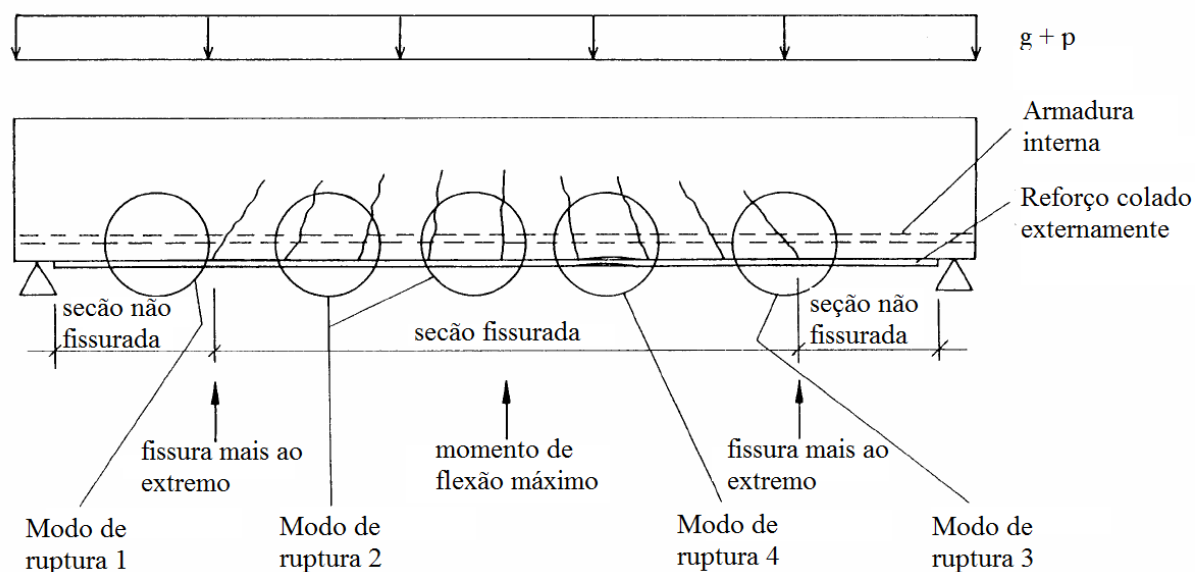


Figura 2.8 – Diferentes modos de ruptura vigas CA. (*Bulletin 14 FIB:2001, Fig. 4-9*)

2.3.2.2 - Análise do estado limite último – ELU (item 4.4)

a) Aço escoando seguido do esmagamento de concreto

O momento último de flexão de projeto da seção transversal reforçada é calculado com base em princípios de projeto de viga de CA, ver Figura 2.8. Em primeiro lugar, a profundidade do eixo neutro, x , é calculada a partir de compatibilidade de deformações e o equilíbrio de forças internas com a Equação 2.11:

$$0.85 \Psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_{fu} \varepsilon_f \quad (2.11)$$

onde:

$\Psi = 0.8$;

f_{cd} - resistência à compressão do concreto de projeto;

A_{s2} - área da armadura de compressão;

E_s - módulo de elasticidade do aço;

ε_{s2} - deformação na armadura de compressão;

A_{s1} - área da armadura de tração;

f_{yd} - tensão de escoamento do aço de projeto;

A_f - área do reforço de PRF;

E_{fu} - módulo de elasticidade do PRF último;

ϵ_f - deformação no reforço de PRF;

ϵ_{cu} - deformação última no concreto.

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \quad (E_s \epsilon_{s2} \text{ não excede } f_{yd}) \quad (2.12)$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \epsilon_o \quad (2.13)$$

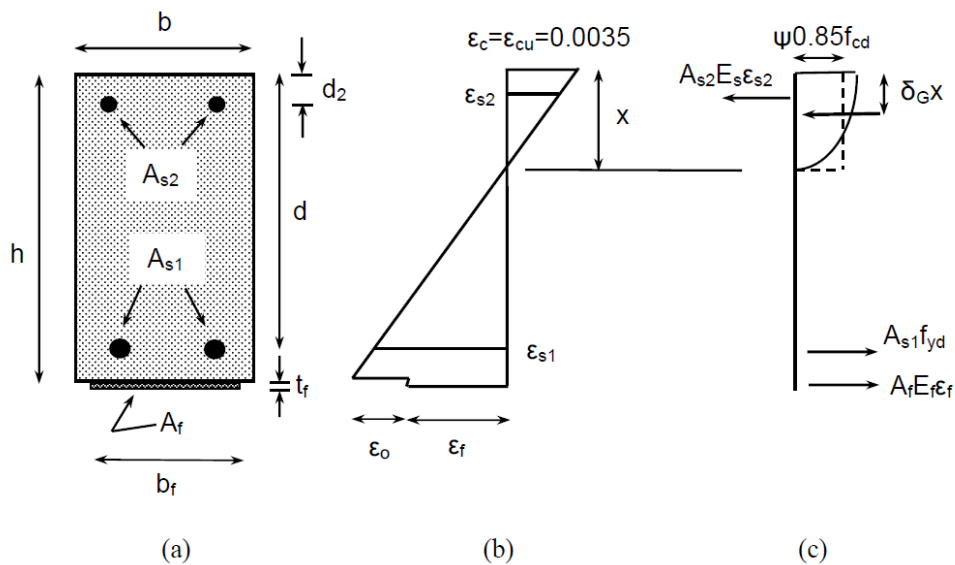


Figura 2.9 – Análise da seção transversal para o estado limite último de flexão: (a) geometria, (b) distribuição de deformação e (c) distribuição de tensões. (*Bulletin 14 FIB:2001, Fig. 4-11*)

O momento de flexão de projeto é calculado com a Equação 2.14:

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \epsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \quad (2.14)$$

onde $\delta_G = 0.4$.

Para serem válidas as equações acima, as seguintes premissas devem ser verificadas: (a) fluência do reforço de aço à tração e (b) a deformação do PRF está limitada à deformação final, ϵ_{fud} :

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{fud} \quad (2.16)$$

onde:

ε_o - deformação inicial na fibra à tração extrema do concreto antes do reforço;

ε_{fud} - valor de projeto da deformação final do FRP.

b) Aço escoando seguido da ruptura do PRF

Este modo de ruptura pode acontecer, mas, é bastante provável que o prematuro descolamento do PRF vai preceder a ruptura do PRF e, portanto, esse mecanismo não será ativado. Podemos afirmar aqui que a análise para este mecanismo pode ser feita ao longo das linhas da seção anterior. Os valores do bloco de tensões do concreto Ψ e δ_G são fornecidos pelas Equações 2.17 e 2.18:

$$\Psi = \begin{cases} 1000 \varepsilon_c \left(0.5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{para } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000 \varepsilon_c} & \text{para } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000 \varepsilon_c}{4 (6 - 1000 \varepsilon_c)} & \text{para } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{10000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 2)} & \text{para } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (2.18)$$

onde:

ε_c - deformação de concreto na fibra extrema comprimida.

c) Descolamento na ancoragem final e nas fissuras de flexão

- Verificação de ancoragem final, limitação da deformação no PRF: esta abordagem envolve duas etapas independentes: primeiro, a ancoragem final deve ser verificada

com base na lei constitutiva da tensão de cisalhamento-deslizamento na interface PRF-concreto. Em seguida, uma limitação da deformação deve ser aplicada sobre o PRF para assegurar que a ruptura por aderência longe da ancoragem será impedida. No entanto, este processo representa uma simplificação do comportamento real, porque o esforço no PRF correspondente a ruptura de aderência não é um valor fixo, mas isso depende de uma série de parâmetros, incluindo a relação momento-cisalhamento, a deformação interna no aço e da distribuição de fissuras.

- Verificação de acordo com a linha envolvente de tensões de tração no PRF: nesta abordagem o descolamento é tratado de forma unificada tanto na ancoragem final como em qualquer ponto ao longo da interface PRF-concreto com base na lei da interface cisalhamento-deslizamento e a linha envolvente de tensões de tração no PRF. A principal vantagem desta abordagem é que o descolamento no final e nas fissuras de flexão é tratado com o mesmo modelo.
- Verificação de ancoragem final e de transferência de força na interface PRF / concreto: dois passos independentes devem ser seguidos: primeiro o ancoragem final deve ser verificado com base na lei constitutiva da tensão de cisalhamento - deslizamento na interface PRF-concreto e segundo deve verificar-se que a tensão de cisalhamento ao longo da interface calculado com base em condições de equilíbrio simplificados é mantida abaixo de um valor crítico (a força de cisalhamento do concreto).

2.4 - TRABALHOS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO REFORÇO HÍBRIDO COLADO NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

2.4.1- Pesquisas realizadas no exterior

2.4.1.1 - Xiong, Yang e Ji (2004)

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento do reforço de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono e vidro externamente coladas. Foram usados dois sistemas: reforço híbrido com fibras de carbono e vidro combinadas (H-CF/GF-RP) e reforço com fibra de carbono (PRFC). O programa experimental incluiu seis vigas, as dimensões e o detalhamento são mostrados na Figura 2.10.

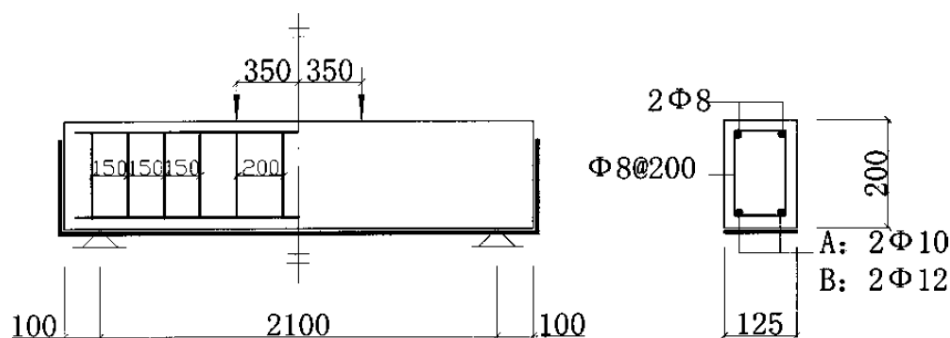


Figura 2.10 – Dimensões em mm e detalhamento das vigas (Xiong et al., 2004)

A resistência de compressão do concreto aos 28 dias foi de 39,7 MPa, a tensão de escoamento do aço de 10 mm, 12 mm e 8 mm foi de 411 MPa, 606 MPa e 233 MPa, respectivamente. O módulo de elasticidade para a armadura longitudinal e para os estribos foi de 210 GPa. As propriedades mecânicas dos materiais compósitos utilizados neste estudo são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades dos materiais compósitos (Xiong et al., 2004)

Nome FRP	Tipo de Compósito	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)
CF ₁	Uma camada de CF	1.459	122,6	1,19
CF ₂	Duas camadas de CF	1.501	124,0	1,21
GF ₁	Uma camada de GF	1.703	49,1	3,47
CF _{0,8} /GF ₁	Uma camada de CF de 50 mm de largura e uma camada de GF de 62,5 mm de largura	1.578	82,2	1,92

Note: CF=fibra de carbono GF=fibra de vidro

Duas vigas foram reforçadas com fibra de carbono (CF) e outras duas vigas reforçadas com fibra de carbono (CF) e fibra de vidro (GF) simultaneamente. Além disso, duas vigas de referência foram ensaiadas para comparar os resultados. A Tabela 2.3 mostra as características das vigas.

Tabela 2.3 – Detalhes das vigas ensaiadas (Xiong et al., 2004)

Viga numero	Nome da viga	Taxa de armadura (%)	Tipo de reforço	Custo do reforço (dollars/m ²) ^a
1	P_a	0,76	Control	—
2	CF_1	0,76	Uma camada de 125 mm de largura CF	40,5
3	$CF_{0,8}/GF_1 \cdot 1$	0,76	Uma camada de 100 mm de largura CF primeiro,	47,75
4	$CF_{0,8}/GF_1 \cdot 2$	0,76	uma camada de 125 mm de largura GF segundo	
5	CF_2	0,76	Duas camadas de 125 mm de largura CF	77,25
6	P_b	1,10	Control	—

Note: CF=fibra de carbono. GF=fibra de vidro

^aCusto inclui material e mão de obra

O modo de ruptura das vigas foi ruptura do PRF no meio do vão. Nesta fase, embora o aço atinja o escoamento bem em cada viga reforçada, a deformação de compressão do concreto alcançou o estágio de esmagamento. Na Tabela 2.4 são apresentados os valores calculados e encontrados nos ensaios de: carga de ruptura, deflexão, deformação dos PRF e ductilidade. Além, na Figura 2.11 são mostradas as curvas carga-deflexão das vigas ensaiadas.

Tabela 2.4 – Resultados das vigas ensaiadas (Xiong et al., 2004)

Numero da viga	Nome da viga	Carga de escoamento do aço experimental (kN) / deflexão no escoamento (Δ_y) (mm)	Carga de ruptura do FRP experimental (kN)/carga de ruptura do FRP calculada (kN)	Deflexão de ruptura (Δ_u) (mm)	Deformação de ruptura do FRP (%)	Deflexão ductilidade (μ_Δ) ^a
1	P_a	19,50/3,26	29,38/29,22	46,40	—	14,2
2	CF_1	26,11/5,99	40,70/36,91	28,19	1,03	4,71
3	$CF_{0,8}/GF_1 \cdot 1$	35,71/7,95	55,77/56,80	44,71	1,69	5,62
4	$CF_{0,8}/GF_1 \cdot 2$	34,32/7,35	59,21/56,80	46,23	1,78	6,29
5	CF_2	38,45/7,10	54,91/50,25	22,32	0,95	3,14
6	P_b	48,11/7,07	58,30/57,75	48,81	—	6,90

Nota: FRP=Polímero reforçado com fibra; CF=fibra de carbono; e GF=fibra de vidro

^a $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$.

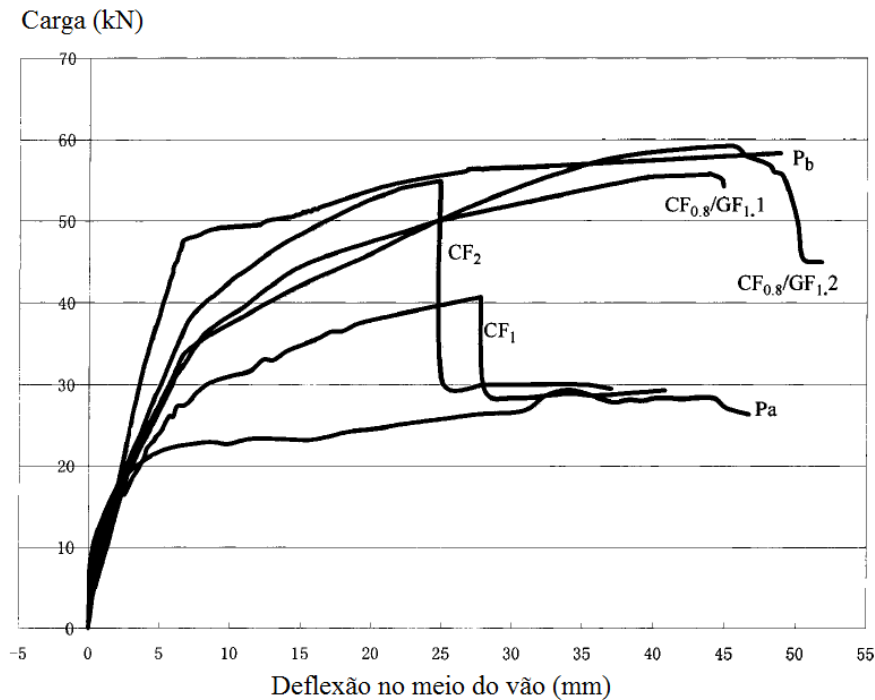


Figura 2.11 – Curvas carga-deflexão das vigas (Xiong et al., 2004)

Por último, neste estudo os resultados dos ensaios indicaram que o reforço com materiais compósitos H-CF/GF-RP pode prover tanto um aumento significativo de ductilidade, como uma diminuição notável do custo do reforço com variações ligeiras na capacidade de carga e rigidez das vigas reforçadas. Xiong et al. concluíram que:

- Sob cargas de ruptura semelhantes, a deflexão-ductilidade e a rigidez das vigas com reforço H-CF/GF-RP eram 89,7% maiores que às das vigas reforçadas com PRFC. Além disso, o custo do reforço híbrido é 10-38% inferior ao reforço com PRFC.
- Sob cargas de ruptura semelhantes à deflexão-ductilidade das vigas com reforço H-CF / GF-RP foi apenas 16,2% inferior a da viga de referência (Pa).

2.4.1.2 - Hosny, Shaheen, Abdelrahman e Elafandy (2006)

Em 2006, Hosny *et al* estudaram experimentalmente o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas externamente com PRF híbridos. O programa experimental constou de sete vigas T de concreto armado. As características das vigas são mostradas na Figura 2.12. As vigas foram testadas sobre carregamento cíclico até a ruptura para analisar o seu comportamento à flexão. Diferentes proporções, direções de reforço de fibra, localizações

e combinações de fibra de carbono (PRFC) e fibra de vidro (PRFV) foram colados às vigas para determinar o melhor esquema de reforço.

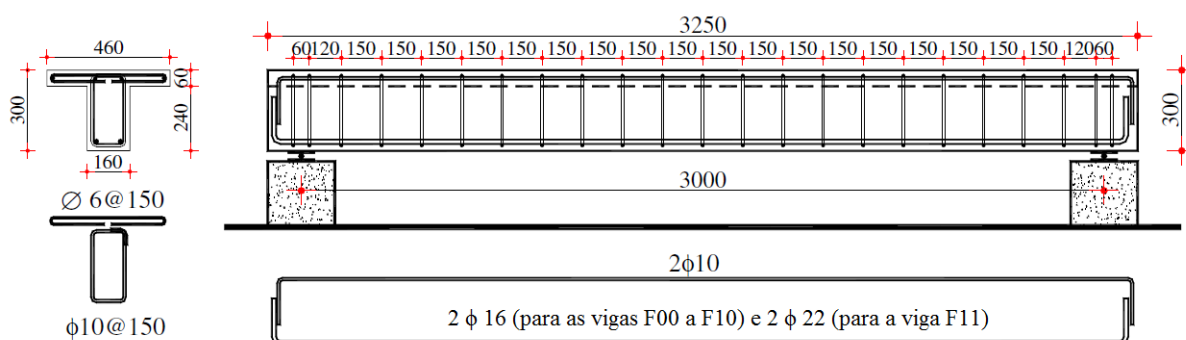


Figura 2.12 – Dimensões em mm e detalhamento das vigas T (Hosny et al., 2006)

As características dos materiais usados são os seguintes: a espessura da fibra de carbono (PRFC) foi 0,117 mm, enquanto a sua deformação final e módulo de elasticidade foram 1,55% e 240 GPa, respectivamente. A espessura da fibra de vidro (PRFV) foi 0,135 mm, com a deformação final e módulo de elasticidade de 2,88% e 65 GPa, respectivamente. A resistência a compressão do concreto após 28 dias era de 25 MPa, enquanto a tensão de escoamento do aço era 415 MPa para o reforço longitudinal e 240 MPa para os estribos.

A viga F00 foi uma amostra de referência, enquanto o esquema de reforço das outras seis vigas é mostrado na figura 2.13 e descrito na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Esquema de reforço das vigas (Hosny et al., 2006)

Viga Numero	Tipo de PRF	Propiedades do PRFC		Propiedades do PRFV		Direcção da fibra em relação ao eixo da viga	Condição da viga no momento do reforço	Tipo de Ancoragem
		Taxa (%)	Localização	Taxa (%)	Localização			
F00	Control							
F01	PRFC	0,073	Em baixo	-	-	0°	-	-
F02	PRFC + PRFV	0,020	Nos lados	0,117	Em baixo	0°	Descarregada	-
F03	PRFC + PRFV	0,020	Nos lados	0,124	Em baixo	0°	Descarregada	6-U GFRP
F04	PRFV	-	-	0,124	Em baixo	0°	Descarregada	2-U GFRP
F05	PRFV	-	-	-	-	0/90°/+45° 0/90°/-45°		-
F06	PRFC + PRFV	0,015	Em baixo	0,169	Nos lados	0°	Descarregada	6-U GFRP

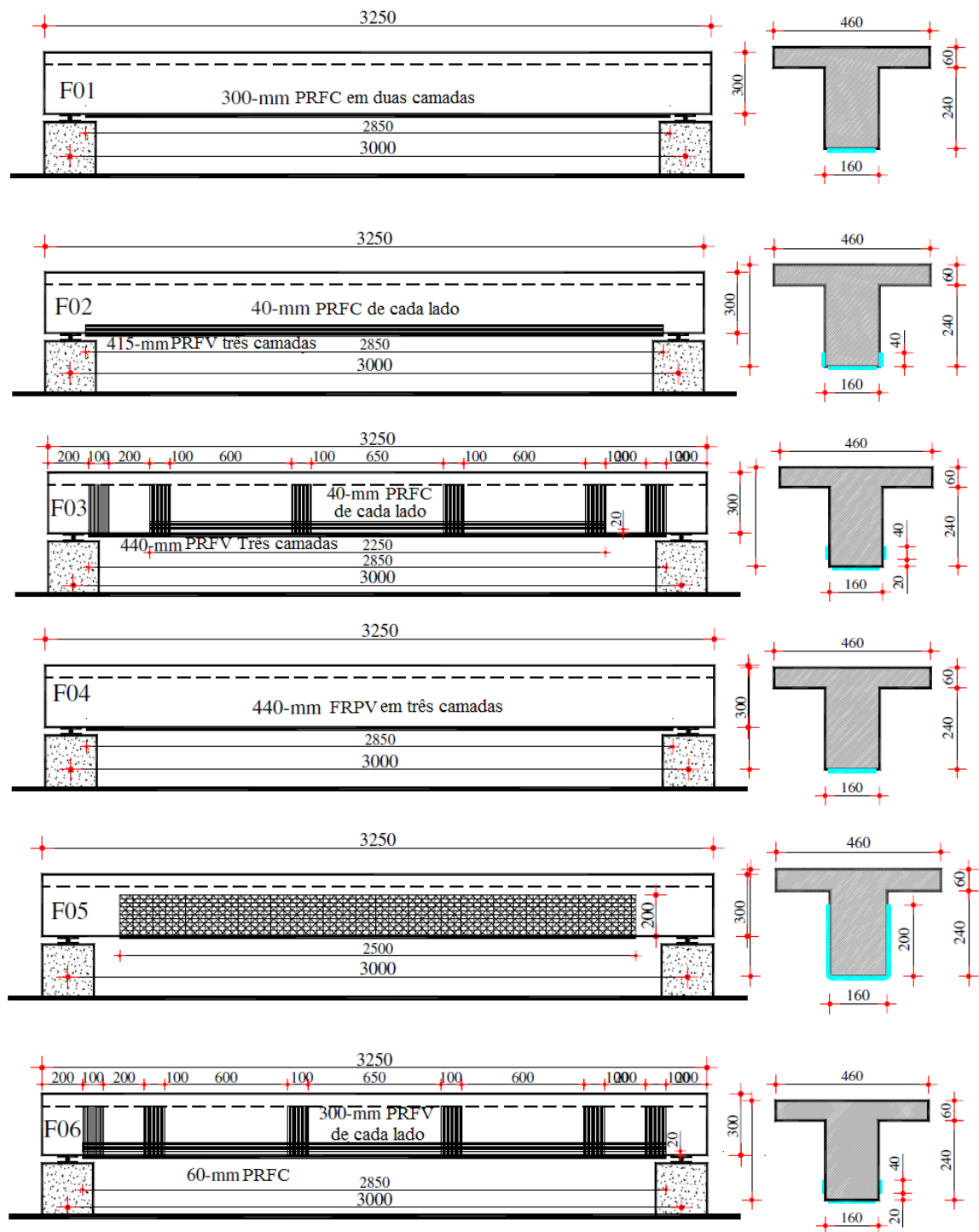


Figura 2.13 – Detalhe de esquema de reforço das vigas (Hosny et al., 2006)

As vigas foram submetidas a carregamento cíclico até a ruptura, com duas cargas concentradas em 375 mm a partir do meio da viga (Figura 2.14) e usando controle da deformação. As cargas de ruptura das amostras foram de 100, 116,5, 127,2, 117,3, 125,25, 169,7 e 110,25 kN das vigas F00 a F06, respectivamente. A capacidade de carga máxima das vigas F01 a F06 aumentou 16,5%, 27,2%, 17,3%, 25,3%, 69,7% e 10,3%

respectivamente, em comparação com o modelo F00 de referência. A deformação máxima medida no reforço de aço foi de 2,8% para a amostra de referência, ao mesmo tempo em que variou a partir de 1,0% a 1,5% para as amostras reforçadas.



Figura 2.14 – Esquema do ensaio (Hosny et al., 2006)

A ruptura da amostra de referência foi dúctil, pois a deflexão na ruptura foi 12 vezes a deformação no escoamento de reforço de aço. Usando fibras de carbono (PRFC) resultou em uma ruptura muito menos dúctil, onde a deformação no final foi de apenas 2,5 a deformação no escoamento de aço. Adicionando combinação de PRFC e PRFV poderia atingir uma ductilidade de 6,0, que é 2,4 vezes a ductilidade das vigas com um tipo de PRF laminados.

Baseados nos ensaios das sete vigas e no estudo analítico, os autores concluíram o seguinte:

- O uso de fibras de carbono (PRFC) ou vidro (PRFV) para o reforço de vigas T é um método eficaz para aumentar a capacidade de carga última. No entanto, a ductilidade das vigas é significativamente reduzida. O uso de uma combinação de fibra de PRFC e PRFV é um método eficaz para melhorar a ductilidade das vigas reforçadas.
- A energia elástica liberada devido à ruptura das fibras de carbono (PRFC), afeta negativamente a interface entre o concreto e as fibras de vidro (PRFV).
- A utilização de fibra tipo U-forma para o ancoragem longitudinal das fibras de vidro (PRFV) conseguiu impedir que o dano ocorresse devido à ruptura do laminado PRFC.
- O melhor esquema encontrado para reforçar as vigas de concreto é anexar fibra de carbono (PRFC) sobre os lados da viga 20 mm acima da superfície inferior e ancorar as fibras de vidro (PRFV) na sua superfície inferior.

2.4.1.3 - Lenwari e Thepchatri (2009)

O objetivo do estudo foi investigar os efeitos das fibras de carbono e de vidro sobre os comportamentos de flexão de vigas de concreto armado, quando elas são coladas às zonas de tração das vigas. O programa experimental consistiu de oito vigas simplesmente apoiadas em um ensaio de quatro pontos e projetadas com uma taxa da armadura (ρ) de 0,0095. Na Figura 2.15 são ilustrados os detalhes das vigas ensaiadas.

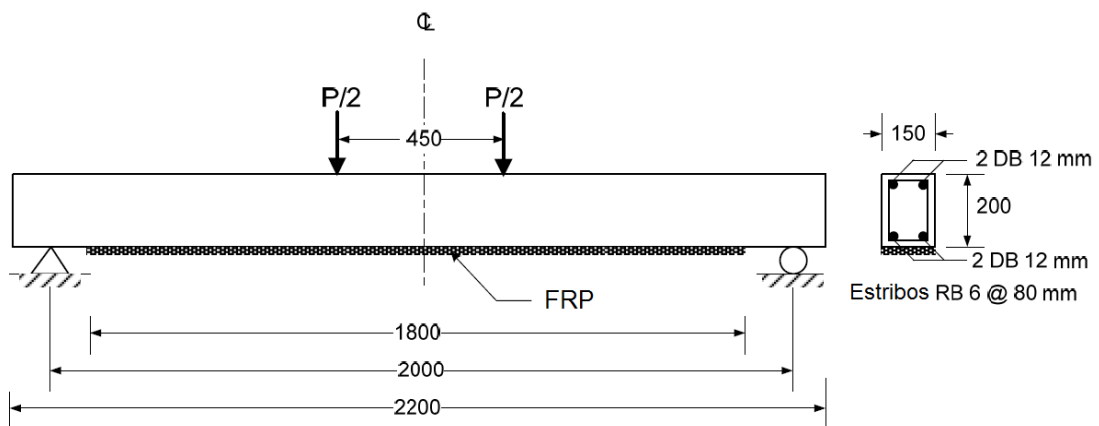


Figura 2.15 – Dimensões em mm e detalhamento das vigas (Lenwari e Thepchatri, 2009)

As propriedades do material são as seguintes:

- Resistência à compressão do concreto (f_c): 55 MPa.
- Resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço: 400 MPa e 200 GPa, respectivamente.
- Espessura nominal, resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra de carbono: 0,165 milímetros, 3550 MPa e 235 GPa, respectivamente.
- Espessura nominal, resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra de vidro: 0,353 milímetros, 1700 MPa e 71 GPa, respectivamente.

A Tabela 2.6 mostra o esquema de reforço, carga última, deflexão máxima e modo de ruptura de todas as vigas. As vigas foram ensaiadas até a ruptura e submetidas a cargas com descarregamento periódico a cada incremento de 9,81 kN (1 ton), exceto as vigas CB2 e CF-GF2, que foram testadas sob carga monotonicamente crescente até a ruptura.

Tabela 2.6 – Resultados das vigas ensaiadas (Lenwari e Thepchatri, 2009)

Viga	Tipo de carga	Tipo de PRF	Carga de ruptura (kN)	Deflexão máxima no meio do vão (mm)	Modo de ruptura
CB1	Descargas periódicas	-	53,0	44,3	Esmagamento concreto
CB2*	Monotônica	-	44,1	-	Esmagamento concreto
CF1*	Descargas periódicas	Carbono, 1 camada	53,0	-	Ruptura/descolamento
GF1*	Descargas periódicas	Vidro, 1 camada	61,8	-	Delaminação
CF2	Descargas periódicas	Carbono, 2 camadas	93,2	31,3	Descolamento
GF2	Descargas periódicas	Vidro, 2 camadas	97,1	36,2	Descolamento
CF-GF1	Descargas periódicas	Carbono, (1 ^{ra} camada) Vidro, (2 ^{da} camada)	93,2	29,8	Descolamento
CF-GF2	Monotônica	Carbono, (1 ^{ra} camada) Vidro, (2 ^{da} camada)	85,3	31,6	Descolamento

A ruptura mais comum nas vigas reforçadas foi o destacamento do reforço, que não permite que a capacidade da fibra seja aproveitada. A Figura 2.16 ilustra este tipo de ruptura.

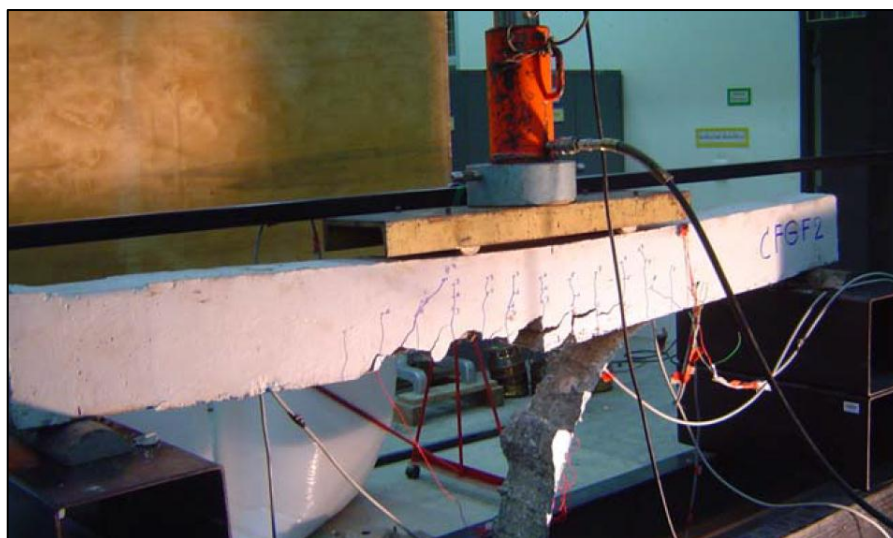


Figura 2.16 – Delaminação do reforço (Lenwari e Thepchatri, 2009)

Na Figura 2.17 são ilustrados os gráficos de carga-deflexão no vão meio das vigas CF-GF1 e CF-GF2. Também foi incluída no gráfico a curva do princípio de trabalho virtual.

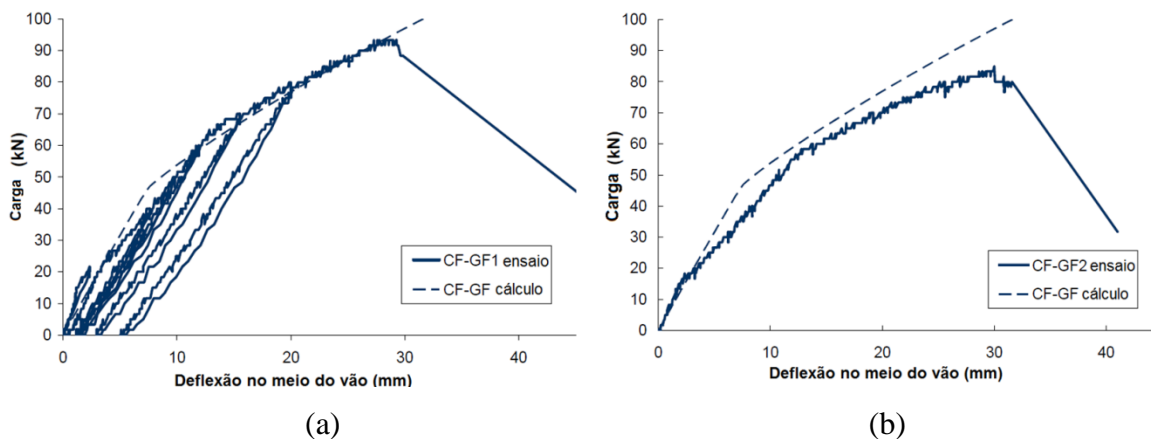


Figura 2.17 – Gráficos carga-deflexão no vão meio: (a) viga CF-GF1 e (b) viga CF-GF2 (Lenwari e Thepchatrri, 2009)

A partir das figuras acima mencionadas uma concordância razoável entre os dados do ensaio e a predição foi encontrada, indicando assim a aplicabilidade do princípio de trabalho virtual. Os efeitos das lâminas de carbono e de fibra de vidro sobre a resistência e ductilidade de vigas de híbridos podem ser resumidos como segue:

1. A rigidez e a carga última das vigas com reforço híbrido aumentam com o número de camadas. No entanto, a carga final não aumenta quando o número de camadas é maior do que dois, porque a eficácia da lâmina de fibra é limitada por ruptura por descolamento.
2. Em número igual de camadas, o efeito da fibra de vidro sobre a carga de ruptura da viga foi mais pronunciado do que da fibra de carbono. Com uma camada, a folha de fibra de vidro aumentou a carga de ruptura de $61.8/53 = 1,17$ (17%), enquanto duas camadas aumentaram a carga de ruptura de $97.1/53 = 1,83$ (83%).
3. A ductilidade de todas as vigas com reforço híbrido foi menor do que da viga de referência, devido à ruptura por destacamento.
4. A descarga em pontos acima da carga de escoamento do aço apresentou dissipação de energia significativa. No entanto, a rigidez de recarga não diminuiu significativamente em relação a rigidez da viga inicial.
5. Nos ensaios monotônicos (vigas CB2 e CF-GF2), as cargas últimas foram de aproximadamente 85-90% dos ensaios com descargas periódicas (vigas CB1 e CF-GF1, respectivamente).

2.4.1.4 - Sun Kim e Soo Shin (2010)

O objetivo deste estudo é analisar o efeito dos materiais híbridos (polímeros reforçados com fibras) PRF no comportamento estrutural do reforço de vigas CA (concreto armado) e investigar se as diferentes combinações de camadas de reforço de fibra de carbono (PRFC) e fibra de vidro (PRFV) têm uma influência na melhoria da resistência de vigas CA reforçadas.

Foram ensaiadas catorze vigas retangulares, o tipo de ensaio foi de flexão de quatro pontos em vigas simplesmente apoiadas e o detalhamento é mostrado na Figura 2.18. Uma viga é usada como a amostra de referência e não é pré-carregada nem reforçada. Como é descrito na Tabela 2.7, seis vigas foram reforçadas com compostos híbridos PRF após o pré-carregamento e se compararam com as vigas reforçadas sem pré-carga. Os valores de pré-carga foram de até 50% ou 70% da resistência final da viga de referência, e a pré-carga é mantidas durante o procedimento de reforço. Fissuras maiores do que 0,3 mm de largura causadas pela carga inicial antes de reforço são reparadas usando o método de injeção de epóxi.

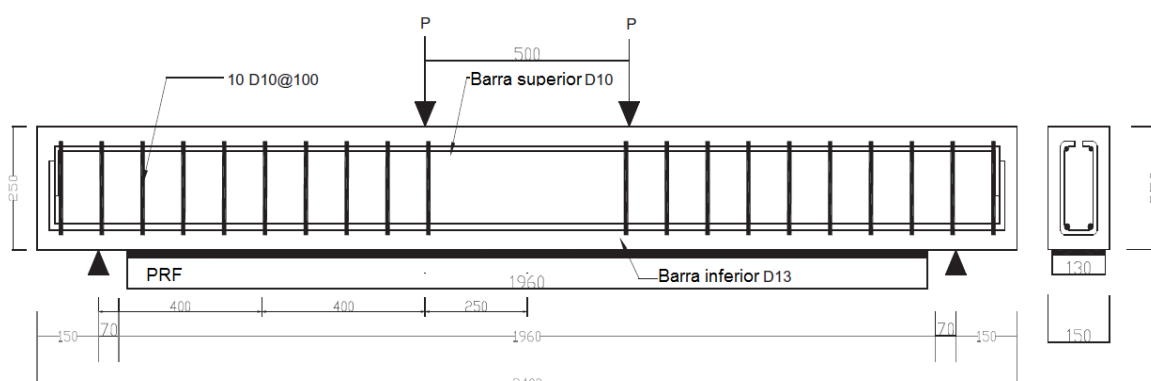


Figura 2.18 – Detalhe de esquema de reforço das vigas (Sun Kim e Soo Shin, 2010)

Tabela 2.7 – Esquema de reforço das vigas (Sun Kim e Soo Shin, 2010)

Viga	Camadas de PRF	Fabricação das vigas e pré-carga
CONTR	0	Viga de control
CC	2	Duas camadas de PRFC são coladas sem pré-carregamento
VV	2	Duas camadas de PRFV são coladas sem pré-carregamento
CV	2	Uma camada de PRFC é colada e uma camada de PRFV é colada em sequência, sem pré-carregamento
VC	2	Uma camada de PRFC é colada e uma de PRFV é colada em sequência, sem pré-carregamento
CCV	3	Duas camadas de PRFC são coladas e uma de PRFV em sequência, sem pré-carregamento
VCV	3	Uma camada de PRFV, uma camada de PRFC e uma camada de PRFV são coladas em sequência, sem o pré-carregamento
VCC	3	Uma camada de GFRP e duas de CFRP são coladas em sequência, sem pré-carregamento
CV-50	2	CG reforço foi executado a 50% da carga última de CONTR
CV-70	2	CG reforço foi executado a 70% da carga última de CONTR
VC-50	2	GC reforço foi executado a 50% da carga última de CONTR
VC-70	2	GV reforço foi executado a 50% da carga última de CONTR
VCC-50	3	VCC reforço foi executado a 50% da carga última de CONTR
VCC-70	3	VCC reforço foi executado a 70% da carga última de CONTR

Nota: C: fibra de carbono
V: fibra de vidro

As vigas foram feitas com concreto de resistência aos 28 dias de 24,5 MPa e a tensão de escoamento das barras de aço de tração e dos estribos de cisalhamento foram de 535 MPa e 461 MPa, respectivamente. As propriedades dos materiais compostos reforçados com fibras são mostradas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Propriedades dos materiais compósitos (Sun Kim e Soo Shin, 2010)

Descrição	Unidade	Fibra de Carbono	Fibra de vidro
Módulo de elasticidade	MPa	$2,3 \times 10^5$	$7,06 \times 10^4$
Resistência / Uni. área	MPa	851,14	648,51
Resistência / Uni. comprimento	N/mm	502,13	558,29
Espessura da fibra	mm	0,11	0,34
Espessura impregnada	mm	0,59	0,86
Deformação de tração		0,02	0,03

As relações de carga-deflexão no meio das vigas não pré-carregadas, obtidas nos ensaios estão ilustrados nas Figuras 2.19 (a) e (b). As vigas reforçadas com PRF tiveram uma maior rigidez e carga última maior que a viga de referência. Entre as vigas reforçadas com duas camadas de PRF, quase não houve relação entre a ordem das camadas de PRF e a rigidez no regime elástico. As vigas reforçadas com três camadas de PRF mostraram maior rigidez e carga máxima que as vigas com duas camadas, tal como mostrado na Figura 2.19 (b). As diferenças na carga máxima e nas cargas do escoamento da armadura das vigas dependem da ordem de colagem de PRFs.

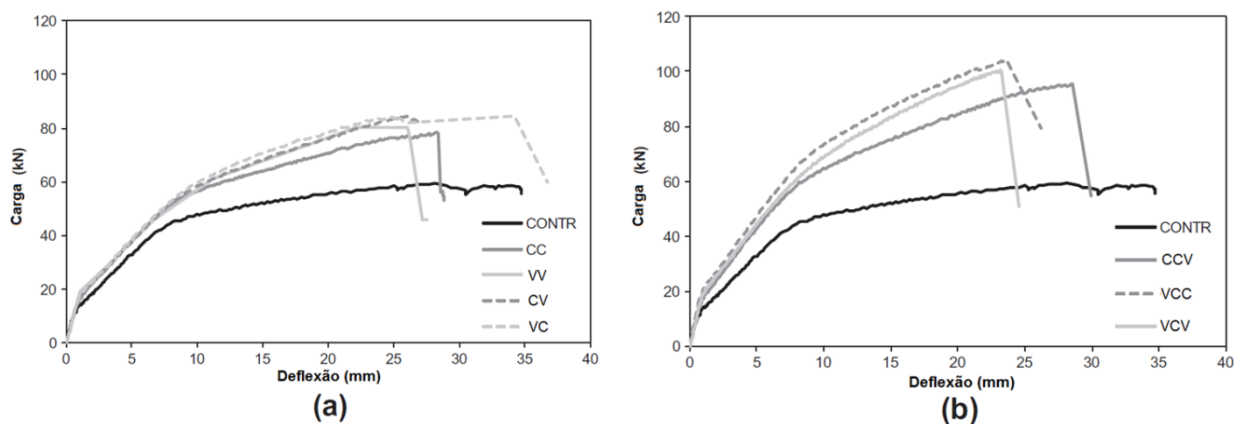


Figura 2.19 – Relações de carga-deflexão vigas não precarregadas: (a) reforçadas com duas camadas de PRFs (b) reforçadas com três camadas (Sun Kim e Soo Shin, 2010)

Foram selecionados reforços de VC, CV, e CCV para investigar o efeito das cargas aplicadas inicialmente sobre o comportamento estrutural das vigas reforçadas. A Figura 2.20 ilustra as curvas de carga-deflexão das vigas.

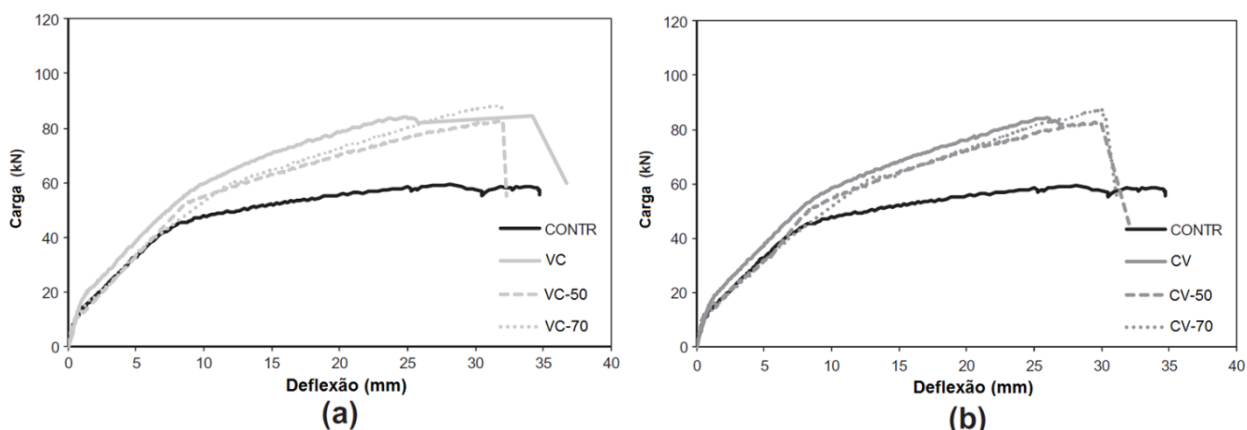


Figura 2.20 – Relações de carga-deflexão vigas pré-carregadas: (a) VC amostras (b) CV amostras (Sun Kim e Soo Shin, 2010)

A figura 2.21 mostra que o modo de ruptura A é ruptura por fissuração horizontal. Quando o PRF é tracionado, tensões de cisalhamento são transmitidas ao longo do comprimento da viga podendo gerar fissuras horizontais na região de contato com a armadura de flexão, que esta submetida a tensões elevadas de aderência. O modo de falha B (Figura 2.22) é causado pelo desenvolvimento de fissuras verticais a partir de ambos os lados da viga, que conduz à ruptura do PRF com concreto.

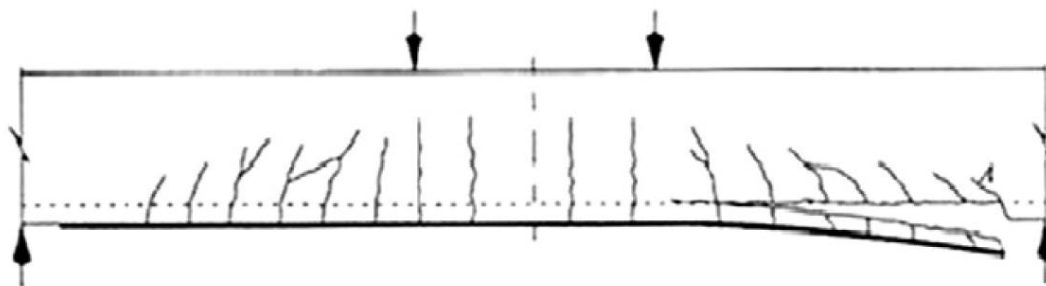


Figura 2.21 – O modo de ruptura A (Sun Kim e Soo Shin, 2010)

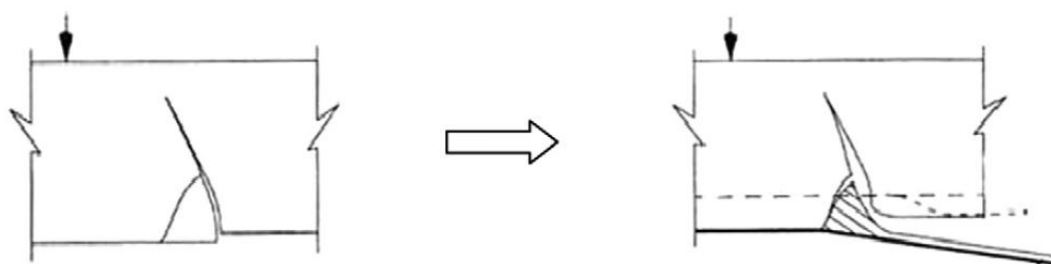


Figura 2.22 – O modo de ruptura B (Sun Kim e Soo Shin, 2010)

Sun Kim e Soo Shin (2010) concluíram que:

- O uso de PRF híbridos é eficaz para melhorar a resistência última e a rigidez de uma viga reforçada.
- A ordem de colagem dos diferentes tipos de PRF influencia na resistência, rigidez e ductilidade de vigas reforçadas com PRF híbridos. Dos ensaios, as vigas com fibra de vidro colada antes da fibra de carbono mostram aumentos na resistência e ductilidade.
- O efeito da pré-carga sobre o comportamento estrutural de vigas reforçadas com PRF é claramente observado, e o efeito de reforço PRF híbrido nas vigas pré-carregadas é menor que em vigas sem pré-carga. No entanto, a deterioração das estruturas devida à pré-carga pode ser superada pela reparação de fissuras antes de colocar os PRF híbridos nas vigas.
- As vigas de concreto armado reforçadas rompem antes que as camadas dos compostos híbridos de PRF atinjam seu ponto de ruptura. Isto limita o efeito do reforço com PRF híbridos. Por conseguinte, o desenvolvimento do método de projeto do reforço é ainda necessário para utilizar os PRF híbridos com a sua capacidade máxima.

2.4.2 - Pesquisas realizadas no Brasil

2.4.2.1 – ARAÚJO (2002)

Neste trabalho estuda-se o comportamento das vigas armadas de seção retangular reforçada à flexão e ao cisalhamento com fibra de carbono colada externamente na superfície. O tipo de ensaio foi de flexão de quatro pontos, foram ensaiadas quatro vigas de seção retangular. O detalhe das dimensões e a armadura são mostrados na Figura 2.23.

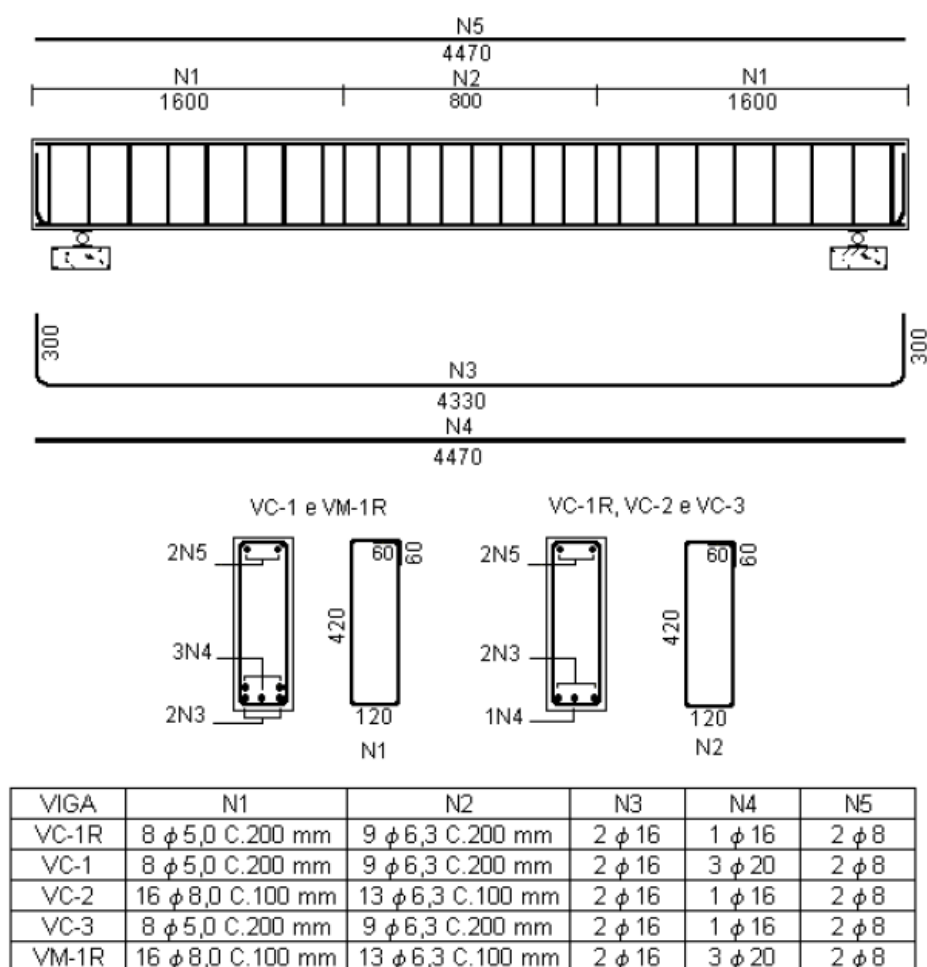


Figura 2.23 – Detalhamento da armadura das vigas (Araújo, 2002)

Uma viga não foi reforçada e é usada como referência (VC-1R), uma viga foi reforçada a cisalhamento (VC-1), outra viga foi reforçada a flexão (VC-2) e por último uma viga foi reforçada a flexão e cisalhamento (VC-3). Além disso, foi usada como referência uma viga ensaiada por outro autor (VM-1R). O esquema de reforço é ilustrado na Figura 2.24.

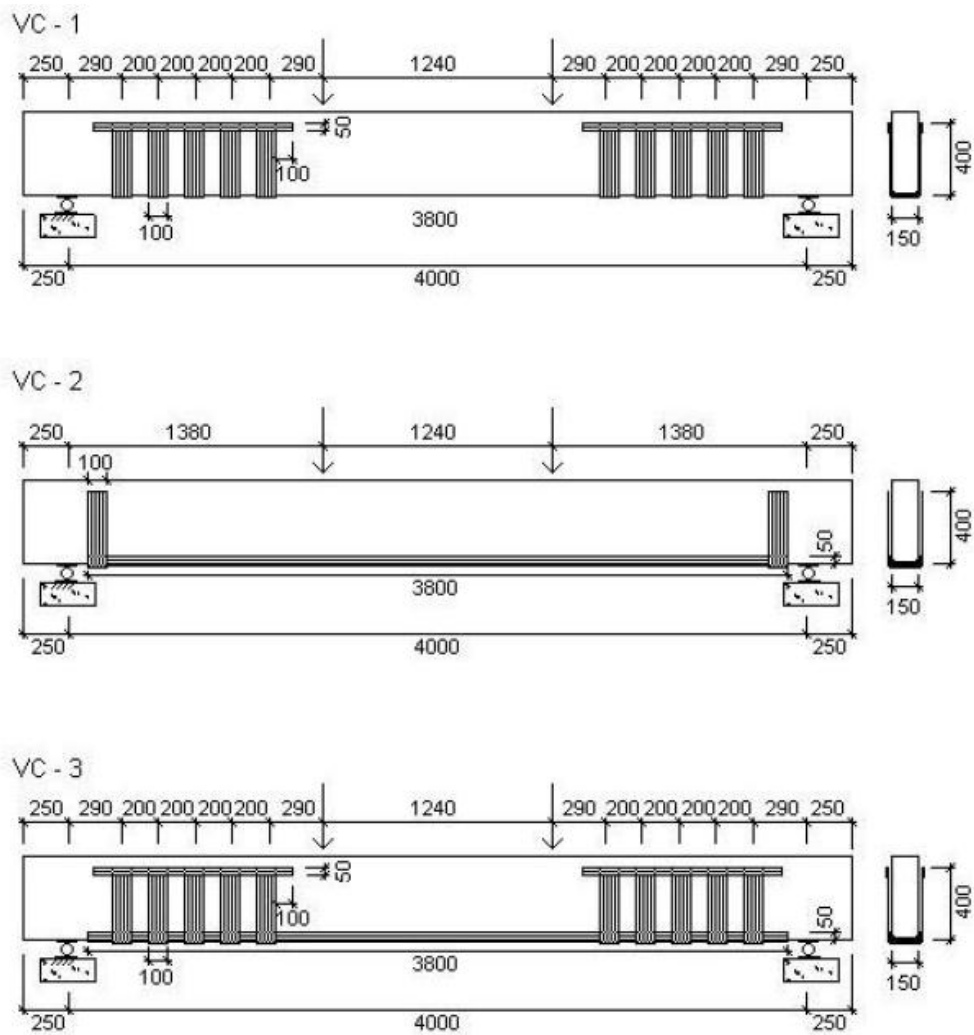


Figura 2.24 – Esquema de reforço das vigas (Araújo, 2002)

O concreto utilizado na confecção das vigas foi feito com betoneira, os resultados dos ensaios de compressão e tração feitos são apresentados na Tabela 2.9. O aço usado no reforço interno das vigas foi CA-50 e CA-60. As fibra utilizada no reforço colado foi *SikaWrap Hex-230C*, as propriedades foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 2.9 – Propriedades do concreto (Araújo, 2002)

Viga	Idade (dias)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	$f_{ctm,dir}$ (MPa)
VC-1R	49	30.4	3.1	-
VC-1	111	28.5	2.9	2.4
VC-2	107	33.8	3.0	2.4
VC-3	51	31.3	3.1	2.6
VM-1R	90	34.4	-	-

f_{ctm} = resistência média à tração do concreto

$f_{ctm,dir}$ = resistência média à tração direta do concreto

A deformação máxima medida nas vigas ensaiadas foi próxima ao valor de 7%. Na Tabela 2.10 é apresentada os valores teóricos calculados da resistência à flexão das vigas obtidas com distintos valores de deformação na fibra (6‰, 7‰ e 10‰). Na Figura 2.25 mostra-se o diagrama carga-flecha em todos os ciclos das vigas ensaiadas.

Tabela 2.10 – Resultados teóricos da resistência à flexão das vigas (Araújo, 2002)

$\epsilon_f=6\text{‰}$														
viga	A_f (mm ²)	d_f (mm)	x_p (mm)		ϵ_f (‰)		ϵ_c (‰)		ϵ_s (‰)		P_u (kN)		$P_{u,exp}/P_u$ (kN)	
			(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
VC-2	165	425	124	135	5,53	5,51	2,9	3,3	7,0	7,0	132	142	1,32	1,23
	248	451			6,00	6,00								
VC-3	165	425	133	145	5,51	5,49	3,1	3,5	6,7	6,7	131	140	1,38	1,29
	248	451			6,00	6,00								
$\epsilon_f=7\text{‰}$														
viga	A_f (mm ²)	d_f (mm)	x_p (mm)		ϵ_f (‰)		ϵ_c (‰)		ϵ_s (‰)		P_u (kN)		$P_{u,exp}/P_u$ (kN)	
			(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
VC-2	165	425	130	140	6,44	6,41	3,5	3,9	7,9	7,9	140	150	1,25	1,17
	248	451			7,00	7,00								
VC-3	165	425	139	150	6,42	6,39	3,8	4,2	7,6	7,6	138	147	1,30	1,22
	248	451			7,00	7,00								
$\epsilon_f=10\text{‰}$														
viga	A_f (mm ²)	d_f (mm)	x_p (mm)		ϵ_f (‰)		ϵ_c (‰)		ϵ_s (‰)		P_u (kN)		$P_{u,exp}/P_u$ (kN)	
			(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
VC-2	165	425	145	155	9,15	9,12	5,5	6,1	10,6	10,5	163	172	1,07	1,01
	248	451			10,00	10,00								
VC-3	165	425	154	165	9,12	9,08	5,9	6,6	10,3	10,2	161	170	1,12	1,06
	248	451			10,00	10,00								

(1) valores calculados a partir da tensão de escoamento nominal do aço

(2) valores calculados a partir da tensão de escoamento experimental do aço

$P_{u,exp}$ = carga última experimental

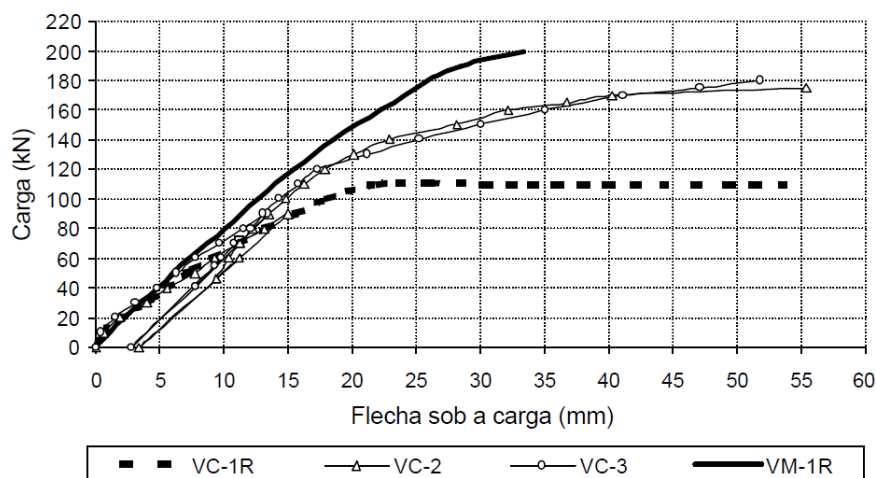


Figura 2.25 – Diagrama carga-flecha das vigas em todos os ciclos de carregamento (Araújo, 2002)

Algumas conclusões do autor são:

- A resistência das vigas foi aumentada em até 64% em relação com as vigas de referência, pela adição do reforço com fibra de carbono, mas as rupturas por descolamento e destacamento diminuíram a ductilidade das vigas.
- O reforço com as fibras aumenta a rigidez das vigas.
- Embora o fabricante limite o número de camadas, nos ensaios foram utilizadas cinco camadas sem prejudicar o comportamento do reforço.
- É recomendável o desenvolvimento de pesquisas futuras para melhorar o entendimento de aspectos como: a caracterização da interface concreto-reforço e mecanismos adicionais para melhorar a ancoragem das fibras.

2.4.2.2 – CASTRO (2004)

Esta pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento estrutural de vigas “T” de concreto armado reforçadas a flexão usando dois sistemas: o reforço colado em entalhes no cobrimento do concreto (CEC) e o reforço colado na superfície do concreto (CSC). O programa experimental consistiu na confecção de 19 vigas “T” divididas em duas séries: série I com 12 vigas taxa de armadura de 0.63% e a série II com 7 vigas com taxa de armadura de 1.57%. As duas séries tinham vigas sem reforço como referência, como apresenta-se na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Características das vigas (Castro, 2004)

Grupos	Vigas		Tipo de Reforço	Técnica utilizada
	Série I $\rho = 0,63\%$	Série II $\rho = 1,57\%$		
A	VA 2.1	VA 5.1	Vigas de Referência	-
	VA 2.2	VA 5.2		
B	VB 2.1	VB 5.1	3 tiras de PRFC (2mm x 16 mm) Hughes Brothers - Aslan 500;	Coladas em entalhes no concreto (CEC)
	VB 2.2			
C	VC 2.1	VC 5.1	1 barra de PRFC - (ϕ 10 mm) Mitsubishi Kasei Corporation - Leadline;	Coladas em entalhes no concreto (CEC)
	VC 2.2			
D	VD 2.1	VD 5.1	2 barras de PRFV - (ϕ 12,7 mm) Hughes Brothers - Aslan 100	Coladas em entalhes no concreto (CEC)
	VD 2.2			
E	VE 2.1	VE 5.1	2 camadas de tecido de PRFC - (0,165mm x 150 mm) Master Builders Technologies - CF-130 W;	Coladas na superfície do concreto (CSC)
	VE 2.2			
F	VF 2.1	VF 5.1	1 barra de Aço - (ϕ 8 mm).	Coladas em entalhes no concreto (CEC)
	VF 2.2			

O tipo de ensaio foi de flexão de quatro pontos simplesmente apoiado, com carregamento incremental até a ruptura. As dimensões e os detalhes da armadura são apresentados nas Figuras 2.26 e 2.27.

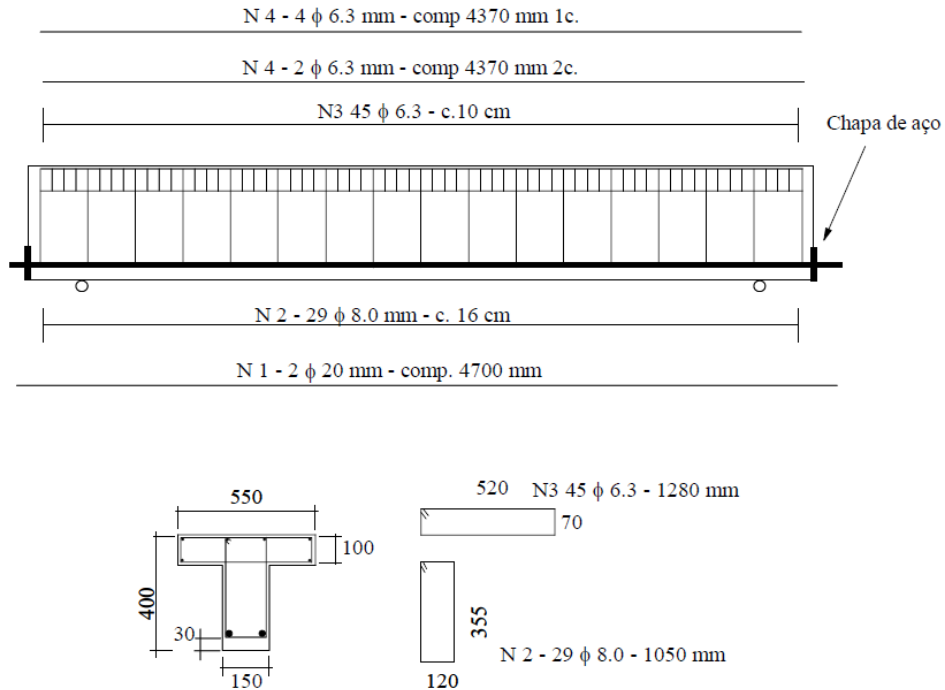


Figura 2.26 – Detalhe das dimensões e armadura das vigas da série I (Castro, 2004)

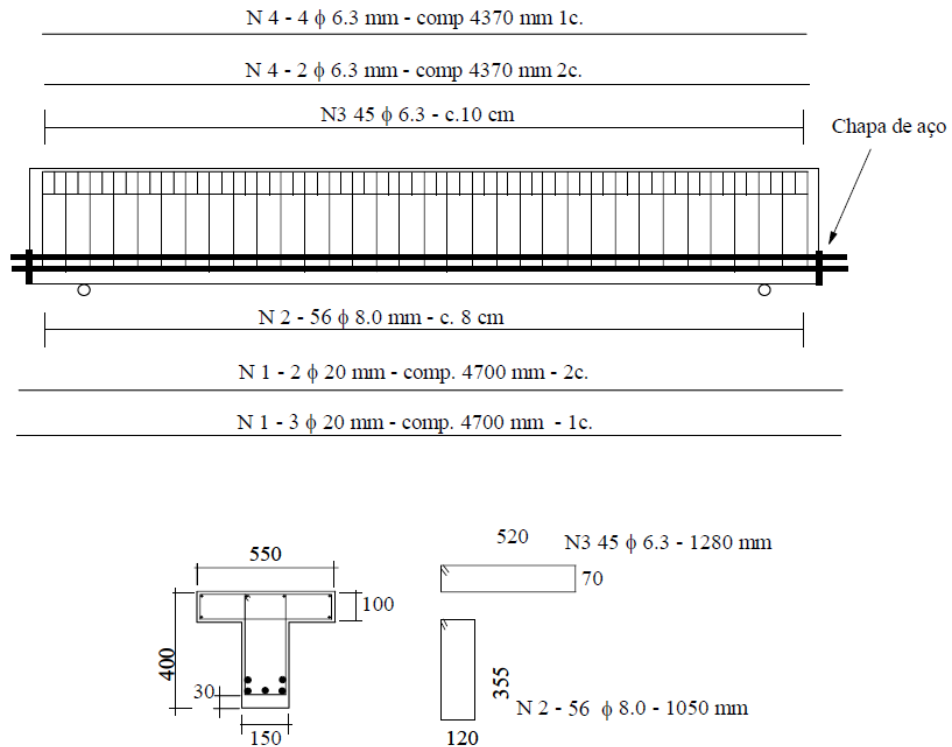


Figura 2.27 – Detalhe das dimensões e armadura das vigas da série II (Castro, 2004)

Foi utilizado um concreto usinado de $f_{c28} = 40$ MPa, o tipo de aço foi A-50 e o tecido de fibra de carbono usado foi do tipo CF 130. O resumo dos resultados experimentais é apresentado na Tabela 2.12 a seguir.

Tabela 2.12 – Resultados experimentais dos ensaios (Castro, 2004)

Vigas	Série	Tipo de Reforço	Carga de Ruptura (kN)	Modos de Ruptura	
VA 2.1	I	Grupo A Referência	163*	A	
VA 2.2			185	A seguido de B	
VA 5.1	II		398*	A	
VA 5.2			398	A seguido de B	
VB 2.1	I		Grupo B 3 tiras PRFC - (CEC)	246	D
VB 2.2				250	D
VB 5.1	II	500		B seguido de D	
VC 2.1	I	Grupo C 1 barra de PRFC (CEC)	253	C	
VC 2.2			250	C	
VC 5.1	II		456	B seguido de C	
VD 2.1	I	Grupo D 3 barras de PRFV (CEC)	250	D	
VD 2.2			227	D	
VD 5.1	II		480	B seguido de D	
VE 2.1	I	Grupo E 2 camadas de tecido de PRFC (CSC)	206	E	
VE 2.2			215	E	
VE 5.1	II		479	E	
VF 2.1	I	Grupo F 1 barra de Aço (CEC)	199	A seguido de B	
VF 2.2			195	A	
VF 5.1	II		416	A seguido de B	

- As armaduras de flexão de todas as vigas escoaram antes de ser atingido a carga de última

* Ensaio interrompido antes de um possível esmagamento do concreto

Tipo A – Deformação plástica excessiva;

Tipo B – Esmagamento do concreto;

Tipo C – Ruptura do reforço;

Tipo D – Destacamento do reforço;

Tipo E – Descolamento do reforço.

Três vigas do grupo E foram reforçadas com duas camadas de laminados de fibra de carbono colado no exterior da superfície (duas da série I e uma da série II), os gráficos de carga-flecha das vigas da série I são apresentados na Figura 2.28.

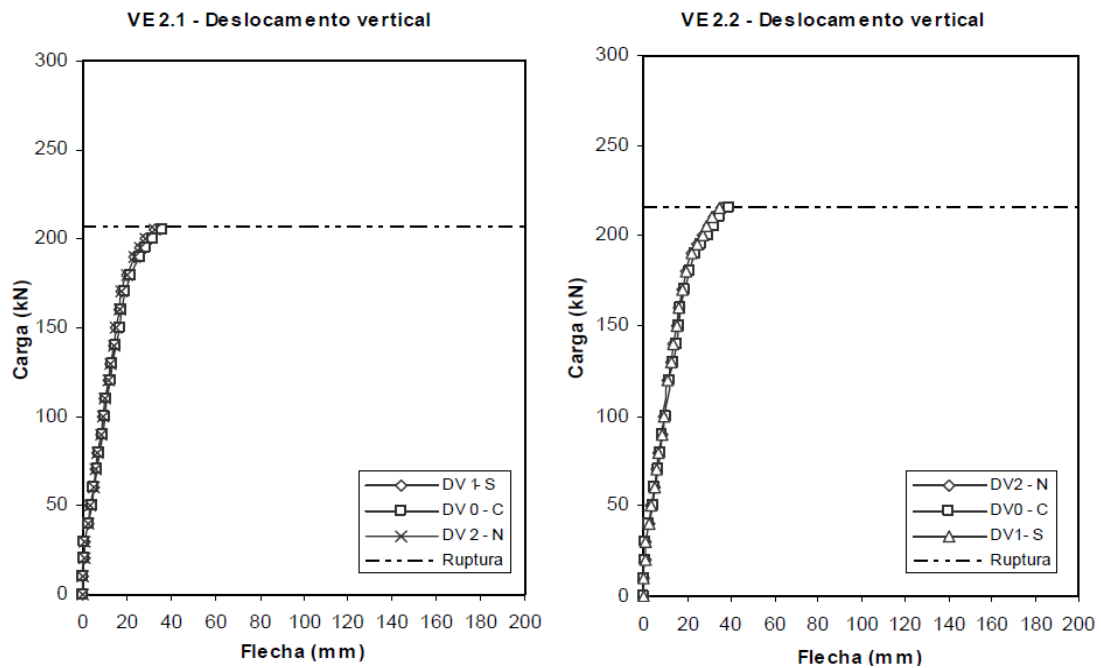


Figura 2.28 – Gráficos carga- flecha das vigas VE 2.1 e VE 2.2 (Castro, 2004)

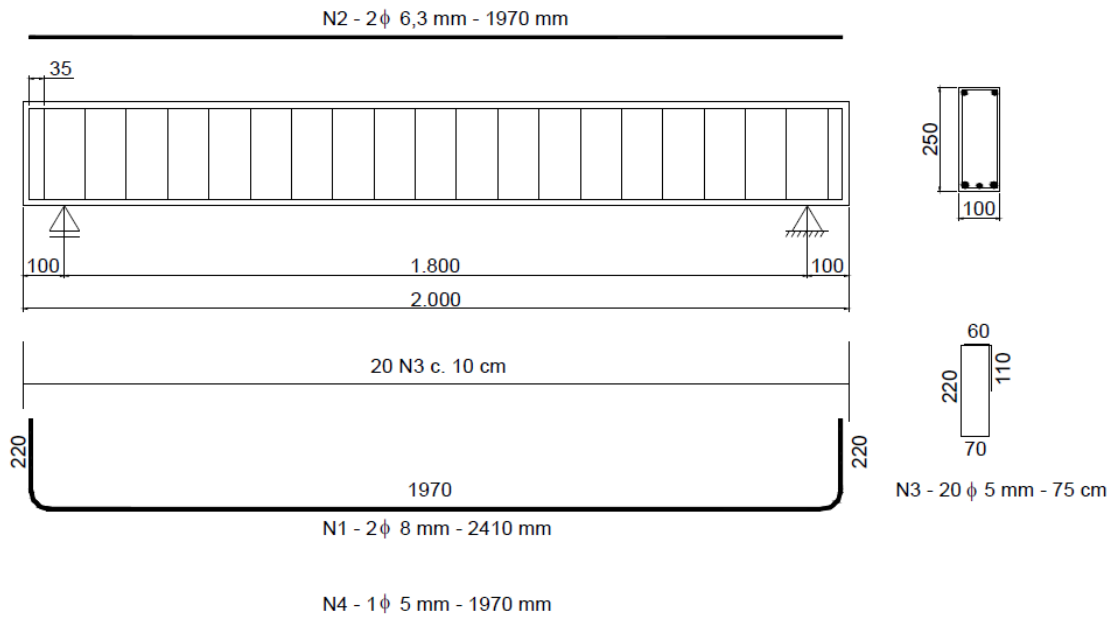
As conclusões finais deste trabalho foram:

- O sistema de reforço colado em entalhes no cobrimento do concreto (CEC) mostrou-se mais eficiente que o sistema de reforço colado na superfície do concreto (CSC) para as vigas com taxa de armadura baixa.
- Os modos de ruptura das vigas reforçadas com polímeros reforçados com fibras (PRF) para os dois sistemas de reforço, foram frágeis e do tipo: destacamento, descolamento ou ruptura do reforço no caso das vigas com taxa de armadura baixa.
- A eficiência do reforço com o sistema CSC usando tecidos de fibra de carbono foi limitada pelo descolamento da fibra, a deformação última medida foi próxima ao limite recomendado pela literatura (8%).
- É recomendável melhorar as normas do reforço de estruturas com polímeros reforçados com fibras com o sistema de colagem na superfície do concreto (CSC), sobretudo no tema de verificação dos modos de ruptura.

2.4.2.3 – SALLABERRY (2005)

O objetivo principal desta dissertação é estudar o limite de deformação das mantas de fibra de carbono usadas no reforço de vigas de concreto reforçado à flexão com o sistema de colagem na superfície de concreto, para evitar o modo de ruptura pelo descolamento do reforço variando o número de camadas da fibra.

No programa experimental foram feitas cinco vigas sub-armadas (taxa de armadura 0,53%) de seção retangular de 10 cm x 25 cm x 200 cm, o tipo de ensaio foi de três pontos de flexão com a carga no meio do vão. O carregamento foi contínuo até a ruína. Uma viga não foi reforçada para ter a referência inicial, as outras foram reforçadas a flexão variando o número de camadas de fibra. Na figura 2.29 são ilustradas as dimensões e a armadura das vigas e na Tabela 2.13 indica-se o tipo de reforço de cada viga.



Cotas do desenho em mm

Figura 2.29 – Detalhe das dimensões e armadura das vigas (Sallaberry, 2005)

Tabela 2.13 – Distribuição do reforço das vigas (Sallaberry, 2005)

Viga	Reforço		
	Flexão (mm)	b_f (mm)	L_f (mm)
VR-1	reforço com 1 camada de SikaWrap Hex 230-C no fundo da viga	50	1500
VR-2	reforço com 2 camadas de SikaWrap Hex 230-C no fundo da viga	50	1500
VR-3	reforço com 3 camadas de SikaWrap Hex 230-C no fundo da viga	50	1500
VR-4	reforço com 4 camadas de SikaWrap Hex 230-C no fundo da viga	50	1500

O concreto foi feito com betoneira, os resultados dos ensaios das propriedades do concreto são apresentados na Tabela 2.14. O tipo de aço utilizado foi CA-50 e CA-60. A manta utilizada no reforço a flexão das vigas foi *SikaWrap Hex-230C*, com as seguintes propriedades: módulo de elasticidade: 230 GPa, resistência a tração: 3500 MPa e deformação máxima específica na ruptura: 1,5%. A resina epóxica *Sikadur-330* e suas propriedades foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 2.14 – Propriedades do concreto (Sallaberry, 2005)

Viga	Idade (dias)	Resistência Compressão		Resistência Tração
		f_{cm} (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	f_{ctm} (MPa)
VR - 1	64	27,3	1,80	2,81
VR - 2	65	29,0	1,41	2,20
VR - 3	68	30,1	1,01	2,42
VR - 4	68	28,0	3,20	2,13
VR - 5	64	28,9	1,39	2,42

Os resultados dos ensaios das vigas são apresentados na Tabela 2.15. É importante notar que todas as vigas reforçadas com a manta de fibra de carbono apresentaram modo de ruptura de descolamento, além do escoamento da armadura de aço interna. Igualmente, na Figura 2.30 são mostrados os diagramas carga-flecha das vigas ensaiadas.

Tabela 2.15 – Resultados da resistência à flexão das vigas (Sallaberry, 2005)

Viga						Reforço				Modo de Ruptura
Nome	f_{cm} (Mpa)	A_s (mm ²)	A_s' (mm ²)	P_{cr} (kN)	P_u (kN)	Flexão	b_f (mm)	L_f (mm)	A_f (mm ²)	
VR-1	27,3	120	62	8,0	43,0	1 camada de manta de fibra de carbono	50	1500	17	Descolamento do reforço e posterior ruptura por flexão
VR-2	29,0			9,0	46,0	2 camadas de manta de fibra de carbono			33	Descolamento do reforço e posterior ruptura por flexão
VR-3	30,1			12,0	44,0	3 camadas de manta de fibra de carbono			50	Descolamento do reforço e posterior ruptura por flexão
VR-4	28,0			6,0	43,5	4 camadas de manta de fibra de carbono			66	Descolamento do reforço e posterior ruptura por flexão
VR-5	28,9			6,0	44,0	viga de referência sem reforço			-	Escoamento da armadura longitudinal interna e esmagamento do concreto

P_{cr} = carga de fissuração

P_u = carga última

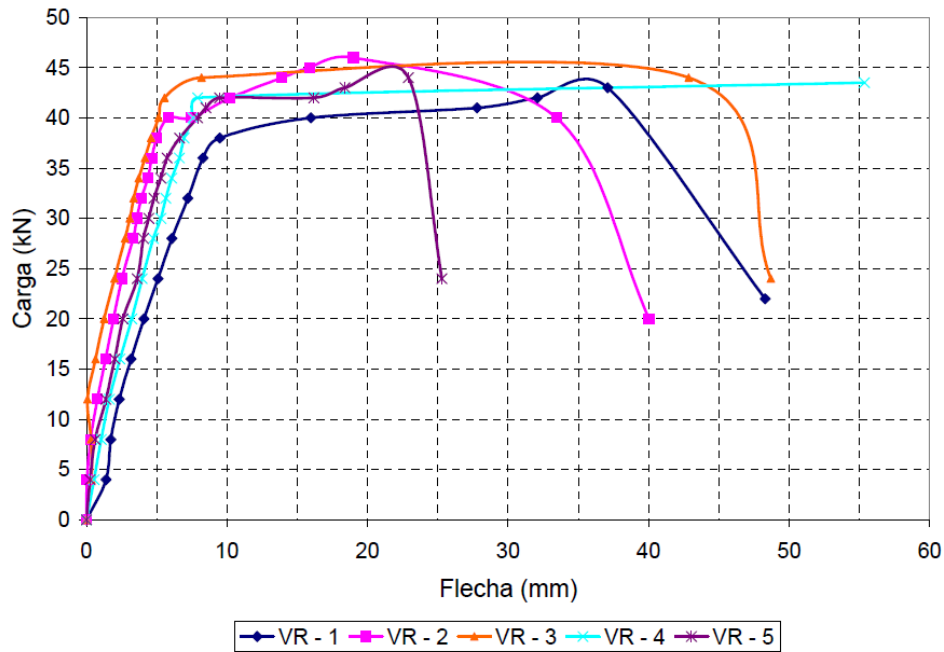


Figura 2.30 – Diagramas carga- flecha das vigas ensaiadas (Sallaberry, 2005)

As conclusões desta dissertação são apresentadas a seguir:

- O reforço à flexão com colagem de mantas de fibra de carbono em vigas de concreto armada permitiu uma diminuição na deformação da armadura longitudinal interna. A maior área de reforço teve menor deformação da armadura.
- A deformação limite última encontrada na manta de fibra de carbono das vigas ensaiadas foi de 4‰, este valor parece aceitável para evitar o descolamento do reforço. No entanto a deformação limite da manta é de 13‰ fornecida pelo fabricante, então a fibra não está sendo aproveitada totalmente. Isto pode estar acontecendo porque a manta não tinha sistema adicional de ancoragem.
- Não foi possível estabelecer se a variação do número de camadas influi no limite da deformação da manta de fibra de carbono.
- Os cálculos da resistência das vigas foram aceitáveis aplicando a teoria da flexão simples e levando em conta os modos de ruptura.

2.4.2.4 - Gamino e Nogueira (2006)

O objetivo principal deste trabalho é avaliar e comparar os modelos de projeto para reforço à flexão e cisalhamento de estruturas reforçadas com fibras de carbono coladas na

superfície do concreto, com as diferentes normas existentes no mundo (ACI, fib-14 e JSCE).

O programa experimental consistiu do ensaio de trinta e três vigas. Foram divididas em três grupos:

- Dezesesseis vigas de seção retangular com reforço à flexão com mantas de fibra de carbono: duas para referência sem reforço (REF1 e REF2), oito reforçadas com uma camada de fibra tipo *Sika Wrap Hex* (VF1 a VF8), duas reforçadas com uma camada de reforço de fibra tipo *Fosfober C* (VF9 e VF10), uma com duas camadas do reforço anterior (VF11) e três com uma camada de reforço traspasse de 10 cm, 15 cm e 20 cm (VF12, VF 13 e VF14). A resistência do concreto usado foi de 45 MPa e o aço utilizado no reforço interno foi CA-50. O detalhe do ensaio das vigas retangulares é mostrado na Figura 2.31.

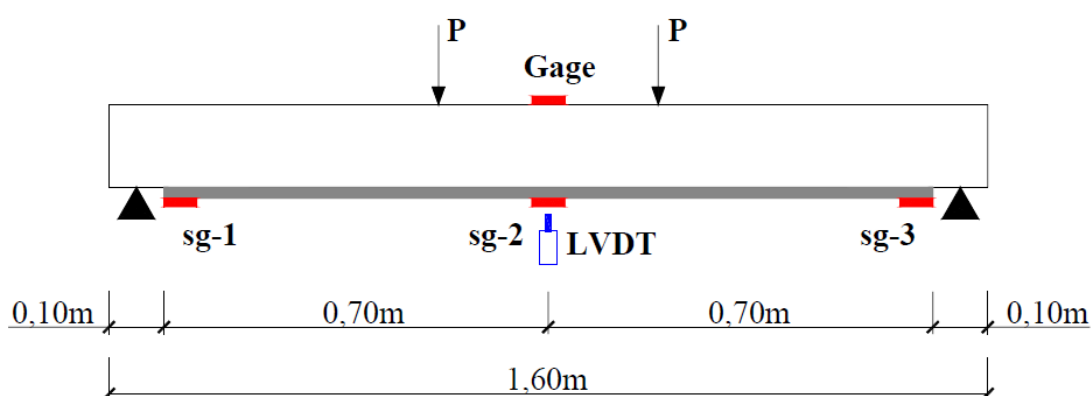


Figura 2.31 – Detalhe das vigas retangulares ensaiadas (Gamino e Nogueira, 2006)

- Nove vigas de seção “T” com reforço à flexão: duas para referência sem reforço (VR01 e VR02), duas vigas com duas camadas de manta de fibra tipo TEI 300 (VF01 e VF02), duas vigas com duas camadas de manta de fibra tipo *MBrace CF-130* (VF03 e VF04), duas vigas com duas camadas de manta de fibra tipo *Fosfiber C* (VF05 e VF06) e uma reforçada com laminado de fibra tipo *Sika Carbodur H514*. A resistência média do concreto foi de 60 MPa e o aço utilizado foi CA-50. Todas as vigas possuíam seção transversal de 12 cm de base, 22 cm de altura da alma, 8 cm de altura da mesa e 40 cm de largura da mesa. O detalhe do ensaio das vigas “T” é apresentado na Figura 2.32.

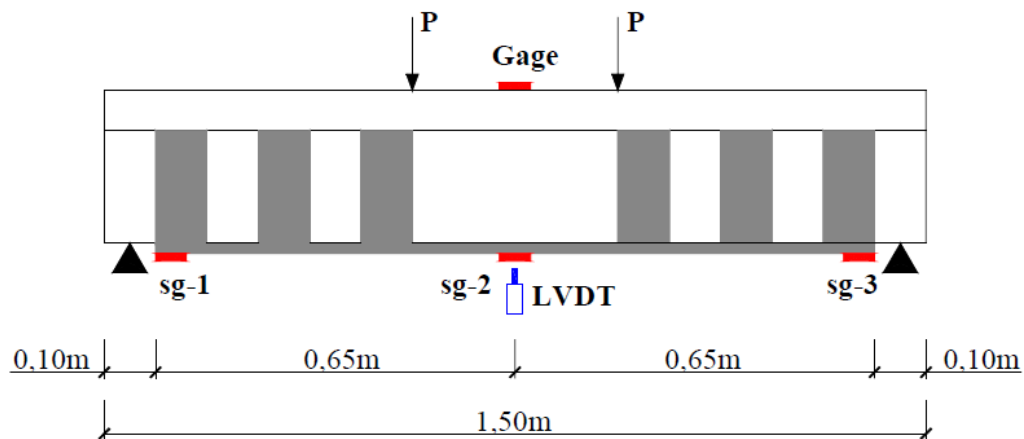


Figura 2.32 – Detalhe das vigas “T” reforçadas a flexão (Gamino e Nogueira, 2006)

- Oito vigas de seção “T” reforçadas ao cisalhamento: duas para referência sem reforço (VR03 e VR04), uma viga com uma camada de reforço em “U” tipo TEI 300 (VC01), duas vigas com uma camada de reforço em “U” tipo *MBrace CF-130* (VC02 e VC03), duas vigas com uma camada de reforço em “U” tipo *Fosfiber C* (VC05 e VC06) e uma viga reforçada com laminado com disposição em dois lados do tipo *Sika Carbodur H514* (VC07). O detalhe do ensaio é ilustrado na Figura 2.33.

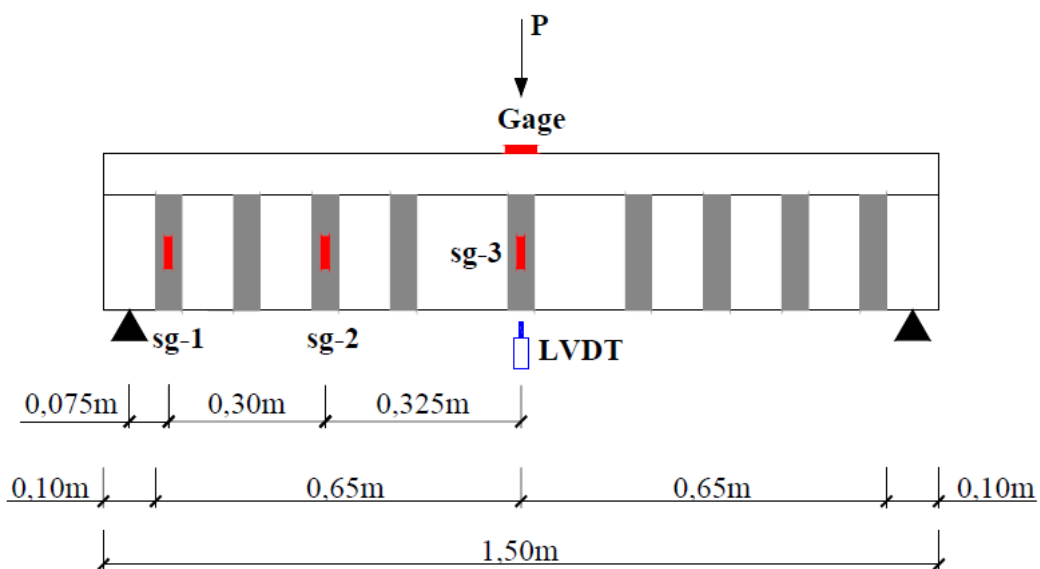


Figura 2.33 – Detalhe das vigas “T” reforçadas ao cisalhamento (Gamino e Nogueira, 2006)

Após a realização dos ensaios foram feitas comparações entre os dados encontrados experimentalmente e os dados das diferentes formulações do ACI, FIB e CHEN (2001).

Nas Tabelas 2.16, 2.17 e 2.18 são apresentadas os resultados dos ensaios e as comparações das vigas retangulares reforçadas à flexão e das vigas “T” reforçadas à flexão e ao cisalhamento, respectivamente.

Tabela 2.16 – Valores teóricos e experimentais das vigas retangulares reforçadas a flexão (Gamino e Nogueira, 2006)

Vigas	M (kN.m)			Δ (%)	
	Experimental	ACI	FIB	ACI	FIB
VF1 a VF8	8,1	7,3	8,8	+10,95	-8,64
VF9 a VF10 e VF12 a VF14	8,02	7,4	8,7	+8,38	-8,48
VF11	9,4	8,7	11,5	+8,04	-22,34

Tabela 2.17 – Valores teóricos e experimentais das vigas “T” reforçadas a flexão (Gamino e Nogueira, 2006)

Vigas	M (kN.m)			Δ (%)	
	Experimental	ACI	FIB	ACI	FIB
VF 01/VF02	51,2	44,7	46,7	+14,54	+9,64
VF 03/VF04	59,2	52,4	54,5	+12,98	+8,62
VF 05/VF06	52,3	39,5	42,4	+32,40	+23,35
VF07	39,9	43,8	45,8	-9,77	-14,79

Tabela 2.18 – Valores teóricos e experimentais das vigas “T” reforçadas ao cisalhamento (Gamino e Nogueira, 2006)

Vigas	V _r (kN)				Δ (%)		
	Experimental	ACI	FIB	CHEN; TENG (2001)	ACI	FIB	CHEN; TENG (2001)
VC 01	37,5	29,2	17,5	36,1	+28,42	+114,3	+3,88
VC 03	27,5	37,4	30	43,3	-36,0	-9,09	-57,45
VC 04	80	79,3	59,3	---	+0,88	+34,91	---
VC 05	49	25,5	19,4	35,2	+92,16	+152,6	+39,2
VC 06	65	55,3	41,9	---	+17,54	+55,13	---
VC 07	31	98,2	34,6	50,6	-216,8	-11,61	-63,22

Os resultados encontrados permitem concluir que:

- Os valores últimos de momento de ruptura obtidos nos ensaios a flexão das vigas retangulares são mais próximos aos valores teóricos encontrados com o uso da norma ACI 440R-1996. Os valores calculados com a norma da *Bulletin 14 FIB:2001* ficaram superiores aos valores experimentais.

- Para as vigas “T” reforçadas a flexão, os valores calculados com a norma *Bulletin 14* FIB:2001 são maiores que os valores calculados com a norma ACI 440R-1996. Embora os dados da norma da FIB ficassem mais próximos dos valores obtidos experimentalmente, exceto para a viga VC07.

2.4.2.5 - MENEGHETTI (2007)

Esta tese tem como objetivo estudar os mecanismos de falha prematura que ocorrem em estruturas de concreto armado reforçadas com materiais compósitos (vidro, carbono e aramida), devido ao carregamento cíclico e ao efeito da concentração de tensão no compósito na região de fissuração do concreto.

O programa experimental é descrito na Figura 2.34. Ensaios básicos (resistência e módulo de elasticidade) foram feitos para garantir o melhor entendimento do comportamento estrutural de elementos de concreto armado reforçados com PRF.

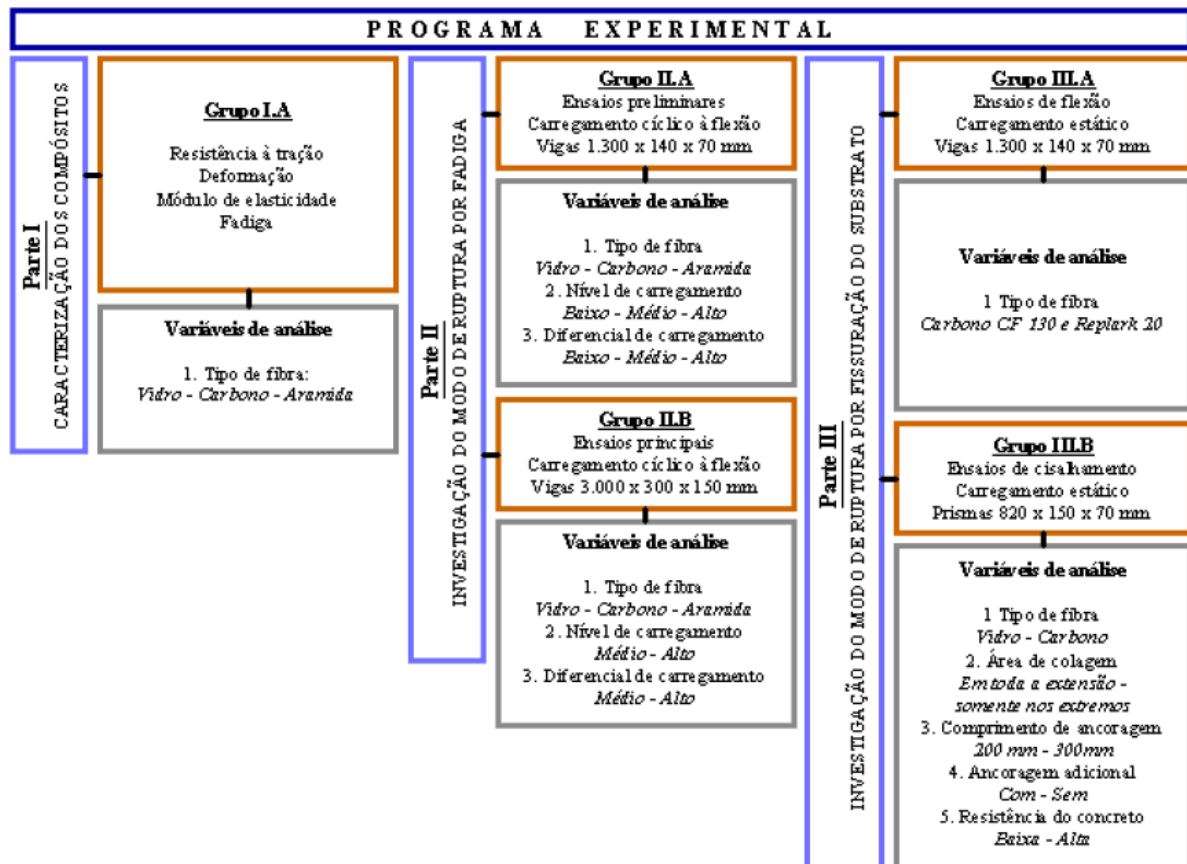


Figura 2.34 – Fluxograma do programa experimental (Meneghetti, 2007)

As propriedades mecânicas do material que foi utilizado nos ensaios e avaliado sobre carregamento estático são apresentadas na Tabela 2.19.

Tabela 2.19 – Propriedades mecânicas das fibras (Meneghetti, 2007)

Compósito	Resistência máxima (MPa)	Deformação máxima (‰)	Módulo de elasticidade (GPa)
Vidro EG 900	320,97	8,95	20,63
Vidro TRB 600	199,03	9,50	35,16
Carbono CF 130	841,51	8,85	74,20
Carbono Replark 20	651,38	8,83	53,38
Aramida AK 60	419,98	8,43	51,13

Para a realização dos ensaios de fadiga de vigas reforçadas com polímeros reforçados com fibras (PRF), escolheu-se o tipo de flexão de quatro pontos. Para o estudo preliminar de fadiga foram feitas 28 vigas menores do grupo IIA, sendo 4 ensaiadas sob carga estática e 24 sob carregamento cíclico. A resistência a compressão do concreto utilizado na confecção das vigas foi de 30 MPa, as barras de aço foram do tipo CA-50 e foram utilizados três tipos diferentes de fibras para o reforço (carbono *Replark 20*, vidro TRB 600 e aramida AK 60). Na Figura 2.35 são mostradas as dimensões da viga, o detalhamento, a disposição do reforço e o esquema de carregamento.

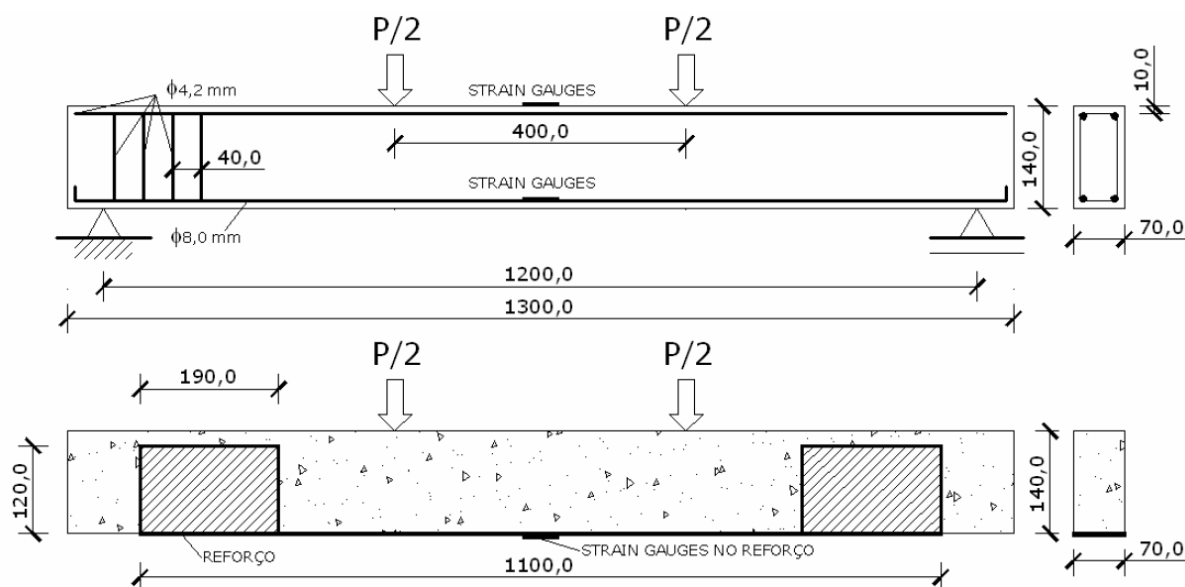


Figura 2.35 – Detalhes e esquema de carregamento das vigas do grupo IIA (Meneghetti, 2007)

O grupo IIB foi constituído por 12 vigas maiores, sendo 4 ensaiadas estaticamente e as restantes sob carregamento cíclico. Elas foram reforçadas com três sistemas de reforço com fibras de carbono, vidro e aramida. Vigas de referência foram ensaiadas tanto no carregamento estático como cíclico. Os valores médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade para o concreto foram 41,4 MPa e 37,6 GPa, respectivamente. O aço usado no reforço interno foi tipo CA-50. A Figura 2.36 ilustra as dimensões, detalhamento e configuração do reforço das vigas; além disso, a Tabela 2.20 apresenta a denominação das vigas deste grupo.

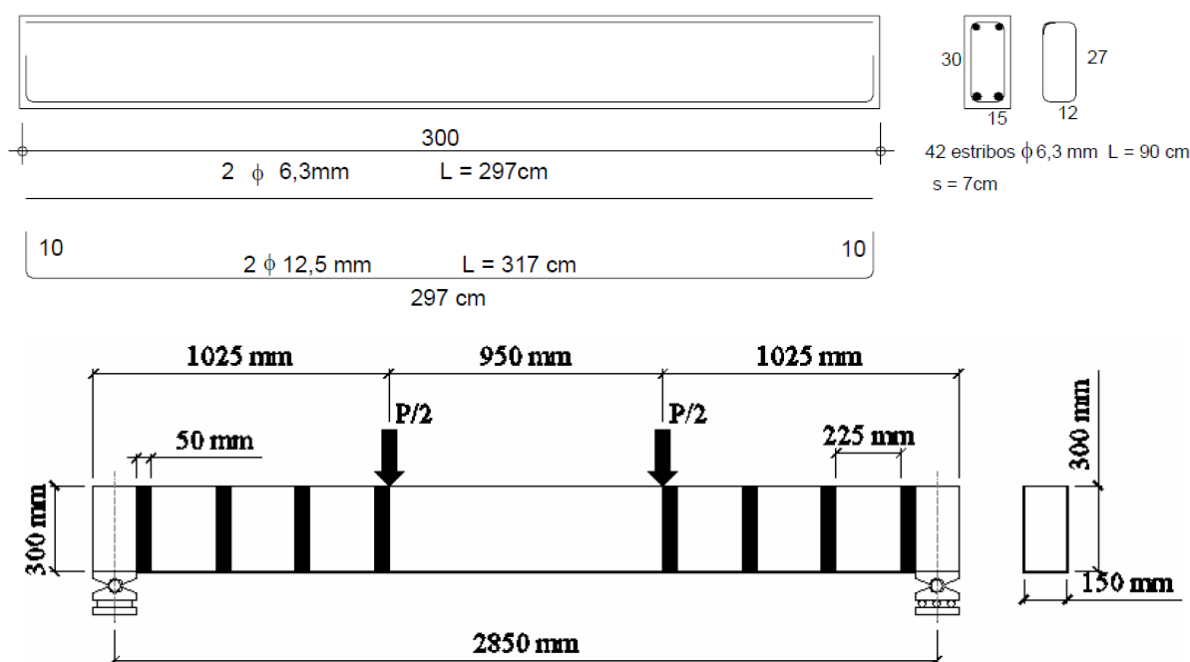


Figura 2.36 – Detalhes e esquema de carregamento das vigas do grupo IIB (Meneghetti, 2007)

Tabela 2.20 – Denominação das vigas do grupo IIB (Meneghetti, 2007)

Denominação	Descrição	Teste
VT.E	Viga testemunho	Estático
VT.F_1 e VT.F_2	Vigas testemunho	Fadiga
VRC.E	Viga reforçada com uma camada de fibra de carbono	Estático
VRC.F_1 e VRC.F_2	Vigas reforçadas com uma camada de fibra de carbono	Fadiga
VRV.E	Viga reforçada com quatro camadas de fibra de vidro	Estático
VRV.F_1 e VRV.F_2	Vigas reforçadas com quatro camadas de fibra de vidro	Fadiga
VRA.E	Viga reforçada com uma camada de fibra de aramida	Estático
VRA.F_1 e VRA.F_2	Vigas reforçadas com uma camada de fibra de aramida	Fadiga

A seguir na Tabela 2.21 são apresentados os resultados das cargas últimas, o modo de ruptura e a comparação com o dimensionamento pelo ACI 440.2R (2002) das vigas ensaiadas do grupo IIA. A relação carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas do grupo IIA é mostrada na Figura 2.37.

Tabela 2.21 – Cargas e modos de ruptura do grupo II.A (Meneghetti, 2007)

Viga	Carga de ruptura (kN)		$P_{exp}/P_{teórico}$	Modo de ruptura
	Teórica	Experimental		
VTE	31,1	37,42	1,20	Escoamento do aço seguido por esmagamento do concreto
VAE	34,55	47,71	1,38	Esmagamento do concreto antes da ruptura do reforço
VCE	33,75	45,28	1,34	Esmagamento do concreto antes da ruptura do reforço
VVE	35,43	38,44	1,08	Ruptura do reforço no meio vão

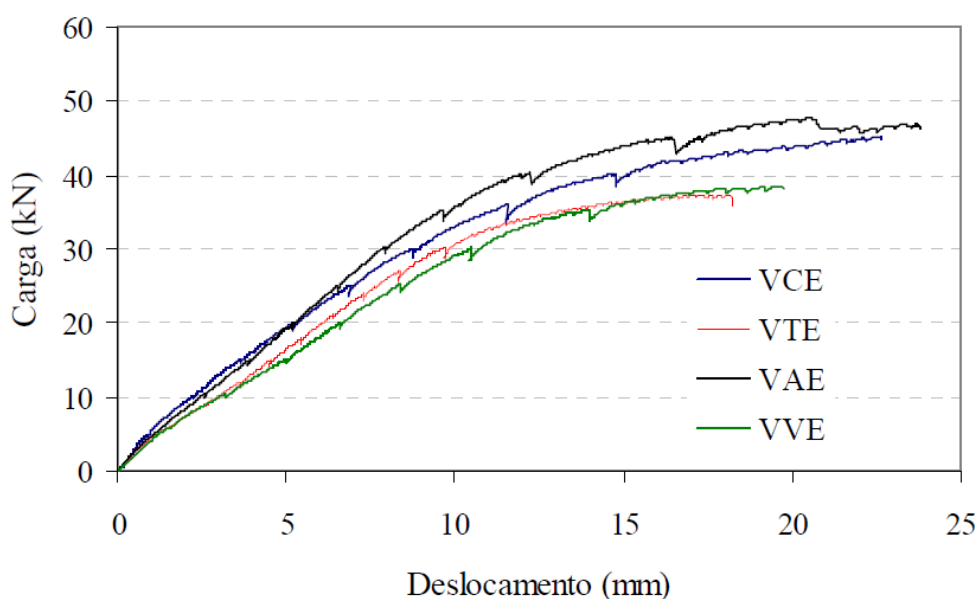


Figura 2.37 – Diagrama carga-deslocamento para as vigas do grupo IIA ensaiadas estaticamente (Meneghetti, 2007)

O desempenho do reforço também foi avaliado nas vigas do grupo IIB, a Tabela 2.22 apresenta os valores de carga última, modos de ruptura observados experimentalmente e a comparação com a norma ACI 440.2R:2002. Do mesmo modo, a relação carga-deslocamento no meio do vão das vigas reforçadas com a viga de referência é ilustrada na Figura 2.38.

Tabela 2.22 – Cargas e modos de ruptura do grupo II.B (Meneghetti, 2007)

Viga	Carga de ruptura (kN)		$P_{exp}/P_{teórico}$	Modo de ruptura
	Teórica	Experimental		
VT.E	80,88	103,16	1,27	Escoamento do aço seguido por esmagamento do concreto
VRC.E	103,26	128,68	1,25	Descolamento e fendilhamento do compósito na região entre os laços de ancoragem adicional
VRA.E	102,13	134,50	1,32	Descolamento e fendilhamento do compósito na região entre os laços de ancoragem adicional
VRV.E	130,61	214,16	1,64	Descolamento dos laços de ancoragem adicional após esmagamento do concreto

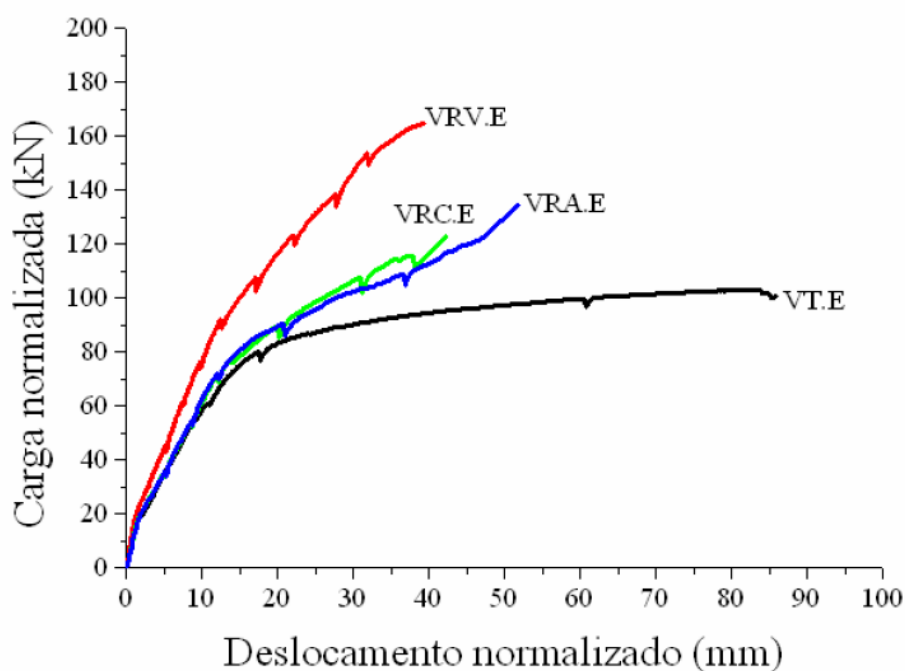


Figura 2.38 – Diagrama carga-deslocamento para as vigas do grupo IIB ensaiadas estaticamente (Meneghetti, 2007)

Algumas das principais conclusões da autora são as seguintes:

- O desempenho à fadiga dos diferentes compósitos ensaiados foi distinto, sendo que os compósitos de fibra de carbono se mostraram como os mais resistentes à fadiga, embora seu desempenho caia mais rapidamente com o aumento da variação de tensão

aplicada, enquanto os compósitos de fibra de vidro se mostraram como os mais suscetíveis à fadiga.

- Sobre ação de cargas estáticas, se forem utilizados laços adicionais de ancoragem para prevenir o descolamento, pode-se mobilizar adequadamente o reforço, atingindo os modos de ruptura desejados – esmagamento do concreto ou ruptura por tração do compósito.
- Em alguns casos podem ocorrer rupturas prematuras do compósito em regiões de fissuração do concreto. Os ensaios realizados parecem indicar que estas rupturas não ocorrem primariamente por desenvolvimento de tensões de cisalhamento no compósito, mas sim pela ocorrência localizada de altas deformações de tração.

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste trabalho, o programa experimental teve por objetivo determinar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado, com seção “T”, reforçadas com dois tipos de polímeros colados externamente: PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) ou CRFP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro) ou GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). Quando estes materiais compósitos trabalham conjuntamente são chamados materiais híbridos. A Tabela 3.1 apresenta as características de cada viga.

Tabela 3.1 – Características das Vigas

Grupo	Viga	Armadura de flexão	Características da viga
A	VR1 - RF	2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	Viga de referência, sem reforço
	VA1 - CC		2 camadas de tecido de fibra de carbono CF-130 (espessura de 0,165mm e largura de 140 mm)
	VA2 - CV		1 camada de tecido de fibra de carbono CF-130 (espessura de 0,165 mm e largura de 140 mm) e 1 camada de tecido de fibra de vidro EG-900 (espessura de 0,357 mm e largura de 140 mm)
	VA3 - VV		2 camadas de tecido de fibra de vidro EG-900 (espessura de 0,357 mm e largura de 140 mm)
	VA4 - VC		1 camada de tecido de fibra de vidro EG-900 (espessura de 0,357 mm e largura de 140 mm) e 1 camada de tecido de fibra de carbono CF-130 (espessura de 0,165 mm e largura de 140 mm)

As dimensões das vigas do programa experimental, seção transversal e comprimento, seguiram as mesmas utilizadas na linha de pesquisa desenvolvida no programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB, onde já foram ensaiadas oito vigas por Salles Neto (2000), oito vigas por Silva Filho (2001), oito vigas

por Araújo (2002), dezenove vigas por Castro (2003) e oito vigas por Lima (2004) com um total de cinquenta e uma vigas de concreto armado.

3.2 - DETALHAMENTO DAS VIGAS

Nesta seção apresentam-se as características e geometria das vigas, o esquema estático e de carregamento, o tipo de ensaio, o detalhamento da armadura e o posicionamento dos reforços.

3.2.1 – Características geométricas das vigas

Todas as vigas ensaiadas possuem seção transversal em “T”, tendo largura da mesa (b_f) de 550 mm, largura da alma (b_w) de 150 mm, altura total (h) de 400 mm, altura da mesa (h_f) de 100 mm, comprimento total de (L) de 4400 mm e vão livre simplesmente apoiado de 4000 mm. Na Figura 3.1 são mostradas as dimensões da seção transversal da viga.

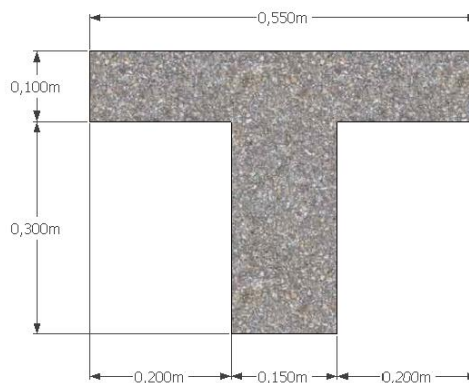


Figura 3.1 – Seção transversal das vigas

3.2.2 - Esquema estático de carregamento

O tipo de ensaio foi de flexão de quatro pontos, com duas cargas concentradas simétricas separadas 1,0 m e distanciadas 1,5 m dos apoios. A carga foi transmitida com um atuador hidráulico e com uma viga metálica de distribuição. Na figura 3.2 ilustra-se o esquema de ensaio das vigas.

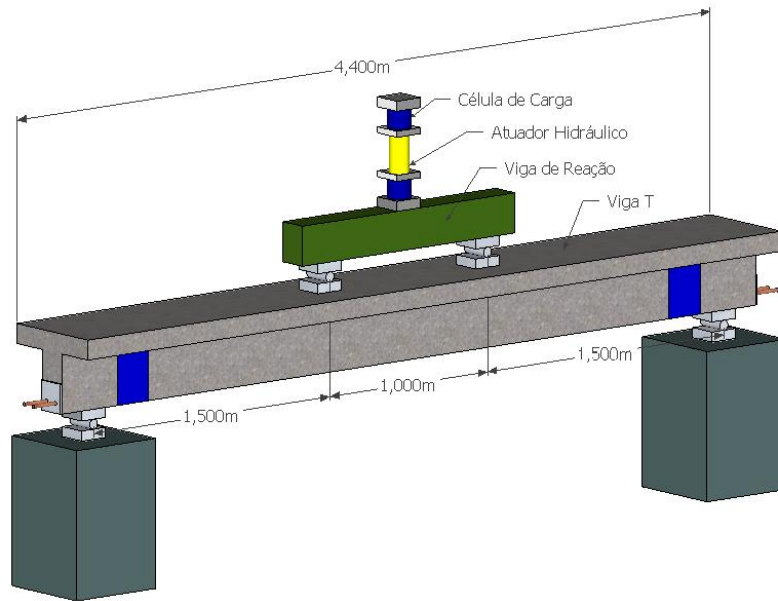


Figura 3.2 – Esquema estático de carregamento

A carga foi aplicada de forma incremental até a ruptura, sendo medida com uma célula de carga com capacidade de 500 kN, ligada a um mostrador digital. A célula de carga é montada em linha com o cilindro hidráulico com capacidade de 1.000 kN montado no pórtico de ensaios do Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, acionado por uma bomba hidráulica manual com capacidade de carga de 500 kN (*Enerpac*), como mostra a Figura 3.3.



Figura 3.3 – Esquema de ensaio

3.2.3 - Dimensionamento das vigas

A capacidade de carga das vigas ensaiadas foi estabelecida com base nos esforços indicados nos diagramas de momento fletor e esforço cortante, mostrados na Figura 3.4, produzidos pelo carregamento descrito anteriormente.

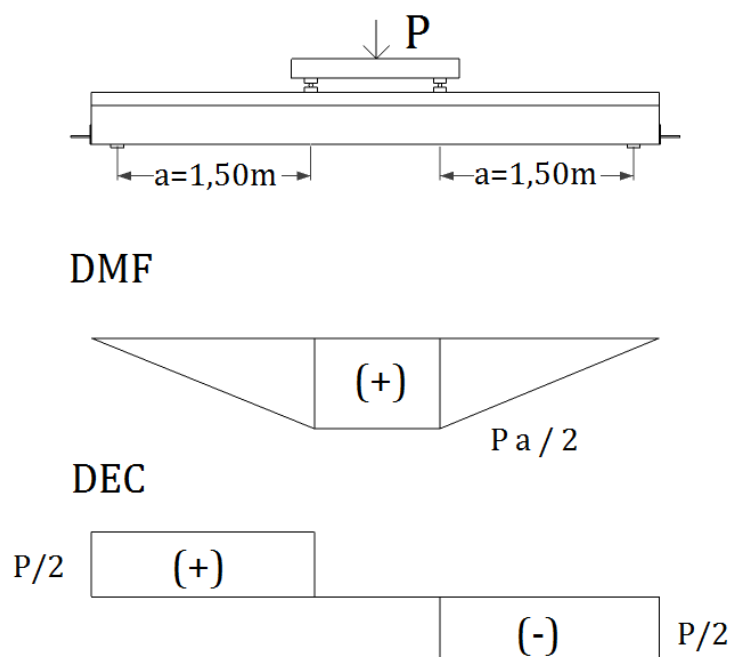


Figura 3.4 – Diagramas de esforços das vigas

3.2.3.1 – Resistência à flexão

O cálculo da resistência à flexão da viga de referência foi feito de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2007 no estágio 2, normalmente armada (taxa de armadura de 0,63%). A resistência à compressão do concreto prevista foi (f_c) de 40 MPa, a tensão de escoamento do aço (f_y) de 500 MPa e o módulo de elasticidade de 210.000 MPa, com cobrimento da armadura de 30 mm a partir da face dos estribos na face tracionada e de 25 mm nas faces laterais. Na Tabela 3.2 são apresentados os valores calculados da resistência à flexão da viga de referencia.

Tabela 3.2 – Cálculo preliminar à flexão

Viga	ρ (%)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	d (mm)	x (mm)	x/d	M_u (kN.m)	P_u (kN)
VR1 - RF	0,63	40	500	628	352	35,7	0,101	108,1	144,16

3.2.3.2 – Resistência ao cisalhamento

A armadura de cisalhamento foi dimensionada pelas normas ABNT NBR 6118:2007 e ACI 318:2008 para que não ocorresse ruptura por cisalhamento da viga após o reforço, de forma que toda ruptura ocorresse por flexão. Para o aço da armadura de cisalhamento, foram considerados uma tensão de escoamento (f_{yk}) de 500 MPa e módulo de elasticidade de 210.000 MPa. Foram utilizados estribos verticais com $6,28 \text{ cm}^2/\text{m}$ (ϕ 8mm cada 16cm). Na Tabela 3.3 são apresentados os valores das parcelas de resistência ao esforço cortante atribuídas ao concreto e a armadura transversal, o valor total do esforço cortante resistente e a carga última correspondente.

Tabela 3.3 – Verificação da resistência ao cisalhamento

Norma	V_c (kN)	V_s (kN)	V_u (kN)	$P_{u,cis.}$ (kN)
NBR 6118:2007	78	99	177	354
ACI 318:2008	50	111	161	322

3.3 – DETALHAMENTO DA ARMADURA E ANCORAGEM

3.3.1 – Detalhamento das armaduras de flexão e cisalhamento

A Figura 3.5 apresenta o detalhamento das 5 (cinco) vigas, que foram submetidas a carregamento monotônico até a ruptura. A armadura longitudinal inferior foi constituída por duas barras de aço CA-50 com 20 mm de diâmetro (taxa de armadura longitudinal geométrica de 0,63%). A armadura transversal foi composta por 29 estribos verticais do aço CA-50 de 8,0 mm de diâmetro, espaçados a cada 16 cm. Na mesa foram utilizados 45 estribos de 6,3 mm de diâmetro, espaçados a cada 10 cm. Como porta-estribos foram empregadas seis barras de 6,3 mm de diâmetro de aço CA-50.

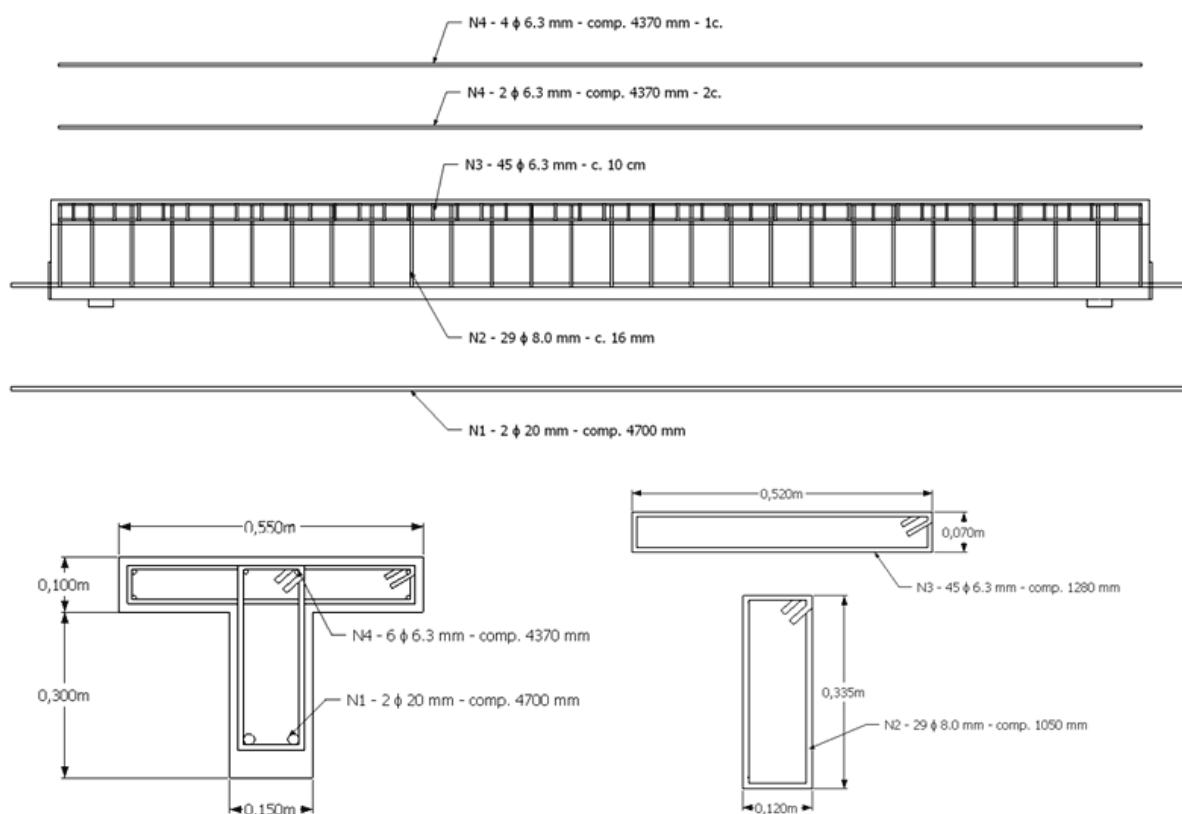


Figura 3.5 – Detalhamento da armadura das vigas

3.3.2 – Ancoragem e cobrimento da armadura de flexão

De acordo com os itens 6.4 e 7.4 da norma ABNT NBR 6118:2007, para um meio ambiente urbano, com uma agressividade moderada e um risco de deterioração da estrutura pequeno; o cobrimento da armadura no bordo inferior da viga foi de 30 mm e de 25 mm nas demais faces.

Como as barras longitudinais possuíam diâmetro elevado e para evitar a ruptura por falha de ancoragem da armadura, segundo o item 9.4.7 da norma ABNT NBR 6118:2007 foi adotado um sistema de ancoragem por meio de dispositivos mecânicos. Foram utilizadas chapas de aço de dimensões 150 mm x 150 mm, com espessura de 10 mm (Figura 3.6) e soldadas à armadura principal de flexão. Esse mecanismo de ancoragem tem sido utilizado nas pesquisas realizadas no Laboratório de Estruturas, apresentado comportamento adequado.

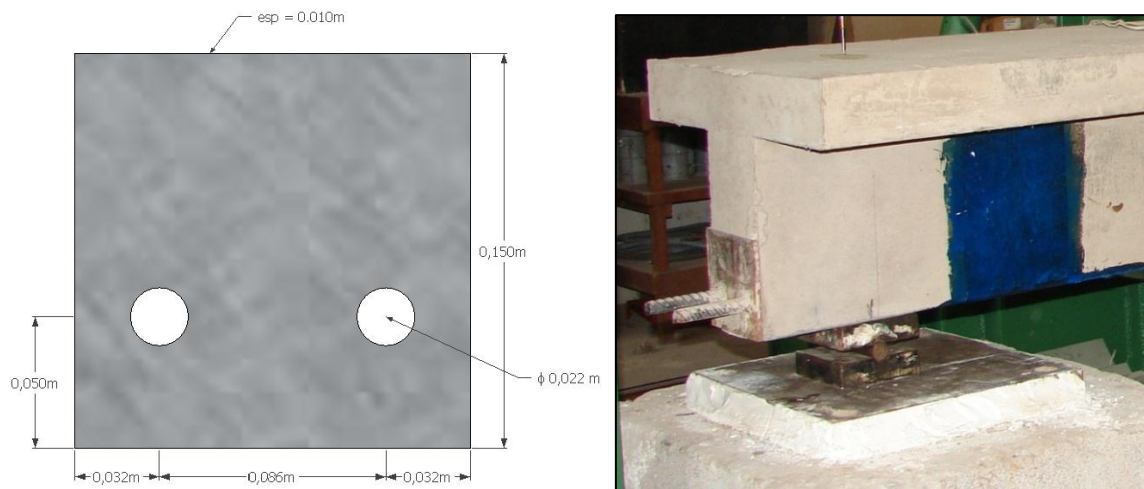


Figura 3.6 – Detalhamento das chapas de ancoragem

3.4 - REFORÇO DAS VIGAS

3.4.1 - Propriedades do material de reforço

Nesta pesquisa foram utilizados dois materiais de reforço colados externamente: tecido de fibra de carbono CF-130 W (PRFC) e tecido de fibra de vidro EG-900 (PRFV). Ambos desenvolvidos pela *Master Builders Technologies* e usados no sistema de compósito estrutural *MBrace*. Além disso, foi usado o adesivo *MBrace Saturant*.

As características dos reforços estão detalhadas na Tabela 3.4, conforme as especificações dos fabricantes. A nomenclatura é a seguinte: E é o módulo de elasticidade, f_{fu} o limite de resistência à tração e ϵ_{fu} a deformação última.

Tabela 3.4 – Características dos materiais de reforço (dados do fabricante)

Tipo de Reforço	Especificação	Espessura (mm)	f_{fu} (MPa)	ϵ_{fu} (‰)	E (GPa)
Tecidos de F. Carbono PRFC	CF-130 W	0,165	3.800	16,7	227,0
Tecidos de F. Vidro PRFV	EG-900	0,357	1.517	21,0	72,4

Foi utilizada a norma ACI 440.2R:2008 para o cálculo da largura (20 cm) da ancoragem lateral instalado nas duas extremidades do reforço, utilizadas para reverter a ruptura por descolamento do PRF ou delaminação do cobrimento.

3.4.2 – Cálculo da resistência à flexão após o reforço

Para calcular a resistência à flexão das vigas reforçadas foram utilizados os critérios da norma ACI 440.2R-08 e do *Bulletin* 14 FIB:2001. Adotou-se um coeficiente de segurança unitário, resistência à compressão do concreto $f_c = 40$ MPa e tensão de escoamento do aço $f_y = 500$ MPa. Foram calculados o momento fletor resistente último e a carga última correspondente, conforme apresentado nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Resistência estimada à flexão pelo ACI 440.2R:2008

Grupo	Modelo	A_f (mm ²)		f_f (MPa)		ε_f (%)	ε_c (%)	ε_s (%)	M_u (kN.m)	$P_{u,teór}$ (kN)	Incr. Ref (%)
		C	V	C	V						
A	VR1 - RF						1,1	10,0	107,5	143,4	
	VA1 - CC	46,20		2156,5		9,5	1,2	8,3	144,9	193,2	34,7
	VA2 - CV	23,10	49,98	2156,5	704,9	9,5	1,1	8,3	139,6	186,2	29,8
	VA3 - VV		99,96		838,5	11,3	1,1	9,9	140,1	186,8	30,3
	VA4 - VC	23,10	49,98	2156,5	704,9	9,5	1,1	8,3	139,6	186,2	29,8

Tabela 3.6 – Resistência estimada à flexão pelo *Bulletin* 14 FIB:2001

Grupo	Modelo	A_f (mm ²)		f_f (MPa)		ε_f (%)	ε_c (%)	ε_s (%)	M_u (kN.m)	$P_{u,teór}$ (kN)	Incr. Ref (%)
		C	V	C	V						
A	VR1 - RF						1,1	10,0	107,6	143,5	
	VA1 - CC	46,20		1929,5		8,5	1,1	8,3	140,5	187,3	29,1
	VA2 - CV	23,10	49,98	1929,5	630,7	8,5	1,1	8,3	135,6	180,8	24,6
	VA3 - VV		99,96		630,7	8,5	1,1	9,9	130,7	174,2	20,1
	VA4 - VC	23,10	49,98	1929,5	630,7	8,5	1,1	8,3	135,6	180,8	24,6

3.5 – INSTRUMENTAÇÃO

3.5.1 – Deformações específicas no aço, concreto e reforço.

Todas as deformações medidas nos diferentes materiais foram registradas por um sistema de aquisição de dados fabricado pela HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik*), constituído por unidades de leitura eletrônica denominadas *Spider8* (Figura 3.7) e um programa de

gerenciamento destas unidades designado como *CatMan*. Nos módulos *Spider8* são ligados os extensômetros em $\frac{1}{4}$ de ponte, os defletômetros e a célula de carga. O programa *CatMan* permite fazer uma leitura direta dos dados experimentais. Na tabela 3.7 apresenta-se a nomenclatura de cada um dos extensômetros colados nos diferentes materiais.



Figura 3.7 – Sistema de aquisição de dados (Spider8)

Tabela 3.7 – Nomenclatura dos extensômetros

Nome	Descrição
EAIIF-01	Extensômetro do aço interno de flexão No. 01
EAEF-01	Extensômetro do aço externo de flexão No. 01
EAIIC-01	Extensômetro do aço interno de cisalhamento No. 01
EAEIC-01	Extensômetro do aço externo de cisalhamento No. 01
EAIIF-02	Extensômetro do aço interno de flexão No. 02
EAEF-02	Extensômetro do aço externo de flexão No. 02
EAIIF-03	Extensômetro do aço interno de flexão No. 03
EAEF-03	Extensômetro do aço externo de flexão No. 03
EAIIF-04	Extensômetro do aço interno de flexão No. 04
EAEF-04	Extensômetro do aço externo de flexão No. 04
EC01	Extensômetro do concreto No. 01
EC02	Extensômetro do concreto No. 02
EFFC01	Extensômetro da fibra de flexão No.1
EFFC02	Extensômetro da fibra de flexão No.2
EFFC03	Extensômetro da fibra de flexão No.3

3.5.1.1 - Armadura de flexão e cisalhamento

Para a determinação das deformações nas barras de armaduras longitudinais de flexão e nos estribos, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) uniaxiais da

marca Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda. do tipo PA-06-250BA-120L (F.S.= 2,11). Foram instrumentadas em cada viga, uma barra de reforço longitudinal e um estribo de cisalhamento.

Para melhorar a precisão na obtenção de dados da deformação da armadura, foi posicionado um extensômetro em cada lado da barra em cada ponto de medição. Na Figura 3.8 se apresentam os detalhes das posições de instrumentação dos extensômetros.

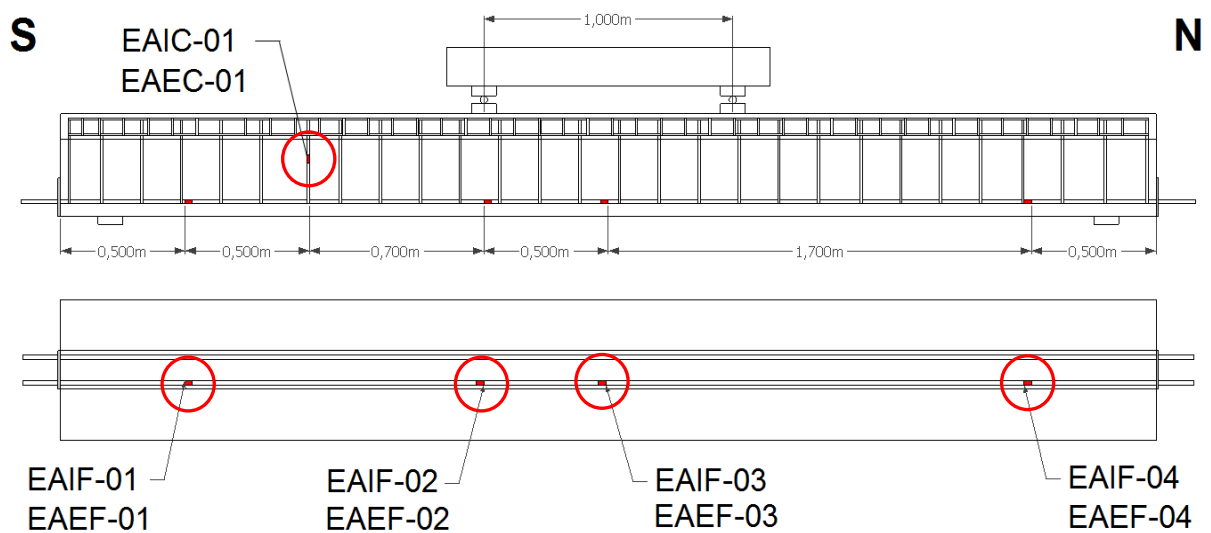
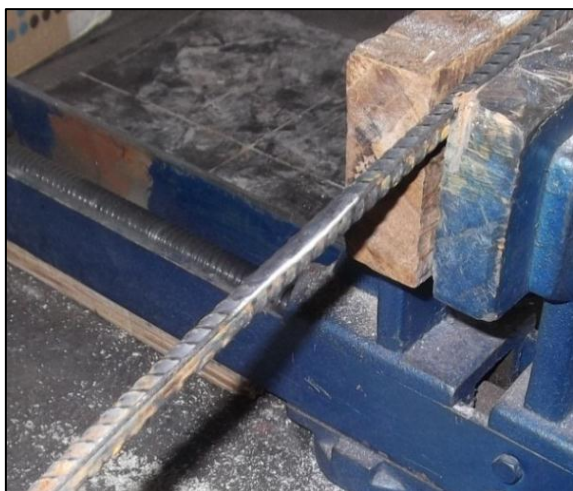


Figura 3.8 – Localização dos extensômetros elétricos na armadura de flexão e de cisalhamento

O procedimento para a colagem dos extensômetros foi o seguinte: lixamento da superfície do aço (Figura 3.9 (a)), limpeza com álcool isopropílico, fixação dos extensômetros com cola tipo cianoacrilática da marca *Super Bonder* (Figura 3.9 (b)), por último a solda dos fios (Figura 3.9 (c)). Para a proteção dos extensômetros foi aplicada uma camada de resina epoxídica flexível da marca *Araldite*, posteriormente uma proteção mecânica a base de silicone envolvida com uma fita isolante de autofusão (Figura 3.9 (d)).



(a) Lixamento da superfície



(b) Colagem do extensômetro



(c) Soldagem dos fios



(d) Proteção do extensômetro

Figura 3.9 – Processo de colagem dos Extensômetro no aço

3.5.1.2 – Concreto

A colocação dos extensômetros do concreto foi escolhida no ponto do maior tensão de compressão da viga, no meio do vão sob a mesa da viga, conforme a figura 3.10. O posicionamento deles procura fornecer uma deformação média na largura da mesa. Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) uniaxiais da marca Excel Sensores Ind. do tipo PA-06-201-BA-120L (F.S.=2,14).

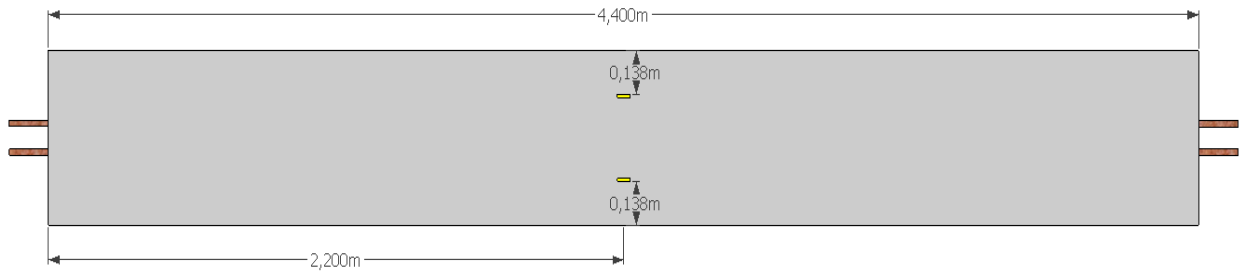


Figura 3.10 – Localização dos extensômetros elétricos na superfície superior da viga

O processo para a colagem dos extensômetros consistiu na preparação da superfície do concreto por meio de lixamento e limpeza com jato de ar comprimido. Posteriormente, os extensômetros foram fixados com cola tipo cianoacrilática da marca *Super Bonder*, como mostra a Figura 3.11.



Figura 3.11 – Colagem do extensômetro elétrico no concreto

3.5.1.3 - Reforço

Para fazer as medições das deformações do tecido de fibra de carbono CF-130 W (PRFC) e tecido de fibra de vidro EG-900 (PRFV), foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) uniaxiais da marca Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda. do tipo PA-06-250BA-120L (F.S.= 2,11). Os extensômetros foram localizados no meio do vão da viga e nos pontos da aplicação do carregamento, como mostra a figura 3.12.

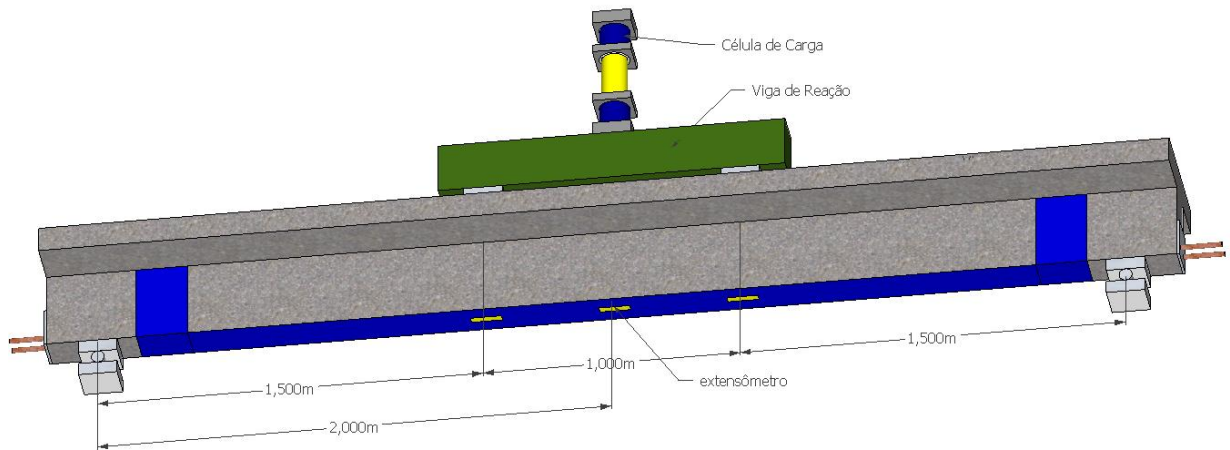


Figura 3.12 – Localização dos extensômetro elétrico na fibra

O procedimento para a fixação dos extensômetros na fibra foi: a regularização da superfície, realizado através de lixamento, mas visando somente retirar a resina saturante para chegar até a fibra. A seguir, fixação dos extensômetros com cola tipo cianoacrilática da marca *Super Bonder*. Por último, solda dos fios conforme a Figura 3.13.

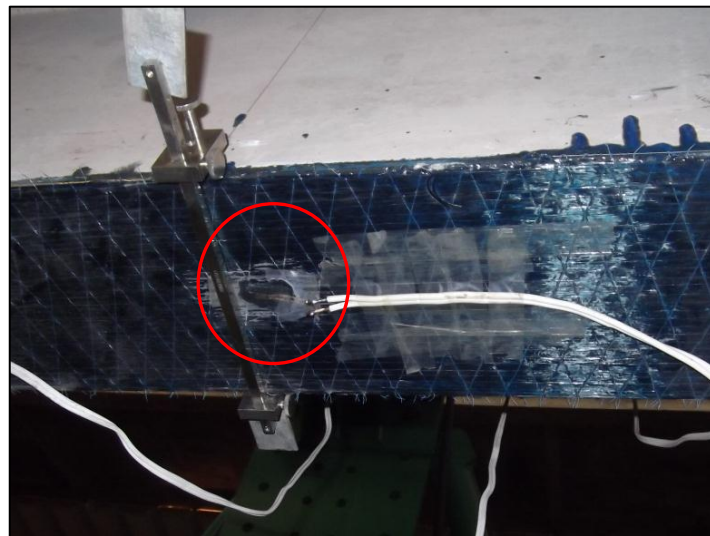


Figura 3.13 – Colagem do extensômetro elétrico na fibra

3.5.2 – Deslocamento vertical

Os deslocamentos verticais foram medidos por meio de sete (7) defletômetros indutivos, da marca HBM, instalados no meio da viga, nos dois pontos de aplicação de carga e a 75 cm depois do apoio, como mostram as Figuras 3.14 e 3.15. Para medir eventuais deslocamentos verticais foram colocados defletômetros sobre os dois apoios.



Figura 3.14 – Vista dos defletômetros

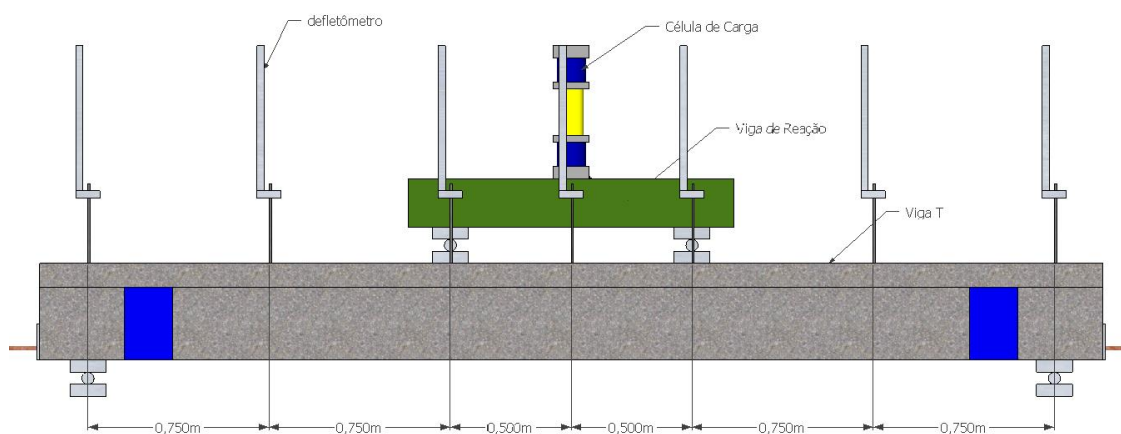


Figura 3.15 – Posicionamento dos defletômetros

3.6 – PROCESSO EXECUTIVO

3.6.1 - Montagem e concretagem das vigas

As formas metálicas utilizadas para a execução das vigas foram projetadas e construídas no Laboratório de Estruturas. O processo de preparação das formas consistiu na aplicação de desmoldante, colocação de separadores de armadura e aplicação de silicone nas juntas dos elementos metálicos.

As vigas foram concretadas em uma única etapa no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília – UnB. Após a

montagem das formas e confecção das armaduras, as vigas foram concretadas utilizando concreto usinado fornecido em caminhão betoneira de resistência estimada de projeto de 40 MPa, dosado na central. As Figuras 3.16 a 3.17 ilustram mais detalhes.



Figura 3.16 – Detalhe das formas



Figura 3.17 – Concretagem

Na etapa de concretagem foram feitos testes de abatimento de tronco de cone para a verificação da consistência do concreto, onde se obteve o resultado de 12,0 cm de abatimento (Figura 3.18). Além disso, foram moldados 40 corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm, para realização dos ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade (Figura 3.19).



Figura 3.18 – Ensaio de tronco de cone



Figura 3.19 – Corpos de Prova

Após a etapa de concretagem, o seguinte procedimento de cura para as vigas e os corpos de prova foi feito: colocação de tecidos de algodão molhados sobre a superfície de concreto exposta, umedecimento dos tecidos a cada três horas nos primeiros dois dias e duas vezes

por dia nos seguintes cinco dias. Adicionalmente, foi colocada sobre cada viga e nos corpos de prova uma lona plástica para melhorar as condições de retenção da umidade.

3.6.2 – Aplicação do reforço

A técnica utilizada no reforço das vigas foi colagem de polímeros reforçados com fibras (PRF) na superfície do concreto (CSC). Esta colagem se executou usando o sistema de reforço de estruturas de concreto armado *MBrace*. O processo para aplicação do reforço foi o seguinte:

- Preparo da superfície do concreto, por meio de lixamento mecânico até a eliminação total de impurezas ou contaminações superficiais. Também se lixou as arestas da viga na região de ancoragem da fibra, pois estas poderiam gerar concentração de tensões na fibra de carbono usada na ancoragem do sistema.
- Aplicação uniforme sobre toda a superfície do *MBrace Putty* (imprimador epoxídico) com pincel, para melhorar a aderência do sistema ao substrato.
- Aplicação da primeira camada de *MBrace Saturant* (resina saturante) com rolo.
- Colocação da primeira camada do tecido de fibra de carbono (CF-130 W) ou tecido de fibra de vidro (EG-900), sobre *MBrace Saturant* aplicado ainda fresco, pressionando com um rolo de ranhuras metálicas, até uma impregnação perfeita da fibra com o conjunto.
- Aplicação da segunda camada de *MBrace Saturant* (resina saturante) distribuído uniformemente com rolo.
- Colocação da segunda camada do tecido de fibra de carbono (CF-130 W) ou tecido de fibra de vidro (EG-900), sobre *MBrace Saturant* com ajuda do rolo.
- Aplicação da terceira camada de *MBrace Saturant* (resina saturante) distribuído uniformemente com rolo.
- Colocação das ancoragens da fibra (gravatas) de tecido de fibra de carbono (CF-130 W), sobre *MBrace Saturant* com ajuda do rolo.
- Aplicação da última camada de *MBrace Saturant* (resina saturante) sobre as ancoragens, distribuído uniformemente com rolo.

A figura 3.20 ilustra os procedimentos citados anteriormente.



(a) Preparo da superfície



(b) Aplicação do primer



(c) Aplicação do saturante



(d) Colocação da fibra



(e) Aplicação do saturante sob a fibra



(f) Colocação da ancoragem

Figura 3.20 – Processo para aplicação do reforço

O processo anterior foi aplicado para o reforço das quatro vigas ensaiadas, cuja nomenclatura depende do tipo de reforço. As figuras 3.21, 3.22, 3.23 e 3.24 apresentam o posicionamento e detalhamento do tecido de fibra colado em cada uma das vigas.

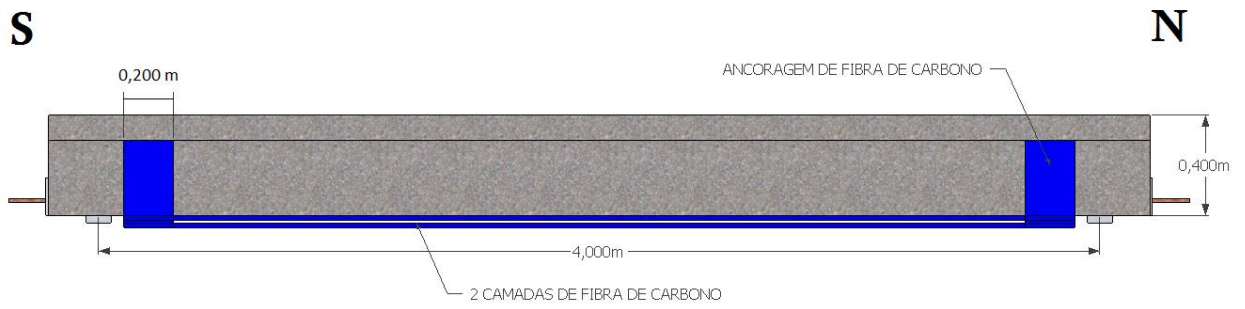


Figura 3.21 – Configuração de colagem da fibra viga VA1 - CC

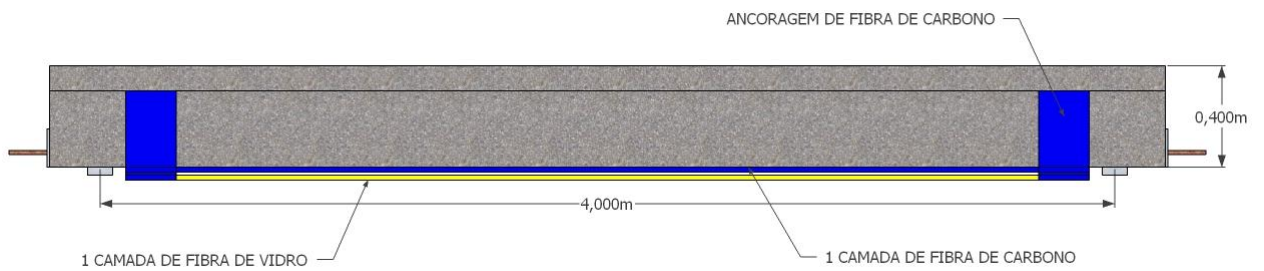


Figura 3.22 – Configuração de colagem da fibra viga VA2 - CV



Figura 3.23 – Configuração de colagem da fibra viga VA3 - VV

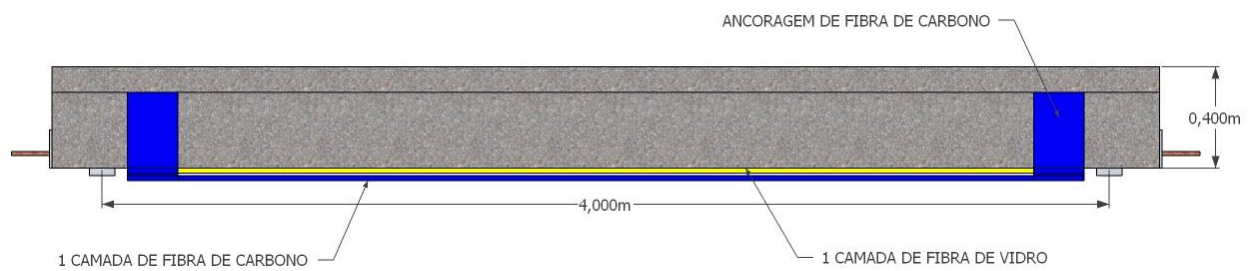


Figura 3.24 – Configuração de colagem da fibra viga VA4 - VC

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 - PRELIMINARES

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios dos materiais utilizados na pesquisa: aço e concreto, os ensaios de ruptura da viga de referência VR1 RF e os ensaios até a ruptura das quatro (4) vigas reforçadas com compósitos híbridos.

4.2 - MATERIAIS

4.2.1 - Aço

As vigas foram confeccionadas com armadura de aço tipo CA 50. Os diâmetros utilizados foram: 20 mm para a armadura principal de flexão, 8 mm para os estribos da armadura principal de cisalhamento e 6,3 mm para os estribos na mesa e porta-estribos. Seguindo a norma ABNT NBR 6152:2002, foram ensaiadas à tração três (3) amostras aleatórias de 500 mm de comprimento, para cada diâmetro das barras de aço.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB. Foi utilizada a Máquina Universal de Ensaio, modelo DL 30000 (capacidade de 300 kN) da marca EMIC e um extensômetro mecânico EMIC modelo EE09 para medir as deformações das barras. Foram seguidas as recomendações da norma ABNT NBR 6892:2002. A figura 4.1 apresenta os detalhes do ensaio.



Figura 4.1 – Ensaio de caracterização do aço

A seguir nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentados os diagramas tensão x deformação dos ensaios à tração das amostras de aço ensaiadas.

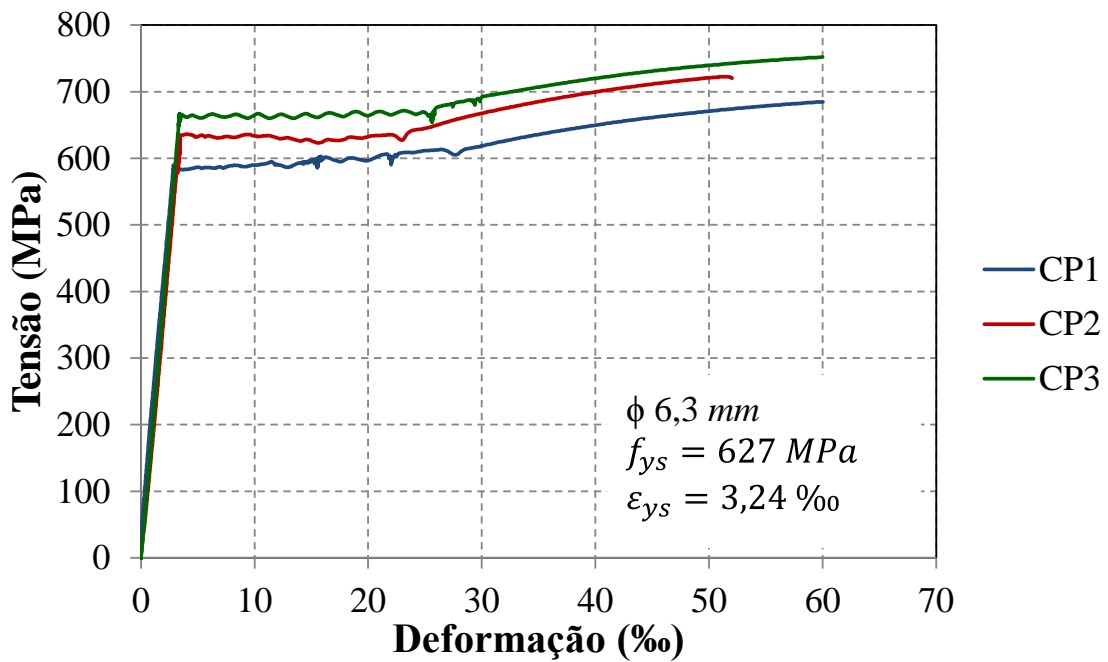


Figura 4.2 – Diagrama tensão x deformação do aço de ϕ 6,3 mm

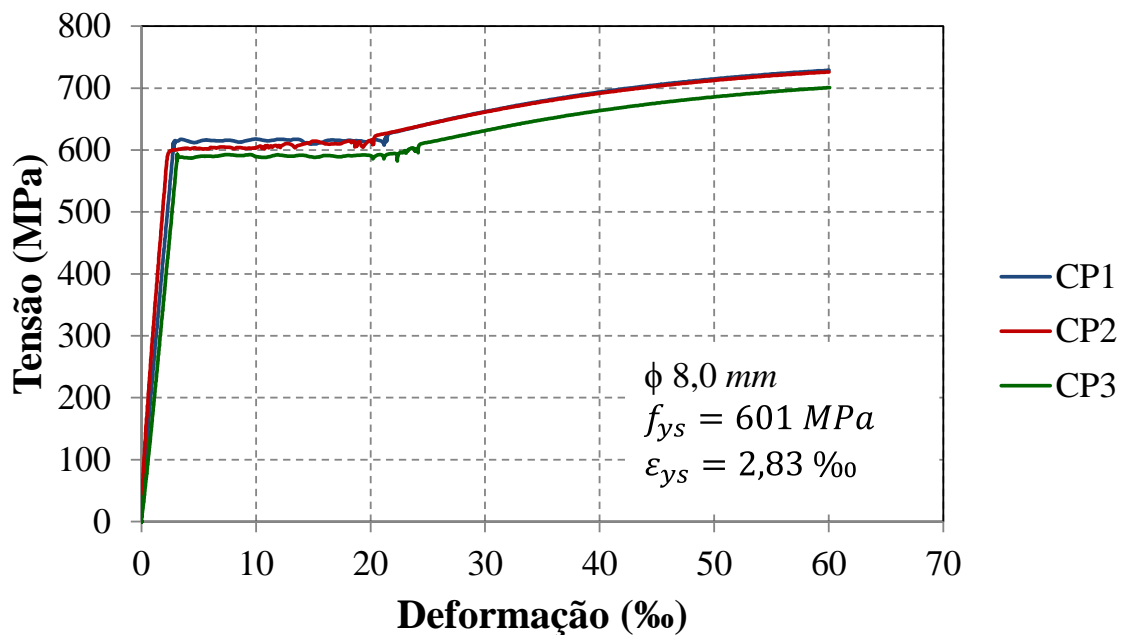


Figura 4.3 – Diagrama tensão x deformação do aço de ϕ 8,0 mm

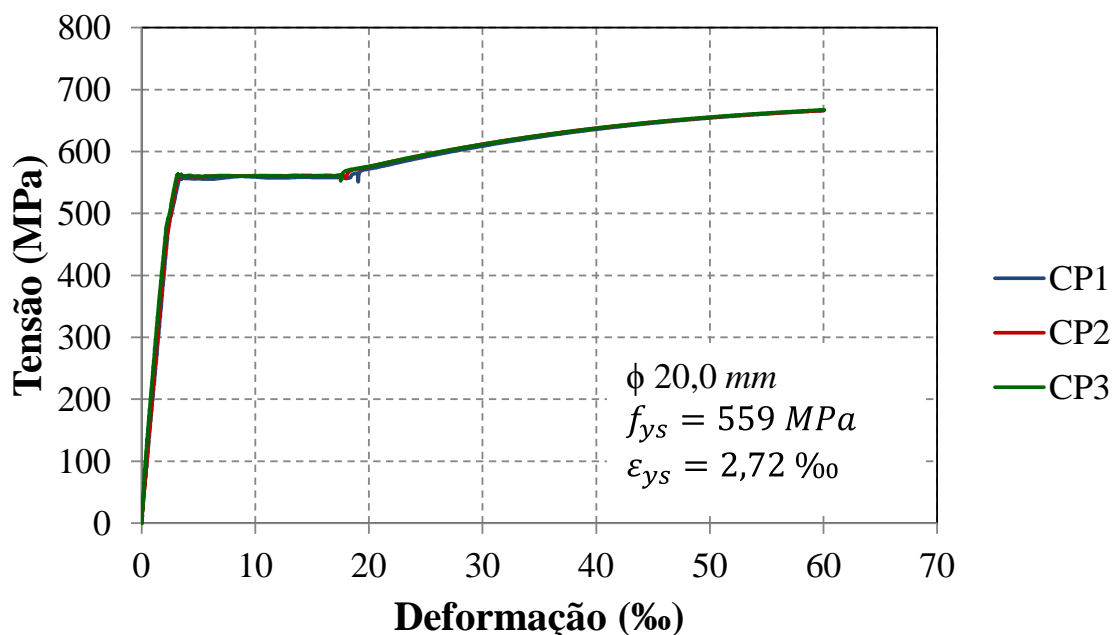


Figura 4.4 – Diagrama tensão x deformação do aço de $\phi 20 \text{ mm}$

Para o cálculo das propriedades mecânicas do aço utilizou-se a média dos resultados dos três corpos de prova de cada diâmetro. O resumo dos resultados dos ensaios da armadura está transcrito na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades da armadura de aço

Diâmetro (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_y (‰)	E_s (GPa)
6,3	627	729	3,24	194
8,0	601	735	2,83	215
20,0	559	682	2,72	205

4.2.1 - Concreto

O concreto utilizado na confecção das cinco (5) vigas foi fornecido pela empresa Concrecon, especificado para uma resistência $f_{c,28} = 40 \text{ MPa}$, e abatimento de $10 \pm 2 \text{ cm}$. Foram moldados segundo a norma ABNT NBR 5738:2003, 40 corpos de prova para a realização dos ensaios de caracterização do concreto: resistência à compressão, resistência à tração diametral e módulo de elasticidade tangente inicial.

Foram seguidas as recomendações da norma ABNT NBR 5739:2007 para os ensaios de resistência a compressão simples. Para determinação da resistência à tração por compressão diametral foi seguida a norma ABNT NBR 7222:2011. Para o ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial, foram usados 6 corpos de prova conforme as recomendações da norma ABNT NBR 8522:2008. Todos os corpos de prova foram ensaiados aos 285 dias, no período de ensaio das vigas. Nas tabelas 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados.

Tabela 4.2 – Características do concreto

	Viga	$f_{c,m}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	E_{ci} (GPa)
Grupo A	VR1 - RF	47,0	3,76	25,8
	VA1 - CC			
	VA2 - CV			
	VA3 - VV			
	VA4 - VC			

4.3 - ENSAIO DAS VIGAS

4.3.1 - Resultados Gerais

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios das cinco vigas deste estudo. A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 4.3 – Resultados Experimentais das vigas

	Viga	Desloc. Escoamento (mm)	Carga Escoamento Aço (kN)	Deformação Máx. concreto (‰)	Flecha Max. (mm)	Carga de Ruptura (kN)
Grupo A	VR1 - RF	25,24	140,0	1,60	67,00	159,6
	VA1 - CC	25,25	165,0	1,95	40,91	188,2
	VA2 - CV	21,38	150,0	1,43	36,58*	184,0
	VA3 - VV	22,18	150,0	1,19	49,70	185,8
	VA4 - VC	22,66	155,0	1,12	32,28*	192,0

Para todas as vigas: $f_c = 47,0$ Mpa, $f_t = 3,76$ MPa e $E_{ci} = 25,8$ GPa

*Registro antes da carga de ruptura

4.3.2 - Ensaio da viga de referência VR1 – RF

A viga de referência VR1 – RF foi carregada até seu estado limite último apresentando a ruptura por deformação plástica excessiva da armadura de flexão. A carga máxima aplicada foi de 159,6 Kn. Na Figura 4.5 é apresentada a viga após a execução do ensaio.



Figura 4.5 – Viga VR1 - RF após o ensaio

4.3.2.1 - Deformação da armadura de flexão da viga VR1 - RF

A Figura 4.6 mostra o gráfico carga-deformação específica na armadura de flexão da viga VR1 - RF de referência. A máxima deformação (3,12%) foi registrada pelo extensômetro EAIEF-03 no meio do vão da viga, embora deixasse de funcionar pouco antes de alcançar a carga de ruptura.

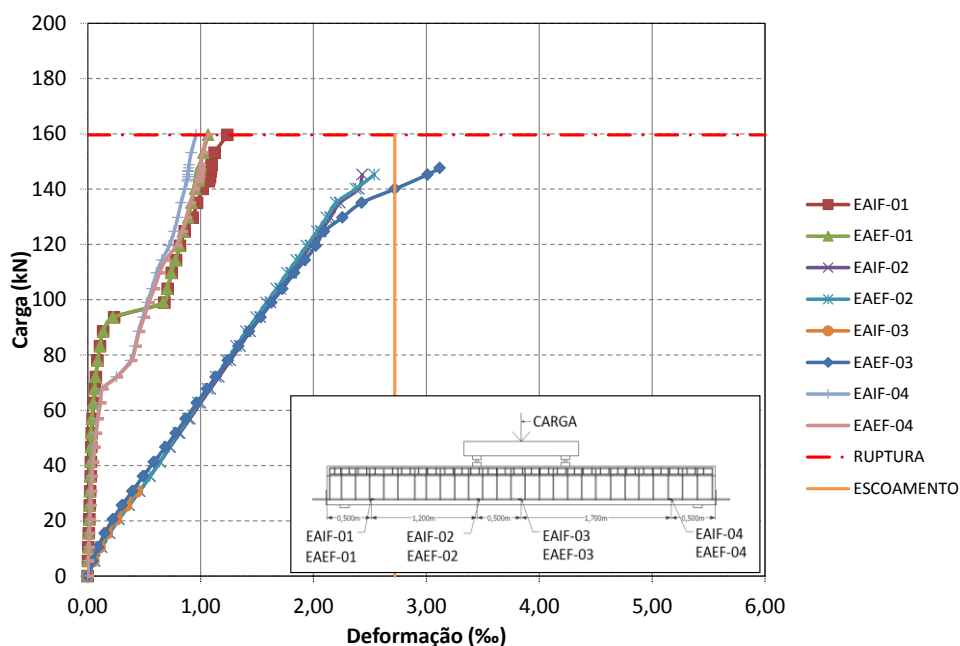


Figura 4.6 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VR1 – RF

Neste ensaio os extensômetros elétricos de resistência (EER) não forneceram dados confiáveis (valores negativos) e isto pode ter acontecido pelo descolamento ou baixa qualidade dos mesmos.

4.3.2.2 - Deformação da armadura de cisalhamento da viga VR1 - RF

A seguir apresenta-se o gráfico carga-deformação específica das armaduras de cisalhamento (Figura 4.7) da viga VR1 - RF de referência. O extensômetro EAIC-02 registrou a deformação máxima de 1,06%. O extensômetro EAEC-02 não funcionou desde o início do ensaio.

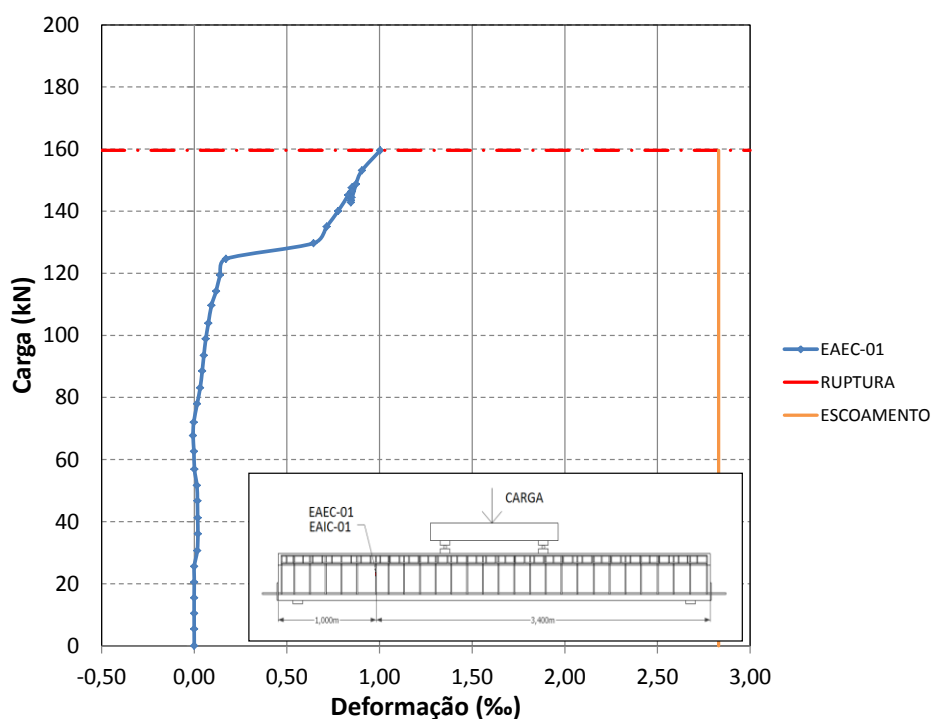


Figura 4.7 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VR1 - RF

4.3.2.3 - Deformação no concreto da viga VR1 - RF

A Figura 4.8 exibe o gráfico carga- deformação específica do concreto da viga VA1 - RF de referência. A deformação máxima (-1,60%) foi registrada no extensômetro EC01.

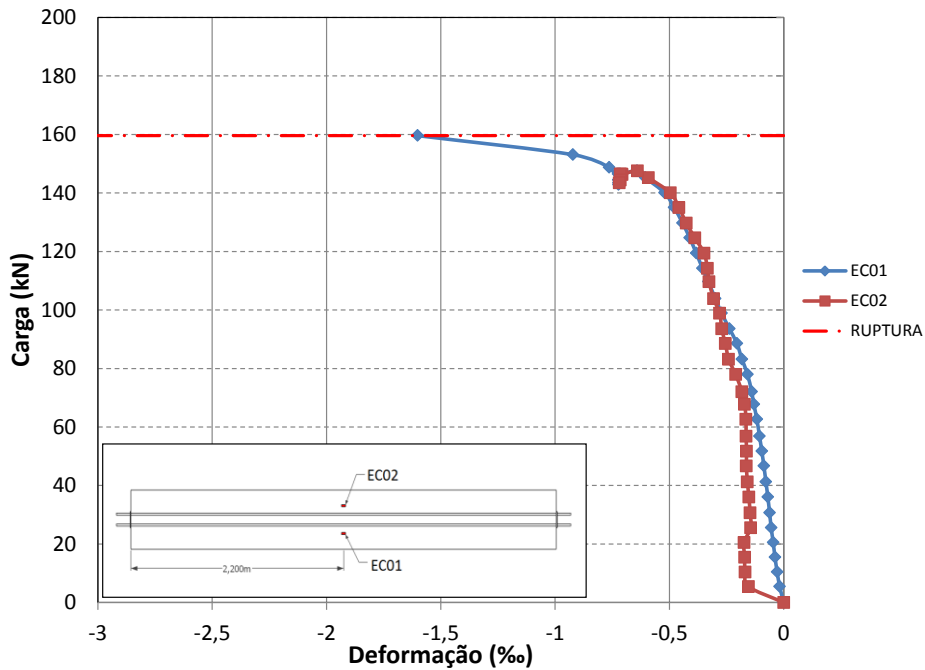


Figura 4.8 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VR1 - RF

4.3.2.4 - Deslocamento vertical da viga VR1 - RF

A figura 4.9 mostra o gráfico carga-deslocamento vertical dos diferentes pontos de instrumentação na viga VA1 – RF. Após o término do curso do defletômetro o deslocamento no meio do vão da viga foi medido com trena, tomando como referência a face superior da viga inferior do pórtico de ensaio. Segundo a flecha máxima de serviço, a carga de serviço é 95 kN. O deslocamento máximo medido foi de 67,0 mm.

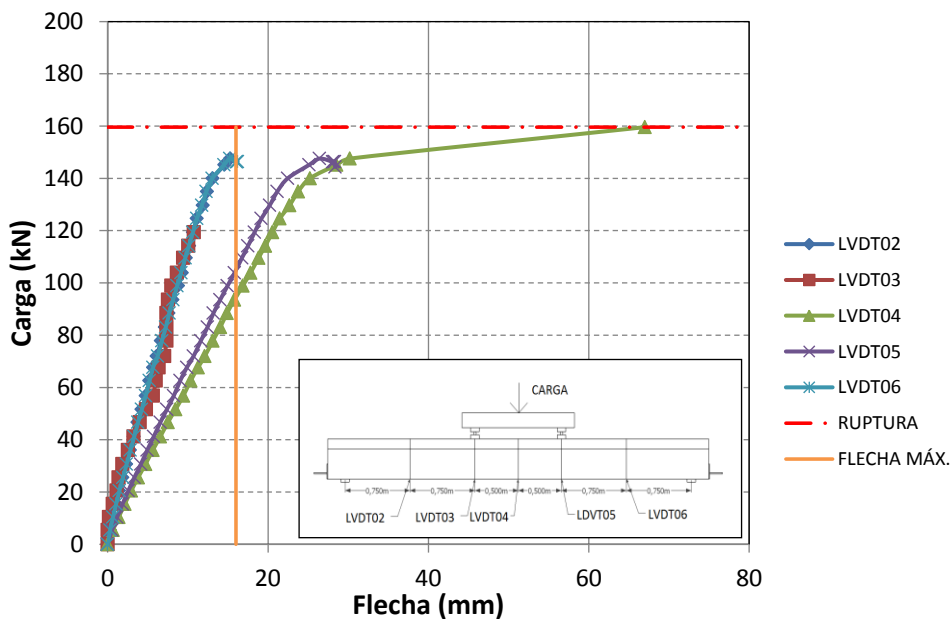


Figura 4.9 – Gráfico carga-deslocamento da viga VR1 - RF

4.3.2.5 - Evolução das fissuras da viga VR1 - RF

Foi acompanhado e monitorado o desenvolvimento das fissuras da viga VA1 - RF. As primeiras fissuras verticais de flexão na viga apresentam-se no meio do vão e entre a zona de aplicação do carregamento para uma carga de 21 kN. Com o incremento da carga, as fissuras aumentam sua abertura e aparecem também nas zonas próximas ao apoio. A Figura 4.10 ilustra a evolução da fissuração com o incremento do carregamento.

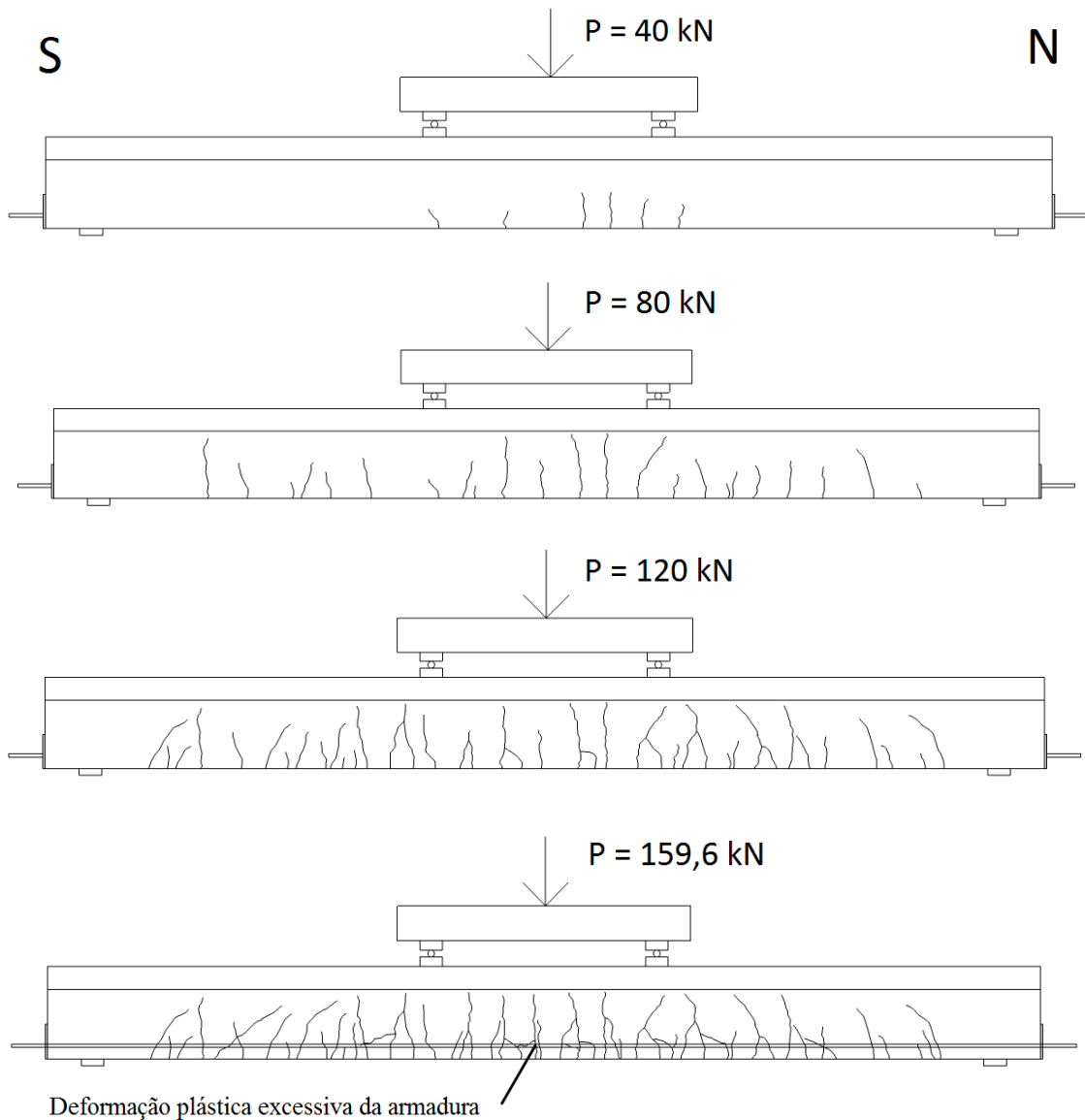


Figura 4.10 – Evolução da fissuração na viga VR1 - RF

4.3.3 - Ensaio da viga reforçada VA1 – CC

A viga VA1 – CC foi carregada até ocorrer a ruptura por descolamento do reforço de PRF na superfície do concreto, localizada no lado norte. A carga de ruptura foi de 188,2 kN. A Figura 4.11 mostra depois da execução do ensaio.



Figura 4.11 – Viga reforçada VA1 - CC após o ensaio

4.3.3.1 - Deformação da armadura de flexão da viga VA1 - CC

A Figura 4.12 apresenta o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão da viga reforçada VA1 - CC. A deformação máxima (2,00%) foi registrada pelo extensômetro EAIF – 03. Como se pode observar na figura alguns dos extensômetros pararam de funcionar antes da ruptura da viga.

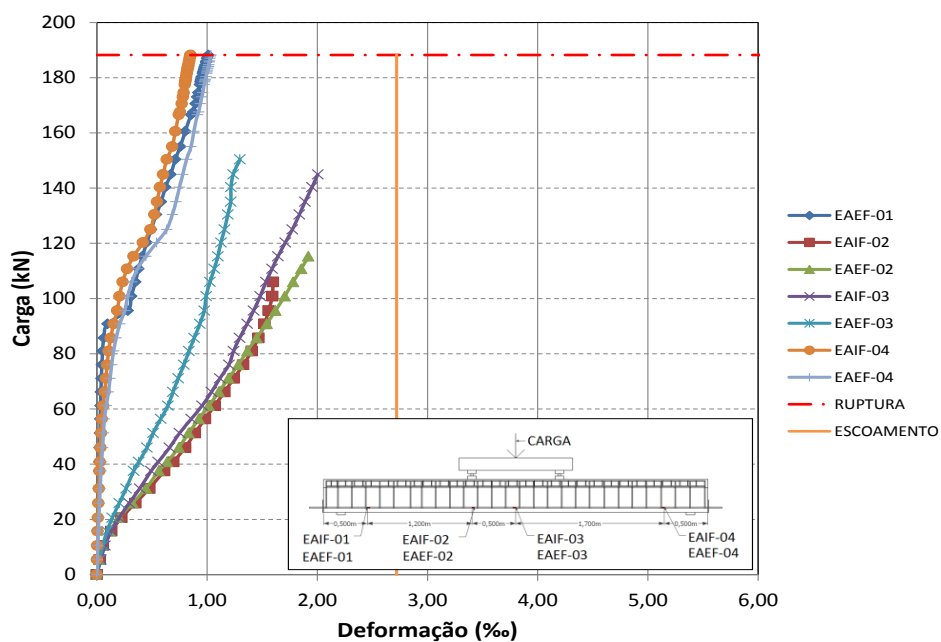


Figura 4.12 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA1 – CC

Neste ensaio os extensômetros elétricos de resistência (EER) não forneceram dados confiáveis (valores negativos) e isto pode ter acontecido pelo descolamento ou baixa qualidade dos mesmos.

4.3.3.2 - Deformação da armadura de cisalhamento da viga VA1 - CC

Na Figura 4.13 é mostrada o gráfico carga-deformação específica da armadura de cisalhamento da viga reforçada VA1 - CC. A deformação máxima medida foi de 1,06% e foi registrada pelo extensômetro EAIC – 01.

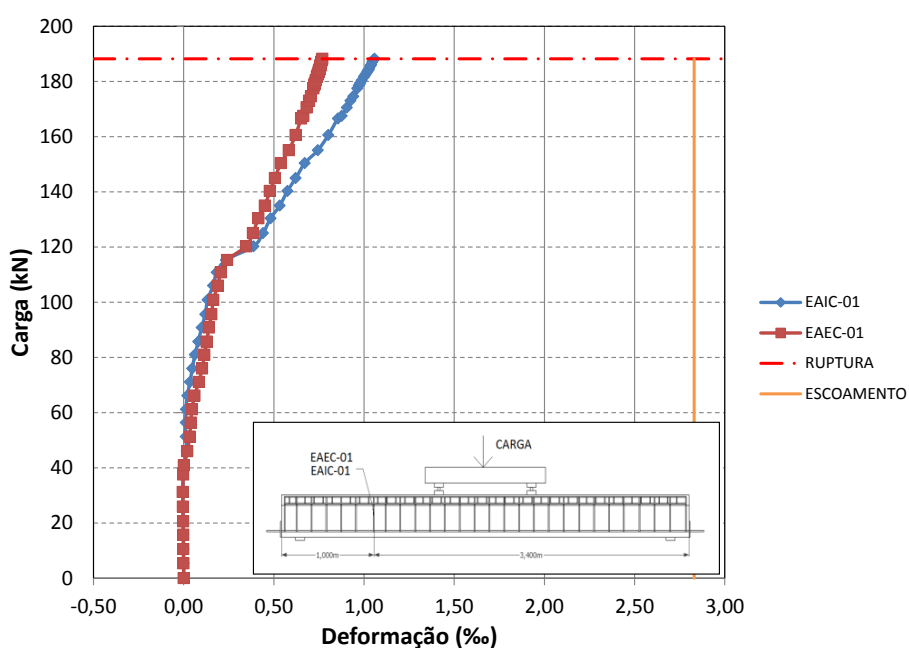


Figura 4.13 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA1 – CC

4.3.3.3 - Deformação no concreto da viga VA1 - CC

Na Figura 4.14 é mostrada o gráfico carga-deformação específica do concreto da viga reforçada VA1 – CC. O encurtamento máximo de 1,95% foi medido pelo extensômetro ECO1.

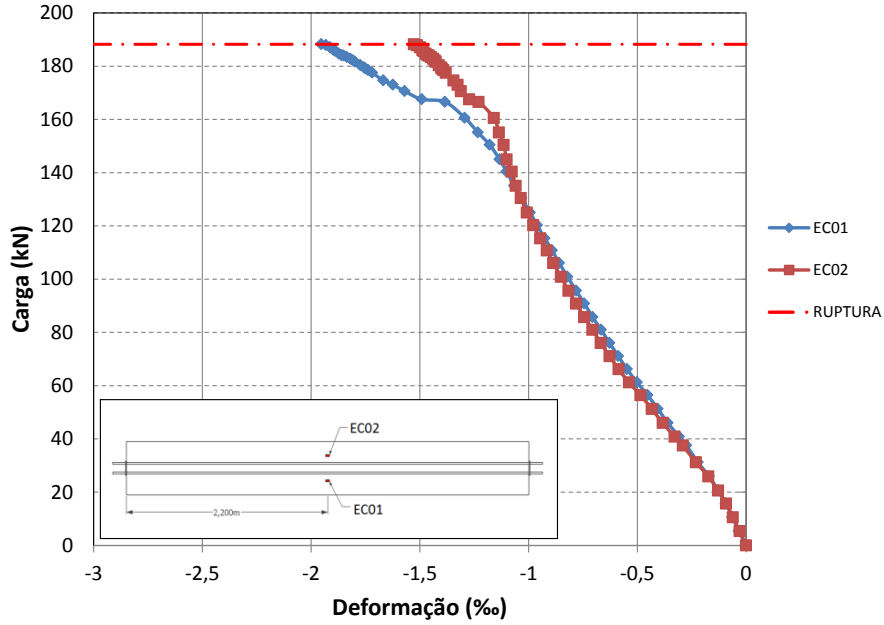


Figura 4.14 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA1 – CC

4.3.3.4 - Deformação no reforço da viga VA1 - CC

A Figura 4.15 ilustra o gráfico carga-deformação específica do reforço de PRFC da viga reforçada VA1 – CC. A deformação máxima foi de 5,21‰ e foi registrada pelo extensômetro EFFC01.

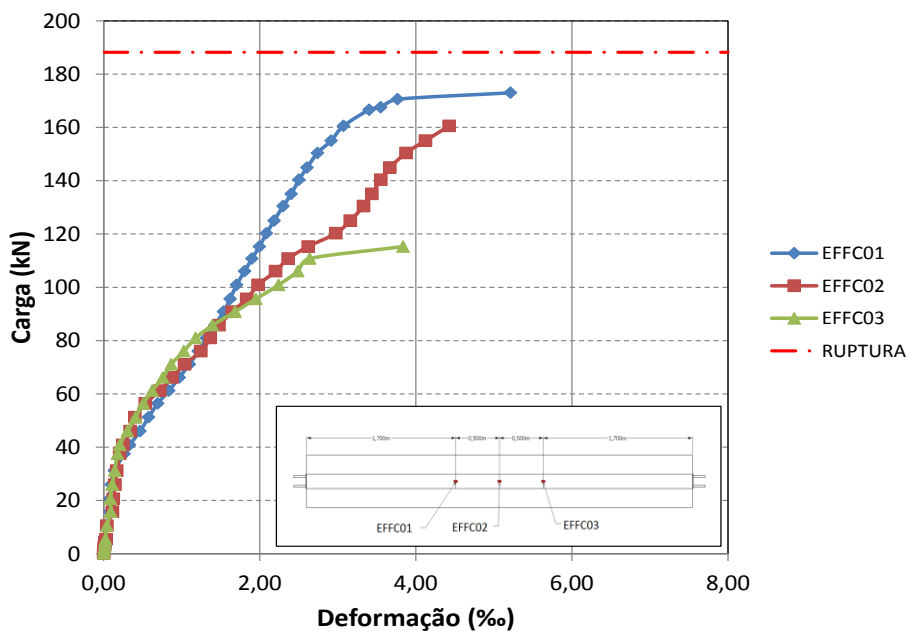
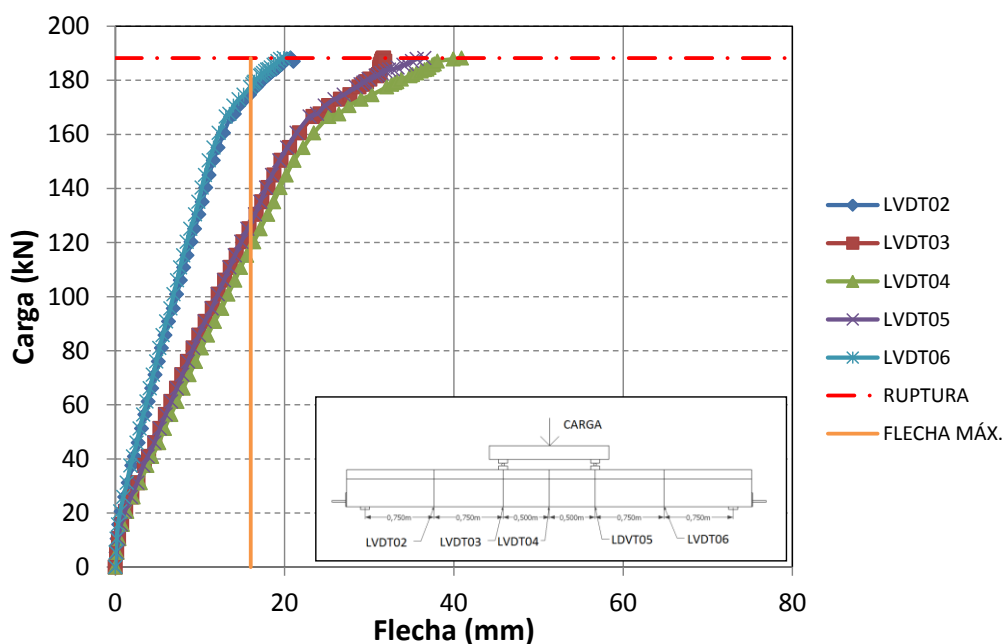


Figura 4.15 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA1 – CC

4.3.3.5 – Deslocamento vertical da viga VA1 - CC

A Figura 4.16 mostra o gráfico de carga-deslocamento vertical em diferentes regiões da viga reforçada VA1 – CC. Para um carregamento de 120 kN a viga alcançou o flecha máxima de serviço. O deslocamento máximo vertical (40,9 mm) foi medido com o LVDT04 localizado no vão meio da viga.



4.3.3.6 - Evolução das fissuras da viga VA1 - CC

O tipo de ruptura apresentada na viga foi descolamento do reforço de PRFC por fissuras de flexão. Com o desenvolvimento da fissuração, notou-se que a viga VA1 – CC apresentou a primeira fissura para uma carga de 23 kN. Com os incrementos de carregamento foi observado que fissuras horizontais aparecem entre as fissuras de flexão. A Figura 4.17 ilustra a evolução da fissuração com o incremento do carregamento.

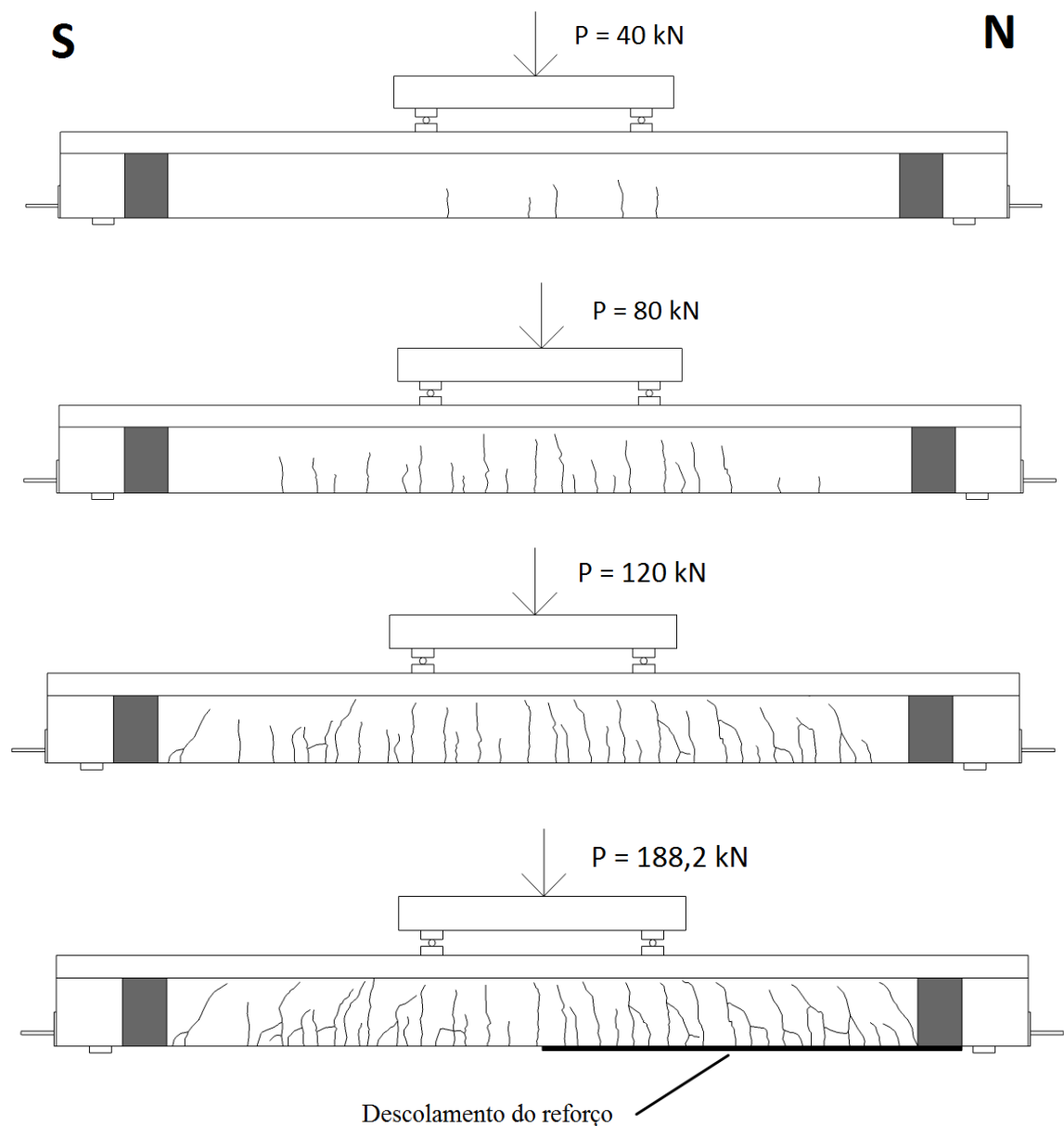


Figura 4.17 – Evolução da fissuração na viga VA1 - CC

4.3.4 - Ensaio da viga reforçada VA2 – CV

A viga VA2 – CC foi carregada até ocorrer a ruptura por descolamento do reforço de PRF na superfície do concreto, localizada no lado sul. A carga última foi de 184,0 kN, na Figura 4.18 é apresentada a viga após a execução do ensaio.



Figura 4.18 – Viga reforçada VA2 - CV após o ensaio

4.3.4.1 - Deformação da armadura de flexão da viga VA2 - CV

Na Figura 4.19 é apresentada o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão da viga reforçada VA2 – CV. O extensômetro EAIF-02 registrou a deformação máxima de 3,48‰.

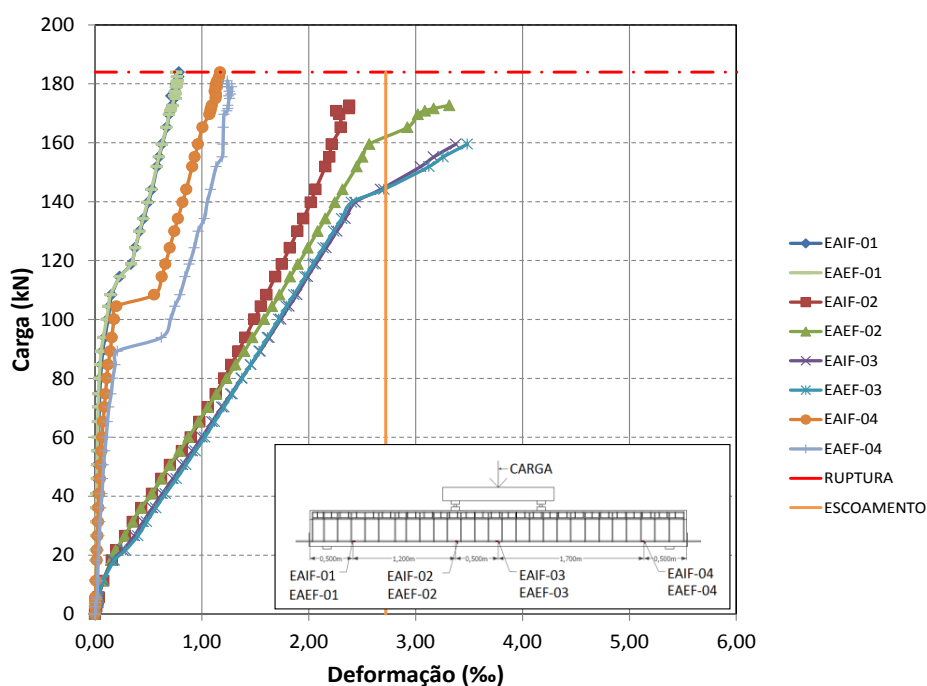


Figura 4.19 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA2 – CV

4.3.4.2 - Deformação da armadura de cisalhamento da viga VA2 - CV

A Figura 4.20 mostra o gráfico carga-deformação específica da armadura de cisalhamento da viga reforçada VA2 – CV. A deformação máxima (1,80‰) foi medida pelo extensômetro EAEC-01.

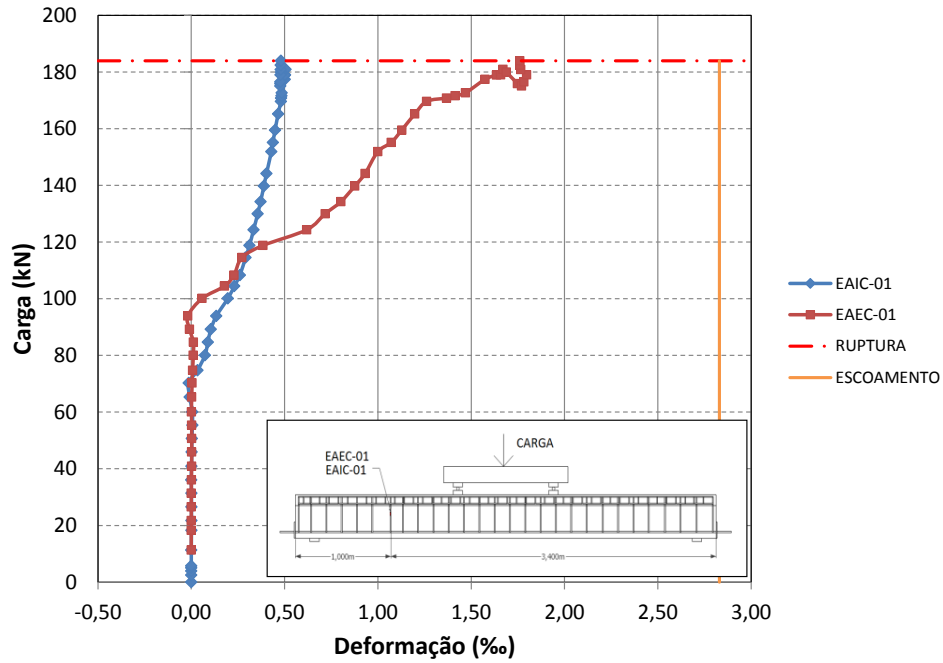


Figura 4.20 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA2 – CV

4.3.4.3 - Deformação no concreto da viga VA2 - CV

A Figura 4.21 ilustra o gráfico carga-deformação específica do concreto da viga reforçada VA1 – CV. O encurtamento máximo foi medido pelo extensômetro EC01 e teve um valor de deformação específica de -1,43%.

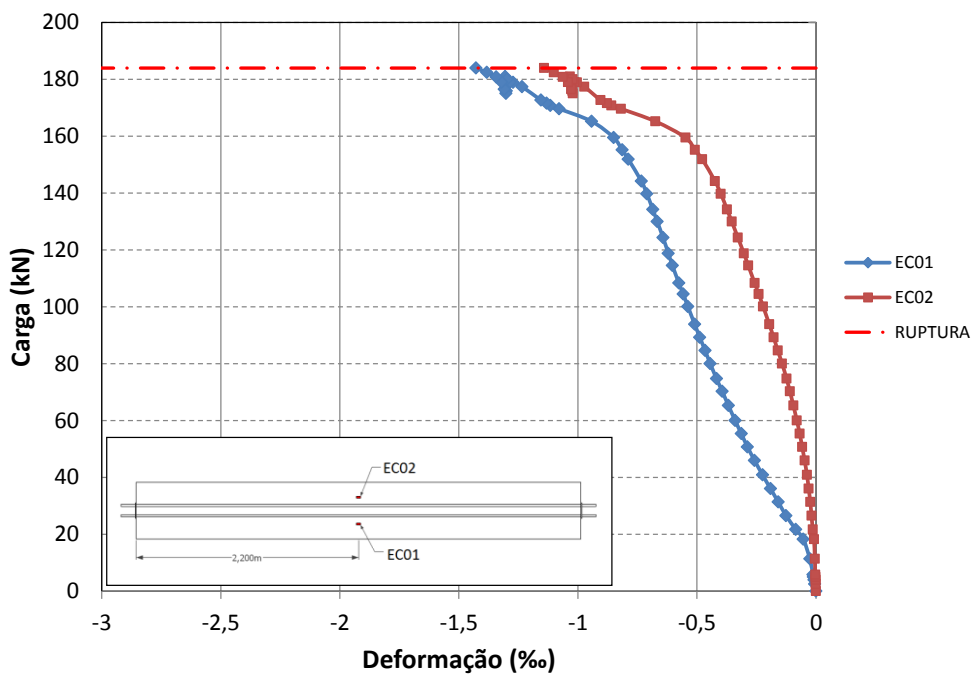


Figura 4.21 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA2 – CV

4.3.4.4 - Deformação no reforço da viga VA2 - CV

Na Figura 4.22 é apresentado o gráfico carga-deformação específica do reforço da viga VA2 – CV. A máxima deformação registrada pelo extensômetro EFFC foi de 5,96%, no entanto os extensômetros deixaram de funcionar antes da carga de ruptura.

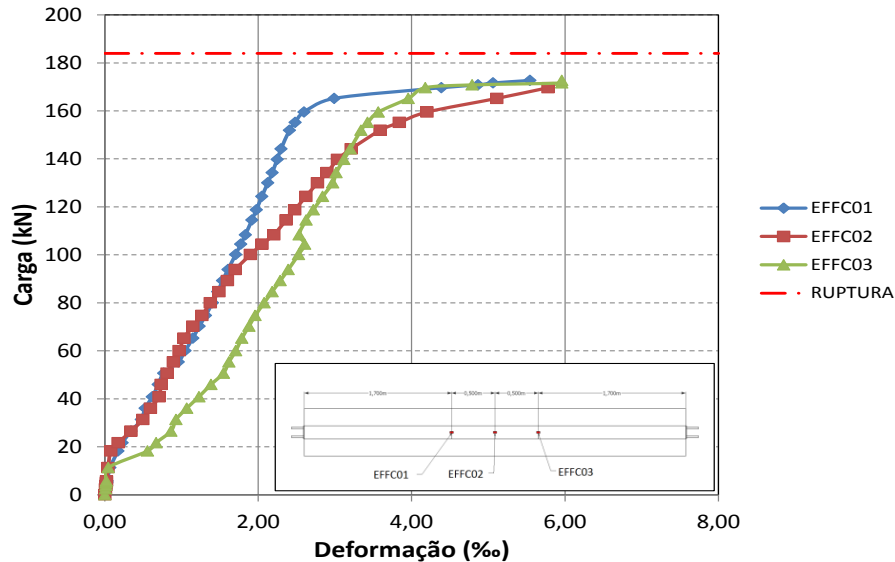


Figura 4.22 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA2 – CV

4.3.4.5 – Deslocamento vertical da viga VA2 - CV

A Figura 4.23 mostra o gráfico carga-deslocamento vertical nos diferentes pontos da viga reforçada VA2 – CV. A flecha máxima de 41,02 mm foi medida no LVDT 05 em um ponto de aplicação da carga; isto aconteceu porque o defletômetro no meio do vão da viga atingiu seu limite máximo antes da carga de ruptura. A carga de serviço foi de 120 kN.

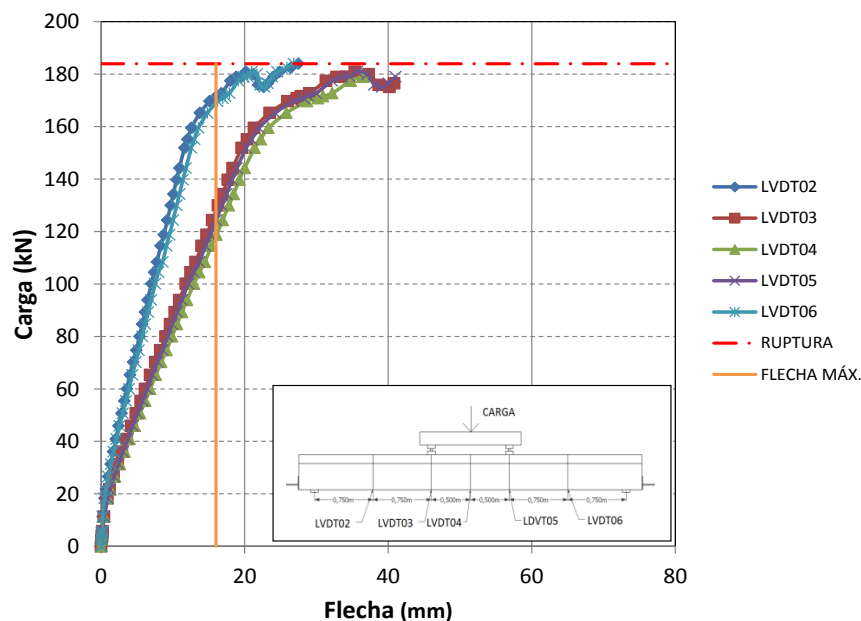


Figura 4.23 – Gráfico carga-deslocamento da viga VA2 – CV

4.3.4.6 - Evolução das fissuras da viga VA2 - CV

A viga reforçada VA2 – CV apresentou o tipo de ruptura de descolamento do reforço da superfície de concreto por fissuras de flexão, no lado sul. A primeira fissura de flexão vertical se apresentou com uma carga de 28 kN, localizada no vão meio da viga. A Figura 4.24 mostra os gráficos de evolução da fissuração com o incremento do carregamento.

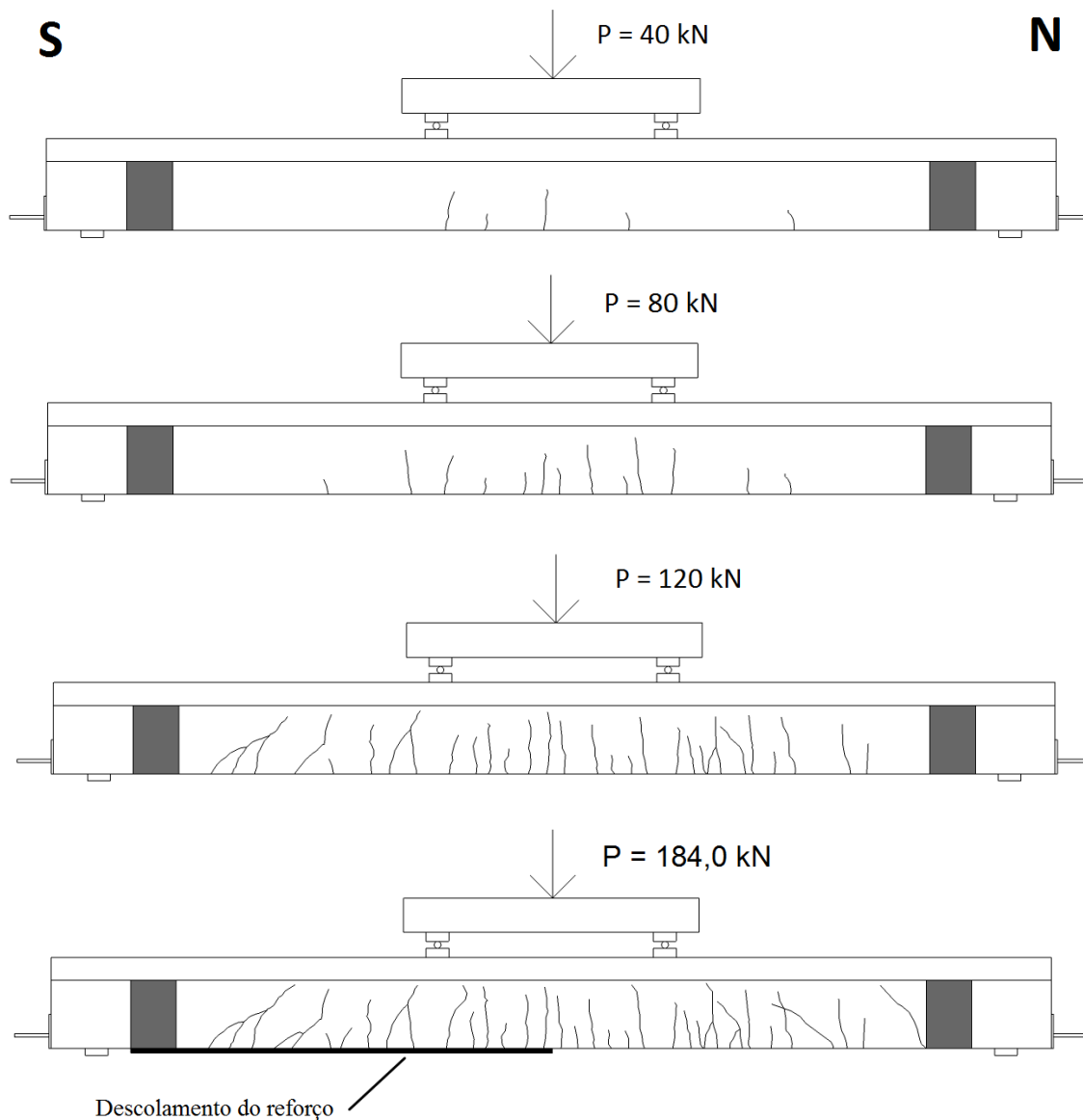


Figura 4.24 – Evolução da fissuração na viga VA2 - CV

4.3.5 - Ensaio da viga reforçada VA3 – VV

A viga reforçada VA3 - VV teve uma carga de ruptura de 185,8 kN. O tipo de ruptura apresentado foi delaminação por cisalhamento/tração da camada de concreto (delaminação do cobrimento), que se iniciou pelo lado sul da viga. A Figura 4.25 mostra a viga reforçada após a ruptura.



Figura 4.25 – Viga reforçada VA3 - VV após o ensaio

4.3.5.1 - Deformação da armadura de flexão da viga VA3 - VV

Na Figura 4.26 é apresentada o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão da viga reforçada VA3 – VV. A deformação máxima de 3,35‰ foi registrada pelo extensômetro EAIF-02.

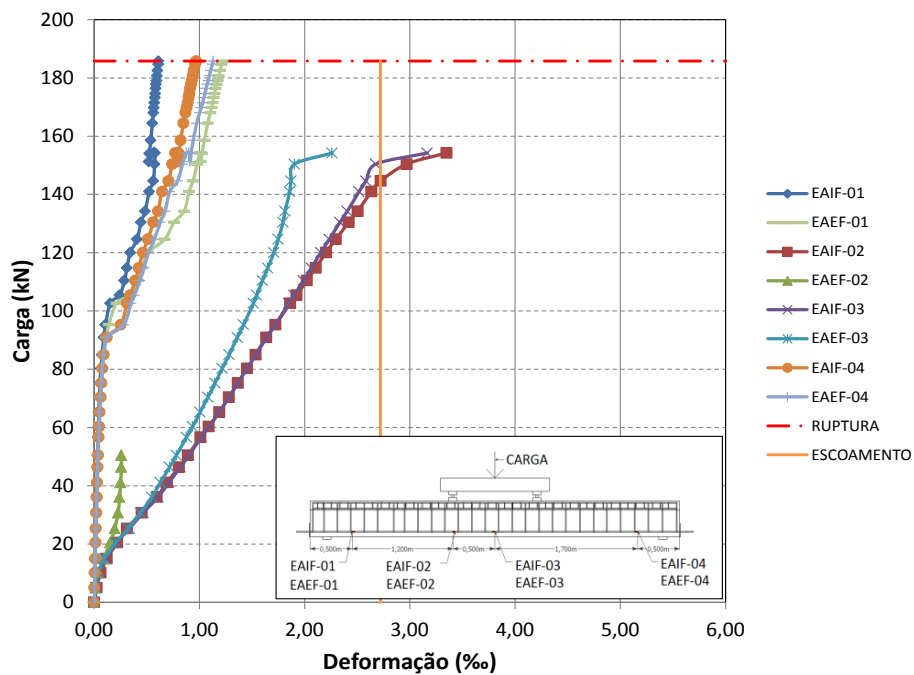


Figura 4.26 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA3 – VV

4.3.5.2 - Deformação da armadura de cisalhamento da viga VA3 - VV

A Figura 4.27 ilustra o gráfico carga-deformação específica da armadura de cisalhamento da viga reforçada VA3 – VV. O extensômetro EAIC-01 registrou a deformação máxima de 1,26‰.

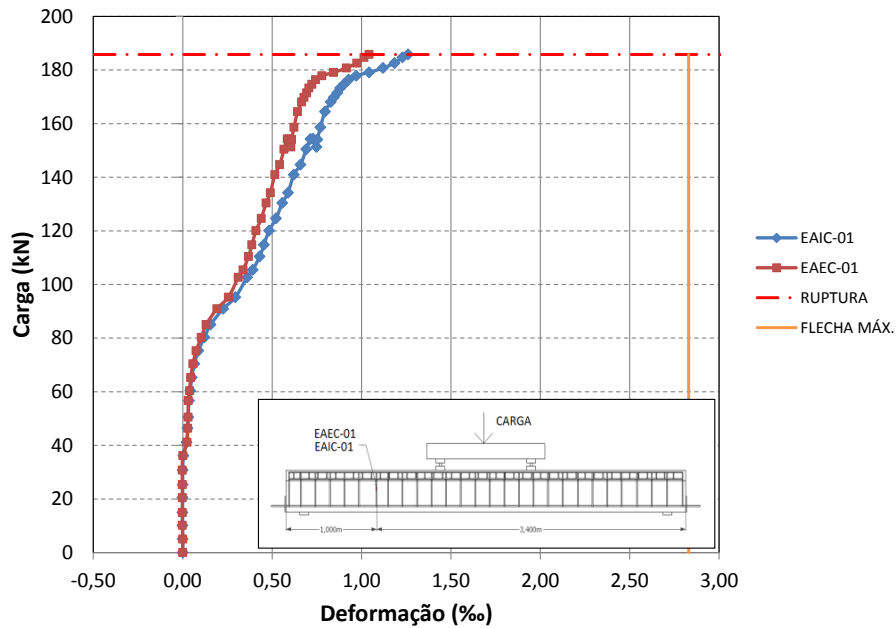


Figura 4.27 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA3 – VV

4.3.5.3 - Deformação no concreto da viga VA3 - VV

A Figura 4.28 mostra o gráfico carga-deformação específica do concreto da viga reforçada VA3 – VV. O encurtamento máximo (-1,19‰) foi medido pelo extensômetro EC01.

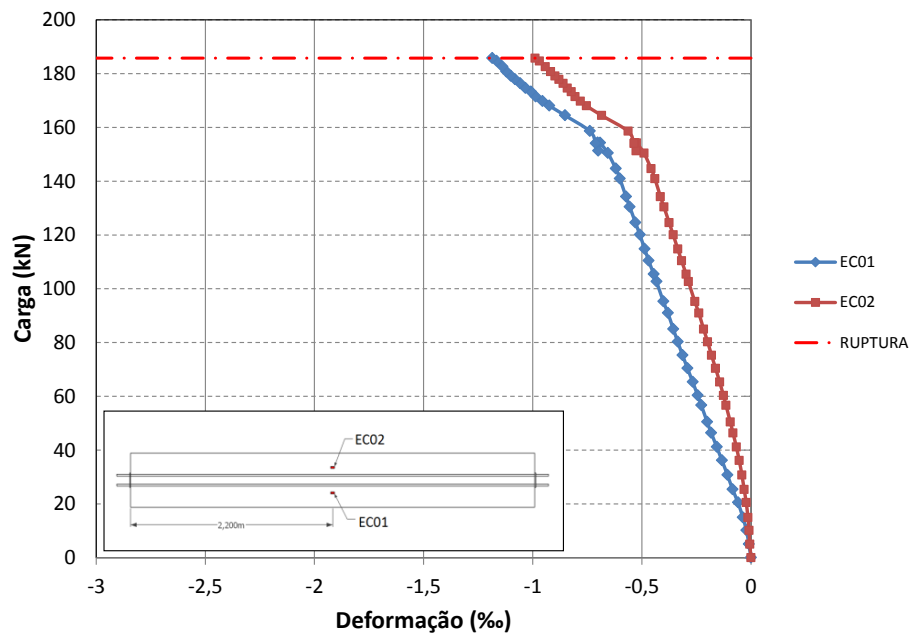


Figura 4.28 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA3 – VV

4.3.5.4 - Deformação no reforço da viga VA3 - VV

Na Figura 4.29 é apresentada o gráfico carga-deformação específica do reforço de PRF da viga reforçada VA3 – VV. A deformação máxima de 7,22% foi medida pelo extensômetro EFFC01.

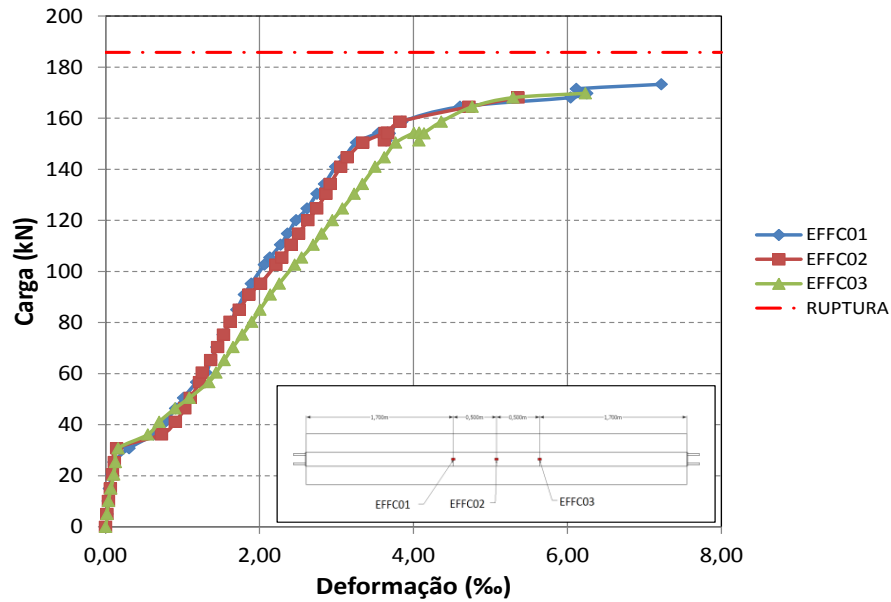


Figura 4.29 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA3 – VV

4.3.5.5 – Deslocamento vertical da viga VA3 - VV

Na Figura 4.30 é ilustrada o gráfico carga-deslocamento vertical da viga reforçada VA3 – VV em diferentes pontos. Para a flecha de serviço a carga registrada foi de 115 kN. A flecha máxima de 49,70 mm foi medida pelo LVDT 04, localizado no vão meio da viga.

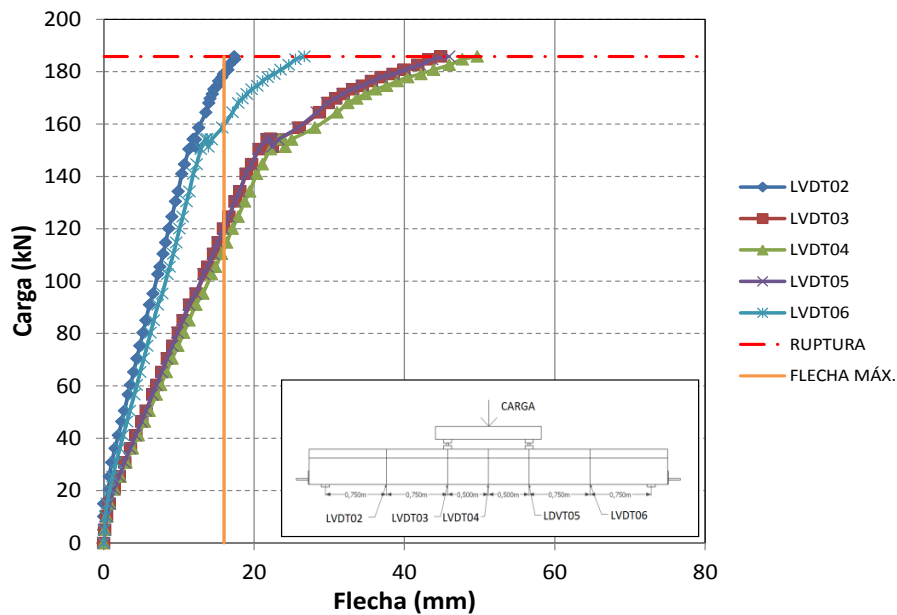


Figura 4.30 – Gráfico carga-deslocamento da viga VA3 – VV

4.3.5.6 - Evolução das fissuras da viga VA3 - VV

O tipo de ruptura que apresentou a viga reforçada VA3 – VV foi delaminação da camada de concreto (delaminação do cobrimento), no lado sul. Devido à ocorrência de tensões normais desenvolvidas nas extremidades do reforço do PRF colado externamente. A primeira fissura de flexão vertical se apresentou com uma carga de 22 kN, localizada no meio do vão da viga. A Figura 4.24 mostra os gráficos de evolução da fissuração com o incremento do carregamento.

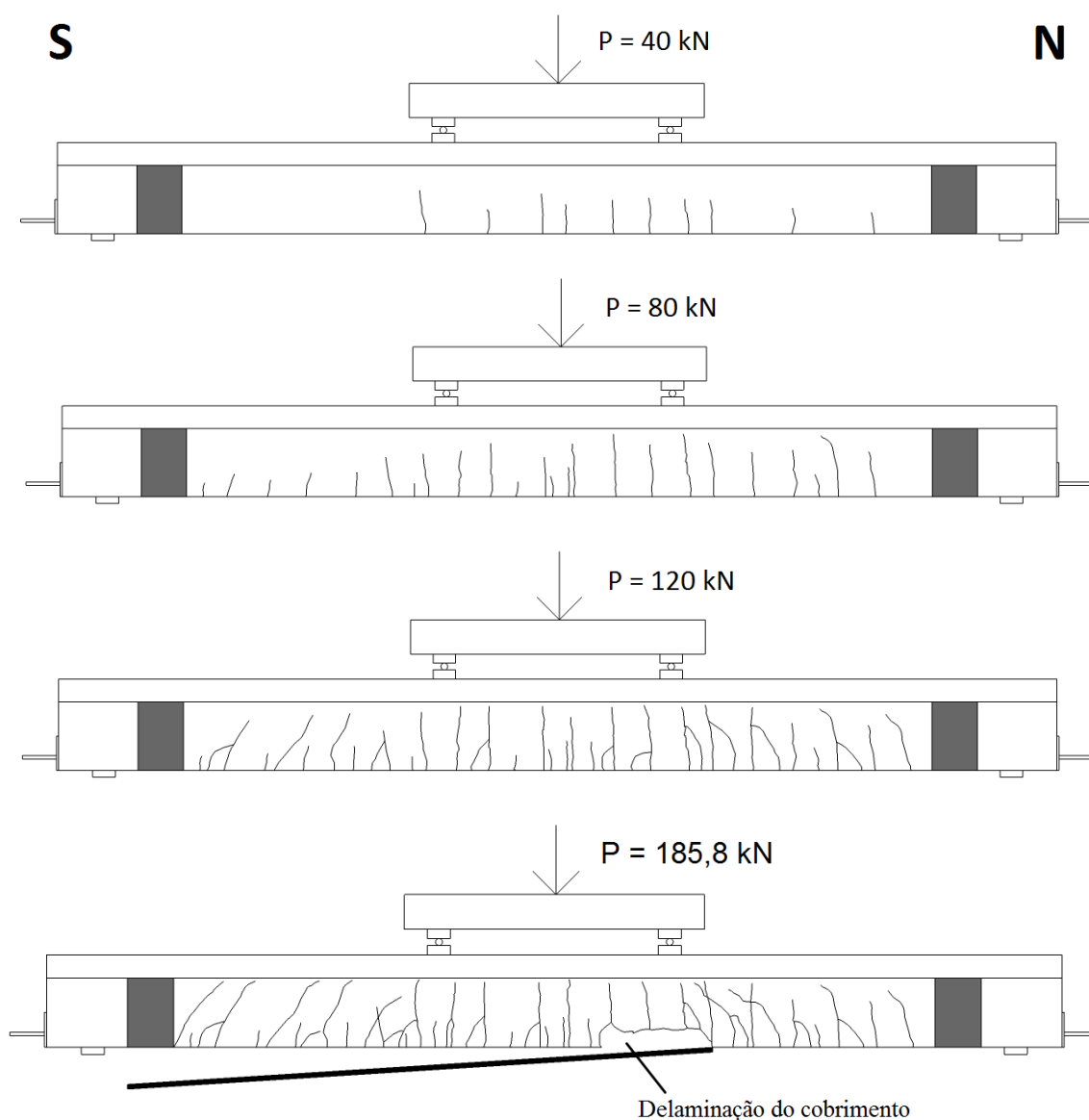


Figura 4.31 – Evolução da fissuração na viga VA3 - VV

4.3.6 - Ensaio da viga reforçada VA4 – VC

A viga reforçada VA4 - VV teve uma carga de ruptura de 192,0 kN. O tipo de ruptura foi o mesmo apresentado na viga VA3 – VV: delaminação por cisalhamento/tração da camada

de concreto (delaminação do cobrimento), que se iniciou também pelo lado sul da viga. A Figura 4.25 mostra a viga reforçada após a ruptura.



Figura 4.32 – Viga reforçada VA4 - VC após o ensaio

4.3.6.1 - Deformação da armadura de flexão da viga VA4 - VC

Na Figura 4.33 apresenta-se o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão da viga reforçada VA4 – VC. A deformação máxima (4,39%) foi medida pelo extensômetro EAIF-02.

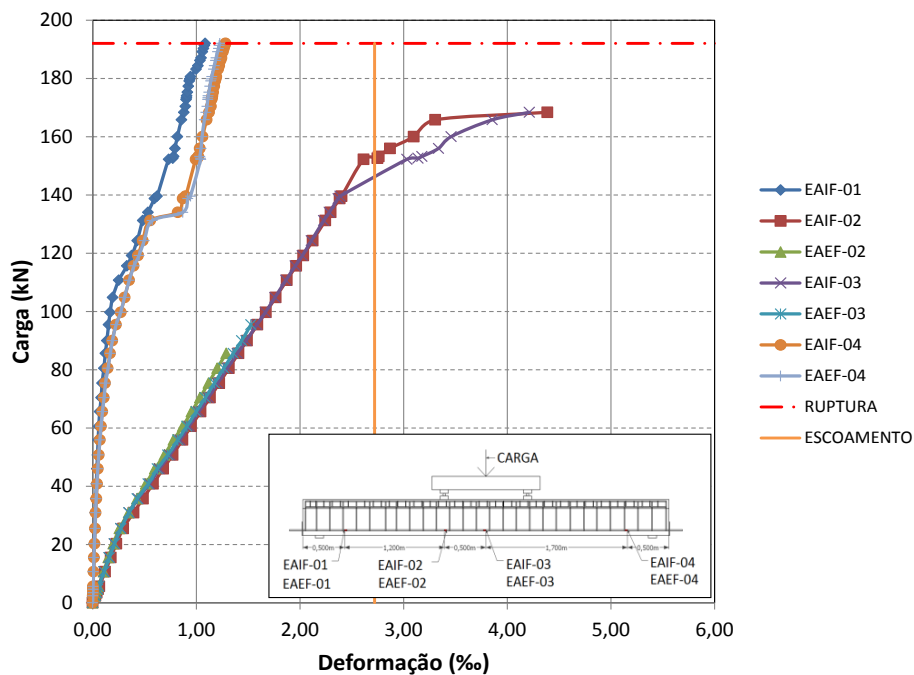


Figura 4.33 – Gráfico carga-deformação da armadura de flexão na viga VA4 – VVC

4.3.6.2 - Deformação da armadura de cisalhamento da viga VA4 - VC

A Figura 4.34 mostra o gráfico carga-deformação específica da armadura de cisalhamento da viga reforçada VA4 – VC. A deformação máxima de 1,84‰ foi registrada pelo extensômetro EAEC-01.

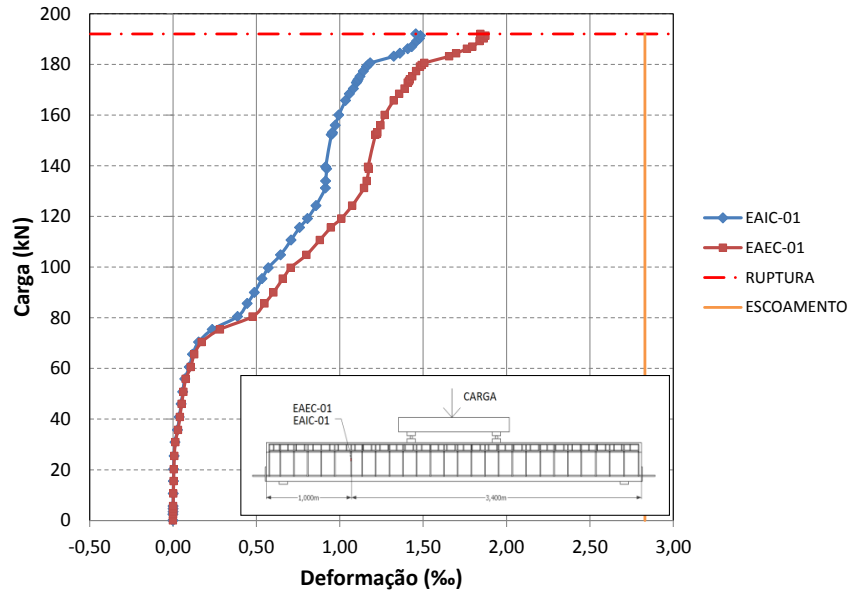


Figura 4.34 – Gráfico carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA4 – VC

4.3.6.3 - Deformação no concreto da viga VA4 - VC

Na Figura 4.35 se ilustra o gráfico carga-deformação específica do concreto da viga reforçada VA4 – VC. O extensômetro EC02 mediu o encurtamento máximo de -1,12‰.

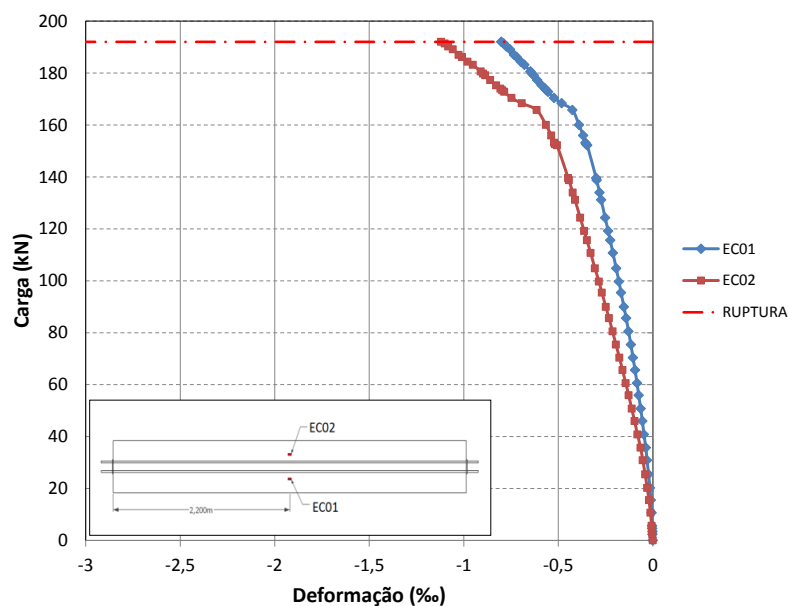


Figura 4.35 – Gráfico carga-deformação da superfície de concreto na viga VA4 – VC

4.3.6.4 - Deformação no reforço da viga VA4 - VC

A Figura 4.36 apresenta o gráfico carga-deformação específica do reforço de PRF da viga reforçada VA4 – VC. A deformação máxima medida de 5,98‰ foi registrada pelo extensômetro EFFC02.

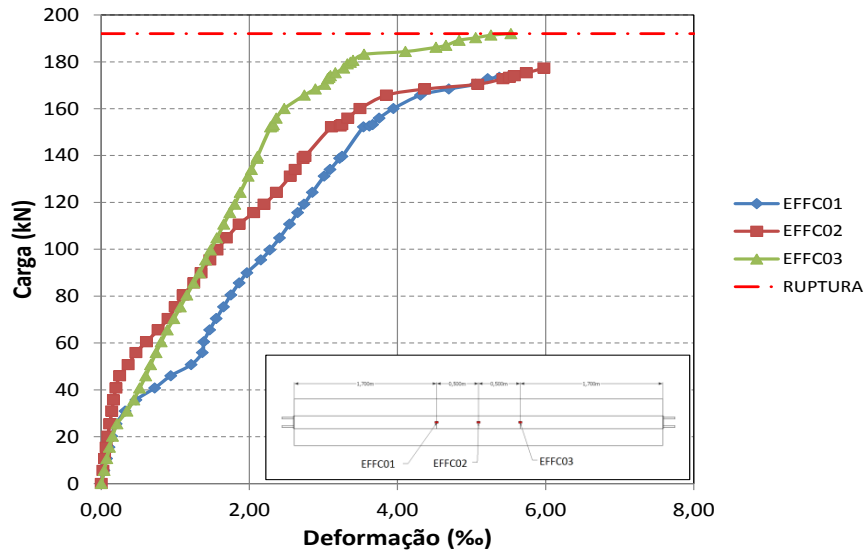


Figura 4.36 – Gráfico carga-deformação do reforço na viga VA4 – VC

4.3.6.5 – Deslocamento vertical da viga VA4 - VC

A Figura 4.37 mostra o gráfico carga-deslocamento vertical em diferentes pontos da viga reforçada VA4 – VC. A carga de serviço foi 120 kN. A flecha máxima de 41,15 mm foi medida no LVDT 03 em um ponto de aplicação da carga, isto aconteceu porque o defletômetro (LVDT 04) no vão meio da viga atingiu seu limite máximo antes da carga de ruptura.

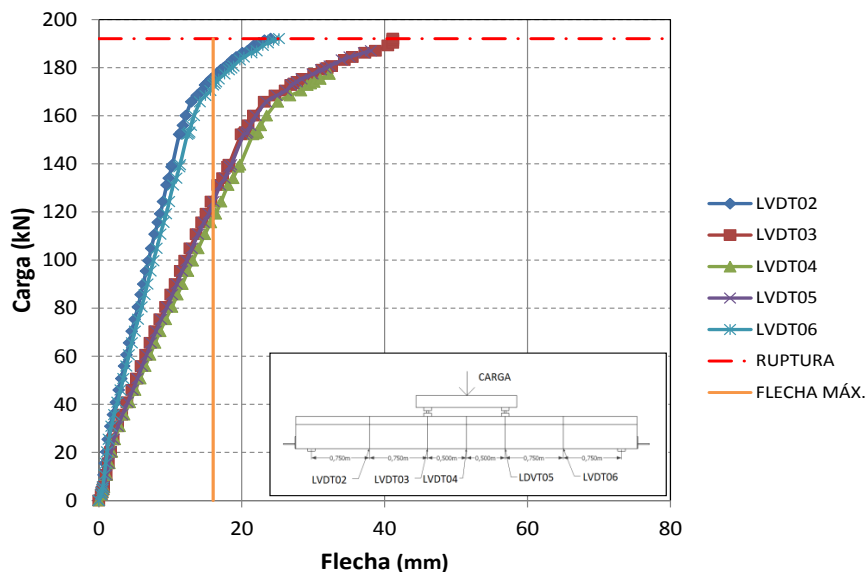


Figura 4.37 – Gráfico carga-deslocamento da viga VA4 – VC

4.3.6.6 - Evolução das fissuras da viga VA4 - VC

A viga reforçada VA4 – VC apresentou o tipo de ruptura de delaminação da camada de concreto (delaminação do cobrimento), no lado sul. Isto ocorre pelas tensões normais desenvolvidas nas extremidades do reforço do PRF externamente colado. A primeira fissura de flexão vertical apresentou-se com uma carga de 23 kN, localizada no meio do vão da viga. A Figura 4.38 mostra os gráficos de evolução da fissuração com o incremento do carregamento.

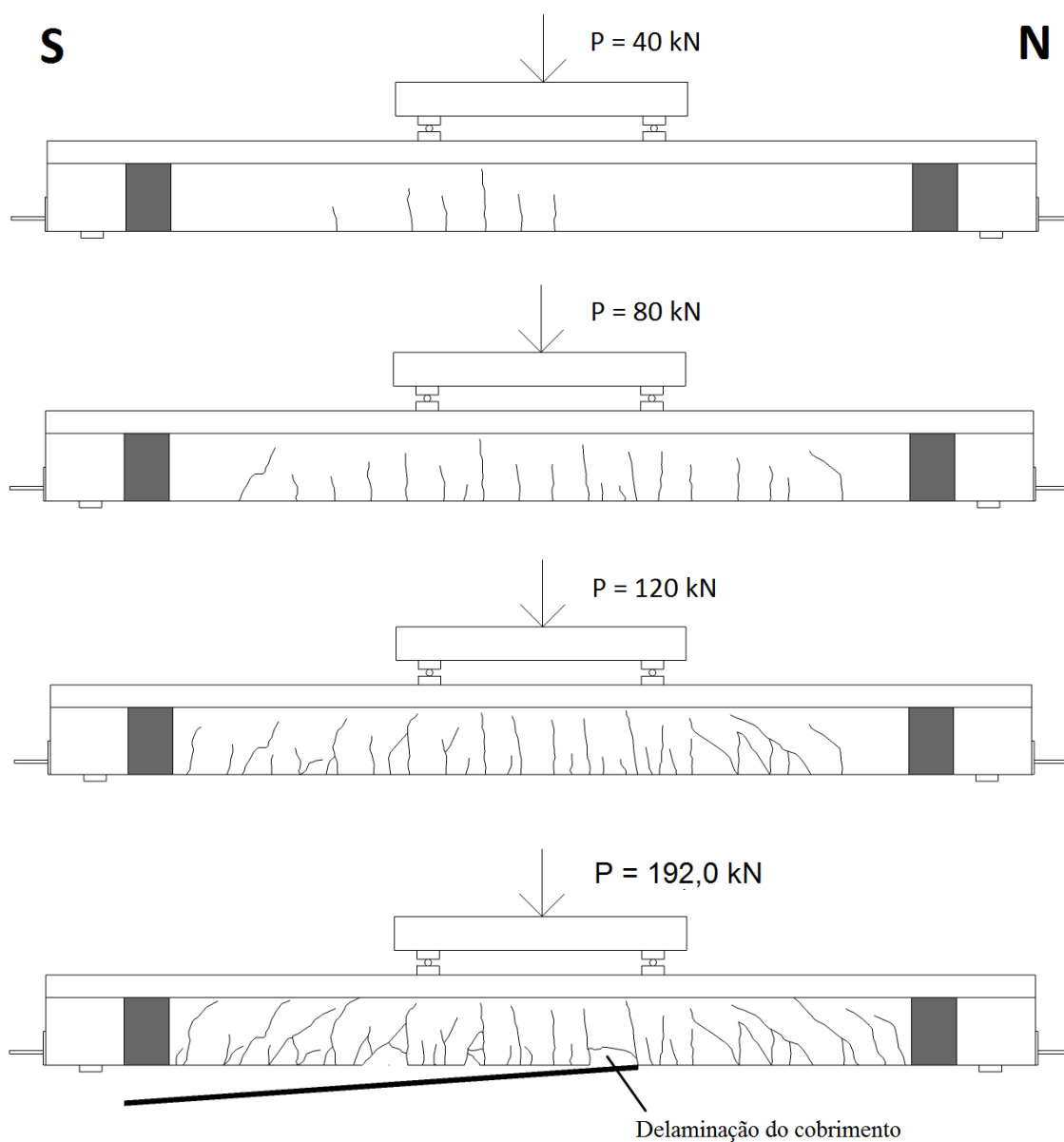


Figura 4.38 – Evolução da fissuração na viga VA4 – VC

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A análise dos resultados encontrados no capítulo anterior é o objetivo deste capítulo. O estudo será feito com os parâmetros medidos nos ensaios como: as deformações específicas dos materiais, os modos de ruptura e os deslocamentos verticais. É apresentada uma comparação entre os valores calculados da resistência das vigas com as diferentes normas e com os dados experimentais.

5.2 – COMPORTAMENTO DAS VIGAS ENSAIADAS

5.2.1 – Carga última e modo de ruptura

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de carga de ruptura, do incremento de resistência em relação à viga de referência e do modo de ruptura das vigas ensaiadas.

Tabela 5.1 – Resultados da carga última e modo de ruptura das vigas

Grupo	Viga	Tipo de Reforço	Carga de Ruptura $P_{u,exp}$ (kN)	Inc. Ref. (%)	Modo de Ruptura
A	VR1 - RF	Referência	159,6		Tipo A
	VA1 - CC	2 camadas de PRFC	188,2	17,9	Tipo B
	VA2 - CV	1 camada de PRFC 1 camada de PRFV	184,0	15,3	Tipo B
	VA3 - VV	2 camadas de PRFV	185,8	16,4	Tipo C
	VA4 - VC	1 camada de PRFV 1 camada de PRFC	192,0	20,3	Tipo C

As armaduras de flexão de todas as vigas escoaram antes de ser atingida a carga última

Tipo A – Deformação plástica excessiva da armadura de flexão

Tipo B – Descolamento do reforço de PRF

Tipo C – Delaminação do cobrimento

Como se pode observar, o modo de ruptura apresentado nas vigas reforçadas foi causado pela perda da ação composta entre o concreto e o reforço PRF. Para as vigas que foram reforçadas com a primeira camada de PRFC o tipo de ruptura foi o descolamento do reforço, porque o concreto não consegue absorver as tensões normais e de cisalhamento interfaciais e o reforço mantém aderida somente uma fina camada de concreto. Isto é incrementado pela propagação da descolagem localizada produzida pelas fissuras de flexão da viga. As vigas reforçadas primeiro com uma camada de PRFV apresentaram ruptura por

delaminação do cobrimento, que ocorre pelas tensões normais interfaciais desenvolvidas nas extremidades do reforço produzindo o destacamento de uma área reduzida do cobrimento desde o plano horizontal formado pelas barras da armadura longitudinal.

No incremento da resistência das vigas, a viga VA4 – VC (reforço híbrido) apresentou o maior aumento com 20,3% em relação à viga de referência, mostrando-se mais eficiente. A viga VA1 – CC teve um ganho de 17,9%. No entanto explica-se o ocorrido devido a melhor aderência do PRFV com o substrato do concreto. As vigas VA3 – VV e VA2 – CV tiveram incremento de 16,4% e 15,3%, respectivamente. A Figura 5.1 ilustra graficamente o acréscimo da resistência em relação à viga de referência das vigas reforçadas.

Por último existe uma diferença de 4,4% entre o valor da carga última da Viga VA2 – CV e a viga VA4 – VC, verifica-se que existe influência no comportamento das vigas reforçadas com compósitos híbridos, e a influência da sequência de colagem das fibras de carbono (PRFC) e de vidro (PRFV) na superfície de concreto. A Figura apresenta uma comparação entre os incrementos da resistência das vigas reforçadas em relação à viga de referência.

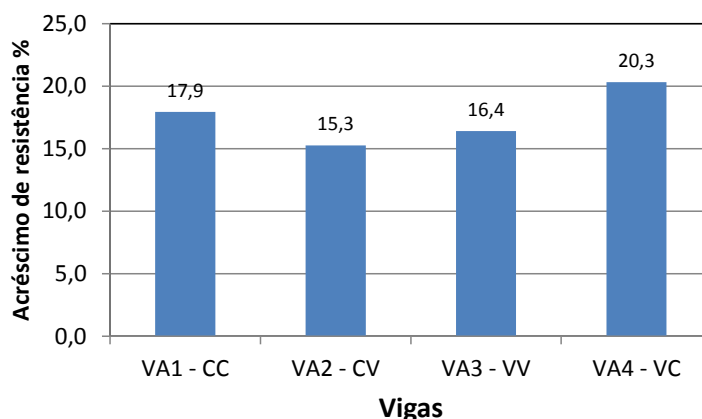


Figura 5.1 – Acréscimo de resistência das vigas reforçadas

5.2.2 – Deformação na armadura de flexão

A Figura 5.2 mostra o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão medida pelos extensômetros EAF – 03 (face interna e externa), localizado no meio do vão da viga. Como se pode observar, todas as vigas alcançaram escoamento da armadura antes da ruptura. Segundo a Figura 5.2, na viga VR1 – RF a armadura de flexão atingiu a tensão de escoamento com uma carga de 140 kN. As vigas reforçadas com PRF atingiram o

escoamento do aço com uma carga entre 150 kN e 165 kN, sendo este valor superior ao da viga de referência.

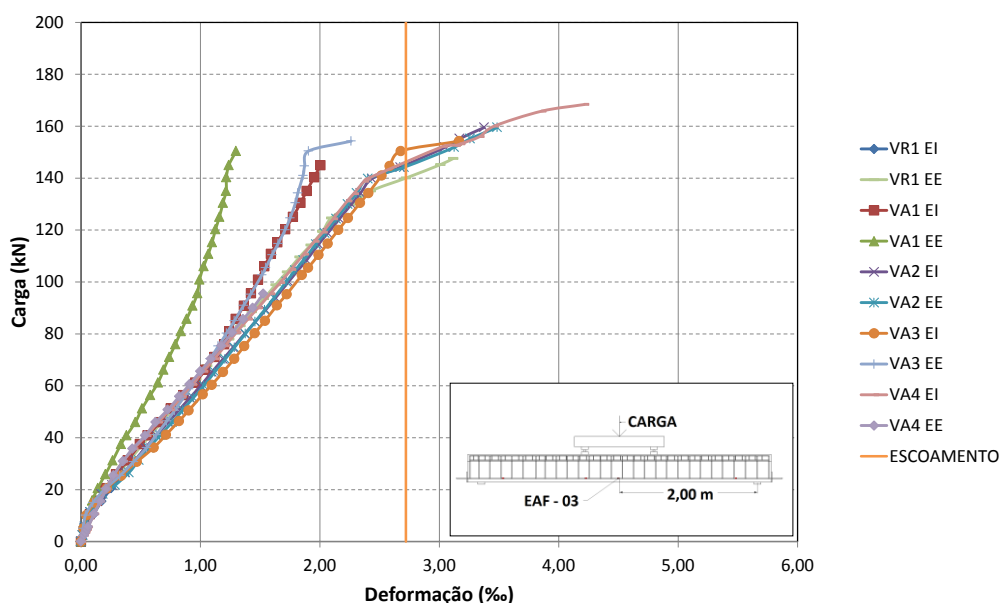


Figura 5.2 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 03

Na Tabela 5.2 é apresentado um resumo dos valores das deformações específicas máximas medidas na armadura de flexão no meio do vão das vigas ensaiadas, nos extensômetros (face interna e externa) EAF - 03. Na viga VA1 – CC os extensômetros pararam de funcionar antes do que o aço escoasse.

Tabela 5.2 – Deformação máxima da armadura de flexão no vão meio e cargas de início de escoamento e de ruptura

	Viga	Máxima def. aço (%)	Carga de escoamento (kN)	Carga de Ruptura (kN)
Grupo A	VR1 - RF	3,12*	140,0	159,6
	VA1 - CC	2,00*	160,0	188,2
	VA2 - CV	3,48*	150,0	184,0
	VA3 - VV	3,17*	150,0	185,8
	VA4 - VC	4,21*	155,0	192,0

*Registro antes da carga de ruptura

Deformação de escoamento do aço de ϕ 20 mm é de 2,72%.

A Figura 5.3 mostra o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão registrada pelos extensômetros (face interna e externa) EAF – 02, localizados a 1,50 m do apoio do lado sul. Como se pode observar o gráfico destes extensômetros apresenta um comportamento similar ao gráfico dos extensômetros do meio do vão da viga, confirmando assim os dados anteriores do escoamento da armadura de flexão.

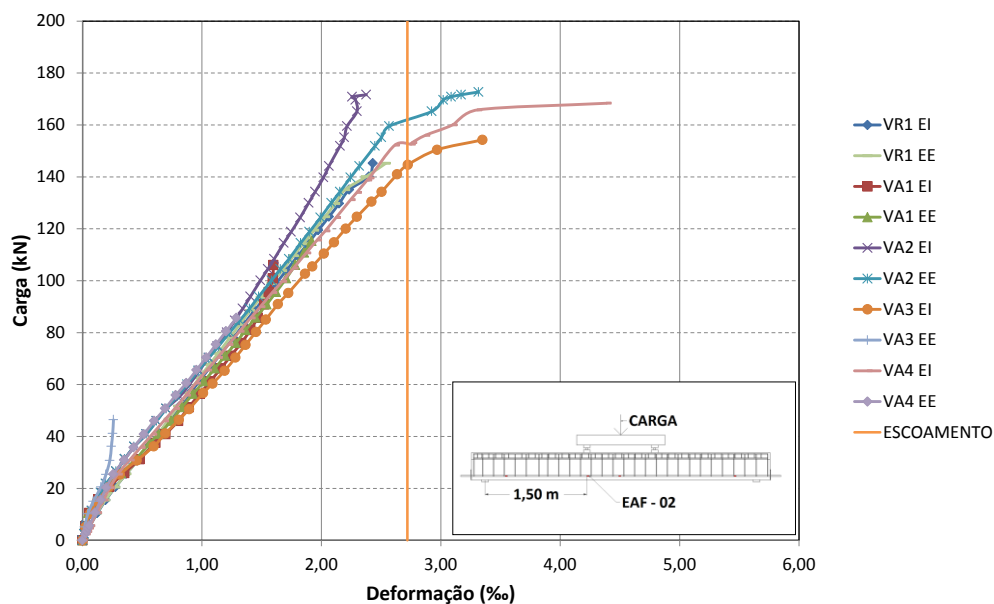


Figura 5.3 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 02

Nas Figuras 5.4 e 5.5 são apresentados os gráficos de carga-deformação específica da armadura de flexão medidas pelos extensômetros (face interna e externa) EAF – 01 (lado sul) e EAF - 04 (lado norte), localizados a 0,3 m do apoio. A viga VR1 – RF mostrou os maiores valores de deformação. As vigas reforçadas VA3 – VV, VA2 – CV e VA4 VC apresentaram os maiores registros de deformação. Se observa um aumento significativo das deformações entre 90 kN e 110 kN que pode-se explicar pelo aumento da fissuração pela força cortante próxima ao apoio.

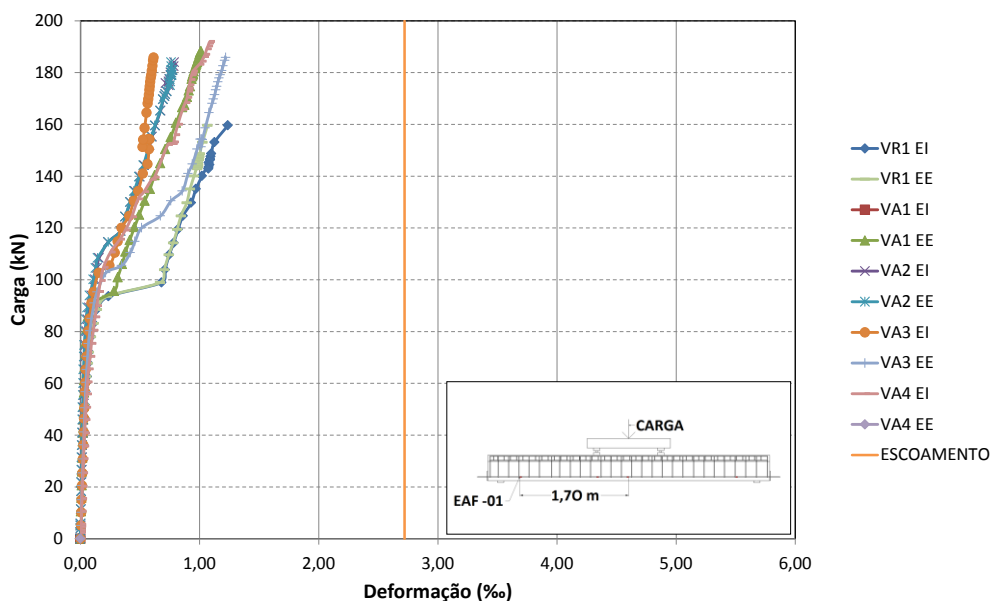


Figura 5.4 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 01

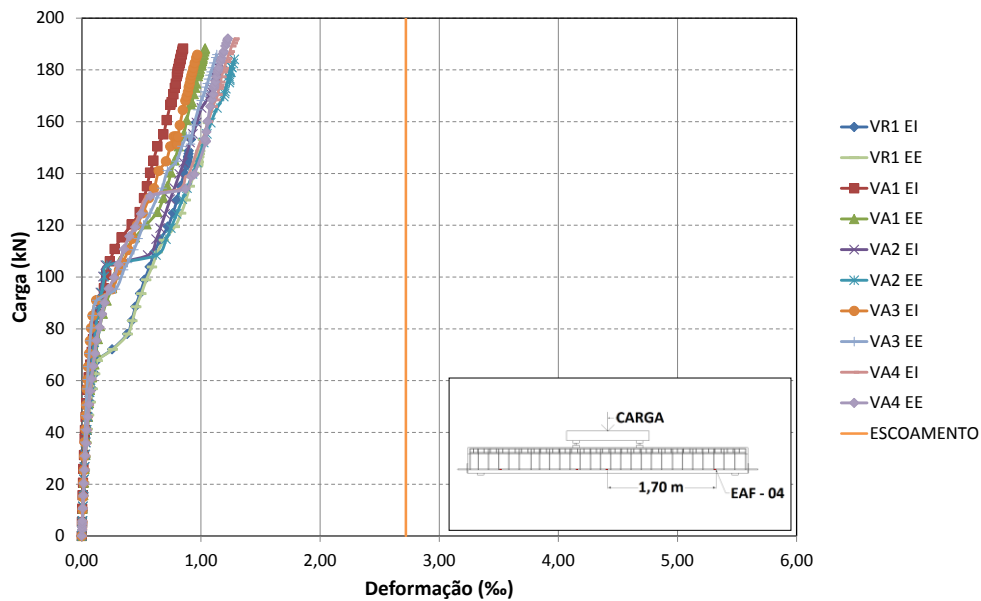


Figura 5.5 – Deformação na armadura de flexão - extensômetros EAF - 04

A Tabela 5.3 apresenta um resumo dos maiores valores das deformações específicas medidas na armadura de flexão, nos extensômetros (face interna e externa) EAF – 01 e EAF – 04. Nenhuma das deformações desses extensômetros alcançou a deformação do escoamento da barra de 20 mm (2,72%). Estes extensômetros não chegam até o escoamento, porque não são solicitados como no meio do vão.

Tabela 5.3 – Deformação máxima medida na armadura de flexão próxima aos apoios

	Viga	Máxima deformação da armadura (%)		Carga de Ruptura (kN)
		Extensômetros EAF - 01	Extensômetros EAF - 04	
Grupo A	VR1 - RF	1,24	1,06	159,6
	VA1 - CC	1,01	1,04	188,2
	VA2 - CV	0,79	1,28	184,0
	VA3 - VV	1,22	1,13	185,8
	VA4 - VC	1,09	1,28	192,0

*Registro antes da carga de ruptura

Deformação de escoamento do aço de ϕ 20 mm é de 2,72%.

5.2.3 – Deformação na armadura de cisalhamento

A Figura 5.6 ilustra o gráfico carga-deformação específica da armadura de cisalhamento das vigas ensaiadas, medidas pelos extensômetros (face interna e externa) EAC – 01. Estes extensômetros foram localizados a 0,8 m do apoio, no vão de corte. No começo as leituras são negativas, mostrando um encurtamento do aço. Isso ocorre porque os estribos serão solicitados depois que iniciar a fissuração diagonal por cisalhamento. Esta fissuração ocorreu com uma carga entre 50 kN e 70 kN.

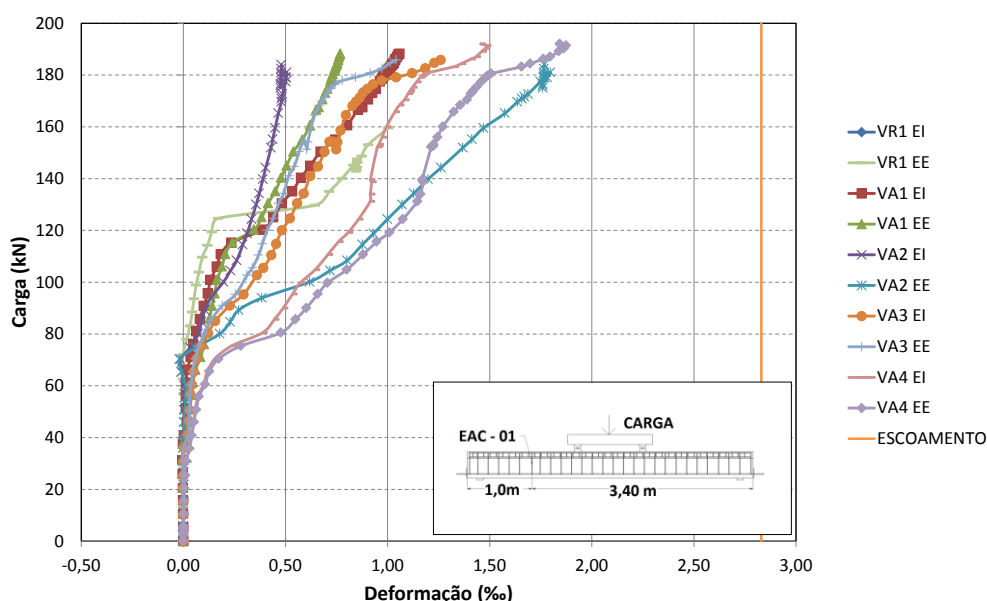


Figura 5.6 – Deformação na armadura de cisalhamento - extensômetros EAC - 01

A Tabela 5.4 apresenta um resumo das deformações específicas máximas medidas na armadura de cisalhamento, pelos extensômetros EAC – 01. Nenhuma das vigas registrou valores superiores a deformação de escoamento da barra de 8 mm (2,83%). A viga VA4 – VC apresentou o maior valor de deformação (1,84%). Isto se explica porque ela resistiu também ao maior carregamento.

Tabela 5.4 – Deformações máximas da armadura de cisalhamento

	Viga	Máxima def. aço (‰)	Carga de Ruptura (kN)
Grupo A	VR1 - RF	1,00	159,6
	VA1 - CC	1,06	188,2
	VA2 - CV	1,77	184,0
	VA3 - VV	1,26	185,8
	VA4 - VC	1,84	192,0

Deformação de escoamento do aço de ϕ 8 mm é de 2,83‰.

5.2.4 – Deformação no concreto

Na Figura 5.7 ilustra-se o gráfico carga-deformação específica do concreto das vigas ensaiadas, medida pelos extensômetros EC01 e EC02. Devido ao modo de ruptura da viga VR1 – RF por deformação plástica excessiva da armadura de flexão sem esmagamento do concreto, e ao modo de ruptura prematura das vigas reforçadas, as deformações de encurtamento no concreto foram inferiores ao limite da norma ABNT NBR 6118:2007 de 3,5‰ e da norma ACI 318:2008 de 3,0‰.

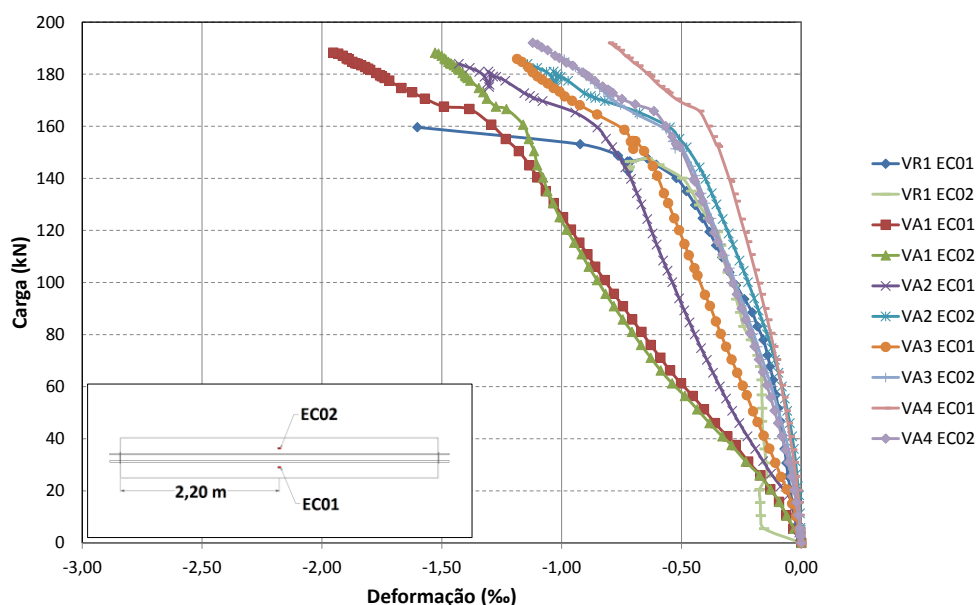


Figura 5.7 – Deformação no concreto - extensômetros EC01 e EC02

A Tabela 5.5 mostra um resumo dos valores da deformação de encurtamento máximo medido no concreto pelos extensômetros EC01 e EC02. A viga VA1 – CC apresentou a maior deformação (1,95‰), embora fosse esperado que a viga de referência VR1 – RF registrasse os valores maiores pelo modo de ruptura.

Tabela 5.5 – Deformações máximas do concreto

	Viga	Máxima deformação do concreto (‰)		Carga de Ruptura (kN)
		Extensômetro EC01	Extensômetro EC02	
Grupo A	VR1 - RF	1,60	0,50*	159,60
	VA1 - CC	1,95	1,53	188,22
	VA2 - CV	1,43	1,14	183,96
	VA3 - VV	1,19	0,99	185,79
	VA4 - VC	0,80	1,12	192,03

*Registro antes da carga de ruptura

5.2.5 – Deformação no reforço

A Figura 5.8 mostra o gráfico carga-deformação específica do reforço das vigas ensaiadas, medida pelos extensômetros: EFFC01 (1,50 m do apoio do lado sul), EFFC02 (no vão meio da viga) e EFFC03 (1,50 m do apoio do lado norte). Como se pode observar na Figura 5.7, para cargas entre 10 e 50 kN pode-se notar a mudança nos gráficos provocada pela fissuração de flexão. Com cargas superiores a 150 kN as deformações na fibra sofrem grandes incrementos. O ocorrido se explica porque neste nível de carregamento já iniciou o escoamento da armadura de flexão.

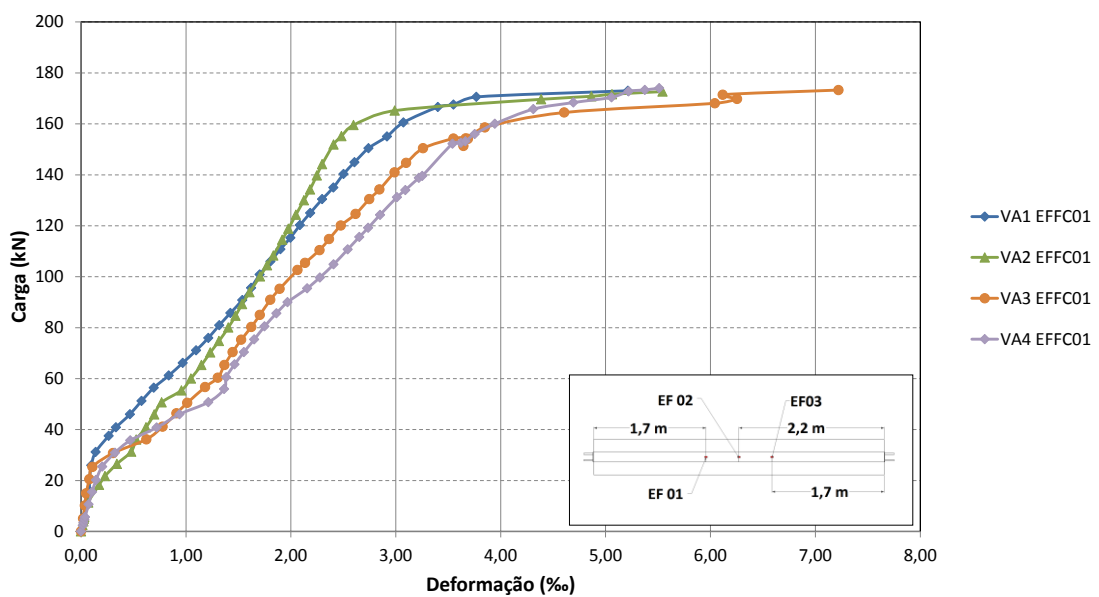


Figura 5.8 – Deformação no reforço - extensômetros EFFC01

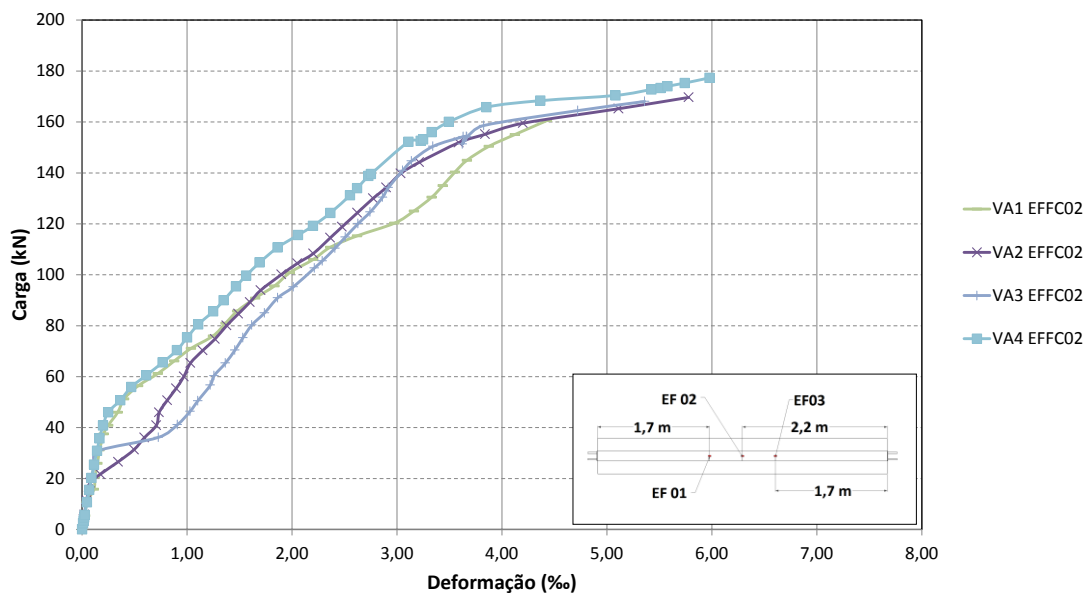


Figura 5.9 – Deformação no reforço - extensômetro EFFC02

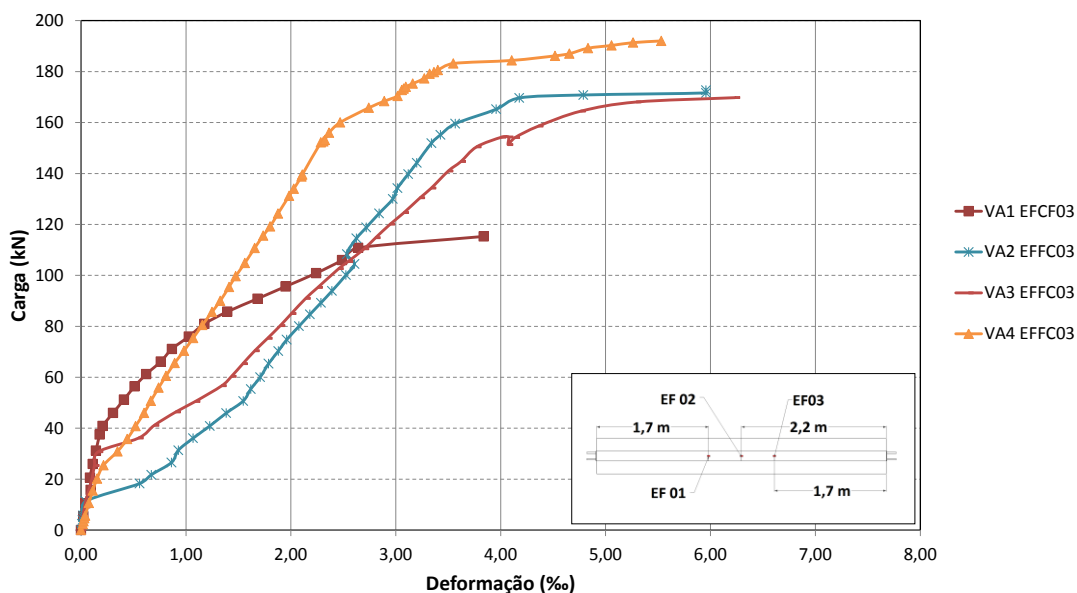


Figura 5.10 – Deformação no reforço - extensômetro EFFC03

Na tabela 5.6 é apresentado um resumo das deformações máximas do reforço, medidas pelos extensômetros: EFFC01, EFFC02 e EFFC03. Na viga VA3 – VV foi registrada a maior deformação (7,22‰). Não obstante, estas medidas ficaram distantes da deformação de ruptura do PRF porque a maioria das leituras das deformações foi registrada antes da carga de ruptura.

Tabela 5.6 – Deformações máximas do reforço

	Viga	Máxima deformação do reforço (‰)					Carga de Ruptura (kN)	
		Ext. EFFC01	Carga Medida (kN)	Ext. EFFC02	Carga Medida (kN)	Ext. EFFC03		
Grupo A	VA1 - CC	5,21	173,0	4,43	160,6	3,84	115,3	188,2
	VA2 - CV	5,54	172,7	5,78	169,7	5,96	172,7	184,0
	VA3 - VV	7,22	173,3	5,36	168,1	6,23	169,8	185,8
	VA4 - VC	5,51	174,0	5,98	177,3	5,53	192,0	192,0

5.2.6 – Deslocamentos verticais

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 são apresentados os deslocamentos verticais medidos nas vigas ensaiadas com defletômetros localizados no meio do vão da viga (LVDT04), nos pontos de aplicação do carregamento (LVDT03 e LVDT 05) e a 0,75m dos apoios (LVDT02 e LVDT06), respectivamente.

Das Figuras observa-se que as vigas reforçadas têm um incremento na rigidez e na capacidade de carga em relação com a viga de referência VR1 – RF, comprovando-se a eficiência do reforço. Mas, nota-se que as vigas apresentam um patamar de escoamento bem definido e de menor magnitude que a viga de referência, por isso há uma redução na ductilidade das vigas em relação à viga de referência.

As medições dos defletômetros localizados no ponto de aplicação de carregamento (LVDT 03 e LVDT05) e afastados do meio do vão da viga (LVDT02 e LVDT06), registraram medidas menores de deslocamentos verticais, embora, seu comportamento seja muito similar ao do defletômetro LVDT 04.

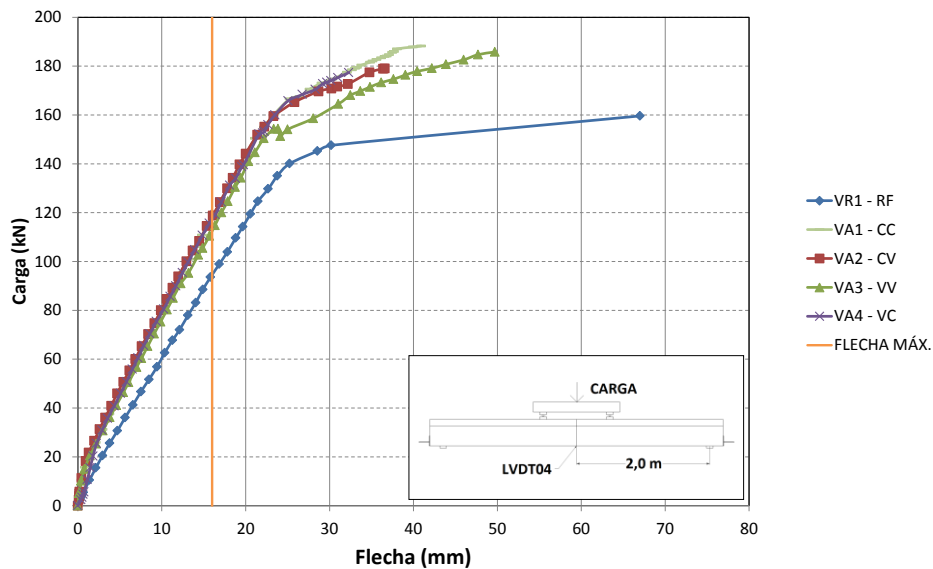


Figura 5.11 – Deslocamento vertical no meio do vão da viga - defletômetro LVDT04

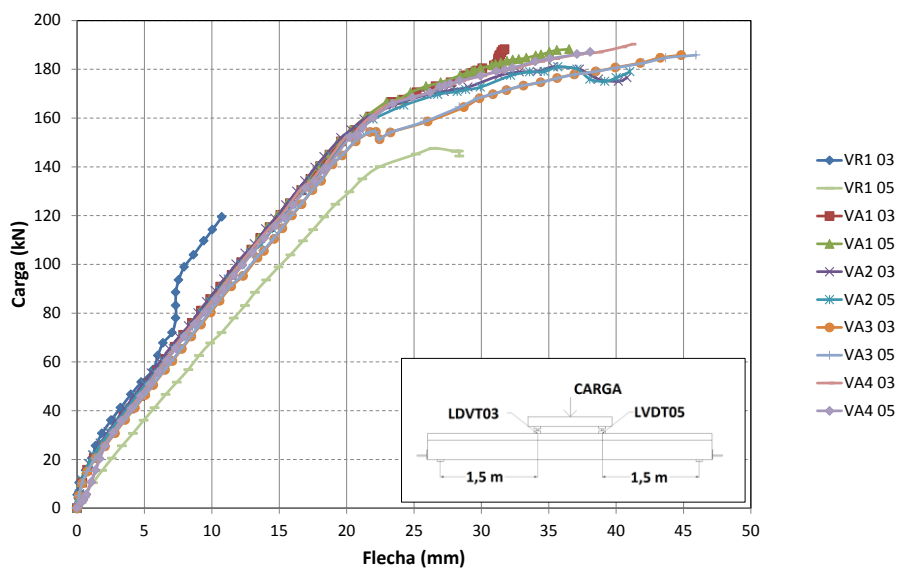


Figura 5.12 – Deslocamento vertical - defletômetros LVDT03 e LVDT05

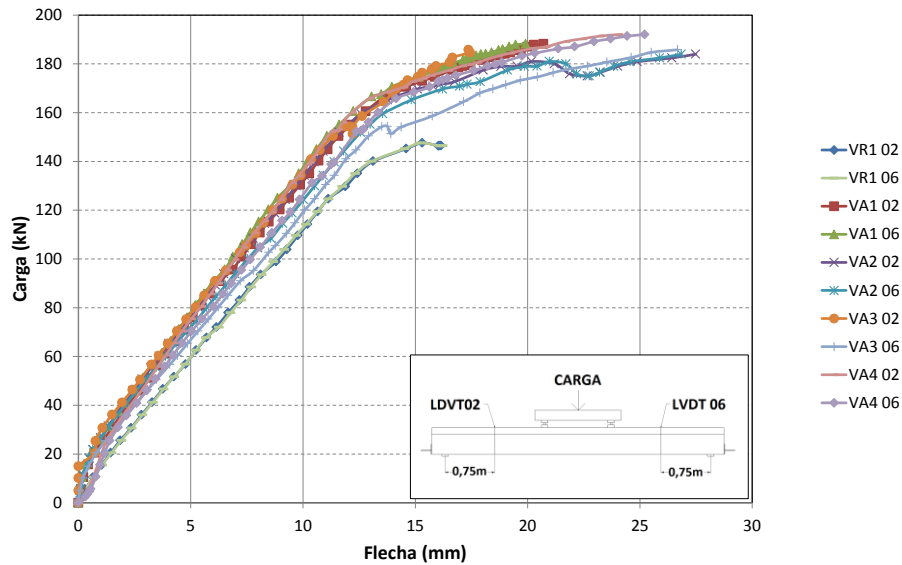


Figura 5.13 – Deslocamento vertical - defletômetros LVDT02 e LVDT06

Na Tabela 5.7 são apresentados os deslocamentos no meio do vão das vigas ensaiadas, comparados com as cargas de fissuração do concreto, as cargas de escoamento da armadura de flexão e as cargas de ruptura. Pode-se comprovar com estes dados o acréscimo na rigidez nas vigas reforçadas pelos deslocamentos menores e também a perda de ductilidade com os valores menores dos deslocamentos máximos das vigas reforçadas em relação à viga de referência.

Tabela 5.7 – Deslocamentos verticais no meio do vão das vigas nas cargas de fissuração, de escoamento da armadura de flexão e na carga última

	Viga	Desloc. Fissuração (mm)	Carga Fissuração (kN)	Desloc. Escoamento (mm)	Carga Escoamento Aço (kN)	Desloc. Máximo (mm)	Carga de Ruptura (kN)
Grupo A	VR1 - RF	2,95	21,0	25,24	140,0	67,00	159,6
	VA1 - CC	2,13	23,0	25,25	165,0	40,91	188,2
	VA2 - CV	1,93	28,0	21,38	150,0	36,58*	184,0
	VA3 - VV	2,20	22,0	22,18	150,0	49,70	185,8
	VA4 - VC	2,23	23,0	22,66	155,0	32,28*	192,0

*Registro antes da carga de ruptura

A Tabela 5.8 mostra um resumo dos valores máximos registrados dos deslocamentos verticais medidos nos diferentes defletômetros, exceto o do meio do vão.

Tabela 5.8 – Deslocamentos verticais máximos - defletômetros LVDT02, LVDT06, LVDT03 e LVDT05

	Viga	LVDT02 (mm)	LVDT06 (mm)	LDVT 03 (mm)	LVDT05 (mm)	Carga de Ruptura (kN)
Grupo A	VR1 - RF	16,15*	16,22*	10,74*	28,37*	159,6
	VA1 - CC	20,70	19,91	31,72	36,53	188,2
	VA2 - CV	27,48	26,85	40,81*	41,02*	184,0
	VA3 - VV	17,37	26,68	44,83	45,94	185,8
	VA4 - VC	24,04	25,21	41,15*	38,08*	192,0

*Registro antes da carga de ruptura

5.2.7 - Contribuição do reforço de PRF

A contribuição do reforço de PRF pode-se avaliar com a comparação da carga aplicada na viga e a força suportada pelo reforço (Figura 5.12). A força é calculada simplesmente com o módulo de elasticidade de cada material e a deformação específica para cada nível de carregamento, além do valor da área de reforço. Foram usados os extensômetros com mais dados (EFFC01 para as vigas VA1 – CC, VA3 – VV, VA4 – VC e EFFC03 para a viga VA2 – CV). Com uma carga de 20 a 30 kN observa-se que a força que suporta o reforço é mínima, mesmo que com o incremento do carregamento esta força também aumenta semelhante ao gráfico carga-deformação das vigas. Conclui-se que as vigas com reforço híbrido (VA2 – CV e VA4 – VC) aguentam maior força num mesmo nível de carga e elas possuem um comportamento mais eficaz que as vigas reforçadas com um tipo só de PRF (VA1 – CC e VA3 – VV).

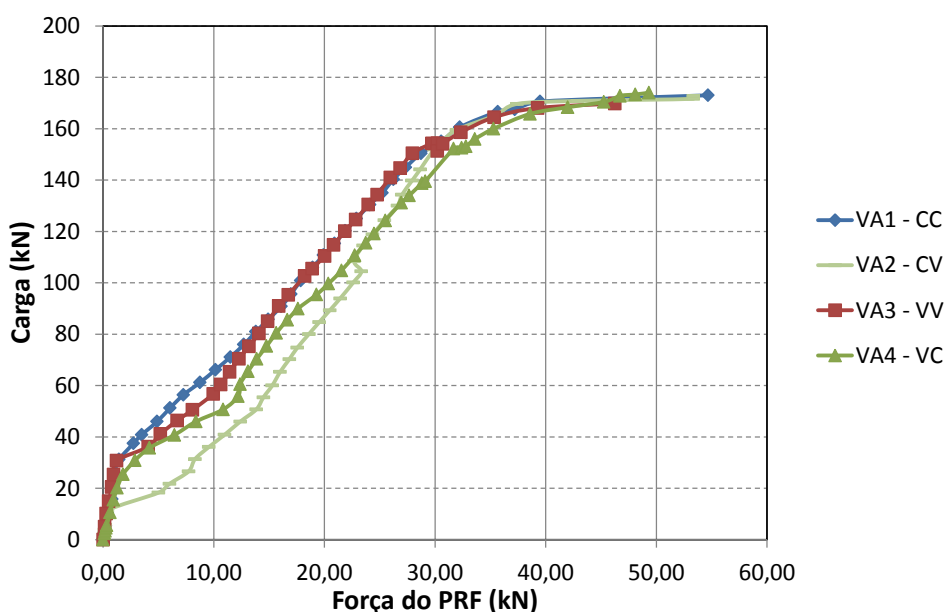


Figura 5.14 – Gráfico carga-força do PRF das vigas reforçadas

5.3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS RESULTADOS CALCULADOS PELA NORMA ABNT NBR 6118:2007, PELA NORMA ACI 440.2R:2008 E PELO *Bulletin* 14 FIB:2001

São apresentadas as comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados dos cálculos feitos segundo as normas ABNT NBR 6118:2007, ACI 440.2R:2008 e *Bulletin* 14 FIB:2001. Para a estimativa realizada pelas normas foram utilizados os resultados experimentais do concreto e aço, as propriedades dos PRF foram especificadas pelo fabricante.

5.3.1 - Carga última estimada pela norma ACI 440.2R:2008

Para o cálculo da carga última das vigas com reforço híbrido, foi necessário fazer uma adaptação da norma ACI 440.2R:2008, porque a norma só considera o cálculo da resistência à flexão com os PRF trabalhando isoladamente. Além disso, foi calculada a deformação inicial no substrato do concreto pelo peso próprio, no momento da aplicação do reforço de PRF. A Tabela 5.9 apresenta a comparação dos resultados experimentais das vigas com os resultados obtidos no cálculo pela norma.

Tabela 5.9 – Comparação entre carga última experimental e carga teórica (ACI 440.2R:2008)

	Viga	Carga última teórica $P_{u,teo}$ (kN)	Carga última experimental $P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,exp} / P_{u,teo}$	Modo de Ruptura
Grupo A	VR1 - RF	159,3	159,6	1,00	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA1 - CC	208,6	188,2	0,90	Descolamento do reforço de PRF
	VA2 - CV	201,7*	184,0	0,91	Descolamento do reforço de PRF
	VA3 - VV	202,5	185,8	0,92	Delaminação do cobrimento
	VA4 - VC	201,7*	192,0	0,95	Delaminação do cobrimento

* Calculada segundo a norma ACI 440:2002 com adaptações

A Figura 5.13 ilustra a comparação dos resultados calculados pela norma ACI 440.2R:2008 com os resultados obtidos experimentalmente.

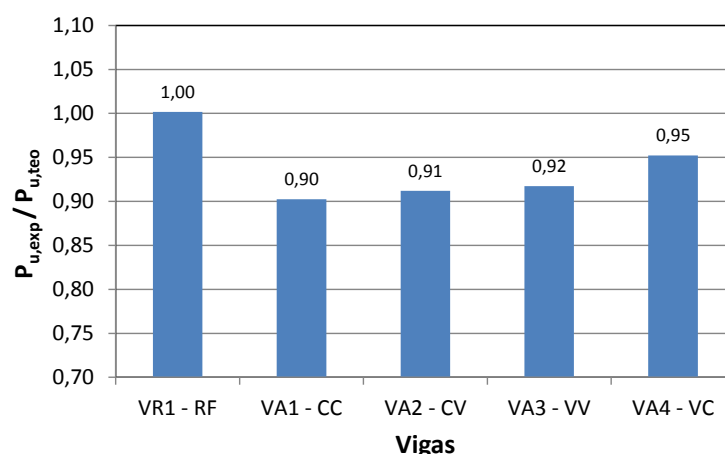


Figura 5.15 – Comparação dos resultados pela norma ACI 440.2R:2008

De acordo com a Figura 5.13 e a Tabela 5.9 pode-se afirmar que o procedimento de cálculo foi satisfatório para a viga de referência VR1 – RF porque sua relação carga última experimental e carga última teórica ($P_{u,exp} / P_{u,teo}$) foi praticamente 1,0. No entanto, todas as relações das vigas reforçadas ficaram inferiores a 1,0. A viga com reforço híbrido VA4 – VC teve melhor comportamento ($P_{u,exp} / P_{u,teo} = 0,95$). Isto se pode explicar devido ao modo de ruptura (descolamento ou de laminação) e ao limite máximo de deformação do reforço de PRF definido pela norma.

5.3.2 - Carga última estimada pela norma *Bulletin 14 FIB:2001*

Esta norma também teve que ser adaptada porque seu procedimento de cálculo não considera o reforço híbrido à flexão. A Tabela 5.10 mostra a comparação dos resultados experimentais das vigas com os resultados obtidos no cálculo pelo *Bulletin 14 FIB:2001*.

Tabela 5.10 – Comparação entre carga última experimental e carga teórica (*Bulletin 14 FIB:2001*)

	Viga	Carga última teórica $P_{u,teo}$ (kN)	Carga última experimental $P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,teo} / P_{u,exp}$	Modo de Ruptura
Grupo A	VR1 - RF	159,5	159,6	1,00	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA1 - CC	202,9	188,2	0,93	Descolamento do reforço de PRF
	VA2 - CV	196,3*	184,0	0,94	Descolamento do reforço de PRF
	VA3 - VV	189,8	185,8	0,98	Delaminação do cobrimento
	VA4 - VC	196,3*	192,0	0,98	Delaminação do cobrimento

* Calculada segundo a norma *Bulletin 14 FIB:2001* com adaptações

A Figura 5.14 apresenta a comparação dos resultados calculados pelo *Bulletin* 14 FIB:2001 com os resultados obtidos experimentalmente. Segundo a Tabela 5.10 pode-se concluir que o procedimento de cálculo foi satisfatório para a viga de referência VR1 – RF, a viga VA3 – VV e a viga VA4VC, porque suas relações de carga última experimental e carga última teórica ($P_{u,exp} / P_{u,teo}$) foram próximas a 1,0. O anterior se pode explicar porque esta norma limita estritamente o valor da deformação última do reforço de PRF no cálculo da resistência última a flexão.

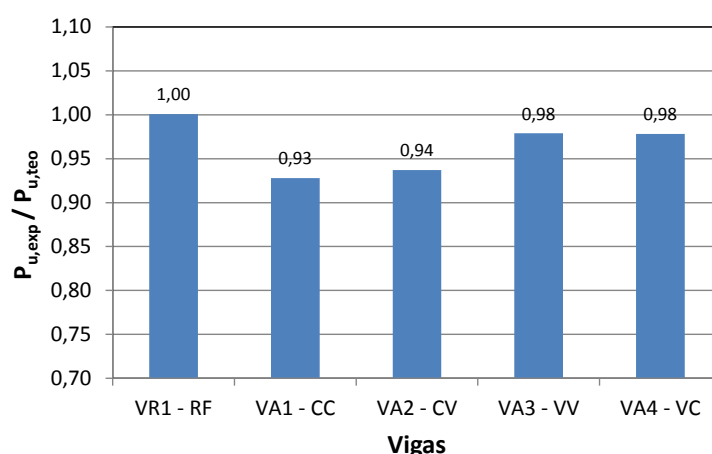


Figura 5.16 – Comparação dos resultados pela norma *Bulletin* 14 FIB:2001

5.3.3 - Comparação entre os resultados experimentais, o código ACI 440-2R:2008 e o *Bulletin* 14 FIB:2001

Finalmente apresenta-se o comparativo entre os resultados experimentais e as normas. A Tabela 5.11 ilustra os resultados de cada uma das vigas ensaiadas comparado com o valor obtido pelo código ACI 440.2R:2008 e pelo *Bulletin* 14 FIB:2001, além das relações de carga ($P_{u,exp} / P_{u,teo}$).

Tabela 5.11 – Comparação entre os resultados experimentais e as normas

		ACI 440.2R:2008			<i>Bulletin</i> 14 FIB:2001	
Grupo	Viga	$P_{u,exp}$	$P_{u,teo}$	$P_{u,teo} / P_{u,exp}$	$P_{u,teo}$	$P_{u,teo} / P_{u,exp}$
		(kN)	(kN)		(kN)	
Grupo A	VR1 - RF	159,6	159,3	1,00	159,5	1,00
	VA1 - CC	188,2	208,6	0,90	202,9	0,93
	VA2 - CV	184,0	201,7	0,91	196,3	0,94
	VA3 - VV	185,8	202,5	0,92	189,8	0,98
	VA4 - VC	192,0	201,7	0,95	196,3	0,98

A Figura 5.15 mostra o resumo dos resultados experimentais e calculados pelas normas de cada uma das vigas ensaiadas. Como se pode observar os resultados calculados mais próximos comparados com os dados experimentais foram do *Bulletin* 14 FIB:2001. Como foi explicado anteriormente isso ocorre pela deformação limite permitida segundo esta norma.

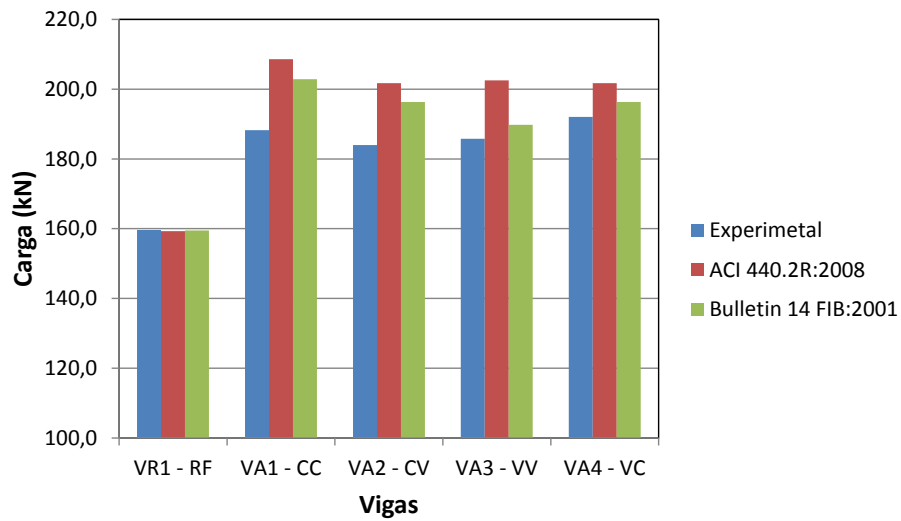


Figura 5.17 – Comparação dos resultados experimentais e as normas ACI 440.2R:2008 e *Bulletin* 14 FIB:2001

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas da realização dos ensaios experimentais e da análise dos diferentes parâmetros estudados do comportamento estrutural das vigas em concreto armado com seção transversal “T” reforçadas à flexão com a técnica de materiais compósitos híbridos colados externamente na superfície do concreto, submetidas a carregamentos estáticos até a ruptura.

O programa experimental desenvolvido consistiu de cinco (5) vigas, uma viga sem reforço como referência e as outras foram com PRF. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

6.2 – CONCLUSÕES

As conclusões são apresentadas para diferentes parâmetros: desempenho do reforço à flexão, estudo do tipo de ruptura, influência da sequência de colagem dos PRF e comparação dos dados experimentais com os resultados calculados pelas diferentes normas.

6.2.1 - Desempenho do reforço à flexão

A utilização de PRF para o reforço híbrido à flexão de vigas é um método eficaz para aumentar a capacidade de carga última. Comparando os resultados de carga última, a viga com reforço híbrido VA4 – VC alcançou o maior acréscimo na resistência (20,3%) em relação à viga de referência, contrário ao esperado porque segundo os cálculos obtidos pelas normas (ACI 440.2R:2008 e *Bulletin* 14 FIB:201) a viga VA1 – CC tinha uma projeção de resistência superior.

Embora a resistência e a rigidez das vigas reforçadas tenham sido aumentadas, a ductilidade em relação à viga de referência, sofreu uma redução. Entre as vigas reforçadas, a viga VA3 – VV teve o melhor comportamento neste parâmetro; isto se pode explicar porque o PRFV tem um módulo de elasticidade (74,2 GPa) menor que o PRFC (227 GPa).

Portanto, para um mesmo nível de carregamento, a deformação do PRFV será superior à do PRFC melhorando a ductilidade do elemento estrutural.

6.2.2 - Modos de ruptura

A viga de referência VR1 – RF apresentou o modo de ruptura de deformação plástica excessiva da armadura de flexão sem esmagamento do concreto. As vigas VA1 – CC e VA2 CV que foram reforçadas com a primeira camada de compósito de carbono (PRFC) apresentaram ruptura por descolamento do reforço de PRF da superfície de concreto. As vigas VA3 – VV e VA4 – VC reforçadas com a primeira camada de compósito de vidro (PRFV) apresentaram ruptura por delaminação do revestimento. Este comportamento pode-se explicar devido à diferença entre as características do substrato da fibra de carbono e da fibra de vidro, que incide diretamente na aderência entre a fibra e o substrato de concreto. Estes modos são prematuros e indesejáveis, cabendo notar que para tentar evitá-los foi instalada a ancoragem em forma de U nas extremidades de cada viga, segundo as recomendações da norma ACI 440.2R:2008.

As rupturas frágeis podem-se verificar com os registros das deformações específicas máximas medidas no reforço. Por exemplo, na viga VA3 – VV foi registrada a deformação de 7,22%. Comparando este valor com a deformação última fornecida pelo fabricante 20,0% pode-se afirmar que a eficiência foi limitada pelo tipo de ruptura. O mesmo ocorre com a recomendação do *Bulletin* 14 FIB:2001 que limita a deformação última do PRF entre 6,5% a 8,5%. Por isso se devem tomar medidas para evitar este tipo de ruptura, como a aplicação de ancoragem mecânica contra o descolamento e o uso de ancoragens (gravatas transversais de PRF) em diferentes pontos contra a delaminação.

6.2.3 - Influência no comportamento das vigas reforçadas da sequência de colagem dos compósitos de carbono (PRFC) e de vidro (PRFV) na superfície de concreto

Quando se compara os resultados das cargas últimas obtidas experimentalmente, se pode afirmar que a ordem da colagem dos materiais compósitos influencia diretamente na resistência última e no modo de ruptura das vigas. A viga com reforço híbrido VA4 – VC alcançou a maior carga de ruptura (192,0 kN) e a viga com reforço híbrido VA2 – CV a menor (184,0 kN). A diferença da resistência à flexão entre as vigas com reforço híbrido

foi de 4,39% devido ao PRFV ter características de superfície diferentes do PRFC, que melhoram a aderência entre o compósito e o concreto.

Outro aspecto que mostra a influência da sequência de colagem é o modo de ruptura. Como foi analisado anteriormente, ele se modifica dependendo do tipo da primeira camada que foi colada na superfície do concreto.

6.2.4 - Comparação entre os resultados experimentais e os estimados segundo as normas

Para o cálculo da resistência última das vigas foram utilizadas as normas: ACI 440.2R:2008 e o *Bulletin* 14 FIB:2001. Estas normas foram adaptadas para o cálculo da resistência à flexão das vigas com reforço híbrido VA2 – CV e VA4 - VC. Além disso, foram utilizados os dados experimentais do concreto e do aço, mas para os PRF foram usados os dados fornecidos pelo fabricante. Finalmente, os fatores de redução das diferentes formulações foram assumidos unitários.

A relação ($P_{u,exp} / P_{u,teo}$) das cargas de ruptura experimentais das vigas reforçadas com as cargas estimadas com a norma ACI 440.2R:2008 ficou inferior a 1,0, entre os valores de 0,90 e 0,95, indicando que os valores teóricos ultrapassaram os resultados experimentais (situação de insegurança). Isto aconteceu pela ruptura prematura das vigas e porque os valores máximos de deformação para o cálculo pela norma (9,5‰ para o PRFC e 11,3‰ para o PRFV) são maiores que as deformações medidas experimentalmente até a ruptura.

A relação $P_{u,exp} / P_{u,teo}$ para as vigas reforçadas segundo o *Bulletin* 14 FIB:2001 variou entre 0,93 e 0,98. Os resultados experimentais, apesar de inferiores (contra a segurança), ficaram próximos dos dados obtidos no cálculo segundo a norma. Embora a ruptura tenha sido prematura, a deformação máxima do reforço utilizada no cálculo das vigas foi de 8,5‰, tanto para o PRFC como para o PRFV. Por isso os resultados foram mais satisfatórios que com a norma ACI 440.2R:2008.

6.3 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuação desta pesquisa são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Aprofundar mais o estudo do comportamento do reforço híbrido a flexão, mudando o tipo de carregamento e analisando outros fatores como a fadiga.
- Estudo com ensaios experimentais que avaliem a aderência entre os diferentes tipos de PRF e o concreto.
- Realização de mais ensaios de vigas com reforço híbrido para acrescentar os dados experimentais deste tipo de reforço e para validar os resultados obtidos nesta pesquisa.
- Estudo de novos mecanismos de ancoragem dos PRF ao longo da viga, para evitar os modos de ruptura prematuros.
- Modelagem numérica através do método dos elementos finitos para análise do comportamento do reforço híbrido à flexão de vigas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI 440:2R – *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. Michigan, USA, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI 318 – *Building code requirements for reinforced concrete*. Michigan, USA, 2008.

ARAÚJO, C. M. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. 2002. 140 f. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR NM 67 – **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6118 – **Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6892 – **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7222 – **Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7480 – **Barras e fios de aço destinados à construção civil**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 8522 – **Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 12142 – **Concreto – Determinação da resistência à tração em flexão em corpos-de-prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

ARQUEZ, A. P. **Aplicação 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 em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

Bulletin 14 FIB (2001) – **Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures –** Technical Report.

CASTRO, E. K. **Reforço em vigas “T” de concreto armado com vários tipos de compósitos em entalhes no cobrimento de concreto (CEC).** 2005. 431 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília – Brasília, 2005.

CALLISTER, JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução, 7ª** Edição, Ed. LTC, Rio de Janeiro – RJ, 2008.

CHANSAWAT K., POTISUK T., MILLER T. H., YIM S. C. and KACHLAKEV. **FE Models of GFRP and CFRP strengthening of Reinforced Concrete Beams.** Journal Advances in Civil Engineering, 2009, 13 p.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado. Fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação,** Editora Universidade de Brasília, FINATEC. Brasília, 2005.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído**

por compósito cimentício de alto desempenho. 2007. 328 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

GAMINO, A. L. **Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP.** 2007. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2007.

HOSNY A., SHAHEEM H., ABDELRAHMAN A. and ELAFANDY T. **Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Hybrid FRP Laminates.** Journal Cement & Concrete Composites 28, 2006, pp. 906-913.

KIM, H. S. and SHIN, Y. S. **Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams retrofitted with hybrid fiber polymers (FRPs) under sustaining loads.** Journal Composite Structures 93, 2011, pp. 802-811.

MAC GREGOR, J. G. - **Reinforced concrete** – Mechanics and design. 3ª Edição, Upper Saddle River, Ed. Prentice Hall, 1997.

MACHADO, A. P. – **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**, 1ª Edição, Editora Pini, São Paulo, 2002.

MENEGHETTI, L. C. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida.** 2007. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

LEVY NETO, F. e PARDINI, L. C. – **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia** – 1ª Edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2006.

LENWARI, A. and THEPCHATRI, T. **Experimental Study on RC Beams Strengthened with Carbon and Glass Fiber Sheets.** Engineering Journal: volume 13, Abr, 2009, pp. 9.

OLIVEIRA JUNIOR, F. S. **Reforço à Flexão de Vigas “T” de Concreto Armado com Colagem Externa e Inserção de Compósitos com Fibra de Carbono e Barras de Aço no Concreto de Cobrimento.** 2005. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.

SILVA FILHO, J. N. **Análise Experimental de Vigas “T” em Concreto Armado Reforçadas à Flexão com FRP Submetidas a Carregamentos Pseudo-estáticos e Cíclicos.** 2005. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 308 p.

SOARES, C. M. **Reforço de Estruturas de Betão Armado com CFR - 1ª Edição,** Universidade Fernando Pessoa (UFP). Porto, 2006

SALLABERRY, R. D. **Limite de deformação das fibras de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado.** 144 p. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

XIONG, G. J.; YANG J. Z. and JI Z. B. **Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Extrenally Bonden Hybrid Carbon Fiber-Glass Fiber Sheets.** Journal of composites for construction ASCE, Mai-Jun, 2004, pp. 275.

A – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS VIGAS ENSAIADAS

A.1 – VIGA VR1 – RF

Tabela A.1 – Deformações da armadura de flexão da viga VR1 - RF

Carga (kN)	Deformações específicas (‰)							
	EAlF-01	EAEF-01	EAlF-02	EAEF-02	EAlF-03	EAEF-03	EAlF-04	EAEF-04
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,46	0,00	0,00	0,06	0,06	0,05	0,04	0,00	0,01
10,44	0,01	0,01	0,12	0,12	0,11	0,09	0,01	0,01
15,45	0,01	0,01	0,19	0,19	0,17	0,15	0,01	0,01
20,52	0,02	0,01	0,28	0,27	0,25	0,22	0,02	0,02
25,56	0,02	0,02	0,37	0,37	0,34	0,30	0,02	0,03
30,66	0,02	0,02	0,46	0,46	0,44	0,39	0,03	0,03
36,06	0,03	0,02	0,55	0,55		0,49	0,04	0,04
41,22	0,03	0,03	0,64	0,64		0,59	0,05	0,05
46,68	0,03	0,03	0,73	0,72		0,69	0,06	0,06
51,69	0,04	0,03	0,81	0,80		0,78	0,07	0,07
56,85	0,04	0,04	0,90	0,89		0,87	0,09	0,09
62,61	0,06	0,05	1,00	0,98		0,97	0,11	0,11
67,71	0,06	0,06	1,09	1,06		1,06	0,13	0,13
72,03	0,07	0,07	1,16	1,14		1,13	0,25	0,26
77,94	0,09	0,09	1,26	1,23		1,24	0,38	0,39
83,13	0,11	0,11	1,35	1,32		1,34	0,42	0,43
88,50	0,14	0,14	1,44	1,40		1,43	0,45	0,46
93,57	0,23	0,22	1,53	1,49		1,53	0,49	0,50
98,91	0,68	0,67	1,62	1,58		1,63	0,53	0,54
103,89	0,71	0,70	1,71	1,67		1,72	0,57	0,59
109,62	0,75	0,74	1,80	1,77		1,83	0,61	0,64
114,24	0,78	0,78	1,89	1,85		1,92	0,66	0,69
119,43	0,82	0,81	1,97	1,94		2,02	0,72	0,78
124,65	0,86	0,84	2,06	2,03		2,09	0,77	0,83
129,69	0,93	0,89	2,15	2,11		2,26	0,80	0,87
135,03	0,97	0,92	2,23	2,20		2,43	0,83	0,91
140,04	1,02	0,95	2,40	2,37		2,72	0,86	0,94
145,20	1,08	0,99	2,43	2,54		3,01	0,89	0,98
147,57	1,09	1,00				3,12	0,90	0,99
146,34	1,09	0,99					0,89	0,98
146,46	1,09	0,99					0,89	0,99
146,46	1,09	0,99					0,89	0,98
144,39	1,08	0,99					0,89	0,98
143,46	1,08	0,98					0,88	0,98
142,83	1,07	0,98					0,88	0,98
148,71	1,10	1,00					0,90	0,99
153,09	1,12	1,02					0,92	1,02
159,60	1,24	1,07					0,96	1,06

Tabela A.2 – Deformações da armadura
de cisalhamento da viga VR1 - RF

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EAIC-01	EAEC-01
0,00		0,00
5,46		0,00
10,44		0,00
15,45		0,00
20,52		0,00
25,56		0,00
30,66		0,02
36,06		0,02
41,22		0,02
46,68		0,02
51,69		0,01
56,85		0,00
62,61		0,00
67,71		-0,01
72,03		0,00
77,94		0,02
83,13		0,03
88,50		0,04
93,57		0,05
98,91		0,06
103,89		0,08
109,62		0,09
114,24		0,12
119,43		0,14
124,65		0,17
129,69		0,64
135,03		0,71
140,04		0,78
145,20		0,83
147,57		0,85
146,34		0,85
146,46		0,85
146,46		0,85
144,39		0,85
143,46		0,85
142,83		0,85
148,71		0,87
153,09		0,91
159,60		1,00

Tabela A.3 – Deformações no concreto
da viga VR1 - RF

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EC01	EC02
0,00	0,00	0,00
5,46	-0,02	-0,15
10,44	-0,03	-0,17
15,45	-0,04	-0,17
20,52	-0,05	-0,17
25,56	-0,05	-0,14
30,66	-0,06	-0,15
36,06	-0,07	-0,15
41,22	-0,08	-0,16
46,68	-0,09	-0,16
51,69	-0,10	-0,16
56,85	-0,11	-0,16
62,61	-0,12	-0,17
67,71	-0,13	-0,17
72,03	-0,14	-0,18
77,94	-0,16	-0,21
83,13	-0,18	-0,24
88,50	-0,20	-0,26
93,57	-0,24	-0,27
98,91	-0,27	-0,28
103,89	-0,30	-0,31
109,62	-0,33	-0,33
114,24	-0,36	-0,33
119,43	-0,38	-0,35
124,65	-0,41	-0,39
129,69	-0,44	-0,43
135,03	-0,48	-0,46
140,04	-0,52	-0,50
145,20	-0,61	-0,59
147,57	-0,64	-0,64
146,34	-0,71	-0,71
146,46	-0,72	-0,71
146,46	-0,72	-0,72
144,39	-0,72	-0,71
143,46	-0,72	-0,72
142,83	-0,72	
148,71	-0,76	
153,09	-0,92	
159,60	-1,60	

Tabela A.4 – Deslocamentos verticais da viga VR1 - RF

Carga (kN)	Deslocamento Vertical (mm)				
	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,46	0,31	0,01	0,66	0,55	0,31
10,44	0,65	0,16	1,39	1,18	0,68
15,45	1,03	0,64	2,14	1,86	1,06
20,52	1,44	1,11	2,95	2,58	1,47
25,56	1,86	1,38	3,80	3,33	1,92
30,66	2,35	1,85	4,72	4,14	2,38
36,06	2,81	2,53	5,63	4,94	2,85
41,22	3,28	3,23	6,57	5,75	3,32
46,68	3,76	4,00	7,52	6,58	3,79
51,69	4,25	4,77	8,48	7,40	4,27
56,85	4,77	5,65	9,44	8,25	4,75
62,61	5,24	5,99	10,36	9,05	5,23
67,71	5,71	6,38	11,28	9,88	5,68
72,03	6,14	7,06	12,13	10,73	6,25
77,94	6,67	7,33	13,13	11,63	6,77
83,13	7,17	7,33	14,05	12,47	7,26
88,50	7,62	7,33	14,90	13,20	7,69
93,57	8,12	7,54	15,82	14,04	8,16
98,91	8,81	7,95	16,86	14,95	8,68
103,89	9,28	8,65	17,82	15,83	9,16
109,62	9,78	9,41	18,82	16,76	9,68
114,24	10,20	10,05	19,66	17,51	10,13
119,43	10,66	10,74	20,56	18,34	10,63
124,65	11,13		21,48	19,18	11,13
129,69	11,89		22,68	20,21	11,75
135,03	12,43		23,78	21,17	12,32
140,04	13,12		25,24	22,46	13,06
145,20	14,60		28,56	25,15	14,53
147,57	15,31		30,21	26,45	15,24
146,34	16,03			28,08	16,08
146,46	16,07			28,16	16,13
146,46	16,15			28,33	16,22
144,39				28,37	16,23
143,46					16,23
142,83					
148,71					
153,09					
159,60			67,00		

A.2 – VIGA VA1 – CC

Tabela A.5 – Deformações da armadura de flexão da viga VA1 - CC

Carga (kN)	Deformações específicas (%)							
	EAIIF-01	EAEF-01	EAIIF-02	EAEF-02	EAIIF-03	EAEF-03	EAIIF-04	EAEF-04
0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,40		0,00	0,03	0,02	0,04	0,03	0,00	0,00
10,53		0,01	0,05	0,05	0,07	0,05	0,00	0,01
15,75		0,01	0,13	0,12	0,13	0,09	0,01	0,01
20,58		0,01	0,22	0,20	0,20	0,14	0,01	0,02
25,92		0,01	0,35	0,32	0,29	0,20	0,01	0,02
31,20		0,02	0,48	0,44	0,39	0,27	0,02	0,03
37,53		0,02	0,61	0,56	0,49	0,33	0,02	0,04
40,86		0,02	0,69	0,64	0,56	0,38	0,03	0,04
45,99		0,02	0,80	0,74	0,66	0,45	0,03	0,05
51,27		0,03	0,89	0,83	0,75	0,51	0,04	0,06
56,40		0,03	0,98	0,93	0,86	0,58	0,04	0,07
61,20		0,03	1,07	1,02	0,96	0,64	0,06	0,09
66,15		0,04	1,16	1,11	1,04	0,69	0,07	0,11
71,10		0,04	1,24	1,19	1,12	0,74	0,08	0,12
75,99		0,05	1,33	1,28	1,20	0,79	0,09	0,13
80,97		0,05	1,40	1,37	1,24	0,84	0,11	0,15
85,74		0,06	1,47	1,45	1,30	0,88	0,13	0,18
90,84		0,10	1,52	1,54	1,36	0,93	0,15	0,21
95,64		0,28	1,56	1,62	1,42	0,97	0,18	0,25
100,86		0,31	1,59	1,71	1,48	0,99	0,21	0,28
106,02		0,35	1,60	1,78	1,53	1,03	0,23	0,32
110,79		0,38		1,86	1,59	1,07	0,27	0,37
115,29		0,41		1,92	1,64	1,10	0,33	0,44
120,27		0,45			1,71	1,13	0,42	0,54
125,04		0,49			1,77	1,16	0,49	0,63
130,44		0,54			1,84	1,19	0,52	0,68
135,03		0,58			1,89	1,21	0,55	0,72
140,34		0,62			1,95	1,22	0,57	0,75
144,96		0,67			2,00	1,24	0,60	0,78
150,42		0,71				1,30	0,63	0,81
155,07		0,76					0,68	0,85
160,56		0,80					0,71	0,88
166,59		0,85					0,74	0,91
170,58		0,89					0,77	0,94
173,01		0,91					0,78	0,95
178,50		0,94					0,80	0,98
179,49		0,95					0,81	0,99
180,39		0,95					0,81	0,99
183,96		0,98					0,83	1,01
184,68		0,99					0,83	1,01
185,64		0,99					0,84	1,02
186,00		0,99					0,84	1,02
187,83		1,01					0,85	1,03
188,22		1,01					0,85	1,04

Tabela A.6 - Deformação da armadura de cisalh. viga VA1 - CC

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EAIC-01	EAEC-01
0,00	0,00	0,00
5,40	0,00	0,00
10,53	0,00	0,00
15,75	0,00	0,00
20,58	0,00	0,00
25,92	0,00	0,00
31,20	0,00	-0,01
37,53	0,00	0,00
40,86	0,00	0,00
45,99	0,02	0,02
51,27	0,01	0,03
56,40	0,01	0,04
61,20	0,01	0,05
66,15	0,02	0,06
71,10	0,04	0,08
75,99	0,05	0,10
80,97	0,06	0,12
85,74	0,08	0,13
90,84	0,10	0,14
95,64	0,12	0,15
100,86	0,13	0,16
106,02	0,16	0,19
110,79	0,18	0,21
115,29	0,23	0,24
120,27	0,39	0,35
125,04	0,44	0,38
130,44	0,48	0,41
135,03	0,53	0,45
140,34	0,58	0,48
144,96	0,62	0,51
150,42	0,67	0,54
155,07	0,74	0,58
160,56	0,80	0,62
166,59	0,85	0,65
170,58	0,90	0,68
173,01	0,92	0,70
178,50	0,97	0,72
179,49	0,98	0,73
180,39	0,99	0,73
183,96	1,02	0,75
184,68	1,03	0,75
185,64	1,04	0,76
186,00	1,04	0,76
187,83	1,05	0,77
188,22	1,06	0,77

Tabela A.7 - Deformação no concreto da viga VA1 - CC

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EC01	EC02
0,00	0,00	0,00
5,40	-0,03	-0,03
10,53	-0,06	-0,06
15,75	-0,09	-0,09
20,58	-0,13	-0,13
25,92	-0,17	-0,17
31,20	-0,22	-0,23
37,53	-0,27	-0,29
40,86	-0,31	-0,33
45,99	-0,36	-0,38
51,27	-0,41	-0,43
56,40	-0,45	-0,49
61,20	-0,50	-0,54
66,15	-0,55	-0,59
71,10	-0,59	-0,63
75,99	-0,63	-0,67
80,97	-0,67	-0,71
85,74	-0,71	-0,74
90,84	-0,74	-0,78
95,64	-0,78	-0,82
100,86	-0,82	-0,85
106,02	-0,86	-0,89
110,79	-0,89	-0,92
115,29	-0,93	-0,95
120,27	-0,96	-0,98
125,04	-0,99	-1,01
130,44	-1,03	-1,04
135,03	-1,07	-1,06
140,34	-1,10	-1,08
144,96	-1,13	-1,10
150,42	-1,18	-1,11
155,07	-1,23	-1,14
160,56	-1,29	-1,16
166,59	-1,38	-1,23
170,58	-1,57	-1,31
173,01	-1,62	-1,33
178,50	-1,74	-1,39
179,49	-1,76	-1,40
180,39	-1,77	-1,41
183,96	-1,85	-1,46
184,68	-1,87	-1,47
185,64	-1,89	-1,48
186,00	-1,90	-1,49
187,83	-1,93	-1,51
188,22	-1,95	-1,53

Tabela A.8 - Deformação no reforço de PRF viga VA1 - CC

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)		
	EFFC01	EFFC02	EFFC03
0,00	0,00	0,00	0,00
5,40	0,02	0,03	0,02
10,53	0,04	0,04	0,04
15,75	0,08	0,11	0,09
20,58	0,08	0,12	0,09
25,92	0,10	0,15	0,11
31,20	0,14	0,17	0,14
37,53	0,26	0,21	0,18
40,86	0,33	0,25	0,21
45,99	0,47	0,34	0,30
51,27	0,58	0,40	0,41
56,40	0,69	0,53	0,51
61,20	0,84	0,72	0,62
66,15	0,97	0,88	0,76
71,10	1,10	1,04	0,87
75,99	1,21	1,25	1,03
80,97	1,32	1,37	1,18
85,74	1,42	1,48	1,39
90,84	1,54	1,65	1,68
95,64	1,62	1,83	1,95
100,86	1,70	1,98	2,24
106,02	1,81	2,20	2,49
110,79	1,90	2,36	2,64
115,29	2,00	2,62	3,84
120,27	2,09	2,98	
125,04	2,18	3,16	
130,44	2,30	3,33	
135,03	2,40	3,44	
140,34	2,50	3,55	
144,96	2,61	3,67	
150,42	2,74	3,88	
155,07	2,92	4,12	
160,56	3,07	4,43	
166,59	3,40		
170,58	3,77		
173,01	5,21		
178,50			
179,49			
180,39			
183,96			
184,68			
185,64			
186,00			
187,83			
188,22			

Tabela A.9 – Deslocamentos verticais da viga VA1 – CC

Carga (kN)	Deslocamento Vertical (mm)				
	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,40	0,10	0,18	0,21	0,16	0,06
10,53	0,22	0,38	0,44	0,35	0,16
15,75	0,43	0,75	0,83	0,68	0,33
20,58	0,71	1,24	1,37	1,14	0,58
25,92	1,11	1,95	2,13	1,84	0,96
31,20	1,54	2,70	2,95	2,59	1,36
37,53	1,97	3,44	3,76	3,31	1,78
40,86	2,27	3,94	4,32	3,83	2,09
45,99	2,73	4,68	5,14	4,62	2,53
51,27	3,10	5,29	5,82	5,26	2,88
56,40	3,49	5,94	6,56	5,95	3,31
61,20	3,89	6,58	7,29	6,61	3,71
66,15	4,30	7,25	8,03	7,28	4,10
71,10	4,70	7,87	8,74	7,91	4,46
75,99	5,10	8,53	9,48	8,58	4,85
80,97	5,47	9,20	10,18	9,20	5,21
85,74	5,87	9,89	10,92	9,87	5,60
90,84	6,29	10,62	11,72	10,59	6,02
95,64	6,87	11,48	12,58	11,40	6,51
100,86	7,26	12,18	13,31	12,11	6,88
106,02	7,71	12,94	14,12	12,84	7,29
110,79	8,08	13,59	14,81	13,49	7,66
115,29	8,48	14,29	15,53	14,14	8,03
120,27	8,96	15,09	16,37	14,89	8,46
125,04	9,38	15,80	17,11	15,62	8,87
130,44	9,87	16,64	18,02	16,50	9,44
135,03	10,28	17,32	18,73	17,14	9,82
140,34	10,69	18,04	19,48	17,83	10,22
144,96	11,09	18,74	20,21	18,52	10,60
150,42	11,58	19,59	21,12	19,39	11,07
155,07	12,15	20,59	22,19	20,32	11,61
160,56	12,79	21,77	23,46	21,43	12,24
166,59	13,64	23,37	25,25	22,98	13,06
170,58	14,60	25,20	27,62	24,77	13,96
173,01	15,30	26,62	29,04	25,91	14,58
178,50	16,92	29,26	32,67	28,98	16,19
179,49	17,20	29,69	33,26	29,52	16,45
180,39	17,46	30,07	33,79	29,94	16,69
183,96	18,79	31,26	36,56	32,34	17,93
184,68	19,22	31,27	37,09	33,35	18,40
185,64	19,52	31,33	37,47	34,05	18,71
186,00	19,70	31,40	37,68	34,43	18,89
187,83	20,28	31,59	39,94	35,62	19,47
188,22	20,70	31,72	40,91	36,53	19,91

A.3 – VIGA VA2 – CV

Tabela A.10 – Deformações da armadura de flexão da viga VA2 – CV

Carga (kN)	Deformações específicas (‰)							
	EAIIF-01	EAEF-01	EAIIF-02	EAEF-02	EAIIF-03	EAEF-03	EAIIF-04	EAEF-04
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,76	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00
11,34	0,00	0,00	0,08	0,08	0,08	0,08	0,01	0,01
18,27	0,01	0,01	0,16	0,15	0,17	0,18	0,02	0,02
21,72	0,01	0,01	0,20	0,19	0,26	0,29	0,02	0,02
26,55	0,01	0,01	0,28	0,28	0,37	0,40	0,02	0,02
31,35	0,02	0,01	0,35	0,35	0,45	0,48	0,03	0,03
36,06	0,02	0,01	0,43	0,43	0,54	0,57	0,03	0,03
40,86	0,02	0,01	0,53	0,53	0,63	0,66	0,04	0,04
45,96	0,02	0,02	0,62	0,62	0,73	0,76	0,05	0,05
50,70	0,02	0,02	0,70	0,70	0,82	0,85	0,05	0,05
55,38	0,03	0,02	0,81	0,79	0,91	0,94	0,06	0,07
60,03	0,03	0,02	0,90	0,88	1,00	1,03	0,07	0,07
65,31	0,04	0,03	0,98	0,97	1,10	1,12	0,08	0,08
70,26	0,04	0,03	1,06	1,06	1,19	1,21	0,09	0,09
74,73	0,04	0,03	1,13	1,14	1,27	1,28	0,10	0,10
80,04	0,05	0,04	1,21	1,23	1,37	1,38	0,11	0,12
84,66	0,06	0,05	1,28	1,32	1,46	1,46	0,12	0,13
89,25	0,07	0,06	1,34	1,40	1,55	1,54	0,14	0,15
93,90	0,09	0,08	1,41	1,48	1,63	1,62	0,16	0,17
100,11	0,12	0,11	1,49	1,58	1,74	1,72	0,18	0,19
104,46	0,14	0,13	1,55	1,66	1,82	1,79	0,20	0,21
108,36	0,16	0,15	1,60	1,73	1,89	1,86	0,55	0,62
114,51	0,23	0,23	1,69	1,83	1,99	1,97	0,62	0,71
118,80	0,34	0,34	1,75	1,90	2,06	2,04	0,66	0,75
124,32	0,38	0,38	1,82	1,99	2,16	2,14	0,70	0,80
129,99	0,42	0,42	1,89	2,08	2,26	2,23	0,74	0,84
134,25	0,46	0,45	1,95	2,16	2,34	2,31	0,78	0,88
139,77	0,50	0,49	2,02	2,24	2,44	2,40	0,82	0,93
144,18	0,54	0,53	2,06	2,32	2,67	2,70	0,85	0,97
151,89	0,58	0,58	2,16	2,45	3,05	3,13	0,91	1,02
155,16	0,60	0,60	2,19	2,50	3,17	3,26	0,93	1,05
159,51	0,63	0,62	2,22	2,57	3,38	3,48	0,96	1,08
165,21	0,67	0,67	2,30	2,92			1,00	1,13
169,65	0,69	0,69	2,29	3,02			1,07	1,19
170,82	0,71	0,71	2,26	3,09			1,08	1,20
171,63	0,71	0,71	2,38	3,17			1,08	1,20
172,68	0,72	0,73	2,38	3,32			1,09	1,21
177,42	0,75	0,75					1,12	1,23
180,00	0,76	0,76					1,13	1,24
175,05	0,74	0,75					1,13	1,24
176,52	0,74	0,75					1,13	1,24
178,98	0,76	0,76					1,14	1,25
180,84	0,77	0,76					1,15	1,26
183,96	0,79	0,76					1,17	1,28

Tabela A.11 -
Deformação da armadura
de cisalh. viga VA2 - CV

Carga (kN)	Defor. Específ. (%)	
	EAIC-01	EAEC-01
0,00	0,00	0,00
5,76	0,23	0,00
11,34	0,23	0,00
18,27	1,14	0,00
21,72	1,36	0,00
26,55	1,14	0,00
31,35	1,14	0,00
36,06	0,00	0,00
40,86	1,14	0,00
45,96	2,50	0,00
50,70	3,41	0,01
55,38	6,37	0,01
60,03	5,91	0,01
65,31	-8,19	-0,01
70,26	-13,88	-0,02
74,73	33,21	0,06
80,04	73,25	0,18
84,66	89,18	0,23
89,25	105,10	0,27
93,90	134,45	0,38
100,11	196,32	0,62
104,46	230,90	0,72
108,36	260,93	0,80
114,51	290,96	0,88
118,80	312,11	0,93
124,32	333,95	1,00
129,99	356,25	1,07
134,25	371,26	1,13
139,77	389,46	1,20
144,18	403,11	1,26
151,89	429,27	1,37
155,16	437,46	1,41
159,51	449,06	1,47
165,21	465,44	1,57
169,65	480,23	1,64
170,82	481,14	1,66
171,63	483,18	1,67
172,68	485,23	1,69
177,42	501,38	1,75
180,00	481,36	1,77
175,05	477,04	1,76
176,52	477,27	1,76
178,98	478,86	1,76
180,84	479,55	1,77
183,96	480,23	1,77

Tabela A.12 -
Deformação no concreto
da viga VA2 - CV

Carga (kN)	Defor. Espec. (%)	
	EC01	EC02
0,00	0,00	0,00
5,76	-0,01	0,00
11,34	-0,03	0,00
18,27	-0,05	-0,01
21,72	-0,09	-0,01
26,55	-0,13	-0,02
31,35	-0,16	-0,02
36,06	-0,19	-0,03
40,86	-0,22	-0,04
45,96	-0,26	-0,05
50,70	-0,29	-0,06
55,38	-0,31	-0,07
60,03	-0,34	-0,08
65,31	-0,37	-0,10
70,26	-0,39	-0,11
74,73	-0,42	-0,12
80,04	-0,44	-0,14
84,66	-0,47	-0,16
89,25	-0,49	-0,18
93,90	-0,51	-0,20
100,11	-0,54	-0,22
104,46	-0,56	-0,24
108,36	-0,58	-0,26
114,51	-0,60	-0,28
118,80	-0,62	-0,30
124,32	-0,64	-0,33
129,99	-0,67	-0,35
134,25	-0,69	-0,37
139,77	-0,71	-0,40
144,18	-0,73	-0,42
151,89	-0,79	-0,48
155,16	-0,81	-0,51
159,51	-0,85	-0,55
165,21	-0,94	-0,67
169,65	-1,08	-0,82
170,82	-1,12	-0,86
171,63	-1,13	-0,88
172,68	-1,16	-0,90
177,42	-1,23	-0,97
180,00	-1,30	-1,02
175,05	-1,30	-1,02
176,52	-1,31	-1,03
178,98	-1,32	-1,04
180,84	-1,34	-1,06
183,96	-1,43	-1,14

Tabela A.13 -
Deformação no reforço de
PRF viga VA2 - CV

Carga (kN)	Defor. Específ. (%)		
	EFFC01	EFFC02	EFFC03
0,00	0,00	0,00	0,00
5,76	0,03	0,02	0,02
11,34	0,07	0,04	0,04
18,27	0,17	0,08	0,56
21,72	0,23	0,17	0,67
26,55	0,34	0,34	0,86
31,35	0,48	0,50	0,93
36,06	0,53	0,59	1,07
40,86	0,62	0,71	1,23
45,96	0,70	0,73	1,38
50,70	0,77	0,81	1,55
55,38	0,96	0,90	1,62
60,03	1,05	0,97	1,71
65,31	1,15	1,03	1,79
70,26	1,23	1,15	1,88
74,73	1,31	1,27	1,96
80,04	1,40	1,38	2,08
84,66	1,47	1,49	2,18
89,25	1,53	1,60	2,29
93,90	1,61	1,70	2,39
100,11	1,71	1,90	2,52
104,46	1,77	2,05	2,61
108,36	1,83	2,20	2,53
114,51	1,92	2,36	2,62
118,80	1,98	2,48	2,72
124,32	2,05	2,62	2,84
129,99	2,12	2,77	2,97
134,25	2,18	2,90	3,02
139,77	2,25	3,04	3,12
144,18	2,30	3,21	3,20
151,89	2,41	3,59	3,34
155,16	2,48	3,84	3,43
159,51	2,60	4,20	3,57
165,21	2,99	5,11	3,96
169,65	4,39	5,78	4,18
170,82	4,87		4,79
171,63	5,06		5,96
172,68	5,54		5,96
177,42			
180,00			
175,05			
176,52			
178,98			
180,84			
183,96			

Tabela A.14 – Deslocamentos verticais da viga VA2 – CV

Carga (kN)	Deslocamento Vertical (mm)				
	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,76	0,11	0,18	0,20	0,19	0,10
11,34	0,22	0,39	0,42	0,41	0,21
18,27	0,49	0,86	0,94	0,91	0,47
21,72	0,66	1,16	1,29	1,22	0,64
26,55	0,99	1,73	1,93	1,81	0,98
31,35	1,33	2,32	2,59	2,43	1,36
36,06	1,68	2,91	3,25	3,05	1,73
40,86	2,06	3,56	3,97	3,72	2,15
45,96	2,44	4,20	4,68	4,40	2,58
50,70	2,84	4,87	5,41	5,08	3,01
55,38	3,23	5,52	6,14	5,77	3,47
60,03	3,61	6,15	6,84	6,43	3,88
65,31	4,03	6,85	7,61	7,15	4,35
70,26	4,46	7,56	8,37	7,86	4,81
74,73	4,92	8,27	9,12	8,55	5,25
80,04	5,35	8,98	9,89	9,27	5,71
84,66	5,72	9,61	10,57	9,89	6,13
89,25	6,10	10,26	11,28	10,60	6,56
93,90	6,48	10,90	11,96	11,24	6,97
100,11	7,00	11,80	12,94	12,15	7,55
104,46	7,39	12,48	13,68	12,88	7,99
108,36	7,78	13,17	14,46	13,67	8,57
114,51	8,29	14,00	15,35	14,51	9,10
118,80	8,75	14,70	16,08	15,20	9,52
124,32	9,22	15,49	16,93	16,02	10,02
129,99	9,70	16,30	17,79	16,83	10,53
134,25	10,06	16,91	18,46	17,46	10,91
139,77	10,51	17,67	19,27	18,23	11,39
144,18	10,90	18,33	20,00	18,92	11,82
151,89	11,61	19,58	21,38	20,21	12,56
155,16	12,04	20,33	22,23	20,98	12,99
159,51	12,58	21,31	23,31	21,98	13,55
165,21	13,77	23,48	25,81	24,26	14,83
169,65	15,10	25,97	28,69	26,78	16,21
170,82	15,79	27,25	30,22	28,22	16,98
171,63	16,12	27,85	30,92	28,85	17,31
172,68	16,75	29,02	32,19	29,94	17,90
177,42	18,03	31,35	34,76	32,18	19,11
180,00	21,20	37,29	36,58	37,11	21,71
175,05	22,66	40,18	36,58	39,16	22,75
176,52	23,24	40,81	36,58	40,03	23,21
178,98	24,02	40,81	36,58	41,02	23,84
180,84	24,88	40,81	36,58	41,02	24,57
183,96	27,48	40,81	36,58	41,02	26,85

A.4 – VIGA VA3 – VV

Tabela A.15 – Deformações da armadura de flexão da viga VA3 – VV

Carga (kN)	Deformações específicas (‰)							
	EAIIF-01	EAEF-01	EAIIF-02	EAEF-02	EAIIF-03	EAEF-03	EAIIF-04	EAEF-04
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,04	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
10,14	0,01	0,01	0,06	0,04	0,04	0,04	0,01	0,01
14,97	0,01	0,01	0,12	0,09	0,11	0,10	0,01	0,01
20,49	0,01	0,01	0,22	0,15	0,22	0,20	0,01	0,01
25,35	0,02	0,02	0,31	0,20	0,34	0,33	0,02	0,02
30,75	0,02	0,02	0,45	0,23	0,47	0,44	0,02	0,02
36,15	0,02	0,03	0,60	0,24	0,61	0,55	0,02	0,02
41,13	0,03	0,03	0,69	0,25	0,71	0,63	0,03	0,03
46,38	0,03	0,03	0,81	0,26	0,82	0,72	0,03	0,03
50,49	0,03	0,04	0,89	0,26	0,90	0,78	0,04	0,04
56,67	0,04	0,04	1,01		1,02	0,88	0,04	0,04
60,36	0,04	0,05	1,09		1,09	0,94	0,05	0,05
65,31	0,04	0,05	1,19		1,19	1,01	0,05	0,05
70,41	0,05	0,06	1,28		1,28	1,08	0,06	0,06
75,27	0,06	0,07	1,36		1,37	1,15	0,07	0,07
80,28	0,06	0,08	1,45		1,45	1,22	0,08	0,08
85,02	0,08	0,09	1,54		1,54	1,28	0,09	0,09
90,96	0,09	0,11	1,64		1,64	1,36	0,12	0,12
95,25	0,11	0,14	1,72		1,72	1,42	0,25	0,28
102,66	0,15	0,21	1,86		1,85	1,51	0,31	0,35
105,45	0,24	0,35	1,92		1,90	1,55	0,34	0,38
110,43	0,29	0,42	2,02		1,99	1,60	0,39	0,44
114,78	0,31	0,46	2,11		2,06	1,65	0,42	0,47
120,06	0,34	0,51	2,20		2,15	1,71	0,46	0,52
124,62	0,41	0,67	2,30		2,24	1,75	0,51	0,57
130,44	0,45	0,76	2,42		2,34	1,80	0,56	0,63
134,25	0,48	0,86	2,50		2,41	1,81	0,61	0,67
140,97	0,52	0,90	2,63		2,52	1,86	0,65	0,72
144,66	0,56	0,94	2,72		2,58	1,87	0,71	0,79
150,42	0,58	0,98	2,97		2,68	1,90	0,74	0,84
154,23	0,58	1,01	3,35		3,17	2,26	0,77	0,88
154,32	0,57	1,02					0,79	0,90
151,29	0,52	1,01					0,80	0,91
154,08	0,53	1,02					0,81	0,92
158,61	0,54	1,05					0,82	0,94
164,46	0,55	1,08					0,85	0,97
168,06	0,56	1,10					0,87	1,00
169,77	0,57	1,12					0,88	1,02
171,45	0,57	1,13					0,89	1,03
173,28	0,58	1,14					0,90	1,04
176,40	0,59	1,15					0,91	1,06
180,75	0,60	1,19					0,94	1,10
182,58	0,60	1,20					0,95	1,11
185,79	0,61	1,22					0,97	1,13

Tabela A.16 - Deformação da armadura de cisalh. viga

VA3 - VV

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EAIC-01	EAEC-01
0,00	0,00	0,00
5,04	0,00	0,00
10,14	0,00	0,00
14,97	0,00	0,00
20,49	0,00	0,00
25,35	0,00	0,00
30,75	0,00	0,00
36,15	0,00	0,00
41,13	0,02	0,02
46,38	0,03	0,03
50,49	0,03	0,03
56,67	0,03	0,03
60,36	0,04	0,04
65,31	0,05	0,04
70,41	0,07	0,06
75,27	0,09	0,08
80,28	0,12	0,10
85,02	0,16	0,13
90,96	0,23	0,19
95,25	0,29	0,26
102,66	0,36	0,31
105,45	0,39	0,34
110,43	0,43	0,37
114,78	0,45	0,39
120,06	0,48	0,41
124,62	0,52	0,44
130,44	0,56	0,47
134,25	0,59	0,49
140,97	0,62	0,52
144,66	0,66	0,54
150,42	0,69	0,57
154,23	0,72	0,59
154,32	0,73	0,60
151,29	0,75	0,61
154,08	0,75	0,61
158,61	0,77	0,62
164,46	0,80	0,64
168,06	0,83	0,66
169,77	0,85	0,68
171,45	0,86	0,69
173,28	0,88	0,71
176,40	0,93	0,74
180,75	1,12	0,92
182,58	1,18	0,97
185,79	1,26	1,04

Tabela A.17 - Deformação no concreto da viga VA3 -

VV

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EC01	EC02
0,00	0,00	0,00
5,04	-0,01	-0,01
10,14	-0,02	-0,01
14,97	-0,04	-0,01
20,49	-0,06	-0,02
25,35	-0,08	-0,03
30,75	-0,11	-0,04
36,15	-0,13	-0,05
41,13	-0,16	-0,07
46,38	-0,18	-0,08
50,49	-0,20	-0,10
56,67	-0,23	-0,11
60,36	-0,24	-0,13
65,31	-0,27	-0,14
70,41	-0,29	-0,16
75,27	-0,31	-0,18
80,28	-0,34	-0,20
85,02	-0,36	-0,22
90,96	-0,38	-0,24
95,25	-0,40	-0,26
102,66	-0,43	-0,29
105,45	-0,45	-0,30
110,43	-0,47	-0,32
114,78	-0,49	-0,34
120,06	-0,51	-0,36
124,62	-0,53	-0,38
130,44	-0,56	-0,40
134,25	-0,57	-0,41
140,97	-0,60	-0,44
144,66	-0,62	-0,46
150,42	-0,66	-0,49
154,23	-0,69	-0,52
154,32	-0,70	-0,53
151,29	-0,70	-0,53
154,08	-0,71	-0,54
158,61	-0,74	-0,56
164,46	-0,85	-0,68
168,06	-0,92	-0,75
169,77	-0,96	-0,78
171,45	-0,99	-0,81
173,28	-1,01	-0,82
176,40	-1,06	-0,86
180,75	-1,12	-0,92
182,58	-1,14	-0,94
185,79	-1,19	-0,99

Tabela A.18 - Deformação no reforço de PRF viga

VA3 - VV

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)		
	EFFC01	EFFC02	EFFC03
0,00	0,00	0,00	0,00
5,04	0,02	0,02	0,02
10,14	0,04	0,04	0,04
14,97	0,05	0,06	0,07
20,49	0,08	0,09	0,11
25,35	0,11	0,12	0,13
30,75	0,31	0,14	0,16
36,15	0,62	0,73	0,55
41,13	0,78	0,91	0,70
46,38	0,91	1,03	0,90
50,49	1,01	1,10	1,09
56,67	1,18	1,22	1,34
60,36	1,30	1,26	1,43
65,31	1,37	1,37	1,54
70,41	1,44	1,46	1,66
75,27	1,53	1,53	1,78
80,28	1,62	1,62	1,90
85,02	1,70	1,74	2,01
90,96	1,80	1,86	2,14
95,25	1,89	2,01	2,26
102,66	2,06	2,21	2,46
105,45	2,13	2,29	2,55
110,43	2,27	2,41	2,70
114,78	2,36	2,51	2,81
120,06	2,48	2,63	2,95
124,62	2,62	2,74	3,08
130,44	2,75	2,86	3,23
134,25	2,84	2,92	3,34
140,97	2,99	3,06	3,50
144,66	3,10	3,14	3,62
150,42	3,26	3,34	3,77
154,23	3,55	3,63	4,01
154,32	3,67	3,66	4,07
151,29	3,65	3,62	4,07
154,08	3,69	3,67	4,14
158,61	3,85	3,83	4,36
164,46	4,61	4,72	4,76
168,06	6,04	5,36	5,29
169,77	6,25		6,23
171,45	6,12		
173,28	7,22		
176,40			
180,75			
182,58			
185,79			

Tabela A.19 – Deslocamentos verticais da viga VA3 – VV

Carga (kN)	Deslocamento Vertical (mm)				
	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,04	0,00	0,14	0,14	0,13	0,06
10,14	0,00	0,38	0,38	0,36	0,21
14,97	0,00	0,76	0,79	0,74	0,44
20,49	0,74	1,38	1,45	1,34	0,80
25,35	0,76	2,07	2,20	2,02	1,20
30,75	1,07	2,81	2,99	2,74	1,65
36,15	1,50	3,57	3,82	3,51	2,13
41,13	1,94	4,30	4,59	4,23	2,59
46,38	2,40	5,07	5,43	5,01	3,09
50,49	2,74	5,65	6,06	5,60	3,47
56,67	3,25	6,52	7,00	6,48	4,07
60,36	3,57	7,08	7,58	7,01	4,41
65,31	3,98	7,77	8,33	7,69	4,86
70,41	4,39	8,48	9,10	8,41	5,33
75,27	4,80	9,20	9,87	9,11	5,78
80,28	5,22	9,92	10,63	9,81	6,23
85,02	5,60	10,58	11,35	10,48	6,66
90,96	6,09	11,44	12,27	11,34	7,21
95,25	6,56	12,31	13,19	12,19	7,80
102,66	7,18	13,39	14,36	13,30	8,47
105,45	7,46	13,87	14,87	13,78	8,77
110,43	7,90	14,63	15,69	14,55	9,26
114,78	8,24	15,23	16,34	15,17	9,64
120,06	8,64	15,95	17,12	15,90	10,08
124,62	9,07	16,66	17,88	16,61	10,52
130,44	9,53	17,47	18,75	17,43	11,01
134,25	9,90	18,11	19,43	18,06	11,40
140,97	10,38	18,96	20,34	18,92	11,91
144,66	10,75	19,67	21,10	19,64	12,36
150,42	11,33	20,68	22,18	20,62	12,92
154,23	11,88	21,74	23,36	21,70	13,51
154,32	12,09	22,18	23,86	22,16	13,76
151,29	12,21	22,45	24,14	22,43	13,92
154,08	12,21	23,26	25,01	23,23	14,37
158,61	12,63	26,02	28,07	25,81	15,76
164,46	13,59	28,70	31,04	28,36	17,15
168,06	13,98	29,86	32,49	29,73	17,88
169,77	14,14	30,86	33,68	30,78	18,46
171,45	14,47	31,87	34,83	31,83	19,03
173,28	14,66	33,13	36,17	33,02	19,68
176,40	15,30	35,63	39,05	35,69	21,14
180,75	16,53	39,95	43,88	40,11	23,54
182,58	16,65	41,80	45,99	42,06	24,62
185,79	17,37	44,83	49,70	45,94	26,68

A.5 – VIGA VA4 – VC

Tabela A.20 – Deformações da armadura de flexão da viga VA4 – VC

Carga (kN)	Deformações específicas (‰)							
	EAIIF-01	EAEF-01	EAIIF-02	EAEF-02	EAIIF-03	EAEF-03	EAIIF-04	EAEF-04
0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,64	0,00		0,06	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00
10,65	0,01		0,12	0,11	0,11	0,11	0,01	0,01
15,51	0,01		0,17	0,15	0,16	0,16	0,01	0,01
20,22	0,02		0,23	0,20	0,21	0,21	0,02	0,02
25,47	0,02		0,29	0,26	0,27	0,27	0,02	0,02
30,90	0,03		0,39	0,35	0,35	0,35	0,03	0,03
35,73	0,03		0,49	0,43	0,44	0,43	0,04	0,03
40,80	0,04		0,58	0,51	0,55	0,54	0,04	0,04
45,99	0,04		0,68	0,60	0,64	0,62	0,05	0,05
50,73	0,05		0,77	0,69	0,75	0,73	0,06	0,06
55,89	0,05		0,87	0,78	0,84	0,82	0,07	0,07
60,54	0,06		0,95	0,87	0,93	0,91	0,08	0,08
65,58	0,07		1,04	0,95	1,02	1,00	0,09	0,09
70,41	0,08		1,13	1,04	1,12	1,09	0,11	0,11
75,39	0,09		1,22	1,12	1,21	1,17	0,12	0,12
80,49	0,11		1,31	1,20	1,30	1,27	0,15	0,15
85,62	0,12		1,41	1,29	1,40	1,36	0,17	0,17
89,97	0,14		1,49		1,48	1,44	0,19	0,19
95,43	0,15		1,59		1,58	1,53	0,22	0,23
99,69	0,17		1,67		1,67		0,27	0,27
104,82	0,19		1,77		1,76		0,31	0,31
110,70	0,25		1,87		1,86		0,35	0,35
115,62	0,33		1,96		1,95		0,39	0,40
119,19	0,38		2,03		2,02		0,44	0,45
124,29	0,43		2,12		2,11		0,48	0,50
131,19	0,48		2,24		2,23		0,55	0,57
134,01	0,53		2,30		2,28		0,82	0,87
139,59	0,62		2,40		2,39		0,90	0,94
152,61	0,77		2,75		3,14		1,01	1,04
155,97	0,79		2,87		3,34		1,03	1,05
160,02	0,82		3,10		3,46		1,06	1,06
165,78	0,86		3,31		3,86		1,10	1,08
168,36	0,88		4,39		4,21		1,12	1,09
173,34	0,90						1,15	1,11
174,03	0,91						1,15	1,11
175,29	0,91						1,16	1,12
177,33	0,92						1,17	1,13
179,79	0,94						1,19	1,14
183,18	1,00						1,21	1,17
186,18	1,04						1,23	1,18
187,02	1,05						1,24	1,19
189,18	1,06						1,26	1,20
191,37	1,08						1,28	1,22
192,03	1,09						1,28	1,23

Tabela A.21 - Deformação da armadura de cisalh. viga VA4 - VC

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EAIC-01	EAEC-01
0,00	0,00	0,00
5,64	0,00	0,00
10,65	0,00	0,00
15,51	0,00	0,00
20,22	0,00	0,01
25,47	0,01	0,01
30,90	0,01	0,01
35,73	0,03	0,03
40,80	0,04	0,04
45,99	0,05	0,05
50,73	0,06	0,06
55,89	0,07	0,08
60,54	0,10	0,11
65,58	0,12	0,13
70,41	0,15	0,17
75,39	0,24	0,28
80,49	0,39	0,48
85,62	0,45	0,55
89,97	0,49	0,60
95,43	0,53	0,66
99,69	0,57	0,71
104,82	0,65	0,80
110,70	0,71	0,88
115,62	0,76	0,95
119,19	0,81	1,01
124,29	0,86	1,07
131,19	0,91	1,15
134,01	0,92	1,16
139,59	0,92	1,17
152,61	0,96	1,22
155,97	0,97	1,24
160,02	0,99	1,27
165,78	1,04	1,32
168,36	1,06	1,36
173,34	1,11	1,41
174,03	1,11	1,42
175,29	1,12	1,44
177,33	1,14	1,46
179,79	1,17	1,49
183,18	1,32	1,66
186,18	1,41	1,76
187,02	1,43	1,80
189,18	1,46	1,84
191,37	1,48	1,87
192,03	1,46	1,84

Tabela A.22 - Deformação no concreto da viga VA4 - VC

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)	
	EC01	EC02
0,00	0,00	0,00
5,64	0,00	-0,01
10,65	-0,01	-0,01
15,51	-0,01	-0,02
20,22	-0,02	-0,03
25,47	-0,02	-0,04
30,90	-0,03	-0,05
35,73	-0,04	-0,07
40,80	-0,05	-0,08
45,99	-0,06	-0,10
50,73	-0,06	-0,11
55,89	-0,07	-0,13
60,54	-0,08	-0,14
65,58	-0,09	-0,16
70,41	-0,10	-0,18
75,39	-0,12	-0,19
80,49	-0,13	-0,21
85,62	-0,14	-0,23
89,97	-0,15	-0,25
95,43	-0,17	-0,27
99,69	-0,18	-0,29
104,82	-0,19	-0,31
110,70	-0,21	-0,33
115,62	-0,23	-0,35
119,19	-0,24	-0,36
124,29	-0,25	-0,38
131,19	-0,27	-0,41
134,01	-0,28	-0,42
139,59	-0,30	-0,45
152,61	-0,35	-0,52
155,97	-0,37	-0,54
160,02	-0,39	-0,57
165,78	-0,43	-0,61
168,36	-0,48	-0,69
173,34	-0,56	-0,80
174,03	-0,57	-0,81
175,29	-0,59	-0,83
177,33	-0,61	-0,86
179,79	-0,64	-0,90
183,18	-0,68	-0,95
186,18	-0,72	-1,01
187,02	-0,73	-1,03
189,18	-0,76	-1,06
191,37	-0,79	-1,10
192,03	-0,80	-1,12

Tabela A.23 - Deformação no reforço de PRF viga VA4 - VC

Carga (kN)	Defor. Específ. (‰)		
	EFFC01	EFFC02	EFFC03
0,00	0,00	0,00	0,00
5,64	0,04	0,02	0,04
10,65	0,07	0,05	0,08
15,51	0,11	0,07	0,11
20,22	0,14	0,09	0,15
25,47	0,20	0,11	0,21
30,90	0,32	0,14	0,35
35,73	0,47	0,17	0,44
40,80	0,72	0,20	0,52
45,99	0,94	0,25	0,60
50,73	1,21	0,36	0,67
55,89	1,36	0,47	0,74
60,54	1,38	0,61	0,81
65,58	1,46	0,77	0,89
70,41	1,55	0,90	0,98
75,39	1,65	1,00	1,07
80,49	1,75	1,11	1,16
85,62	1,86	1,25	1,25
89,97	1,97	1,35	1,33
95,43	2,15	1,47	1,41
99,69	2,28	1,56	1,47
104,82	2,41	1,69	1,56
110,70	2,54	1,86	1,65
115,62	2,65	2,06	1,74
119,19	2,74	2,20	1,80
124,29	2,85	2,37	1,88
131,19	3,01	2,55	1,98
134,01	3,09	2,62	2,03
139,59	3,25	2,75	2,11
152,61	3,62	3,23	2,31
155,97	3,75	3,33	2,36
160,02	3,94	3,49	2,47
165,78	4,31	3,85	2,74
168,36	4,69	4,37	2,89
173,34	5,37	5,51	3,08
174,03	5,51	5,58	3,10
175,29		5,74	3,16
177,33		5,98	3,27
179,79			3,36
183,18			3,55
186,18			4,52
187,02			4,65
189,18			4,83
191,37			5,26
192,03			5,53

Tabela A.24 – Deslocamentos verticais da viga VA4 – VC

Carga (kN)	Deslocamento Vertical (mm)				
	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,64	0,46	0,66	0,72	0,70	0,55
10,65	0,67	1,02	1,13	1,06	0,77
15,51	0,85	1,33	1,47	1,38	0,97
20,22	1,03	1,63	1,81	1,69	1,16
25,47	1,25	2,01	2,23	2,08	1,40
30,90	1,62	2,62	2,89	2,68	1,77
35,73	1,98	3,22	3,54	3,30	2,14
40,80	2,39	3,93	4,33	4,04	2,60
45,99	2,80	4,63	5,09	4,75	3,04
50,73	3,17	5,28	5,79	5,40	3,43
55,89	3,53	5,93	6,50	6,06	3,84
60,54	3,89	6,54	7,17	6,68	4,21
65,58	4,25	7,18	7,86	7,32	4,62
70,41	4,62	7,83	8,58	7,99	5,04
75,39	5,02	8,55	9,37	8,74	5,51
80,49	5,47	9,34	10,23	9,55	6,00
85,62	5,87	10,07	11,01	10,28	6,43
89,97	6,21	10,69	11,68	10,90	6,80
95,43	6,61	11,42	12,48	11,66	7,26
99,69	6,95	12,03	13,14	12,29	7,65
104,82	7,33	12,75	13,93	13,03	8,10
110,70	7,82	13,61	14,84	13,89	8,62
115,62	8,27	14,40	15,69	14,70	9,08
119,19	8,61	15,02	16,37	15,37	9,44
124,29	8,99	15,72	17,11	16,06	9,85
131,19	9,50	16,65	18,10	16,98	10,41
134,01	9,80	17,32	18,80	17,64	10,85
139,59	10,30	18,22	19,76	18,54	11,38
152,61	11,46	20,33	22,03	20,64	12,59
155,97	11,76	20,90	22,66	21,21	12,92
160,02	12,16	21,66	23,48	21,97	13,34
165,78	12,94	23,15	25,06	23,43	14,15
168,36	13,72	24,67	26,76	24,89	14,93
173,34	15,11	27,33	29,67	27,30	16,23
174,03	15,34	27,78	30,17	27,70	16,44
175,29	15,71	28,52	30,99	28,39	16,81
177,33	16,49	30,08	32,28	29,95	17,62
179,79	17,45	31,97		31,76	18,56
183,18	18,67	34,38		34,01	19,75
186,18	20,10	37,26		37,11	21,37
187,02	20,81	38,72		38,08	22,10
189,18	21,68	40,46			22,96
191,37	23,20	41,15			24,43
192,03	24,04	41,15			25,21

B – MEMORIAL DE CÁLCULO

B.1 – NORMA ABNT NBR 6118:2007

Tabela B.1 – Dimensionamento à flexão da viga VR1 – RF segundo a norma ABNT NBR 6118:2007, com os dados fornecidos pelos fabricantes

Viga	ρ (%)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	d (mm)	x (mm)	x/d	M_u (kN.m)	P_u (kN)
VR1 - RF	0,63	40	500	628	352	35,7	0,101	108,1	144,16

Nome	No. Barras	Area (cm ²)	y (cm)	Deform. Espec. (m/m)	Tensão	Força (kN)	Braço (cm)
A'_{s1}	4	1,24	- 0,57	- 0,0002	C	- 3,784	11,00
A'_{s2}	2	0,62	3,43	0,0011	T	22,773	7,00
A_s	2	6,28	31,63	0,0100	T	314,000	21,20
Concreto		196,35	3,57	0,0011	C	- 333,585	12,81
Somatória da iteração						- 0,60	

b_f (cm)	55,00	ϵ_{cu}	0,0035
E_s (GPa)	210,00	ϵ_{sy}	0,00238

Tabela B.2 – Dimensionamento à flexão da viga VR1 – RF segundo a norma ABNT NBR 6118:2007, com os resultados experimentais

Viga	ρ (%)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	d (mm)	x (mm)	x/d	M_u (kN.m)	P_u (kN)
VR1 - RF	0,63	46,95	559	628	352	40,0	0,114	119,9	159,88

Nome	No. Barras	Area (cm ²)	y (cm)	Deform. Espec. (m/m)	Tensão	Força (kN)	Braço (cm)
A'_{s1}	4	1,24	- 1,00	- 0,0003	C	- 6,571	11,00
A'_{s2}	2	0,62	3,00	0,0010	T	19,712	7,00
A_s	2	6,28	31,20	0,0100	T	351,052	21,20
Concreto		196,35	4,00	0,0013	C	- 364,316	12,67
Somatória da iteração						- 0,12	

b_f (cm)	55,00	ϵ_{cu}	0,0035
E_s (GPa)	205,00	ϵ_{sy}	0,00272

B.2 – CÓDIGO ACI 440:2R:2008

Tabela B.3 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o ACI 440.2R:2, com os dados fornecidos pelos fabricantes

VIGAS	Concreto		Aço			Ef (MPa)		tf (mm)		larg. (mm)	Af (mm ²)		εfu (%)	
	fc (MPa)	Ec (MPa)	Es (GPa)	As (mm ²)	As2 (mm ²)	C	V	C	V		C	V	C	V
VR1-RF	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0									
VA1-CC	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0	227000,0		0,165		140,0	46,2		16,7	
VA2-CV	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		
VA3-VV	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0		74200,0		0,357	140,0		99,96		21,0
VA4-VC	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		

VIGAS									f _{fe} (MPa)		Aço			
	ε _{fd}	0,9 ε _{fu}	df (cm)	d (cm)	d2 (cm)	c (cm)	ε _{cbi}	ε _{fe}	C	V	ε _s	ε _{s2}	f _s (MPa)	f _{s2} (MPa)
VR1-RF			40,0	35,2	7,0	3,54					0,0100	0,00095	500,0	199,29
VA1-CC	9,5	15,03	40,0	35,2	7,0	4,36	0,00004	0,0095	2156,5		0,0083	0,00070	500,0	147,78
VA2-CV			40,0	35,2	7,0	4,12	0,00004	0,0095	2156,5	704,9	0,0083	0,00076	500,0	160,13
VA3-VV	11,3	18,9	40,0	35,2	7,0	3,57	0,00004	0,0113		838,46	0,0098	0,00106	500,0	223,43
VA4-VC			40,0	35,2	7,0	4,12	0,00004	0,0095	2156,5	704,9	0,0083	0,00076	500,0	160,13

VIGAS	Concreto		Iteração			ACI	
	ε _c	f _c (MPa)	b (cm)	c (cm)	Dif	Mn (kN cm)	Pu (kN)
VR1-RF	0,0011	33,7	55	3,5256	-0,4%	10754,2	143,39
VA1-CC	0,0012	35,2	55	4,3738	0,3%	14487,7	193,17
VA2-CV	0,0011	33,0	55	4,1192	0,0%	13962,5	186,17
VA3-VV	0,0011	33,5	55	3,5622	-0,2%	14012,4	186,83
VA4-VC	0,0011	33,0	55	4,1192	0,0%	13962,5	186,17

Tabela B.4 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o ACI 440.2R:2, com os resultados experimentais

VIGAS	Concreto		Aço			Ef (MPa)		tf (mm)		larg. (mm)	Af (mm ²)		εfu (%)	
	fc (MPa)	Ec (MPa)	Es (GPa)	As (mm ²)	As2 (mm ²)	C	V	C	V		C	V	C	V
VR1-RF	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0									
VA1-CC	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0	227000,0		0,165		140,0	46,2		16,7	
VA2-CV	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		
VA3-VV	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0		74200,0		0,357	140,0		99,96		21,0
VA4-VC	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		

VIGAS									f _{fe} (MPa)		Aço			
	ε _{fd}	0,9 ε _{fu}	df (cm)	d (cm)	d2 (cm)	c (cm)	ε _{cbi}	ε _{fe}	C	V	ε _s	ε _{s2}	f _s (MPa)	f _{s2} (MPa)
VR1-RF			40,0	35,2	7,0	4,00					0,0100	0,00083	559,0	170,83
VA1-CC	10,3	15,03	40,0	35,2	7,0	4,90	0,00004	0,0095	2156,5		0,0082	0,00057	559,0	116,52
VA2-CV			40,0	35,2	7,0	4,65	0,00004	0,0095	2156,5	704,9	0,0082	0,00063	559,0	129,47
VA3-VV	12,2	18,9	40,0	35,2	7,0	3,05	0,00004	0,0113		838,46	0,0098	0,00093	559,0	190,09
VA4-VC			40,0	35,2	7,0	4,65	0,00004	0,0095	2156,5	704,9	0,0082	0,00063	559,0	129,47

VIGAS	Concreto		Iteração			ACI	
	ε _c	f _c (MPa)	b (cm)	c (cm)	Dif	Mn (kN cm)	Pu (kN)
VR1-RF	0,0013	33,1	55,0	3,9707	-0,7%	11949,0	159,32
VA1-CC	0,0013	34,4	55,0	4,8376	-1,3%	15644,9	208,60
VA2-CV	0,0013	32,4	55,0	4,5844	-1,4%	15126,7	201,69
VA3-VV	0,0013	33,0	55,0	3,9963	-1,3%	15189,0	202,52
VA4-VC	0,0013	32,4	55,0	4,5844	-1,4%	15126,7	201,69

B.3 – *Bulletin* 14 FIB:2001

Tabela B.5 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o *Bulletin* 14 FIB:2001, com os dados fornecidos pelos fabricantes

VIGAS	Concreto		Aço			E_f (MPa)		tf (mm)		larg. (mm)	Af (mm ²)		ϵ_{fu} (%)	
	f_c (MPa)	E_c (MPa)	E_s (GPa)	A_s (mm ²)	A_{s2} (mm ²)	C	V	C	V		C	V	C	V
VR1-RF	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0									
VA1-CC	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0	227000,0		0,165		140,0	46,2		16,7	
VA2-CV	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		
VA3-VV	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0		74200,0		0,357	140,0		99,96		21,0
VA4-VC	40,0	30104,9	210,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		

VIGAS												Concreto		Aço	
	x	h	b	bf	d	d_2	f_{cd}	ϵ_{fu}	f_{fe} (MPa) C	f_{fe} (MPa) V	ϵ_o	ϵ_c	f_c (MPa)	ϵ_{s1}	ϵ_{s2}
VR1-RF	3,55	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	40,0					0,00112	33,77	0,0100	0,00109
VA1-CC	4,55	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	40,0	0,0085	1930		0,00004	0,00110	33,02	0,0074	0,00059
VA2-CV	4,46	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	40,0	0,0085	1930	630,7	0,00004	0,00107	32,28	0,0074	0,00061
VA3-VV	4,39	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	40,0	0,0085		630,7	0,00004	0,00105	31,71	0,0074	0,00062
VA4-VC	4,46	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	40,0	0,0085	1930	630,7	0,00004	0,00107	32,28	0,0074	0,00061

VIGAS	Aço		Iteração			<i>Bulletin</i>	
	f_s (MPa)	f_{s2} (MPa)	1er term	2do term	dif	Mn (kN cm)	Pu (kN)
VR1-RF	500	228,91	329,65	328,19	0,4%	10764	143,517
VA1-CC	500	123,364	413,1	410,79	0,6%	14049	187,32
VA2-CV	500	127,572	395,92	398	-0,5%	13560	180,803
VA3-VV	500	130,83	382,83	385,16	-0,6%	13068	174,237
VA4-VC	500	127,572	395,92	398	-0,5%	13560	180,803

Tabela B. 6 – Dimensionamento à flexão das vigas segundo o *Bulletin* 14 FIB:2001, com os resultados experimentais

VIGAS	Concreto		Aço			Ef (MPa)		tf (mm)		larg. (mm)	Af (mm ²)		ε _{fu} (%)	
	f _c (MPa)	E _c (MPa)	E _s (GPa)	A _s (mm ²)	A _{s2} (mm ²)	C	V	C	V		C	V	C	V
VR1-RF	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0									
VA1-CC	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0	227000,0		0,165		140,0	46,2		16,7	
VA2-CV	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		
VA3-VV	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0		74200,0		0,357	140,0		99,96		21,0
VA4-VC	46,95	25833,3	205,0	628,0	62,0	227000,0	74200,0	0,165	0,357	140,0	23,1	49,98		

VIGAS												Concreto		Aço	
	x	h	b	bf	d	d ₂	f _{cd}	ε _{fu}	f _{fc} (MPa) C	f _{fc} (MPa) V	ε _o	ε _c	f _c (MPa)	ε _{s1}	ε _{s2}
VR1-RF	3,98	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	46,95					0,00127	32,93	0,0100	0,00097
VA1-CC	5,05	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	46,95	0,0085	1930		0,00004	0,00123	31,89	0,0074	0,00047
VA2-CV	4,98	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	46,95	0,0085	1930	630,7	0,00004	0,00122	31,39	0,0074	0,00049
VA3-VV	4,92	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	46,95	0,0085		630,7	0,00004	0,00120	30,96	0,0074	0,00050
VA4-VC	4,98	40,0	15,0	55,0	35,2	7,0	46,95	0,0085	1930	630,7	0,00004	0,00122	31,39	0,0074	0,00049

VIGAS	Aço		Iteração			<i>Bulletin</i>	
	f _s (MPa)	f _{s2} (MPa)	1er term	2do term	dif	Mn (kN cm)	Pu (kN)
VR1-RF	559	198,30	360,50	363,30	-0,8%	11961,1	159,48
VA1-CC	559	97,22	442,90	446,20	-0,7%	15213,8	202,85
VA2-CV	559	100,51	429,90	433,40	-0,8%	14725,0	196,33
VA3-VV	559	103,32	418,90	420,50	-0,4%	14234,0	189,79
VA4-VC	559	100,51	429,90	433,40	-0,8%	14725,0	196,33

C – ENSAIOS DO CONCRETO

C.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela C.1 – Dados experimentais do ensaio de resistência à compressão

	Diâmetro CP (mm)			Comprimento CP (mm)			Carga (tf)	Resistência (MPa)	Peso (gr)	Tipo de Ruptura
	D1	D2	Média	C1	C2	Média				
CP01	100,58	101,27	100,93	194,64	194,96	194,80	36,52	45,65	3504,60	B
CP02	101,74	100,78	101,26	196,17	195,74	195,96	38,71	48,07	3548,82	C
CP03	100,69	101,00	100,85	196,65	196,73	196,69	32,65	40,88	3533,00	B
CP04	100,82	101,55	101,19	195,81	195,59	195,70	34,30	42,66	3538,96	C
CP05	100,60	101,12	100,86	196,86	195,51	196,19	39,67	49,65	3503,10	B
CP06	101,57	101,24	101,41	196,72	196,11	196,42	39,78	49,26	3547,30	C
CP07	100,65	101,33	100,99	197,40	197,99	197,70	37,71	47,08	3516,60	D
CP08	100,99	101,87	101,43	197,92	197,91	197,92	37,09	45,90	3562,20	E
CP09	100,66	101,38	101,02	197,02	197,53	197,28	39,48	49,26	3548,70	F
CP10	100,65	101,55	101,10	198,58	198,25	198,42	41,14	51,25	3599,10	F
CP11	101,64	101,38	101,51	194,93	194,89	194,91	39,48	48,78	3571,7	D
CP12	102,52	101,20	101,86	195,14	195,74	195,44	37,82	46,41	3558,1	E
CP13	100,84	101,16	101,00	194,42	194,00	194,21	36,51	45,56	3540,5	E
RESIST. MÉDIA								46,95		

C.2 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela C.2 – Dados experimentais do ensaio de tração por compressão diametral

	Diâmetro CP (mm)			Comprimento CP (mm)			Carga (tf)	Resistência (MPa)	Peso (gr)	
	D1	D2	Média	C1	C2	Média				
CP01	101,00	101,00	101,00	196,84	196,86	196,85	11,41	3,65	3546,75	
CP02	100,60	100,00	100,30	197,63	197,78	197,71	12,10	3,88	3512,95	
CP03	101,43	100,94	101,19	197,93	197,32	197,63	11,56	3,68	3573,77	
CP04	101,71	101,73	101,72	197,84	197,62	197,73	10,90	3,45	3613,58	
CP05	102,11	101,32	101,72	197,65	197,42	197,54	9,57	3,03	3606,50	
CP06	100,89	101,69	101,29	198,38	198,43	198,41	12,59	3,99	3615,50	
CP07	101,93	101,96	101,95	197,56	197,15	197,36	12,16	3,85	3544,10	
CP08	100,66	102,14	101,40	198,08	198,16	198,12	13,14	4,16	3623,60	
CP09	102,57	102,70	102,64	197,48	196,54	197,01	11,38	3,58	3584,30	
CP10	103,04	101,97	102,51	198,04	199,99	199,02	13,82	4,31	3600,70	
RESIST. MÉDIA								3,76		

C.2 – MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tabela C.3 – Dados experimentais do ensaio de módulo de elasticidade

Ciclo	Carga (kgf)	CP1				Ciclo	Carga (kgf)	CP2			
		CH0	diff	CH1	diff			CH0	diff	CH1	diff
I	375	-0,148	0,051	0,384	0,050	I	420	-0,068	0,055	0,704	0,051
	11135	-0,199		0,334			0,653				
II	440	-0,150	0,052	0,383	0,048	II	460	-0,070	0,059	0,704	0,048
	11105	-0,202		0,335			0,656				
III	435	-0,151	0,053	0,382	0,047	III	435	-0,070	0,057	0,703	0,048
	11175	-0,204		0,335			0,655				
IV	460	-0,151	0,053	0,382	0,047	IV	520	-0,071	0,058	0,703	0,047
	11190	-0,204		0,335			0,656				

Ciclo	Carga (kgf)	CP3			
		CH0	diff	CH1	diff
I	430	-0,125	0,056	0,328	0,054
	11060	-0,181		0,274	
II	395	-0,126	0,057	0,328	0,054
	11175	-0,183		0,274	
III	420	-0,126	0,058	0,328	0,053
	11260	-0,184		0,275	
IV	440	-0,127	0,057	0,328	0,053
	11130	-0,184		0,275	

Ensaio	Peso (kg)	Ø (mm)	h (mm)	A (cm ²)	P _u (kgf)	f _c (MPa)	E (GPa)
CP1	3,584	101,68	194,62	81,201	40.085	49,37	26,90
CP2	3,545	101,21	194,30	80,444	39.370	48,94	25,80
CP3	3,544	100,95	194,65	80,031	40.605	50,74	24,80

Média	49,68	25,83
Desvio P.	0,938	1,050