

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

FRANCISCO SÁVIO DE OLIVEIRA JUNIOR

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

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

**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**

Engº Civil FRANCISCO SÁVIO DE OLIVEIRA JUNIOR

**ORIENTADOR: Prof. GUILHERME SALES S. DE A. MELO, Ph.D.
CO-ORIENTADOR: Prof. YOSIAKI NAGATO, D.Sc.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM – 009A/05

BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2005

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

**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**

ENG. FRANCISCO SÁVIO DE OLIVEIRA JUNIOR

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. Guilherme Sales S. de A. Melo
(Orientador – Ph.D. – UnB)

Prof. José Luís Vital de Brito
(Examinador Interno – D.Sc. – UnB)

Prof^a. Kristiane Mattar Accetti Holanda
(Examinadora Externa – D.Sc. – CNPq)

BRASÍLIA/DF, 26 DE JULHO DE 2005

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA JUNIOR, FRANCISCO SÁVIO DE

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.

xix, 167 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2005).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Concreto Armado

2. Flexão

3. Vigas “T”

4. Reforço com FRP

5. EBR

6. NSMR

I. ENC/FT/UnB

II – Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA JUNIOR, F. S. (2005). 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. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM – 009A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Francisco Sávio de Oliveira Junior.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: 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.

GRAU/ANO: Mestre/2005

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 desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem sua autorização por escrito.

Francisco Sávio de Oliveira Junior

STM Conjunto 11 Lote 09 Casa 01

Taguatinga

CEP: 72023-455 – Brasília-DF

e-mail: chicobyte@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Primeiramente a Deus,
aos meus pais (Francisco e Salomé)
aos meus irmãos (Flávio, Fábio e Roberto)
e a minha namorada (Camille)
pelo amor e carinho
durante o desenvolvimento deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Guilherme e Nagato, pela dedicação, paciência, incentivo, compreensão e excelente orientação prestada durante a elaboração deste trabalho.

À Universidade de Brasília - UnB - pela oportunidade oferecida, e à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao professor Ronaldson, por seu grande auxílio no desenvolvimento desta dissertação.

Aos doutorandos Eliane Castro e José Neres, por seu amplo apoio na idealização dos ensaios e no desenvolvimento dos mesmos.

Aos engenheiros Carlos Luna, Fábio Silva e Otávio Rangel pelos incentivos, amizade e auxílio demonstrados nos estudos e na realização dos ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas, Leonardo, Divino e Leandro, pelo companheirismo, apoio e dedicação durante os ensaios.

Aos técnicos Severino e Xavier do Laboratório de Ensaio de Materiais, pela colaboração.

Aos amigos do mestrado, pelo espírito solidário e de companheirismo.

À CONCRECON, pela doação do concreto.

Aos meus amigos.

Aos meus pais, irmãos e namorada.

A Deus.

RESUMO

OLIVEIRA JUNIOR, F. S. de; 2005. *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.* Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 167p.

O objetivo deste trabalho é investigar o comportamento de vigas de concreto armado, com seção “T”, reforçadas à flexão com compósitos com fibras de carbono e barras de aço por meio de duas técnicas, uma com reforço colado em entalhes preparados na camada de cobrimento e outra com reforço colado na superfície do concreto. Foram ensaiadas 7 vigas simplesmente apoiadas, submetidas a duas cargas concentradas aplicadas a 1500 mm dos apoios, em um vão de 4000 mm, sendo 4 vigas com taxa de armação de 0,63 % e 3 com 1,57 %. Foram utilizadas 2 vigas de referência (sem reforço) e 5 reforçadas com barras e mantas com fibras de carbono e barras de aço. Os reforços empregados tinham rigidezes axiais similares.

São apresentados e analisados resultados de carga última, modos de ruptura, fissuração, deslocamento vertical, deformação do concreto, da armadura e do reforço. As cargas últimas e modos de ruptura são comparados com os previstos pelas normas NBR 6118:03, ACI 318M:02 e ACI 440:02. Foram feitas adaptações no procedimento de cálculo para vigas fora do escopo das normas acima.

Foram observados descolamentos prematuros dos reforços com barra de aço e barra com fibra de carbono em duas das vigas reforçadas por conta de problemas no adesivo utilizado. Os resultados mostram que o incremento na capacidade resistente proporcionado pelo reforço depende da taxa de armação da viga. As vigas reforçadas com manta de fibra de carbono apresentaram melhores resultados, obtendo incremento na capacidade resistente de até 24,5 % em relação à viga sem reforço. A viga reforçada com barra de aço apresentou incremento pouco acima da metade do observado na viga reforçada com manta de fibra de carbono em face do baixo limite elástico desse material. Os resultados de carga última e modos de ruptura obtidos pelas normas ficaram coerentes com os experimentais, com exceção das vigas que apresentaram descolamento. Os resultados da NBR 6118:03 foram mais conservadores do que os obtidos com o ACI. Cabe ressaltar que alguns procedimentos de cálculo foram adaptados.

ABSTRACT

FLEXURAL STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE “T” BEAMS THROUGH EXTERNAL BONDING AND INSERTION OF CFRP COMPOSITES AND STEEL BARS AT THE CONCRETE COVER

The purpose of this work is to investigate the behavior of reinforced concrete “T” beams, flexural strengthened with composites with carbon fiber and steel bars by two techniques, one with bonded reinforcement in grooves prepared on the cover layer and one with reinforcement bonded on the surface of the concrete. It was tested 7 beams, that were under two concentrated loads applied at 1500 mm from the supports, in a 4000 mm length, being that 4 beams with steel reinforcement ratio of 0,63% and 3 with 1,57%. It was utilized 2 reference beams (without reinforcement) and 5 reinforced with carbon fiber bars and mantles and steel bars. The reinforcement used had similar axial rigidity.

It is analyzed results of the ultimate load, rupture modes, failure types, cracking, deflections, strain of concrete, steel and of the strength. The ultimate load and the rupture modes are compared with the ones expected by the guides NBR 6118:03, ACI 318M:02 and ACI 440:02. There were made adaptations on the method of design for the beams out of the range of the above guides.

It was noticed some early debonding of the steel bars and carbon fiber bars in 2 of the strengthened beams because of problems on the adhesive used. The result show that the increase in the resistant capacity provided by the reinforcement depends on the steel reinforcement ratio. The beams reinforced with carbon fiber mantle presented better results, getting an increase of the resistant capacity of up to 24,5 % as opposed to the beam without strengthened. The strengthened beam with steel bar present an increase a little more than the half of the observed on the carbon fiber mantle strengthened bean due to the small elastic limit of this material. The result of the ultimate load and rupture modes obtained by the guides were coherent with the experimental, except the beams that presented debonding. The result of the NBR 6118:03 were more coherent that the ones obtained with the ACI. It is important to mention that some of the calculations were adapted.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - GENERALIDADES	1
1.2 - OBJETIVO, MOTIVAÇÃO E METODOLOGIA DO TRABALHO	2
1.3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - PRELIMINARES	4
2.2 - TÉCNICAS DE REFORÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO	4
2.2.1 - Armaduras de complementação ou de reforço	5
2.2.2 - Adição de chapas e perfis metálicos	6
2.2.3 - Protensão exterior	7
2.2.4 - Aumento da seção transversal pela adição de concreto ou argamassa com ou sem adição de armadura	8
2.2.5 - Adição de compósitos com fibra	8
2.2.5.1 - Reforço por colagem externa de polímeros reforçados com fibras na superfície do elemento estrutural (EBR – FRP)	10
2.2.5.2 - Reforço por inserção de polímeros reforçados com fibras na camada de cobrimento do elemento estrutural (NSMR – FRP)	11
2.3 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS	12
2.4 - MODOS DE RUPTURA DE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO	15
2.4.1 - Modos de ruptura de vigas reforçadas externamente pela técnica EBR	15
2.4.2 - Modos de ruptura de vigas reforçadas pela técnica NSMR	18
2.5 - ALGUMAS PESQUISAS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS	19
2.5.1 - Preliminares	19
2.5.2 - De Lorenzis & Nanni (2002) – Aderência	19
2.5.3 - Hassan (2002) – Reforço à flexão, aderência e custo	24
2.5.3.1 - Reforço à flexão	24
2.5.3.2 - Análise de custo	25
2.5.3.3 - Programa experimental na análise da aderência	26
2.5.4 - Castro (2003) – Reforço à flexão	29
2.5.4.1 - Materiais	30
2.5.4.2 - Resultados experimentais	31
2.5.5 - Lima (2004) – Reforço à flexão	34
2.5.5.1 - Materiais	36
2.5.5.2 - Resultados experimentais	36
3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	41
3.1 - PRELIMINARES	41
3.2 - DETALHAMENTO DAS VIGAS	42
3.2.1 - Comprimento e seção transversal	42
3.2.2 - Esquema estático de carregamento	43
3.2.3 - Capacidade de resistência das vigas de referência	44
3.2.3.1 - Resistência à flexão	45

3.2.3.2 - Resistência ao cisalhamento	45
3.2.4 - Detalhamento das armaduras de flexão e cisalhamento	46
3.2.4.1 - Ancoragem e cobrimento da armadura	47
3.2.5 - Reforço das vigas	48
3.2.5.1 - Propriedades do material de reforço	48
3.2.5.2 - Definição do reforço	49
3.2.5.3 - Detalhamento do reforço com barras de CFRP e de aço	50
3.2.5.4 - Detalhamento do reforço com manta de CFRP	52
3.2.6 - Resistência à flexão das vigas reforçadas	52
3.3 - INSTRUMENTAÇÃO	53
3.3.1 - Deformações das armaduras de flexão e cisalhamento	53
3.3.2 - Deformações dos reforços	56
3.3.3 - Deformação do concreto	58
3.3.4 - Deslocamentos verticais	59
3.4 - CONFECÇÃO DAS VIGAS	60
3.4.1 - Montagem e concretagem das vigas	60
3.4.2 - Execução do reforço das vigas	61
3.4.2.1 - Reforço das vigas utilizando a técnica NSMR	61
3.4.2.2 - Reforço da viga com a manta de CFRP	64
3.4.2.3 - Observações quanto à resina	69
3.4.3 - Ensaio de ruptura das vigas	70
4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	72
4.1 - PRELIMINARES	72
4.2 - MATERIAIS	72
4.2.1 - Aço	72
4.2.2 - Concreto	74
4.2.3 - Resina epóxi	77
4.2.4 - Barra de fibra de carbono	78
4.2.5 - Manta de fibra de carbono	78
4.3 - ENSAIO DAS VIGAS DE REFERÊNCIA	80
4.3.1 - Ensaio da viga de referência VA – REF	80
4.3.1.1 - Deformação da armadura de flexão	81
4.3.1.2 - Deformação da armadura de cisalhamento	82
4.3.1.3 - Deformação do concreto	82
4.3.1.4 - Deslocamentos verticais	83
4.3.2 - Ensaio da viga de referência VB – REF	83
4.3.2.1 - Deformação da armadura de flexão	84
4.3.2.2 - Deformação da armadura de cisalhamento	85
4.3.2.3 - Deformação do concreto	85
4.3.2.4 - Deslocamentos verticais	86
4.4 - ENSAIO DAS VIGAS REFORÇADAS	86
4.4.1 - Vigas reforçadas do grupo A	86
4.4.1.1 - Modo e carga de ruptura	86
4.4.1.2 - Deformação na armadura de flexão	90
4.4.1.3 - Deformação na armadura de cisalhamento	91
4.4.1.4 - Deformação no concreto	92
4.4.1.5 - Deformação nos reforços das vigas	94
4.4.1.6 - Deslocamentos verticais	95
4.4.2 - Vigas do grupo B	97

4.4.2.1 - Modo e carga última	97
4.4.2.2 - Deformação na armadura de flexão	100
4.4.2.3 - Deformação na armadura de cisalhamento	101
4.4.2.4 - Deformação no concreto	102
4.4.2.5 - Deformação no reforço das vigas	103
4.4.2.6 - Deslocamentos verticais	104
4.4.3 - Fissuração das vigas	105
5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	110
5.1 - PRELIMINARES	110
5.2 - ANÁLISE DAS VIGAS ENSAIADAS	110
5.2.1 - Carga última e modos de ruptura	110
5.2.2 - Deformação da armadura de flexão	111
5.2.3 - Deformação da armadura de cisalhamento	113
5.2.4 - Deformação do concreto	115
5.2.5 - Deformação dos reforços	117
5.2.6 - Deslocamentos verticais	119
5.3 - CÁLCULO TEÓRICO DAS VIGAS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS	122
5.3.1 - Cálculo das vigas com o ACI 318M:2002 e ACI 440:2002	122
5.3.2 - Cálculo das vigas segundo a NBR 6118:2003	124
5.4 - COMPARAÇÕES ENTRE OS TIPOS DE REFORÇO E DE RUPTURA	125
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	128
6.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	128
6.2 - CONCLUSÕES	128
6.2.1 - Dos materiais	128
6.2.2 - Do comportamento das vigas de referência e reforçadas	129
6.2.3 - Comparação entre as técnicas de reforço colado em entalhes no concreto (NSMR) e de reforço colado na superfície do concreto (EBR)	130
6.2.4 - Comparação entre os resultados estimados pelas normas e os obtidos experimentalmente	131
6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
BIBLIOGRAFIA	133
ANEXOS	140
A - PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA O DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE ESTRUTURAS REFORÇADAS COM FRP	140
A.1 - RECOMENDAÇÕES DO ACI 440.2R (2002)	140
A.1.1 - Hipóteses de cálculo	140
A.1.2 - Propriedades de cálculo da fibra	141
A.1.3 - Deformação Existente do Elemento Reforçado	142
A.1.4 - Capacidade Resistente	142
A.1.5 - Modo de Ruptura	143
A.1.6 - Compatibilidade de Deformação	144
A.1.7 - Fator de Redução do Aumento de Rigidez	145
A.1.8 - Equilíbrio das Forças Internas	145
A.2 - PROPOSTA DE ADIÇÃO AO ACI 440	146
A.2.1 - Compatibilidade de Deformação	146
A.2.2 - Coeficiente km	147
A.2.3 - Observações quando ao reforço com barras de aço	147
A.3 - RECOMENDAÇÕES DA NBR 6118 (2003)	148

A.3.1 - Hipóteses de Cálculo	148
A.3.2 - Aço escoando Seguido pelo Esmagamento do Concreto	148
A.3.3 - Aço escoando Seguido pela Ruptura da Fibra	149
B - MEMORIAL DE CÁLCULO	151
B.1 - Viga VA - REF segundo à NBR 6118:2003	151
B.2 - Viga VA – RBC segundo ao ACI 440:2002	152
B.3 - Viga VA – RMC segundo ao ACI 440:2002	153
C - LEITURAS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	154
C.1 - VIGA VA – REF	154
C.2 - VIGA VA – RBC	156
C.3 - VIGA VA – RBA	158
C.4 - VIGA VA – RMC	160
C.5 - VIGA VB – REF	162
C.6 - VIGA VB – RBA	164
C.7 - VIGA VB – RMC	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Reforço por aumento de seção (Rizkalla, 2001, com adaptações)	5
Figura 2.2 – Adição de chapas de aço metálicos (Rizkalla, 2001)	6
Figura 2.3 – Aplicação de protensão exterior (Rizkalla, 2001)	7
Figura 2.4 – Reforço por aumento de seção (Souza & Ripper, 1998)	8
Figura 2.5 – Colagem externa de manta de fibra de carbono (FHWA, 2005 e D.S. Brown 2005)	10
Figura 2.6 - Detalhamento do Reforço com a técnica NSMR FRP (Rizkalla, 2002, com adaptações)	11
Figura 2.7 – Instalação do reforço com a técnica NSMR (Rizkalla, 1999)	12
Figura 2.8 – Curvas Tensão-deformação das principais fibras (Machado, 2002)	13
Figura 2.9 – Diversas formas das fibras utilizadas nos reforços (Chung, 2002)	14
Figura 2.10 – Modos de ruptura clássicos	16
Figura 2.11 – Modos de ruptura prematuros	17
Figura 2.12 – Ruptura por destacamento da camada de cobrimento (Gorreti & Oliveira Junior, 2000)	17
Figura 2.13 – Modos de ruptura prematuros	17
Figura 2.14 – Descolamento do FRP devido fissuras de flexão (Silva Filho, 2004)	18
Figura 2.15 – Ruptura por destacamento do compósito (Castro, 2004)	18
Figura 2.16 – Modos de ruptura prematuros no reforço com a técnica NSMR	19
Figura 2.17 – Esquema do ensaio (De Lorenzis & Nanni, 2002)	20
Figura 2.18 – Detalhe da ancoragem da barra no ensaio, face inferior da viga (De Lorenzis & Nanni, 2002, com adaptações)	20
Figura 2.19 – Exemplos com ruptura por fendilhamento no epóxi e fissuração no concreto (De Lorenzis & Nanni, 2002, com adaptações)	21
Figura 2.20 – Eficiência dos vários tipos de reforço (Hassan, 2002, com adaptações)	26
Figura 2.21 – Detalhe da armação da vigas (Hassan, 2002)	27
Figura 2.22 – Seção transversal, detalhamento da armadura e esquema de ensaio (Castro, 2003)	31
Figura 2.23 – (a) % de incremento de carga em relação à viga de referência; (b) Relação entre a carga última experimental e a carga teórica (Castro, 2003)	32
Figura 2.24 – Detalhe da ruptura da barra de CFRP na viga VC 2.2 (Castro, 2003)	33
Figura 2.25 – Detalhes da ruptura das vigas VB 2.2 e VD 2.2 (Castro, 2003)	34
Figura 2.26 – Sistema de reforço aplicado (Lima, 2004)	35
Figura 2.27 - Relação entre a carga experimental e a carga teórica (Lima, 2004)	37
Figura 2.28 - Detalhe do destacamento das barras de GFRP na viga VA – RBG	39
Figura 2.29 - Detalhe da ruptura da barra de GFRP da viga VB – RBG	39
Figura 2.30 - Detalhe do destacamento das tiras de laminado de CFRP na VB – RLC	39
Figura 3.1 – Seção transversal das vigas	43
Figura 3.2 – Esquema estático de carregamento	43
Figura 3.3 – Esquema de ensaio das vigas	44
Figura 3.4 – Diagramas de esforços das vigas	44
Figura 3.5 – Detalhamento da armadura das vigas do Grupo A	46
Figura 3.6 – Detalhamento da armadura das vigas do Grupo B	47
Figura 3.7 – Detalhamento das chapas de ancoragem	48
Figura 3.8 – Detalhe da chapa na forma	48
Figura 3.9 – Detalhamento do reforço com 1 barra de CFRP	51
Figura 3.10 - Detalhe do entalhe para reforço com barra de CFRP	51

Figura 3.11 – Detalhamento do reforço com 1 barra de aço	51
Figura 3.12 – Detalhamento longitudinal do reforço com a técnica NSMR	51
Figura 3.13 - Detalhamento do reforço com manta de CFRP	52
Figura 3.14 – Detalhamento longitudinal do reforço colado externamente	52
Figura 3.15 – Localização dos extensômetros elétricos na armadura do Grupo A	54
Figura 3.16 - Localização dos extensômetros elétricos na armadura do Grupo B	54
Figura 3.17 – Spider8 e o notebook com o programa CatMan	55
Figura 3.18 – Preparo da superfície do aço	55
Figura 3.19 – Extensômetro colado no aço	56
Figura 3.20 – Localização dos extensômetros elétricos no reforço	56
Figura 3.21 – Regularização da superfície das barras de CFRP	56
Figura 3.22 – Regularização da superfície da manta de CFRP	57
Figura 3.23 – Colagem do extensômetro na barra de CFRP	57
Figura 3.24 – Colagem do extensômetro no reforço com MFC	57
Figura 3.25 – Localização dos extensômetros elétricos no concreto	58
Figura 3.26 – Colagem do extensômetro elétrico no concreto	58
Figura 3.27 – Posicionamento dos defletômetros	59
Figura 3.28 – Defletômetro montado na viga	59
Figura 3.29 – Cura das vigas	60
Figura 3.30 – Corte do concreto com a serra mármore via úmida	61
Figura 3.31 – Detalhe do reforço na região do extensômetro	61
Figura 3.32 – Barra de CFRP pronta para colagem	62
Figura 3.33 – Balança utilizada para a dosagem dos componentes	62
Figura 3.34 – Mistura dos componentes A e B da resina epóxi	63
Figura 3.35 – Aplicação da resina no entalhe	63
Figura 3.36 – Inserção da barra de CFRP no entalhe	64
Figura 3.37 – Peso sobre a barra para evitar a barra emergir do entalhe	64
Figura 3.38 – Sistema para evitar a ascensão da barra de CFRP	64
Figura 3.39 – Superfície do concreto para colagem da manta de FRP	65
Figura 3.40 – Substrato impregnado com primer epóxico FC	66
Figura 3.41 – Superfície com a argamassa epóxica FC	66
Figura 3.42 – Impregnação da superfície de concreto com Epóxi Estruturante FC	67
Figura 3.43 – Posicionamento da manta de CFRP na viga	67
Figura 3.44 – Impregnação da manta de CFRP com a resina saturante	68
Figura 3.45 – Aplicação da segunda camada da manta de CFRP	68
Figura 3.46 – Aplicação da gravada de ancoragem do reforço com MFC	68
Figura 3.47 – Detalhe da resina	69
Figura 3.48 – Corpos de prova da resina	70
Figura 3.49 – Detalhe do apoio	70
Figura 4.1 – Gráfico tensão-deformação do aço \varnothing 6,3 mm	73
Figura 4.2 - Gráfico tensão-deformação do aço \varnothing 8,0 mm	73
Figura 4.3 - Gráfico tensão-deformação do aço \varnothing 20,0 mm	74
Figura 4.4 – Detalhe do ensaio de módulo de deformação secante do concreto	75
Figura 4.5 – Diagrama tensão-deformação do concreto na viga VA – REF	76
Figura 4.6 – Diagrama tensão-deformação do concreto na viga VB – REF	76
Figura 4.7 – Dimensões dos corpos de prova do laminado com fibra de carbono (em mm)	78
Figura 4.8 – Máquina de ensaios de materiais	79
Figura 4.9 - Diagrama tensão-deformação do laminado com fibra de carbono	79

Figura 4.10 – Detalhes da ruptura dos corpos de prova do laminado de fibra de carbono	80
Figura 4.11 – Viga VA – REF após o ensaio	81
Figura 4.12 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – REF	81
Figura 4.13 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – REF	82
Figura 4.14 – Carga-deformação da superfície do concreto na viga VA – REF	82
Figura 4.15 – Carga-deslocamento na viga VA – REF	83
Figura 4.16 – Viga VB – REF após o ensaio	84
Figura 4.17 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – REF	84
Figura 4.18 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VB – REF	85
Figura 4.19 – Carga-deformação da superfície do concreto na viga VB – REF	85
Figura 4.20 – Carga-descolamento na viga VB – REF	86
Figura 4.21 – Detalhes da resina da barra de CFRP na viga VA – RBC durante o ensaio	87
Figura 4.22 – Viga VA – RBC após o ensaio	87
Figura 4.23 – Detalhe do escorregamento da resina da barra de aço na viga VA – RBA durante o ensaio	88
Figura 4.24 - Viga VA – RBA após o ensaio	88
Figura 4.25 – Detalhe do compósito de CFRP na viga VA – RMC após a ruptura	89
Figura 4.26 - Viga VA – RMC após o ensaio	89
Figura 4.27 - Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – RBC	90
Figura 4.28 - Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – RBA	90
Figura 4.29 - Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – RMC	91
Figura 4.30 - Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – RBC	91
Figura 4.31 - Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – RBA	92
Figura 4.32 - Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – RMC	92
Figura 4.33 – Carga-deformação do concreto na viga VA – RBC	93
Figura 4.34 – Carga-deformação do concreto na viga VA – RBA	93
Figura 4.35 – Carga-deformação do concreto na viga VA – RMC	94
Figura 4.36 – Carga-deformação da barra de fibra de carbono na viga VA – RBC	94
Figura 4.37 – Carga-deformação da barra de aço na viga VA – RBA	95
Figura 4.38 – Carga-deformação da manta de fibra de carbono na viga VA – RMC	95
Figura 4.39 – Carga-deslocamento na viga VA – RBC	96
Figura 4.40 – Carga-deslocamento na viga VA – RBA	96
Figura 4.41 – Carga-deslocamento na viga VA – RMC	97
Figura 4.42 – Detalhe do concreto na viga VB – RBA após a ruptura	98
Figura 4.43 – Viga VB – RBA após a ruptura	98
Figura 4.44 – Detalhe da ruptura do reforço na viga VB – RMC	99
Figura 4.45 – Viga VB – RMC após o ensaio	99
Figura 4.46 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – RBA	100
Figura 4.47 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – RMC	100
Figura 4.48 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VB – RBA	101
Figura 4.49 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VB – RMC	101
Figura 4.50 – Carga-deformação do concreto na viga VB - RBA	102
Figura 4.51 – Carga-deformação do concreto na viga VB – RMC	102
Figura 4.52 – Carga-deformação da barra de aço na viga VB – RBA	103
Figura 4.53 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – RMC	103
Figura 4.54 – Carga-deslocamento na viga VB – RBA	104
Figura 4.55 – Carga-deslocamento na viga VB – RMC	104
Figura 4.56 – Fissuração na viga VA – REF, após o ensaio	105
Figura 4.57 – Fissuração na viga VA – RBC, após o ensaio	105

Figura 4.58 – Fissuração na viga VA – RBA, após o ensaio	106
Figura 4.59 – Fissuração na viga VA – RMC, após o ensaio	106
Figura 4.60 – Fissuração na viga VB – REF, após o ensaio	106
Figura 4.61 – Fissuração na viga VB – RBA, após o ensaio	106
Figura 4.62 – Fissuração na viga VB – RMC, após o ensaio	107
Figura 4.63 – Esquema de fissuração das vigas, após o ensaio	108
Figura 5.1 – Deformação da armadura de flexão das vigas – extensômetro L0	112
Figura 5.2 – Deformação da armadura de flexão das vigas – extensômetro L1	113
Figura 5.3 – Deformação da armadura de cisalhamento – extensômetro T	114
Figura 5.4 – Deformação na superfície do concreto – extensômetro CL	115
Figura 5.5 – Deformação na superfície do concreto – extensômetro CW	116
Figura 5.6 – Deformação dos reforços – extensômetro F0	117
Figura 5.7 – Deformação dos reforços – extensômetro F1	118
Figura 5.8 – Deslocamento vertical – Defletômetro D0	120
Figura 5.9 – Deslocamento vertical – Defletômetro D1	120
Figura 5.10 – Deslocamento vertical – Defletômetro D2	121
Figura 5.11 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados pelo ACI 318:2002 e ACI 440:2003	123
Figura 5.12 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados pela NBR 6118:2003	125
Figura A.1 - Seção de Concreto Reforçada com FRP no Estado Limite Último	143
Figura A.2 – Seção de Concreto Reforçada com FRP no Estado Limite de Serviço	146
Figura A.3 – Esquema de deformações e resultantes produzidas na flexão no ELU	148

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades à tração de barras de polímeros reforçadas por fibras	13
Tabela 2.2 – Descrição das vigas e resultados dos ensaios (De Lorenzis & Nanni, 2002, com adaptações)	22
Tabela 2.3 – Características dos reforços nas lajes	25
Tabela 2.4 – Características das vigas (Castro, 2003)	29
Tabela 2.5 – Características dos materiais (Castro, 2003)	30
Tabela 2.6 – Dimensionamento dos reforços (Castro, 2003)	30
Tabela 2.7 – Resultados das cargas de ruptura das vigas (Castro, 2003)	32
Tabela 2.8 - Características das vigas do programa experimental (Lima, 2004)	35
Tabela 2.9 - Características dos compósitos empregados no reforço (Lima, 2004)	36
Tabela 2.10 - Acréscimo na carga última de flexão para cada uma das vigas reforçadas	38
Tabela 3.1 – Características das vigas do programa experimental	42
Tabela 3.2 – Verificação da capacidade resistente à flexão das vigas de referência	45
Tabela 3.3 – Verificação da resistência ao cisalhamento	45
Tabela 3.4 – Características dos reforços empregados no reforço	49
Tabela 3.5 – Dimensões dos reforços	50
Tabela 3.6 – Dimensões dos entalhes realizados nas vigas	50
Tabela 3.7 – Resistência estimada à flexão das vigas reforçadas	53
Tabela 3.8 – Marca e características dos extensômetros	54
Tabela 3.9 – Características da resina epóxi estruturante tixotrópica FC	62
Tabela 3.10 – Características das resinas do reforço com MFC	65
Tabela 4.1 – Características das barras de aço	74
Tabela 4.2 – Características do concreto	76
Tabela 4.3 – Características da resina utilizada nas barras de aço e de fibra de carbono	77
Tabela 4.4 – Características das resinas utilizadas na manta de fibra de carbono	77
Tabela 4.5 – Características da barra de fibra de carbono	78
Tabela 4.6 - Características do laminado com manta de fibra de carbono	80
Tabela 4.7 – Carga de ruptura das vigas ensaiadas do grupo A	89
Tabela 4.8 – Carga de ruptura das vigas ensaiadas do grupo B	99
Tabela 4.9 – Cargas da primeira fissura nas vigas e observações do ensaio	107
Tabela 5.1 – Acréscimo na carga última de flexão para cada uma das vigas reforçadas	110
Tabela 5.2 – Deformação e carga de escoamento da armadura de flexão	113
Tabela 5.3 – Deformação da armadura de cisalhamento – extensômetro T	115
Tabela 5.4 – Deformação do concreto	116
Tabela 5.5 – Deformação dos reforços e as respectivas cargas	118
Tabela 5.6 – Deslocamentos verticais das vigas nas cargas de fissuração, de escoamento da armadura de flexão e na carga última	121
Tabela 5.7 – Carga última experimental e carga teórica das vigas, segundo o ACI318M:2002 e ACI 440:2002	123
Tabela 5.8 – Carga última experimental e carga teórica das vigas, segundo a NBR 6118:2003	124
Tabela 5.9 – Comparação entre os modos de ruptura esperados pelas normas ACI318M:2002 e ACI 440:2002 e os observados experimentalmente	126
Tabela 5.10 – Comparação entre os modos de ruptura esperados pela norma NBR 6118:2003 e os observados experimentalmente	127
Tabela A.1 – Coeficiente de redução ambiental para vários tipos de sistemas de FRP e condições de exposição	141

Tabela B.1 – Dimensionamento à flexão da viga VA – REF segundo a norma NBR 6118, onde as resistências dos materiais são as informadas pelos fabricantes	151
Tabela B.2 – Dimensionamento à flexão da viga VA – RBC segundo o ACI 440, onde as resistências dos materiais são as obtidas experimentalmente	152
Tabela B.3 – Dimensionamento à flexão da viga VA – RMC segundo o ACI 440, onde as resistências dos materiais são as obtidas experimentalmente	153
Tabela C.1 – Deformações na viga VA – REF	154
Tabela C.2 – Deslocamentos na viga VA – REF	155
Tabela C.3 – Deformações na viga VA – RBC	156
Tabela C.4 – Deformações e deslocamentos na viga VA – RBC	157
Tabela C.5 – Deformações na viga VA – RBA	158
Tabela C.6 – Deformações e deslocamentos na viga VA – RBA	159
Tabela C.7 – Deformações e deslocamentos na viga VA - RMC	160
Tabela C.8 – Deformações e deslocamentos na viga VA - RMC	161
Tabela C.9 – Deformações na viga VB - REF	162
Tabela C.10 – Deformações e deslocamentos na viga VB - REF	163
Tabela C.11 – Deformações na viga VB - RBA	164
Tabela C.12 – Deformações e deslocamentos na viga VB - RBA	165
Tabela C.13 – Deformações e deslocamentos na viga VB - RMC	166
Tabela C.14 – Deformações e deslocamentos na viga VB – RMC	167

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Vão de cisalhamento
A_s	Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração
A_{sw}	Área da seção transversal da armadura de cisalhamento
A_f	Área do reforço
b_f	Largura da mesa
b_w	Largura da seção, compreendida ao longo da altura útil
C_E	Coefficiente de redução ambiental
c	Altura da linha neutra no ACI 318M e ACI 440
d	Altura útil
d_f	Altura do reforço
E_f	Módulo de elasticidade do compósito de FRP
E_s	Módulo de elasticidade do aço
E_{ci}	Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto
E_{sec}	Módulo de elasticidade secante
ϵ_c	Deformação de encurtamento do concreto
ϵ_{cu}	Deformação última de encurtamento do concreto
ϵ_f	Deformação do compósito de FRP
ϵ_{fu}	Deformação última do compósito de FRP
ϵ_{fe}	Deformação efetiva do compósito de FRP
ϵ_s	Deformação do aço
ϵ_y	Deformação de escoamento do aço
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{cj}	Resistência à compressão do concreto aos j dias
f_{ct}	Resistência do concreto à tração
f_{ck}	Resistência à compressão do concreto característica
f_{fe}	Tensão efetiva no FRP
f_{fu}	Tensão última à tração do compósito de FRP
f_r	Tensão de ruptura do aço
f_y	Limite de escoamento do aço
h	Altura total da peça
h_f	Espessura da mesa

k_m	coeficiente segurança da barra de FRP do ACI 440
M_n	Momento resistente nominal
M_{res}	Momento fletor resistente último
M_u	Momento fletor último
P	Carga
P_u	Carga última de flexão
x	Altura da linha neutra
z	Braço de alavanca
V_c	Parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça
V_{sw}	Resistência ao cisalhamento proveniente da armadura de cisalhamento
V_R	Esforço cortante último
ρ	Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração
ϕ	Fator de minoração da resistência do ACI 318 e ACI 440
\emptyset	Diâmetro das barras da armadura
ψ_f	Fator de redução adicional à parcela do FRP do ACI 440

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

As anomalias encontradas nas estruturas, que podem surgir durante a sua construção ou durante a sua fase de utilização, devem ser corretamente estudadas, para se poder determinar as suas origens e suas conseqüências, e, em função de sua duração, se definir sobre a conveniência da recuperação, do reforço ou mesmo da demolição pura e simples dos elementos ou da estrutura danificada (Machado, 2002).

Segundo Fortes (2000), as causas mais freqüentes das manifestações patológicas são:

- Erro de projeto;
- Erro de execução;
- Mudança de uso da estrutura;
- Perda de resistência após incêndios;
- Abalos sísmicos;
- Efeitos agressivos, mecânicos ou químicos.

Para o *fib* (2001), “reabilitar” significa restabelecer a funcionalidade de uma estrutura ao nível original, ou mais alto, tanto no ponto de vista da durabilidade quanto da resistência. A reabilitação compreende o “reparo” e o “reforço”.

As tecnologias de reforços têm sido aprimoradas, por meio de pesquisas tecnológicas e de estudos acadêmicos. Para o reforço de vigas submetidas à flexão tem-se utilizado o aumento da seção transversal com adição de barras ou chapas de aço, a aplicação de protensão exterior e colagem de polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*).

Os polímeros reforçados com fibras, e em especial com fibra de carbono, têm sido utilizados em obras nacionais há algum tempo, apesar de não haver regulamentação nem normalização, nem de aplicação nem com relação aos métodos de cálculo.

A colagem externa de fibras de carbono, denominada de EBR (*Externally Bonded Reinforcement* – reforço colado externamente), nos elementos estruturais é a técnica de reforço com FRP mais empregada, devido à sua simplicidade e facilidade de execução. Todavia, problemas como o descolamento prematuro do FRP (*debonding*), conduziram alguns pesquisadores a desenvolverem uma técnica baseada na inserção de tiras de laminados de FRP em entalhes realizados no concreto de cobertura das peças a serem reforçadas, sendo esta técnica denominada NSMR (*Near Surface Mounted Reinforcement* – reforço inserido no concreto de cobertura). Os estudos desta técnica são recentes, e procuram demonstrar o ganho de resistência em relação à colagem externa, utilizando melhor as propriedades mecânicas do compósito como sistema de reforço.

1.2 - OBJETIVO, MOTIVAÇÃO E METODOLOGIA DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é investigar experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado de seção transversal “T”, reforçadas à flexão com compósitos tipo FRP e barras de aço pela técnica NSMR e manta de fibra de carbono pela técnica EBR. Os resultados experimentais serão comparados com os calculados pelas normas ACI 318, ACI 440 e NBR 6118. Pretende-se então contribuir ao conhecimento de reforço com FRP e nas futuras disposições normativas para reforço com FRP no Brasil.

A motivação desta pesquisa fundamenta-se no ainda incompleto conhecimento do assunto, e do uso até certo ponto incipiente no Brasil de sistemas de reforço utilizando FRP.

A metodologia seguida envolveu uma revisão bibliográfica, o ensaio de 7 vigas de concreto armado com seção transversal “T” divididas em dois grupos em função da taxa de armadura longitudinal antes do reforço com FRP e com barra de aço usando as técnicas NSMR e EBR, sendo que em cada grupo uma viga era de referência, sem reforço, e a comparação dos resultados experimentais com previsões baseadas em prescrições normativas.

Este trabalho prossegue as investigações experimentais em vigas de concreto armado com seção transversal retangular e “T”, realizadas na Universidade de Brasília (UnB), na área de utilização de compósitos tipo FRP em estruturas (Martin & Cardoso, 1997; Rayol,

1999), e na área de reforço de estruturas com FRP (Siqueira & Machado, 1999; Salles Neto, 2000; Goretti & Oliveira Jr, 2000; Silva Filho, 2001; Souza, 2001; Araújo, 2002; Lima, 2004; Silva Filho, 2005, e Castro, 2005).

1.3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

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

No *Capítulo 2* são apresentadas as diversas técnicas de reforço, as características dos FRP e modos de ruptura observados nas vigas reforçadas com esse material. É apresentada ainda uma sucinta revisão bibliográfica sobre o assunto.

O *Capítulo 3* descreve o programa experimental realizado, com todos os detalhes da execução dos reforços nas vigas com os compósitos de FRP e com os outros materiais.

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

O *Capítulo 5* apresenta uma análise dos resultados experimentais apresentados no capítulo anterior, e é apresentada uma comparação com os resultados experimentais obtidos e os estimados pela NBR6118:2003, o ACI 318:2002 e o ACI440:2002.

No *Capítulo 6* são apresentadas as conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Em seqüência, são apresentados as referências bibliográficas e os anexos, com prescrições normativas e adaptações, detalhes de cálculo e leitura dos instrumentos de medição.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - PRELIMINARES

Este capítulo contém uma revisão bibliográfica das diferentes técnicas de reforço que podem ser utilizadas em vigas de concreto armado e as características dos materiais utilizados nestes reforços. Ainda são apresentadas as pesquisas recentes sobre técnicas de reforço com compósitos formados com fibras de carbono.

2.2 - TÉCNICAS DE REFORÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Segundo Souza & Ripper (1998), os motivos pelos quais são necessários trabalhos de reforço em uma estrutura de concreto ou em um ou mais de seus elementos estruturais são os seguintes: correção de falhas de projeto ou de execução; aumento da capacidade portante da estrutura, para permitir modificações em seu uso; regeneração da capacidade portante, diminuída em virtude de acidentes (choques, incêndios, etc.) ou de desgaste ou deterioração; e modificação da concepção estrutural, como o corte de uma viga, por exemplo, por necessidade arquitetônica ou de utilização.

Basicamente, o reforço de vigas submetidas à flexão tem como objetivo: limitar flechas, reduzir abertura de fissuras e aumentar a capacidade resistente da viga.

Souza & Ripper (1998) sugerem ainda que o projeto de reforço deva levar em conta uma série de fatores, entre os quais a concepção original da estrutura, sua história, os defeitos ou as novas exigências e a disponibilidade de mão-de-obra e de materiais. Mas, antes de tudo, o reforço dependerá da formação técnica e da criatividade do projetista, devendo, portanto, ser confiado apenas a profissionais especializados em trabalhos desta natureza.

Serão abordados a seguir alguns procedimentos mais usuais adotados na execução do reforço de elementos estruturais de concreto, em especial os procedimentos para o reforço à flexão de vigas.

2.2.1 - Armaduras de complementação ou de reforço

São relativamente freqüentes as situações em que, em meio a serviços de recuperação ou de reforço de estruturas de concreto, há a necessidade de aumento do número de barras existentes, seja como reforço, casos em que se pretende adequar ou ampliar a capacidade resistente da peça, seja como recuperação, quando, por corrosão, geralmente as barras existentes perdem parte de sua seção original e necessitam de complementação para que as condições de segurança e desempenho sejam restabelecidas. Esta técnica é bem antiga e bastante utilizada, e tem como exemplo a Figura 2.1.



Figura 2.1 – Reforço por aumento de seção (Rizkalla, 2001, com adaptações)

Como explicado por Souza & Ripper (1998), é necessário ter-se em mente que qualquer que seja o material de reposição ou de aumento da seção transversal de concreto (argamassas pré-dosadas ou não, concreto convencional ou concreto projetado), as armaduras serão sempre um obstáculo à concretagem, ainda mais que, para garantia de boa execução dos serviços, deverão estar perfeita e totalmente envolvidas pelo novo material que se irá aplicar. Assim, e até em maior grau do que nos projetos de estruturas novas, em obras de recuperação ou reforço é indispensável que o detalhamento tenha representação gráfica e escrita bem pormenorizadas, que incluam sempre:

- Cobrimento das armaduras;
- Espaçamento entre barras;

- Sistema de ancoragem e emendas;
- Ângulos de dobramento e curvatura.

Há de atentar, também, em se saber tirar partido da melhor condição de desenvolvimento da capacidade de aderência que as barras de aço dispõem tanto com o concreto quanto com argamassas, nos casos em que, previamente à aplicação do material de reposição, são submetidas à limpeza com jatos de areia, água e/ou ar sob pressão. A armadura deve estar perfeitamente limpa, isenta de qualquer camada ferruginosa, permitindo um maior controle de qualidade das características mecânicas dos aços a utilizar.

2.2.2 - Adição de chapas e perfis metálicos

Souza & Ripper (1998) propõem que quando se trata de incrementar a capacidade resistente, uma opção muito eficiente e de rápida execução, recomendada principalmente para situações que requerem emergência ou não permitem grandes alterações na geometria das peças, é a do reforço exterior por colagem e/ou chumbamento de chapas metálicas ou perfis, como mostrado na Figura 2.2. A técnica é simples, em termos de concepção, mas exigente quanto ao rigor executivo e à necessidade de cuidadoso procedimento prévio de cálculo.



Figura 2.2 – Adição de chapas de aço metálicos (Rizkalla, 2001)

Segundo Cánovas (1988), o estado de tensões de vigas reforçadas por esta técnica pode ser calculado separando-se os momentos provocados pelas cargas permanentes e pelas sobrecargas de uso, considerando a situação antes e depois da aplicação do reforço. Nos

casos usuais de reforços de estruturas, as cargas permanentes não solicitam o reforço, visto que geralmente não se executa qualquer procedimento para transferência desse carregamento, ficando o reforço submetido, apenas, às cargas adicionadas após a sua execução.

2.2.3 - Protensão exterior

Introduzir uma força exterior que seja capaz de compensar a existência de indesejáveis acréscimos de tensões interiores, ou que seja capaz de contribuir para um incremento na capacidade resistente de um determinado elemento estrutural seria, talvez, em termos de concepção, a maneira mais simples de se proceder à recuperação ou ao reforço de peças de concreto, mostrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Aplicação de protensão exterior (Rizkalla, 2001)

O detalhamento desta idéia quer em termos de projeto (dimensionamento), quer quanto à execução, não é tão simples assim, ou, dito de outra maneira, para a garantia de um bom resultado final, requer mão-de-obra especializada, equipamentos sofisticados e controle adequado dos materiais.

2.2.4 - Aumento da seção transversal pela adição de concreto ou argamassa com ou sem adição de armadura

A adição de uma camada adicional de concreto, com ou sem adição de armadura complementar, resulta em um aumento de seção transversal, conforme Figura 2.4. Esta técnica é relativamente simples, apesar de alguns cuidados que devem ser tomados quanto à aderência entre o concreto antigo e o novo reforço a fim de minimizar efeitos de retração entre ambos. O projetista deve ter em mente que esse tipo de reforço aumenta o peso próprio da estrutura.

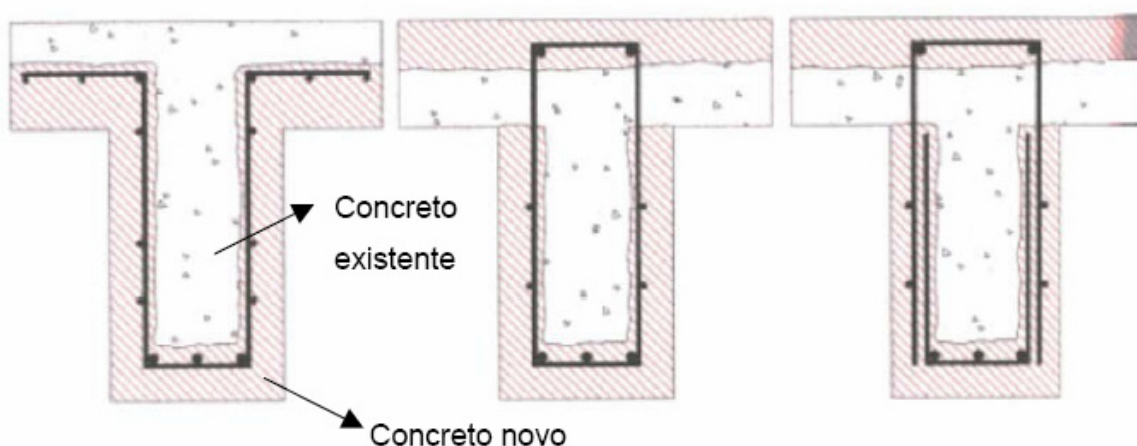


Figura 2.4 – Reforço por aumento de seção (Souza & Ripper,1998)

2.2.5 - Adição de compósitos com fibra

A pesquisa e o desenvolvimento de materiais poliméricos permitiram a aplicação dos mesmos em uma diversificada gama de indústrias. Há alguns anos esses materiais têm sido empregados na indústria aeroespacial, nas construções navais, na indústria automotiva e até mesmo em equipamentos esportivos. Face ao constante barateamento das matérias-primas e dos custos industriais de fabricação, os compósitos com fibra ficaram competitivos em relação aos materiais tradicionalmente utilizados no reforço das estruturas de concreto armado e protendido (Machado, 2002).

O uso de polímeros reforçados com fibras (*fiber-reinforced polymer* – FRP) para o reforço externo de vigas e pilares de concreto surgiu como uma das mais promissoras tecnologias em materiais e engenharia estrutural (Nanni, 1993). Uma das principais características que

faz este material interessante para a engenharia estrutural é a excelente resistência à corrosão e a alta resistência aliada a um baixo peso próprio (De Lorenzis et al., 2001).

Da combinação de dois ou mais materiais, sejam eles metálicos, orgânicos ou inorgânicos, surgem os compósitos. Os componentes mais usados são fibras, partículas, lâminas, flocos, fillers e matrizes. A matriz é o corpo do compósito, que serve para unir os macro-componentes e dar forma ao compósito. Já as fibras, partículas, lâminas, flocos e fillers são os componentes estruturais e determinam a estrutura interna do compósito (Lima, 2004).

Segundo Souza & Ripper (1998), a constante ameaça de um violento sismo no distrito de Kanto, que inclui a cidade de Tóquio, fez o governo japonês tomar a decisão, em meados da década passada, de preparar as construções existentes, em particular o sistema viário. Assim, a partir da conjugação de esforços entre entidades públicas e privadas daquele país no sentido de investigarem novas tecnologias para o reforço das estruturas, surgiu a idéia de se adaptar a utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono (*carbon fiber-reinforced polymer* – CFRP), material já largamente utilizado em soluções de reforço de alto desempenho, particularmente nas indústrias aeronáuticas, aeroespacial, naval e automobilística, ao reforço das estruturas de concreto, tirando o melhor partido de um produto muito resistente, de simples aplicação e que não traz às estruturas de concreto os problemas de durabilidade associados à corrosão das armaduras.

A tecnologia para reforço de estruturas de concreto com compósitos de fibra de carbono conheceu alguns ajustes importantes e ganhou particular desenvolvimento após a ocorrência do sismo de Kobe, em 1995.

Esta tecnologia é, portanto, mais um passo evolutivo da indústria da construção civil, em sua constante busca por novas tecnologias, que sejam cada vez mais simples, resistentes e duráveis, para a reabilitação de estruturas de concreto, dando seqüência a um ciclo com distintas soluções como à do aumento das seções pela aplicação de concreto projetado e/ou de argamassas modificadas, e pelo reforço através da adição de chapas de aço coladas ao concreto.

2.2.5.1 - Reforço por colagem externa de polímeros reforçados com fibras na superfície do elemento estrutural (EBR – FRP)

Esta técnica de reforço é normalmente constituída da colagem externa (*external bonded – EB*) de laminados ou tecidos de fibras, colados com resina epóxi na região da estrutura onde se deseja ter um aumento de resistência. Um exemplo está mostrado na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Colagem externa de manta de fibra de carbono (FHWA, 2005 e D.S. Brown 2005)

Um dos compósitos mais utilizados como elemento de reforço estrutural são os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP – *Carbon fiber reinforced polymer*). As formas comerciais deste compósito para o reforço de estruturas são: os laminados, as folhas flexíveis unidirecionais e os tecidos bidirecionais. Geralmente, os compósitos reforçados com fibras têm um peso específico variando de 1,5 tf/m³ a 2,0 tf/3, ou seja, cerca de 4 a 5 vezes mais leves que o aço, contudo, com módulo de elasticidade semelhante ao do aço de construção. Estas características favorecem o transporte, o manuseio e sua aplicabilidade.

Embora a aplicação do reforço com folhas e/ou laminados de fibra colados externamente seja bem prático, rupturas por descolamento prematuro foram observadas por muitos pesquisadores, podendo levar a rupturas frágeis, sem aviso, do elemento reforçado. A seguir são apresentados os modos de ruptura para o reforço com fibras, identificados pela maioria dos pesquisadores:

- Rompimento do compósito de fibra por tração;

- Esmagamento do concreto à compressão antes ou depois do início do escoamento da armadura tracionada;
- Descolamento do tecido de fibra na interface reforço / concreto (adesivo);
- Destacamento do conjunto reforço / cobrimento de concreto.

2.2.5.2 - Reforço por inserção de polímeros reforçados com fibras na camada de cobrimento do elemento estrutural (NSMR – FRP)

A necessidade de uma maior mobilização da capacidade resistente dos compósitos com fibras, motivou os pesquisadores a investigarem uma nova técnica. Esta técnica consiste na inserção de barras ou tiras de laminados de polímeros reforçados com fibras em entalhes executados no cobrimento do concreto, denominada pelos pesquisadores de NSMR (*Near Surface Mounted Reinforcement*), mostrado na Figura 2.6.

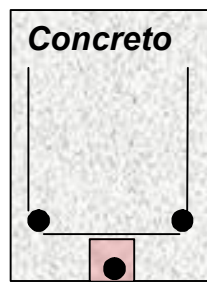


Figura 2.6 - Detalhamento do Reforço com a técnica NSMR FRP (Rizkalla, 2002, com adaptações)

Os compósitos de fibra são colados nas ranhuras usando uma pasta de resina epóxi. O termo em inglês *near* (próximo) indica que o reforço é aplicado próximo à superfície, diferenciando-se daquele colado na superfície externa. A grande vantagem dessa técnica é a melhor ancoragem do reforço por contar com maior superfície de contato com o elemento estrutural a reforçar. Outras vantagens são a maior proteção ao fogo e aos atos de vandalismo. Esta técnica também é interessante no reforço à flexão nas regiões de momento negativo de lajes pois o cobrimento externo pode estar sujeito a danos mecânicos e ambientais, onde requer uma cobertura de proteção (De Lorenzis et al.,2001).

Os polímeros reforçados com fibras utilizados como elementos de reforço estrutural para esta nova técnica são as barras e tiras de laminados. As barras são fabricadas com fibras contínuas de aramida, carbono, vidro, ou qualquer combinação, com diâmetros semelhantes aos das barras de aço.



Figura 2.7 – Instalação do reforço com a técnica NSMR (Rizkalla, 1999)

A desvantagem desta técnica é necessidade da existência de espessura do revestimento suficiente para alojar as barras ou laminados. Contudo, no caso de elementos com pequeno revestimento, é possível fazer a complementação com concreto ou argamassa, o que permite o envolvimento do reforço de fibra.

Em relação às dimensões dos entalhes, Lorenzis et al. (2004) recomenda que a largura e profundidade do entalhe sejam duas vezes o diâmetro da barra.

2.3 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os polímeros reforçados com fibras (FRP), utilizados para reforço de estruturas são constituídos por fibras contínuas, geralmente de vidro (*glass fiber reinforced polymer – GFRP*), aramida (*aramid fiber reinforced polymer – AFRP*) e carbono (*carbon fiber reinforced polymer – CFRP*), mergulhadas em uma matriz de resina epoxídica, cuja finalidade é dar proteção e permitir que as mesmas trabalhem conjuntamente, como um único elemento. O gráfico tensão x deformação dos vários tipos de fibras utilizadas como elemento de reforço são apresentados na Figura 2.8, e um resumo de suas principais características mecânicas na Tabela 2.1, retiradas do ACI 440 (2000a).

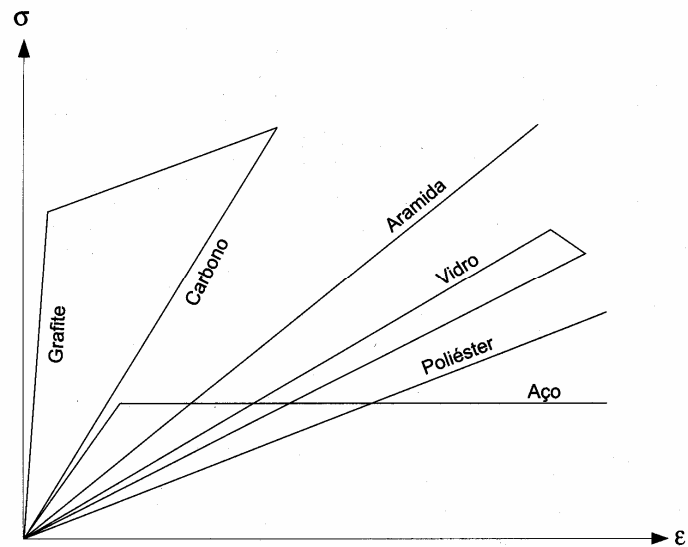


Figura 2.8 – Curvas Tensão-deformação das principais fibras (Machado, 2002)

Tabela 2.1 – Propriedades à tração de barras de polímeros reforçadas por fibras

	<i>Aço</i>	<i>GFRP</i>	<i>CFRP</i>	<i>AFRP</i>
<i>Tensão de escoamento (MPa)</i>	276 – 517	–	–	–
<i>Resistência à tração (MPa)</i>	483 – 690	483 – 1600	600 – 3690	1720 – 2540
<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	200	35 – 51	120 – 580	41 – 125
<i>Deformação de escoamento (%)</i>	0,14 – 0,25	–	–	–
<i>Deformação de Ruptura (%)</i>	6 – 12	1,2 – 3,1	0,5 – 1,7	1,9 – 4,4

Os compósitos utilizados como elemento de reforço estrutural são encontrados no mercado sob diversas formas, tais como: barras, tubos, perfis, lâminas pré-impregnadas, folhas flexíveis pré-impregnadas, folhas flexíveis unidirecionais e tecidos bi-direcionais, com alguns exemplos mostrados na Figura 2.9. A escolha da forma a ser empregada dependerá do tipo e das condições apresentadas pela estrutura a ser reforçada.



Figura 2.9 – Diversas formas das fibras utilizadas nos reforços (Chung, 2002)

O baixo peso dos componentes, sua flexibilidade e facilidade de manuseio permitem a aplicação deste material de modo simples e rápido. No entanto, deve-se ressaltar a importância do estudo do comportamento deste reforço e da qualidade dos procedimentos de aplicação dos compósitos.

Resumidamente, as principais vantagens da utilização destes materiais como reforço são:

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

Contudo, a aplicação destas fibras reforçadas tem algumas desvantagens como:

- Comportamento linear na ruptura à tração, sem apresentar qualquer deformação plástica ou escoamento, caracterizando ruptura frágil;
- Relação custo/peso é muito maior que a do aço;
- São materiais anisotrópicos, ou seja, suas propriedades dependem da direção da solicitação;

- A exposição a altas temperaturas, como num incêndio, pode causar degradação prematura e colapso.

Dentre todos os materiais poliméricos avançados possíveis de serem utilizados nas estruturas de concreto armado e protendido, destacou-se a alternativa da utilização de sistemas poliméricos estruturados com fibras de carbono. Todos os avanços obtidos das pesquisas e dos ensaios realizados conduziram à produção de perfis estruturais compostos, telas, tecidos e barras de fibra de carbono que estão sendo correntemente utilizados para os reforços estruturais (MACHADO, 2002).

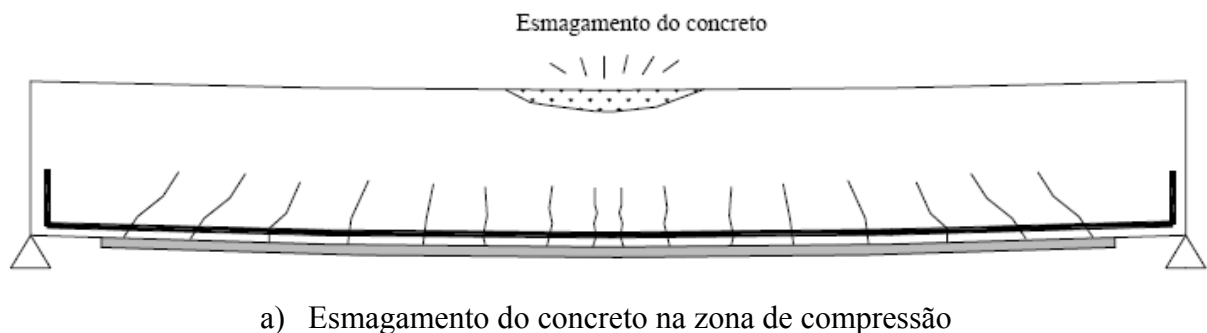
2.4 - MODOS DE RUPTURA DE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO

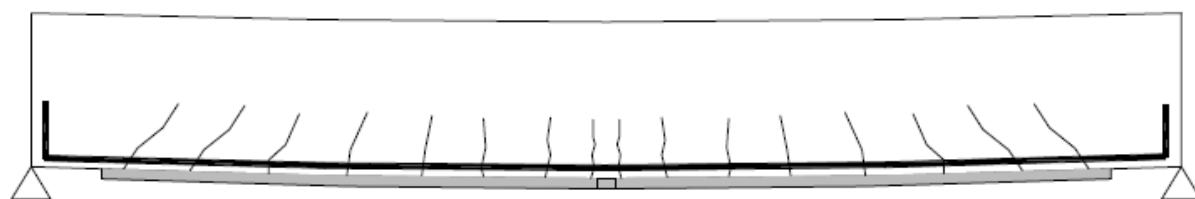
2.4.1 - Modos de ruptura de vigas reforçadas externamente pela técnica EBR

Embora esta técnica de reforço seja bem prática, rupturas por descolamento prematuro foram observadas por muitos pesquisadores, que alertam para este tipo de ruptura, por ser brusca, sem aviso e, normalmente, com carga muito menor que aquela prevista pelos modelos teóricos tradicionais.

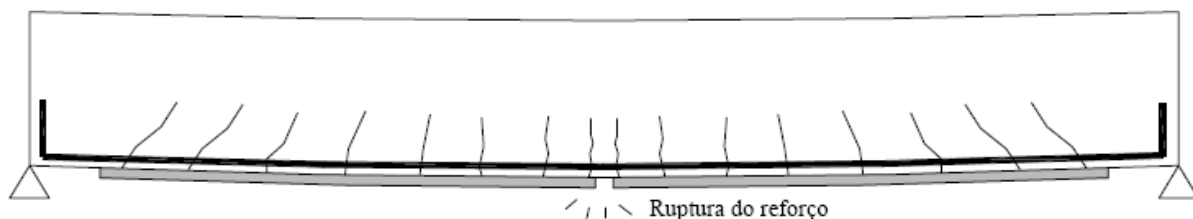
Assim é necessário classificar estes modos de ruptura que serão separados em duas categorias: modos de ruptura clássicos e modos de ruptura prematuros.

Os modos de ruptura clássicos estão na Figura 2.10.

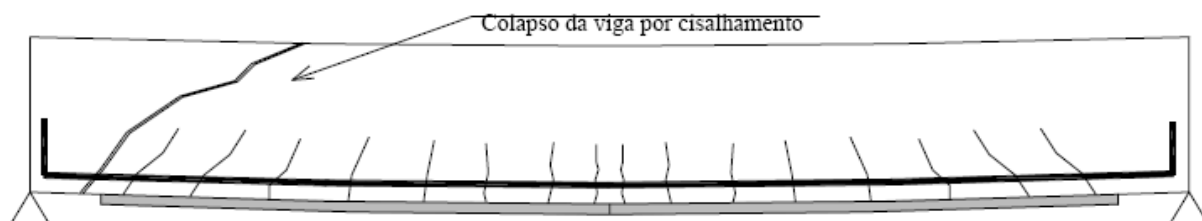




b) Deformação plástica excessiva da armadura de tração



c) Ruptura do reforço

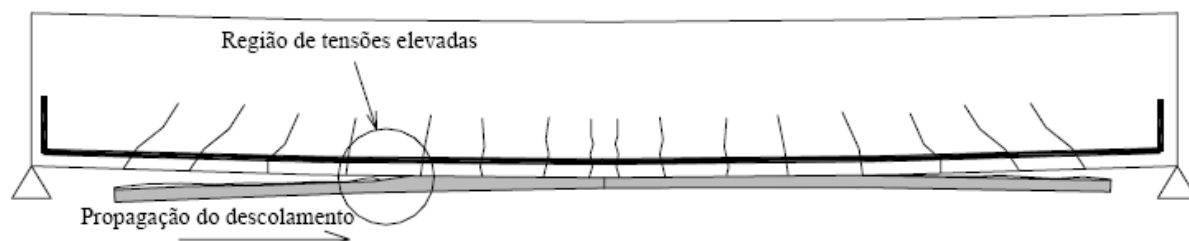


d) Ruptura por cisalhamento

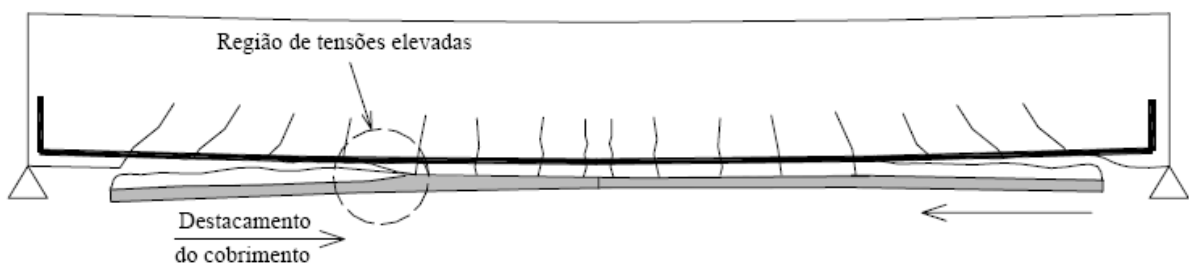
Figura 2.10 – Modos de ruptura clássicos

Os modos de ruptura prematuros, normalmente relacionados a problemas gerados por perda de aderência entre o compósito utilizado no reforço e o substrato do concreto, devido à associação das tensões de tração e cisalhamento, ou ruptura por tração do concreto da camada de cobrimento da armadura de flexão, devido à combinação das tensões de tração e cisalhamento nesta região e devido às fissuras de flexão e cisalhamento que surgem no local do reforço, são mostrados na Figura 2.11. Um exemplo de ruptura por tração do concreto da camada de cobrimento está apresentado na Figura 2.12.

Os modos de rupturas prematuros também estão associados ao descolamento do material de reforço devido às irregularidades na superfície de concreto, fissuras nas regiões próximas aos apoios (descolamento por cisalhamento), e fissuras de flexão (descolamento por flexão), mostrados na Figura 2.13. Um exemplo do segundo caso está mostrado na Figura 2.14.



a) descolamento do reforço devido às elevadas tensões na extremidade



b) destacamento da camada de cobrimento da armadura de flexão

Figura 2.11 – Modos de ruptura prematuros

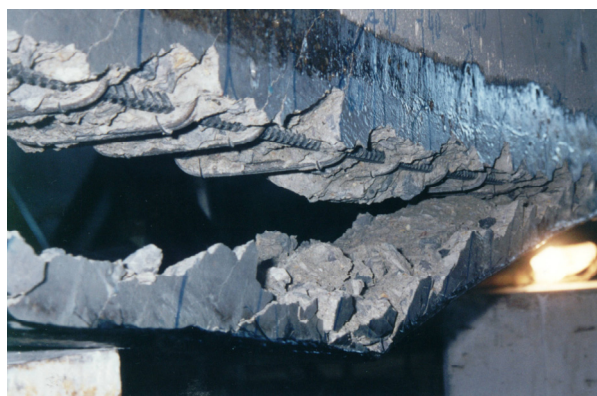


Figura 2.12 – Ruptura por destacamento da camada de cobrimento (Gorreti & Oliveira Junior, 2000)

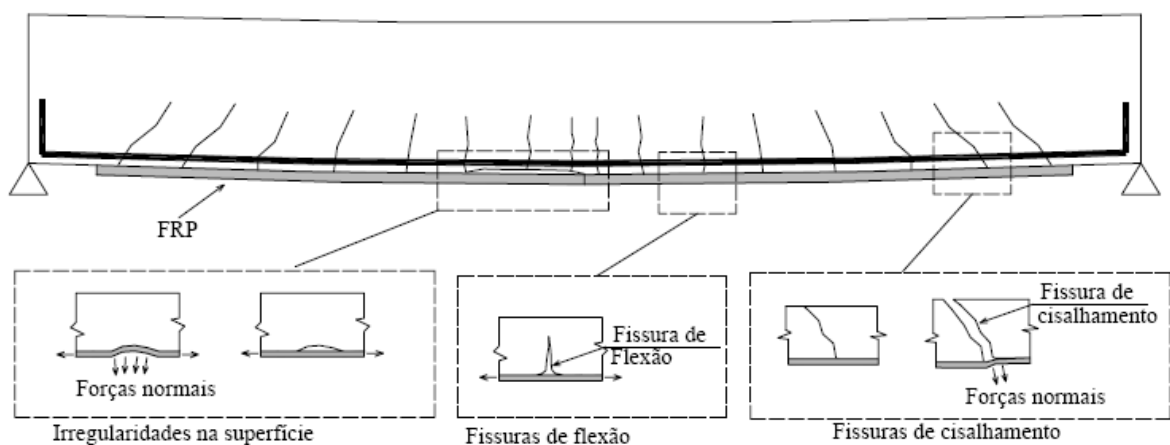


Figura 2.13 – Modos de ruptura prematuros

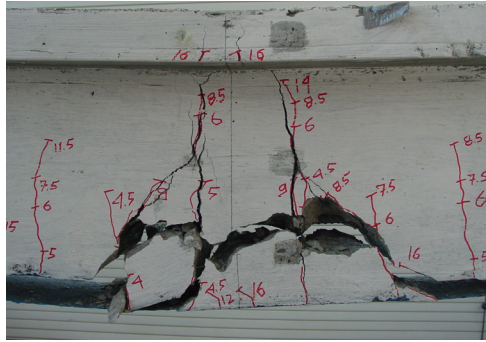


Figura 2.14 – Descolamento do FRP devido fissuras de flexão (Silva Filho, 2004)

2.4.2 - Modos de ruptura de vigas reforçadas pela técnica NSMR

Este tipo de reforço apresenta os mesmos modos de ruptura clássicos das vigas reforçadas externamente com manta de fibra de carbono, apresentados na Figura 2.10, com a única diferença que o reforço está inserido na camada de cobrimento, e não aderido externamente.

Os modos de ruptura prematuros mais comuns no reforço com a técnica NSMR são o descolamento do reforço devido à ruptura do adesivo, devido as tensões de fendilhamento induzidas pelas suas nervuras e a ruptura do concreto em torno do entalhe, mostrados na Figura 2.16. Um exemplo do segundo caso está apresentado na Figura 2.15.



Figura 2.15 – Ruptura por destacamento do compósito (Castro, 2004)

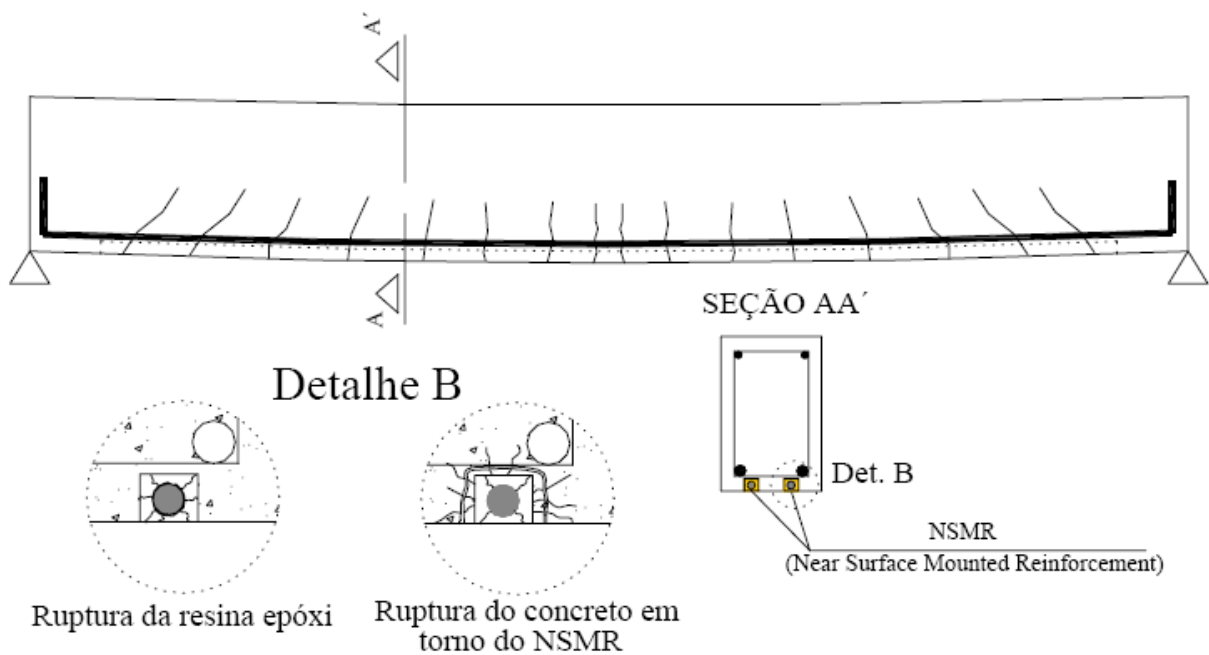


Figura 2.16 – Modos de ruptura prematuros no reforço com a técnica NSMR

2.5 - ALGUMAS PESQUISAS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

2.5.1 - Preliminares

São apresentadas algumas investigações realizadas sobre reforços à flexão e aderência em vigas de concreto armado, reforçadas com FRP.

2.5.2 - De Lorenzis & Nanni (2002) – Aderência

De Lorenzis & Nanni (2002) investigaram experimentalmente as variáveis que influenciam no desempenho da aderência entre as barras de FRP NSMR e o concreto. Foram analisados os seguintes parâmetros: comprimento de ancoragem, diâmetro da barra, tipo de FRP, configuração da superfície da barra e tamanho do entalhe (ranhura) formado na superfície da peça.

As vigas ensaiadas tinham seções transversais tipo T invertida, permitindo assim, maior área de concreto na região tracionada. As dimensões da viga são mostradas na Figura 2.17. Em cada viga foi introduzido um dispositivo (rótula) para liberar a rotação no topo e um

entalhe na face inferior, ambos situados no meio do vão. O propósito da rótula e do entalhe era permitir o controle da distribuição das forças internas durante o carregamento. Durante o carregamento uma fissura é formada nessa região, do entalhe à rótula, de tal forma, que a força de compressão no meio do vão situava-se no centro da rótula, e o braço de alavanca do momento interno era conhecido e constante para qualquer nível de carregamento acima da carga de fissuração. As vigas foram submetidas a duas cargas simétricas, com um vão de cisalhamento igual a 483 mm.

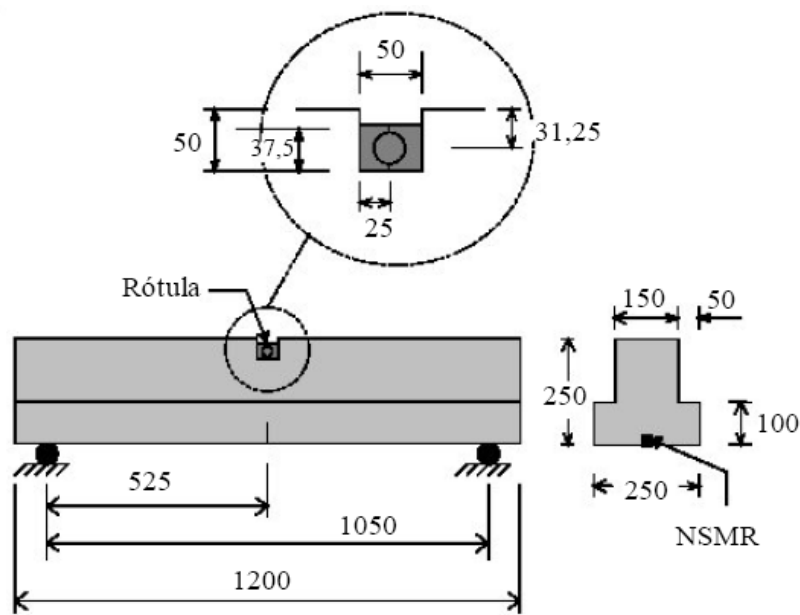


Figura 2.17 – Esquema do ensaio (De Lorenzis & Nanni, 2002)

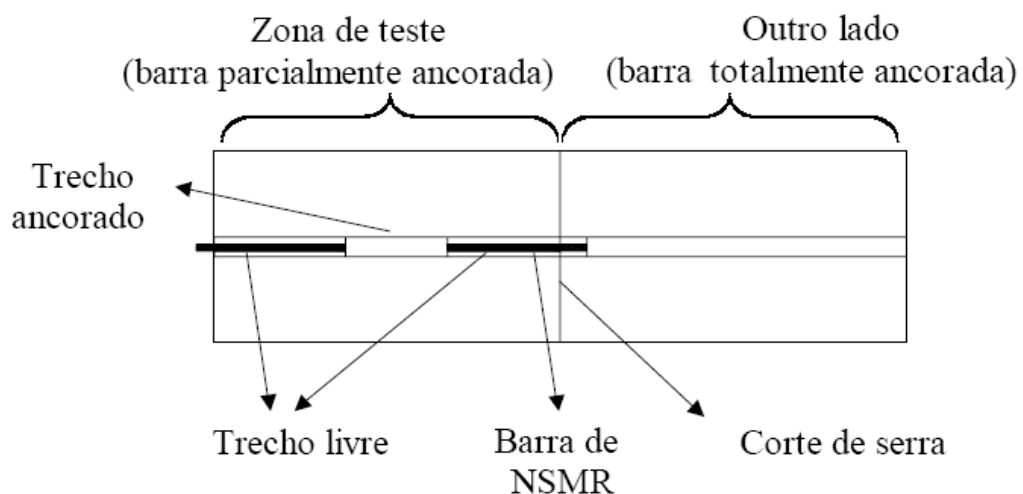


Figura 2.18 – Detalhe da ancoragem da barra no ensaio, face inferior da viga (De Lorenzis & Nanni, 2002, com adaptações)

Foram ensaiadas 22 vigas reforçadas com barras de CFRP e GFRP, na técnica NSMR, aplicadas longitudinalmente na face de tração das vigas. Na região de monitoração, correspondente a uma metade da viga, as barras tiveram comprimentos de ancoragem variados. No outro lado, a barra ficou totalmente ancorada, como mostra a Figura 2.18.

As vigas utilizadas no ensaio à flexão tinham quatro comprimentos de ancoragem, iguais a 6, 12, 18, e 24 vezes o diâmetro da barra, sendo esse de dois tamanhos, No.3 (9,5 mm) e No.4 (12,7 mm). As barras de CFRP tinham duas configurações de superfície, nervuradas (deformed) e polvilhadas com areia (sandblasted). Os cortes (entalhes), executados para colocação da barra de FRP tinham seção quadrada, com 1" (~25 mm), 3/4" (~19 mm) e 5/8" (~16 mm) de lado.

Os resultados dos ensaios em termos de carga última de arrancamento, tensão de aderência, e modo de ruptura são mostrados na Tabela 2.2. O termo “carga de arrancamento” foi adotado para se referir à força de tração aplicada nas barras, após a fissuração da viga, a qual pode ser computada com precisão a partir da carga externa aplicada.

Como os ensaios das vigas com barras No.3 (Sandblasted) não mostraram qualquer influência do tamanho da ranhura na carga última e no modo de ruptura, as vigas com barras de CFRP No.4 (Sandblasted) foram ensaiadas com apenas um tipo de ranhura, de seção transversal quadrada e lado igual a 19 mm.

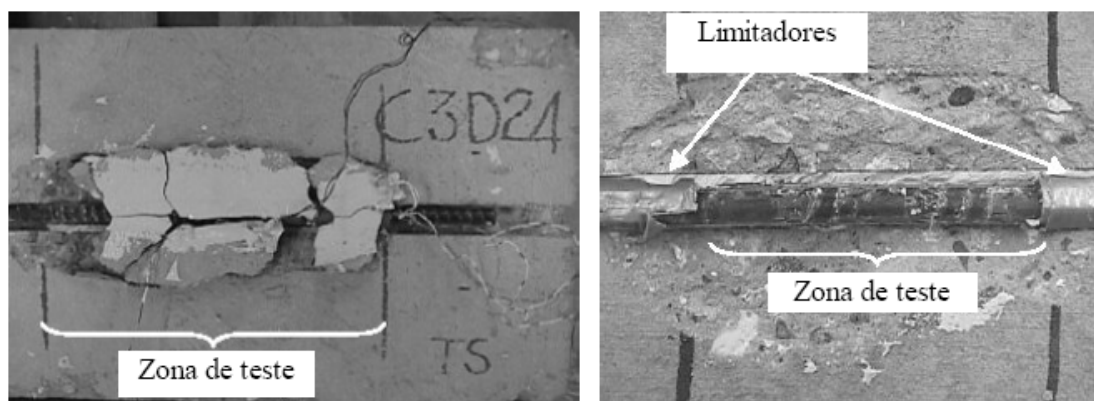


Figura 2.19 – Exemplos com ruptura por fendilhamento no epóxi e fissuração no concreto (De Lorenzis & Nanni, 2002, com adaptações)

Tabela 2.2 – Descrição das vigas e resultados dos ensaios (De Lorenzis & Nanni, 2002, com adaptações)

<i>Vigas</i>	<i>Tipo de FRP/ (Superfície)</i>	<i>Comprimento de ancoragem (n x d_b) (mm)</i>	<i>Tamanho do entalhe (mm)</i>	<i>Carga última de arrancamento (kN)</i>	<i>Tensão média de aderência (MPa)</i>	<i>Modo de ruptura</i>
<i>G4D6a</i>	GFRP -No. 4 φ 12,7 mm (<i>Nervurada</i>)	78	16	24,6	8,1	SOE
<i>G4D12a</i>		156	16	34,5	5,7	SOE
<i>G4D12b</i>			19	37,0	6,1	SOE+C
<i>G4D12ca</i>			25	42,8	7,0	SOE+C
<i>G4D18a</i>		234	16	42,6	4,6	SOE
<i>G4D24c</i>		312	25	62,3	5,1	SOE+C
<i>C3D6a</i>	CFRP – No. 3 φ 9,5 mm (<i>Nervurada</i>)	57	13	15,6	9,1	SOE
<i>C3D12a</i>		114	13	26,7	7,8	SOE
<i>C3D12b</i>			19	30,6	8,9	SOE+C
<i>C3D12c</i>			25	28,8	8,4	C
<i>C3D18a</i>		171	13	42,0	8,2	SOE
<i>C3D24b</i>		228	19	43,9	6,4	SOE+C
<i>C3S6a</i>	CFRP – No. 3 φ 9,5 mm (<i>polvilhada com areia</i>)	57	13	13,8	7,7	SOE
<i>C3S12a</i>		114	13	17,5	5,1	PO
<i>C3S12B</i>			19	15,4	4,5	PO
<i>C3S12C</i>			25	17,5	5,1	PO
<i>C3S18A</i>		171	13	24,9	4,8	PO+SOE
<i>C3S24a</i>		228	13	22,3	3,2	PO+SOE
<i>C4S6</i>	CFRP – No. 4 φ 12,7 mm (<i>polvilhada com areia</i>)	78	16	22,6	7,4	SOE
<i>C4S12</i>		156		25,9	4,2	PO+SOE
<i>C4S18</i>		234		29,5	3,2	PO+SOE
<i>C4S24</i>		312		35,3	2,9	PO+SOE

SOE – Fendilhamento do epóxi (*Splitting of Epoxy*)

C – Fissuração do concreto (*Concrete Cracking*)

PO – Arrancamento (*Pull-out*)

O modo de ruptura por fendilhamento do revestimento de epóxi (SOE) é semelhante ao que ocorre no revestimento de concreto nas estruturas convencionais de concreto armado, Figura

2.19. As componentes radiais de tração são equilibradas pelas tensões circunferenciais de tração no epóxi e podem conduzir à formação de fissuras longitudinais. A carga de ruptura por fendilhamento é influenciada pelas características da superfície das barras, pela resistência à tração e espessura de cobertura de adesivo, a qual é função da profundidade da ranhura e diâmetro da barra FRP. O epóxi normalmente tem uma resistência à tração muito mais alta que o concreto, porém, as espessuras de cobertura do reforço de NSMR são muito baixas comparadas com as das armaduras no concreto, o que faz este modo de ruptura crítico para reforço de NSMR. O concreto que cerca a ranhura também está sujeito a forças de tração ao longo de planos inclinados, e a resistência à tração do material, que causa ruptura ao longo destes planos, pode ser alcançada. Se a ruptura no concreto acontece antes ou depois da formação de intensas fissuras no epóxi, ou até mesmo a ruptura completa do cobertura de epóxi, depende do tamanho da ranhura e da resistência à tração dos dois materiais.

De Lorenzis & Nanni (2002), a partir dos resultados experimentais, concluíram que:

- Foram observados três diferentes modos de ruptura durante os testes experimentais: o fendilhamento do cobertura de epóxi, a fissuração do concreto que cerca a ranhura, e o arrancamento da barra de FRP. Em alguns casos, foram observados modos de ruptura combinados;
- A configuração da superfície das barras FRP influenciou na tensão de aderência. As barras nervuradas parecem ser mais eficientes que barras polvilhadas com areia, do ponto de vista de desempenho de ancoragem;
- O aumento do tamanho da ranhura, e em consequência, da espessura do cobertura de adesivo epóxi, conduz a tensões de aderência mais elevadas quando a ruptura é comandada pelo fendilhamento do cobertura de epóxi, o que não é verdade quando a ruptura ocorre por arrancamento;
- Dos resultados experimentais que envolveram três tamanhos diferentes de ranhura, a dimensão ótima parece ser de 19 mm, para as barras com ϕ 9,5 mm e de 25 mm para as barras com ϕ 12,7 mm, nervuradas.

2.5.3 - Hassan (2002) – Reforço à flexão, aderência e custo

HASSAN (2002) apresenta uma alternativa para o uso de reforço com FRP em pontes de concreto armado com o objetivo de incrementar a capacidade resistente à flexão devido à mudança do trem tipo da ponte. Foram construídos vários e amplos modelos de uma ponte de concreto protendido, e testados até a ruptura para investigar a eficiência dos diferentes tipos de FRP e técnicas de reforço.

As técnicas utilizadas foram a NSMR, inserção de barras ou tiras de laminados de FRP em entalhes executados na camada de cobrimento da armadura de flexão, e a técnica EBR, utilizada na colagem de tecidos na superfície externa do elemento a ser reforçado.

Os materiais empregados foram: barras, tecidos e tiras de laminado de CFRP, e barras de GFRP, fornecidos por diversos fabricantes. O trabalho também apresenta uma avaliação custo-eficiência de cada técnica de reforço.

2.5.3.1 - Reforço à flexão

Foram ensaiadas lajes em balanço para o estudo do reforço em uma ponte localizada em Winnipeg, Manitoba, Canadá. Foram utilizados quatro tipos de reforço de FRP e as duas técnicas citadas, o NSMR e o EBR. Para simular o efeito combinado dos elevados esforços de flexão e de cisalhamento, localizados nos apoios intermediários da ponte, foram construídos três modelos da laje, discriminados na Tabela 2.3. Nos modelos, o momento negativo máximo no apoio do balanço coincide com a região de cisalhamento máximo.

A laje de controle apresentou uma carga de ruptura de 476 kN. O reforço das lajes em balanço utilizando barras de CFRP – Leadline levou a um incremento de 36 % na capacidade resistente, 30 % acima do valor previsto pelo cálculo. Utilizando barras de CFRP C-BAR no lugar de barras de Leadline, houve um incremento de 39 %. As lajes em balanço reforçadas com tiras de laminados de CFRP mostraram o maior incremento de carga, chegando a 43 %. Usando a mesma área de tiras de CFRP utilizadas na técnica NSMR, só que com a técnica de colagem externa (EBR), o aumento de carga foi de apenas 11 % devido ao descolamento prematuro das tiras de laminado. O tecido de CFRP colado

externamente apresentou carga superior a todas as outras técnicas consideradas neste estudo, aumentando a capacidade resistente em 44 %.

Tabela 2.3 – Características dos reforços nas lajes

<i>Série</i>	<i>Tipo de laje</i>	<i>Tipo de reforço</i>	<i>Técnica de reforço</i>	<i>Detalhamento do reforço</i>
S1	C1 (Referência)	-	-	-
	C2	Barras de CFRP Leadline	NSMR	6 ϕ 10 mm cada 200 mm (corte : L=16mm e P=30 mm)
S2	C3	Tiras de CFRP	EBR	Seis tiras de CFRP (50 mm largura e 1,4 mm espessura)
	C4	Tiras de CFRP	NSMR	Tiras de 25 mm largura (corte : L=5 mm e P=25 mm)
S3	C5	Tecido de CFRP	EBR	2 camadas de tecido com 480 mm de largura
	C6	Barras de CFRP C-BAR	NSMR	8 barras
Nota : Dimensões do corte na superfície: L = largura e P = Profundidade				

2.5.3.2 - Análise de custo

Foi realizada uma análise custo-eficiência para cada uma das técnicas de reforço consideradas nesta pesquisa. Em todas as técnicas o reforço foi dimensionado para um incremento de até 30% na capacidade resistente. O custo total considera o custo de materiais, equipamentos necessários durante a construção e custo de mão-de-obra. Os resultados dos ensaios indicam que as tiras de CFRP, na técnica NSMR, e os tecidos de CFRP, colados na superfície externa da laje, obtiveram os maiores incrementos na capacidade resistente.

O custo de execução do reforço com tecidos de CFRP EBR é de apenas 25 % em comparação ao de tiras de CFRP NSMR. O uso das barras de CFRP - Leadline ou barras de CFRP C-BAR na técnica NSMR, obtiveram aproximadamente o mesmo aumento de capacidade carga última, no entanto, o custo do reforço com barras de CFRP C-BAR é 50% menor. Usando uma escala de eficiência (E), definida pela equação 2.1, a eficiência de cada técnica foi quantificada como mostra a Figura 2.20.

$$E = \frac{\text{incremento de resistência}}{\text{custo do reforço US\$}} \times 100 \quad (2.1)$$

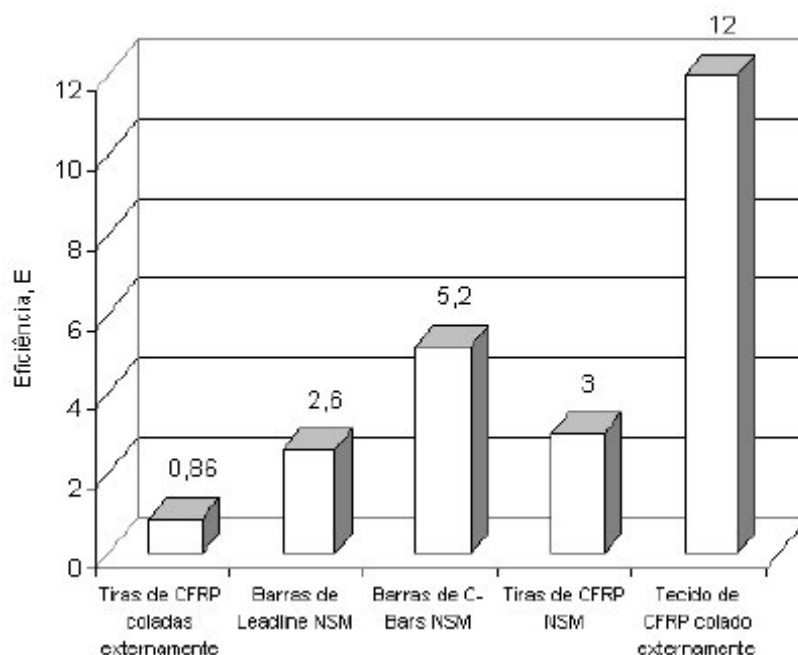


Figura 2.20 – Eficiência dos vários tipos de reforço (Hassan, 2002, com adaptações)

Os resultados mostram que o reforço usando tecidos de CFRP coladas externamente é o de maior eficiência em termos de melhoria de capacidade de carga e custo de reparo.

2.5.3.3 - Programa experimental na análise da aderência

As técnicas de reforço com FRP, na forma de barras C-BAR NSMR, tiras de CFRP NSMR e mantas em EBR foram as mais eficientes em termos de resistência e custo de construção. Para caracterizar o mecanismo de aderência e transferência de carga entre o reforço de CFRP e o concreto nessas técnicas, foram ensaiadas 24 (vinte e quatro) vigas de concreto armado de seção T, comprimento de 2700 mm e altura de 300 mm. As vigas foram ensaiadas com uma carga concentrada aplicada no meio do vão, simplesmente apoiado de 2500 mm. A Figura 2.21 apresenta o detalhe da armação das vigas.

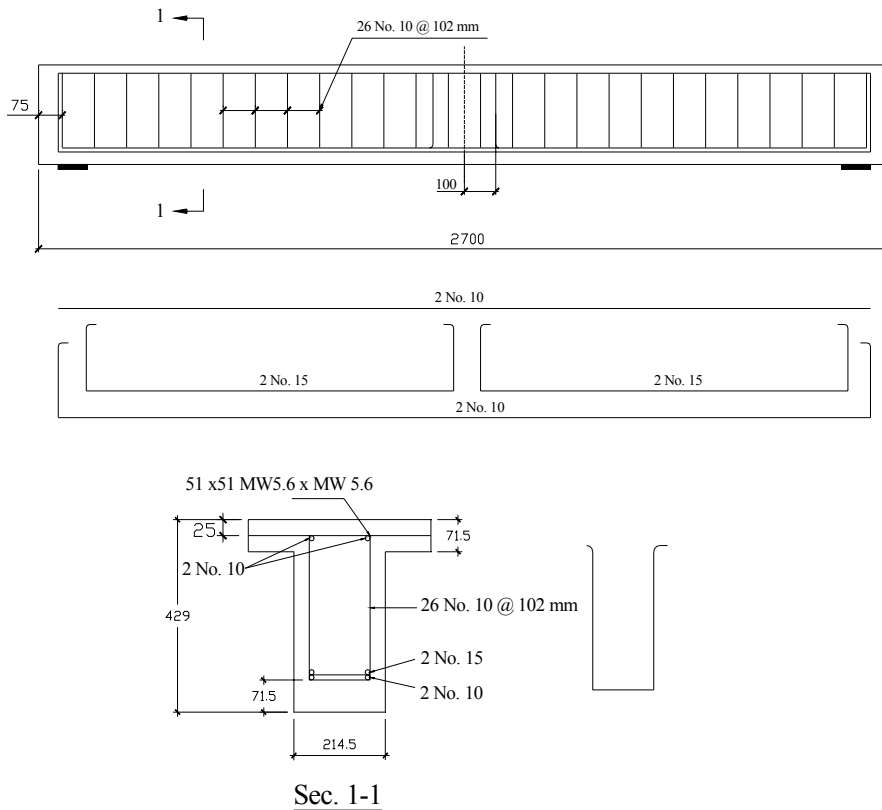


Figura 2.21 – Detalhe da armação da vigas (Hassan, 2002)

Foram moldadas três séries de viga, designadas por A, B, e C. Na série A, as vigas foram reforçadas com barras C-BAR de CFRP na técnica NSMR. Na série B, as vigas foram reforçadas com tiras de laminados de CFRP na técnica NSMR. Na série C, as vigas foram reforçadas com tecidos de CFRP na técnica EBR. Diversos comprimentos do reforço foram adotados de modo a avaliar o comprimento necessário de ancoragem, desde 150 mm até 1200 mm. As vigas foram projetadas para evitar o esmagamento do concreto na compressão e ruptura por cisalhamento.

Os resultados sugerem três mecanismos de ruptura em função do aumento do comprimento de ancoragem:

- Para comprimentos de ancoragem reduzidos, menores que 250 mm, o descolamento do reforço de CFRP acontece antes do escoamento da armadura de flexão, sem um significativo desenvolvimento da aderência. Para este pequeno comprimento de

ancoragem, a ruptura devido ao descolamento é imediata. As vigas se comportaram como vigas convencionais de concreto armado;

- A deformação na ruptura aumenta linearmente com o comprimento de ancoragem. Nessa situação, o aumento do comprimento de ancoragem leva a um considerável aumento na capacidade de carga da viga;
- Os CFRP atuam plenamente em conjunto com a viga. Para estes comprimentos de ancoragem relativamente longos, incrementos no comprimento de ancoragem não melhoraram a resistência das vigas reforçadas.

Partindo dos resultados experimentais, Hassan (2002) observou que:

- A técnica de inserção de CFRP na superfície do concreto (NSMR) é possível e efetiva para reforçar e/ou reparar estruturas concreto;
- O reforço com tiras de CFRP EBR apresentou o menor aumento de resistência, 11%, devido ao descolamento das tiras na superfície concreto. Usando a mesma quantidade de tiras, mas com a técnica CFRP NSMR, a capacidade de resistência chegou em 43%;
- A carga última nas vigas de concreto aumenta com o aumento do comprimento de ancoragem. No entanto, há um certo limite no comprimento de ancoragem, a partir do qual o aumento do comprimento de ancoragem não conduz a um aumento de resistência da viga;
- É improvável que ocorra a ruptura das barras C-BAR de CFRP, mesmo utilizando comprimento de ancoragem e adesivos à base de epóxi adequados. O máximo de deformação permitida em barras deve ser limitado a 0,7 - 0,8 % dependendo do tipo de adesivo de epóxi;
- O comprimento de ancoragem de barras C-BAR de CFRP não deve ser menor do que 800 mm para barras com 10 mm de diâmetro. O comprimento de ancoragem para tiras (25 x 1,2 mm) de CFRP NSMR não deve ser menor do que 850 mm. O comprimento de ancoragem das mantas de CFRP EBR não deve ser menor do que 500 mm;
- Aumentando a largura do corte e/ou usando concreto de alta resistência, reduz-se a possibilidade de ruptura por fendilhamento do concreto. O uso de adesivos com alta

resistência e/ou maiores camadas de cobrimento do adesivo epóxi, retarda a ruptura por fendilhamento do epóxi para barras de CFRP NSMR;

- As barras Leadline e C-BAR de CFRP, ambas em NSMR, apresentam a mesma capacidade de resistência. No entanto, o custo de execução do reforço usando a barra C-BAR de CFRP é consideravelmente menor.

2.5.4 - Castro, Melo & Nagato (2004) – Reforço à flexão

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma alternativa para o uso de polímeros reforçados com fibras para reforço à flexão em vigas “T” de concreto armado, utilizando as técnicas NSMR e EBR.

As características destas técnicas foram investigadas ensaiando 12 vigas de concreto armado de seção transversal “T”, utilizando reforço com diferentes tipos de FRP e barras de aço. Esta técnica foi comparada com a técnica de tecidos colados externamente, na face inferior das vigas. Os tipos de materiais utilizados foram: barras, tecidos e tiras de laminado de CFRP, barras de GFRP e barras de aço, de diversos fornecedores.

As 12 vigas foram divididas em seis grupos, mostrados na Tabela 2.4, sendo vigas de referência e vigas reforçadas com cinco diferentes tipos de reforços.

Tabela 2.4 – Características das vigas (Castro et al, 2004)

Grupo	Vigas	Tipos de materiais	Tipo de reforço
A	VA 2.1	Vigas de Referência	-
	VA 2.2		
B	VB 2.1	Reforço com 3 tiras de CFRP (2 x 16 mm)	Coladas em entalhes na superfície do concreto
	VB 2.2		
C	VC 2.1	Reforço com 1 barra de CFRP (ϕ 10 mm)	Colada em entalhe na superfície do concreto
	VC 2.1		
D	VD 2.1	Reforço com 2 barras de GFRP (ϕ 12,7 mm)	Coladas em entalhes na superfície do concreto
	VD 2.2		
E	VE 2.1	Reforço com 2 camadas de tecido de CFRP (0,165 x 150 mm)	Coladas na superfície do concreto
	VE 2.2		
F	VF 2.1	Reforço com 1 barra de Aço (ϕ 8 mm)	Colada em entalhe na superfície do concreto
	VF 2.2		

2.5.4.1 - Materiais

Para os dimensionamentos dos vários tipos de materiais de reforço, utilizados neste estudo, foi adotado como parâmetro de uniformidade dos materiais o produto ($A \times E$), que é a área da seção transversal do material multiplicado pelo módulo de elasticidade correspondente. Este parâmetro possibilita uma compatibilidade dos materiais para efeito de comparação dos resultados. As principais propriedades dos materiais de reforço, de acordo com o fabricante, e os parâmetros $A \times E$, são apresentados na Tabela 2.5 e na Tabela 2.6

Tabela 2.5 – Características dos materiais (Castro et al, 2004)

Tipos de Reforço	Especificação	ε^*_{fu} (‰)	f^*_{fu} (MPa)	E (GPa)	Fabricante
Tiras de laminados de CFRP	Aslan 500	17	2068	131	Hughes Brothers
Barras de CFRP	Leadline	13,4	1970	147	Mitsubishi
Barras de GFRP	Aslan 100	17	690	40,8	Hughes Brothers
Tecidos de CFRP	CF 130	16,6	3790	228	Master Builders Technologies
Barra de aço	CA 50	10	531	221	Belgo Mineira

Tabela 2.6 – Dimensionamento dos reforços (Castro et al, 2004)

Tipos de Reforço	Dimensões (mm)	Quantidade	E (GPa)	Área (mm ²)	$A \times E$
Tiras de laminados de CFRP	2 x 16	3 tiras	131	96	12.576
Barras de CFRP	ϕ 10	1 barra	147	78,54	11.545
Barras de GFRP	ϕ 12,7	2 barras	40,8	289,7	11.820
Tecidos de CFRP	0,165 x 150	2 camadas	228	49,5	11.286
Barra de aço	ϕ 8	1 barra	221	50,26	11.107

A tensão média de escoamento da barra de aço de 8,0 mm de diâmetro, obtida por meio de ensaio à tração em duas amostras do aço, foi de 531 MPa e módulo de elasticidade de 221 GPa. Para os demais materiais foram adotadas as propriedades dos materiais fornecidas pelo fabricante.

Todos os adesivos à base de epóxi utilizados nesse estudo foram fornecidos pela empresa Master Builders Technologies. Para colagem em entalhes na superfície do concreto das barras dos grupos C, D e F, foi utilizado o adesivo Concrecive 228 Poxxy. No grupo B foi utilizado o adesivo Concrecive 227 Poxxy e para o grupo E foi utilizado o sistema de reforço MBrace™ (Primer, Putty e Saturant).

As vigas foram projetadas para evitar a ruptura por compressão, por esmagamento do concreto, e ruptura por cisalhamento. O comprimento total das vigas foi de 4400 mm, sendo 400 mm entre apoios e ensaiadas com duas cargas concentradas a 1500 mm de cada apoio, com relação $a/d = 4,26$. A seção transversal das vigas, o detalhamento das armaduras e o esquema de ensaio são mostrados na Figura 2.22.

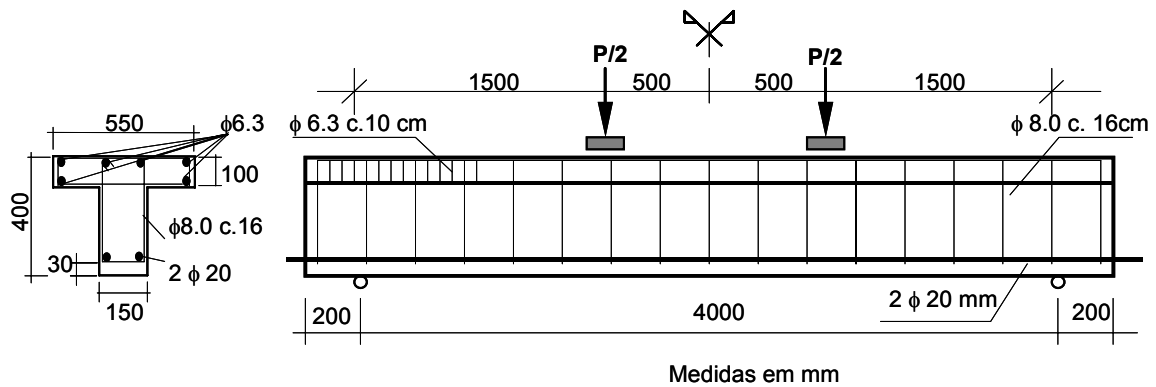


Figura 2.22 – Seção transversal, detalhamento da armadura e esquema de ensaio (Castro et al, 2004)

2.5.4.2 - Resultados experimentais

Os resultados experimentais demonstraram claramente o excelente desempenho do reforço com compósito utilizando a técnica de colagem em entalhes na superfície do concreto (Tabela 2.7). Os resultados teóricos para as cargas de ruptura, determinadas a partir das recomendações na norma brasileira de concreto armado (NBR 6118:2003), apresentam excelente aproximação com os resultados experimentais. Com base nos resultados teóricos e experimentais deste estudo, observa-se que os aumentos, nas cargas de ruptura das vigas reforçadas, são possíveis somente quando não há interferência de outros mecanismos de ruptura. A viga deve, por exemplo, ser capaz de suportar maiores solicitações de cisalhamento.

Tabela 2.7 – Resultados das cargas de ruptura das vigas (Castro et al, 2004)

Vigas	Reforço	f_c (MPa)	$P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,teor}$ (kN)	$P_{u,exp}/P_{u,teor}$	Incr(%) Refer.	Tipo de ruína
VA 2.1	Referência	46,3	162,6	160	1,01		Escoamento da armadura
VA 2.2		36,5	185,1	156	1,19		Escoamento da armadura seguida de esmagamento do concreto
VB 2.1	Tiras de CFRP	49,5	245,6	232	1,06	51,0	Destacamento do compósito
VB 2.2		52,8	250,0	240	1,05	53,8	
VC 2.1	Barras de CFRP	52,7	253,4	225	1,12	55,8	Ruptura do compósito.
VC 2.2		50,1	249,6	237	1,05	53,5	
VD 2.1	Barra de GFRP	50,1	250,0	234	1,07	53,8	Destacamento do compósito
VD 2.2		35,2	226,7	219	1,04	22,5	
VE 2.1	Tecido de CFRP	40,0	205,7	196	1,05	26,5	Destacamento do compósito
VE 2.2		47,7	215,0	203	1,06	32,2	
VF 2.1	Barra de Aço	35,2	198,5	169	1,18	7,2	Escoamento da armadura seguida de esmagamento do concreto
VF 2.2		36,4	195,4	168	1,16	5,6	

As vigas que receberam o reforço de FRP, com a técnica de colagem em entalhes na superfície do concreto, apresentaram resultados bem superiores comparados com as vigas que receberam reforço com compósito utilizando a técnica de colagem externamente à superfície do concreto, como pode-se observar na Figura 2.23.

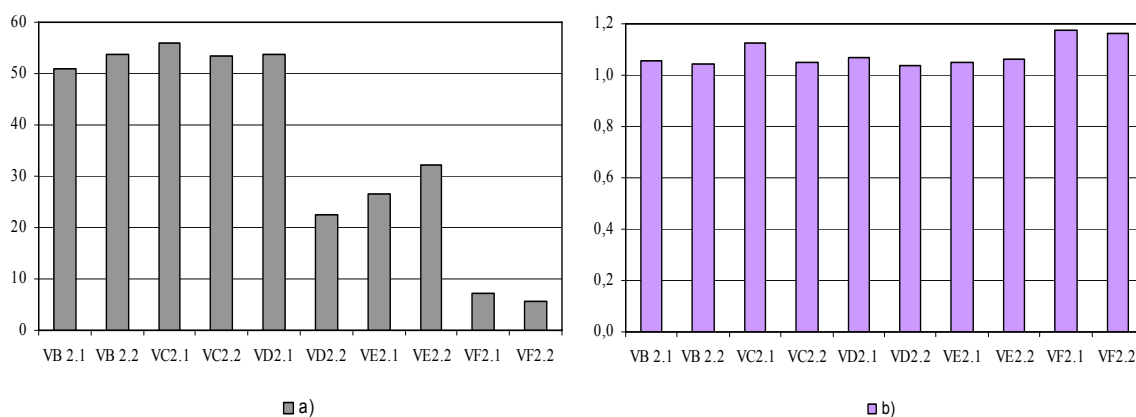


Figura 2.23 – (a) % de incremento de carga em relação à viga de referência; (b) Relação entre a carga última experimental e a carga teórica (Castro et al, 2004)

As vigas VF 2.1 e VF 2.2 apresentaram resultados abaixo do esperado em razão da baixa qualidade do concreto e da deformação plástica excessiva, não se podendo fazer uma análise da contribuição do aço com esse nesse tipo de técnica de reforço.

As vigas VB 2.1, VB 2.2, VC 2.1, VC 2.2 e VD 2.1 apresentaram incrementos de carga em relação à viga referência superiores a 50%, conforme e mostrado na Figura 2.23. A viga VD 2.2 apresentou um resultado abaixo do esperado em função de pertencer à mesma serie das vigas do Grupo VF e da viga de referência VA 2.2, ou seja, o concreto utilizado apresentou baixa resistência. Entretanto, apesar dos problemas apresentados pela qualidade do concreto, esta viga apresentou um resultado ainda superior aos das vigas do Grupo F (reforço com aço), mostrando que a barra de GFRP conseguiu melhorar a capacidade de carga desta viga.

As vigas do Grupo C foram às únicas que apresentaram ruína por ruptura do compósito sem destacamento do concreto, Figura 2.24.



Figura 2.24 – Detalhe da ruptura da barra de CFRP na viga VC 2.2 (Castro et al, 2004)

As vigas dos Grupos B e D, apresentaram ruína por destacamento do compósito junto com a camada de cobertura da armadura de flexão. Entretanto, observou-se que a ruptura se deu na interface entre o concreto e o epóxi, conforme e mostrado na Figura 2.25.

As vigas do Grupo E, reforçadas com tecido de CFRP, apresentaram cargas de ruptura 29,5% superiores à carga de ruptura da viga de referência, com destacamento do reforço na interface concreto/epóxi.



Figura 2.25 – Detalhes da ruptura das vigas VB 2.2 e VD 2.2 (Castro et al, 2004)

Verificou-se que os procedimentos de aplicação do reforço não apresentaram grandes dificuldades de execução. Os aumentos das cargas de ruptura nas vigas reforçadas com a técnica NSMR são significativos, principalmente quando comparados à técnica de colagem de FRP externamente à superfície do concreto. As cargas de ruptura das vigas reforçadas podem ser previstas, com excelente aproximação, pela teoria convencional de vigas, baseada nas recomendações da norma brasileira de concreto armado. A técnica FRP NSMR apresentou um aproveitamento bem maior das deformações dos compósitos, chegando em alguns casos a valores bem próximos do seu limite.

O trabalho de Castro et al (2004) mostrou que esta técnica é particularmente eficiente no reforço de vigas de concreto com pequenas taxas de armadura como as empregadas neste estudo. A resistência do concreto também afeta a rigidez e tem importância fundamental para a ruptura por destacamento do compósito. Os modos de ruptura apresentaram destacamento do reforço ou ruptura do reforço, mas com cargas bem elevadas e deformações próximas do valor último. As vigas que foram reforçadas com barras de aço não apresentaram bons resultados, talvez por ter pertencido à série que apresentou problemas no concreto e com isso ficou difícil realizar uma avaliação mais coerente.

2.5.5 - Lima (2004) – Reforço à flexão

Na pesquisa de Lima (2004) foram utilizados dados da pesquisa de doutorado de Castro (em desenvolvimento), dados provenientes de 08 vigas de concreto armado com seção transversal “T”, das quais 06 foram reforçadas à flexão e 02 vigas eram de referência. As

vigas foram divididas em 2 grupos, denominados de A e B, conforme mostrado na Tabela 2.8, tendo o grupo B a maior taxa de armadura longitudinal de aço (ρ), de 1,57% e sendo composto por 1 viga de referência e 3 vigas reforçadas através da inserção da armadura de reforço no concreto de cobertura. O grupo A tinha menor ρ , de 0,63% e era composto por 1 viga de referência e 3 vigas reforçadas através da inserção da armadura de reforço no concreto de cobertura. A Figura 2.26 detalha o sistema de reforço aplicados. A resistência à compressão do concreto era de 40 MPa.

Tabela 2.8 - Características das vigas do programa experimental (Lima, 2004)

	Viga	Armadura Longitudinal	Tipo de reforço utilizado nas vigas com a técnica NSMR
Grupo A	VA - REF	2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	Viga de referência, sem reforço
	VA - RBC		1 barra de CFRP com 10 mm de diâmetro
	VA - RBG		2 barras de GFRP com 12,7 mm de diâmetro
	VA - RLC		3 tiras de laminado de CFRP
Grupo B	VB - REF	5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	Viga de referência, sem reforço
	VB - RBC		1 barra de CFRP com 10 mm de diâmetro
	VB - RBG		2 barras de GFRP, com 12,7 mm de diâmetro
	VB - RLC		3 tiras de laminado de CFRP

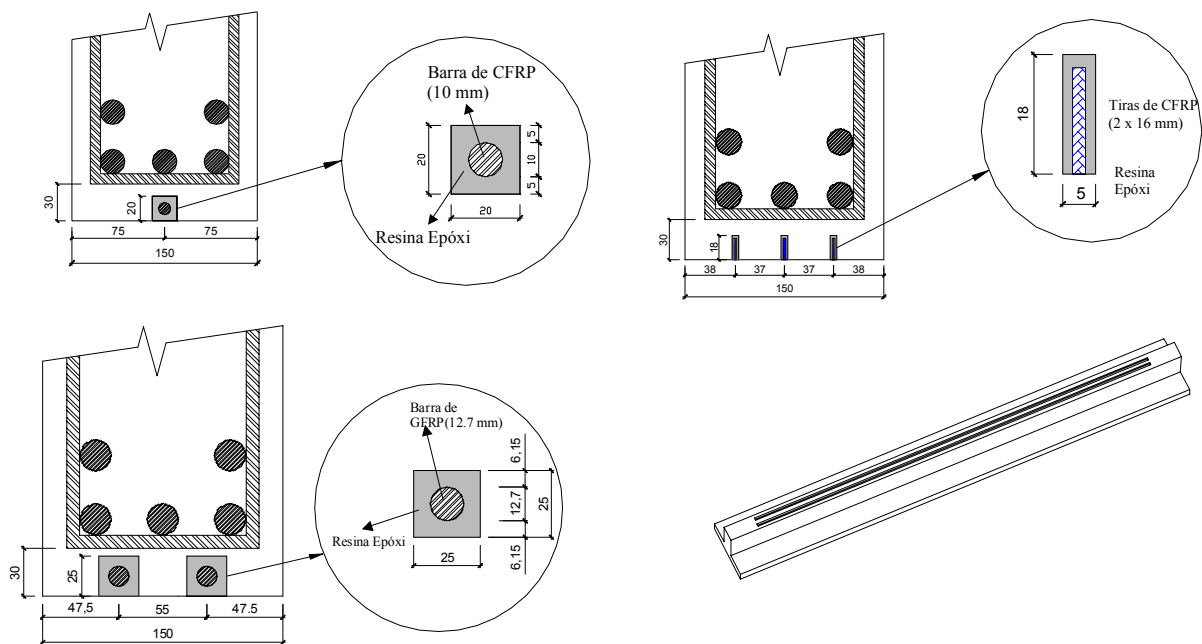


Figura 2.26 – Sistema de reforço aplicado (Lima, 2004)

2.5.5.1 - Materiais

A Tabela 2.9 apresenta as características dos materiais empregados no reforço, conforme as especificações dos fabricantes:

Tabela 2.9 - Características dos compósitos empregados no reforço (Lima, 2004)

<i>Vigas</i>	<i>Reforço de FRP</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>E (GPa)</i>	<i>f_{fu} (MPa)</i>	<i>ε_{fu} (‰)</i>	<i>Fabricante</i>
<i>VA – RBC e VB – RBC</i>	Barra de CFRP	1	Diâmetro = 10,0	147,0	1970	13,4	Marshall Industries
<i>VA – RBG e VB – RBG</i>	Barra de GFRP	2	Diâmetro = 12,7	40,8	690	17,0	Hughes Brothers
<i>VA – RLC e VB – RLC</i>	Tiras de Laminado de CFRP	3	Espessura= 2,0 Largura= 16,0	131,0	2068	17,0	Hughes Brothers

Foram utilizados dois tipos de resina epóxi no reforço das vigas, a CONCRESLIVE 227 POXY da MBT, de consistência fluída, utilizada no reforço com tiras de CFRP e a resina CONCRESLIVE 228 da MBT, de consistência pastosa, utilizada no reforço com barras de CFRP e GFRP.

2.5.5.2 - Resultados experimentais

Foram realizados cálculos da resistência à flexão das vigas reforçadas, no estado limite último, segundo as normas ACI 440:2000, FIB:2001 e NBR 6118:2003. Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais, como mostrado na Figura 2.27.

O ACI 440 apresentou bons resultados para todas as vigas. A relação entre a carga experimental e a carga teórica ($P_{ur,exp} / P_{ur}$) foi maior que a unidade, variando entre 1,06 e 1,23.

O *fib*:2001 forneceu bons resultados para a carga teórica, exceto para a viga VA – RLC, na qual a relação entre a carga experimental e a carga teórica ($P_{ur,exp} / P_{ur}$) foi menor que a unidade. Para as outras vigas esta relação variou entre 1,05 e 1,12.

A NBR 6118:2003 apresentou resultados conservadores, com a relação entre a carga experimental e a carga teórica ($P_{ur,exp} / P_{ur}$) variando entre 1,15 e 1,24. Cabe ressaltar que esta norma não é específica para reforço de vigas e no cálculo da resistência à flexão, a deformação última do compósito foi limitada em 10%, deformação limite do aço, segundo essa norma.

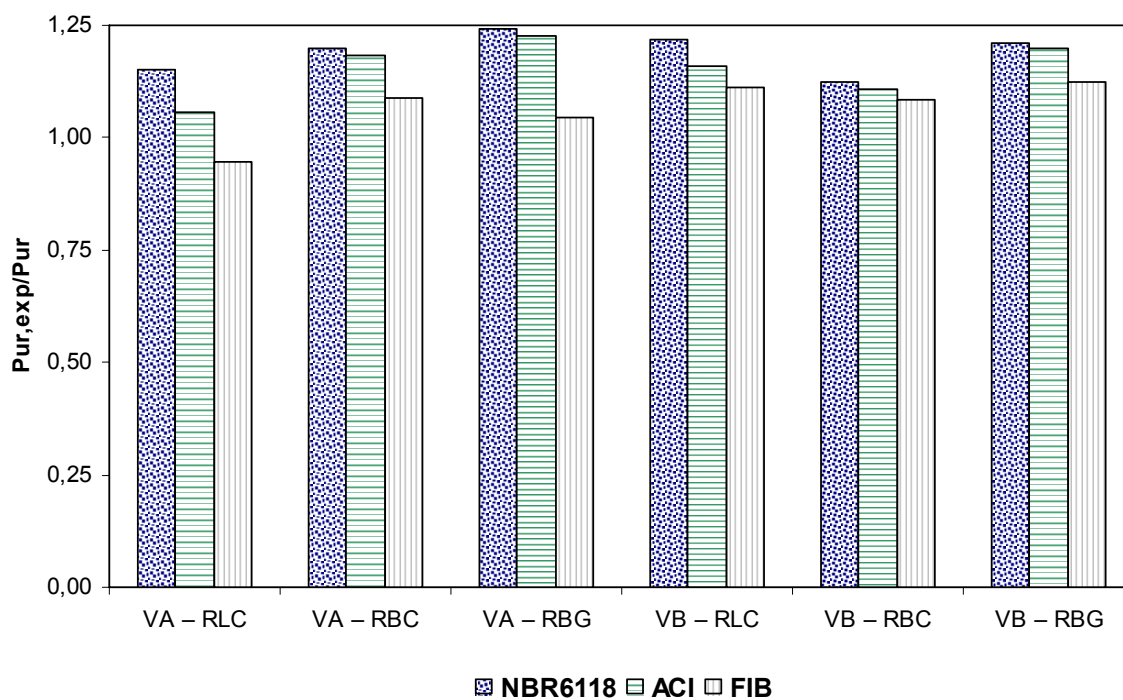


Figura 2.27 - Relação entre a carga experimental e a carga teórica (Lima, 2004)

A Tabela 2.10 apresenta a carga última experimental das vigas de referência e das vigas reforçadas e o acréscimo de resistência à flexão em relação às vigas de referência.

As vigas do grupo A apresentaram maior acréscimo de resistência, sendo de 52,8 % e as vigas do grupo B, apresentaram acréscimo de 20,2 %. Isso se deve à influência da taxa de armadura da viga, ou seja, quanto maior a área de aço existente na viga, menos eficiente será o reforço com compósito de FRP, em termos de acréscimo de resistência à flexão.

As vigas reforçadas do grupo A apresentaram comportamento mais frágil na ruptura final em relação às vigas do grupo B. Em duas vigas, VA - RLC e VA - RBG, ocorreu o destacamento do concreto de cobrimento e do reforço e na viga VA - RBC houve a ruptura

da barra de fibra de carbono. Esses tipos de ruptura são indesejáveis, pois, não fornecem aviso da ruína da peça, que ocorre repentinamente.

As vigas do grupo B, por terem maior taxa de armadura longitudinal de flexão (com $\rho = 1,57\%$), suportaram um nível de carregamento superior ao das vigas do grupo A (com $\rho = 0,63\%$), de tal forma que, em todas as vigas reforçadas do grupo B, houve inicialmente escoamento da armadura de aço seguido do esmagamento do concreto e o destacamento ou a ruptura do compósito de FRP. Esse tipo de ruptura é mais desejável que a ruptura do compósito de FRP, pois fornece sinais de ruína da viga.

Tabela 2.10 - Acréscimo na carga última de flexão para cada uma das vigas reforçadas

<i>Grupo</i>	<i>Viga</i>	<i>Produto $A_f \times E_f$ (kN)</i>	<i>Carga última, viga sem reforço P_u (kN)</i>	<i>Carga última das vigas reforçadas P_{ur} (kN)</i>	<i>Ruptura observada</i>	<i>Acréscimo (%)</i>
<i>A</i> ($\rho = 0,63\%$)	VA - REF	-	162,6	-	- Deformação plástica excessiva da armadura	-
	VA - RBC	11545	-	249,6	- Ruptura da barra de CFRP	53,5
	VA - RBG	10337	-	250,0	- Destacamento do reforço	53,8
	VA - RLC	12576	-	245,6	- Destacamento do reforço	51,1
<i>B</i> ($\rho = 1,57\%$)	VB - REF	-	398,2	-	- Deformação plástica excessiva da armadura	-
	VB - RBC	11545	-	455,9	- Esmagamento do concreto e ruptura da barra de CFRP	14,5
	VB - RBG	10337	-	480,0	- Esmagamento do concreto e ruptura da barra de GFRP	20,5
	VB - RLC	12576	-	500,0	- Esmagamento do concreto e destacamento do reforço	25,6

A Figura 2.28, a Figura 2.29 e a Figura 2.30 mostram a ruptura das vigas viga VA - RBG, VB - RBG e VB-RLC. Na viga VA - RBG ocorreu o destacamento do reforço e do concreto de cobrimento (Figura 2.28), as duas barras de fibra de vidro se destacaram.



Figura 2.28 - Detalhe do descolamento das barras de GFRP na viga VA – RBG

A Figura 2.29 apresenta a ruptura da viga VB – RBG, por esmagamento do concreto seguido da ruptura da barra de GFRP. Na Figura 2.30 é mostrado a ruptura da viga VB – RLC, tendo ocorrido o esmagamento do concreto seguido do descolamento das tiras de laminado de CFRP.



Figura 2.29 - Detalhe da ruptura da barra de GFRP da viga VB – RBG



Figura 2.30 - Detalhe do descolamento das tiras de laminado de CFRP na VB – RLC

Os resultados de Lima (2004) comprovaram que o reforço à flexão de vigas “T” de concreto armado utilizando a técnica NSMR é eficiente, quanto ao acréscimo de resistência, mobilizando boa parte da resistência última do compósito. O corte do entalhe e a colagem com resina epóxi foram, em geral, práticos e fáceis de serem executados, desde que sejam tomados os devidos cuidados especialmente com relação ao controle do tamanho e da profundidade do entalhe. As vigas do grupo A (com duas barras de aço de 20 mm) como esperado, apresentaram maior acréscimo de resistência em relação às vigas de referência, do que as vigas do grupo B, uma vez que quanto menor a taxa de armadura longitudinal de flexão de aço da viga mais eficaz seria o reforço no acréscimo de resistência à flexão. Contudo, as vigas reforçadas do grupo A apresentaram comportamento mais frágil na ruptura final em relação às vigas do grupo B. A máxima deformação medida na barra de CFRP foi 6,7 % maior que a deformação última de ruptura fornecida pelo fabricante. Na barra de GFRP e no laminado de CFRP, a máxima deformação medida foi 75 % e 68 %, respectivamente, do valor da deformação última de ruptura fornecida pelo fabricante, indicando que a técnica NSMR permite que os compósitos de FRP trabalhem mais próximo do limite de ruptura.

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - PRELIMINARES

Neste trabalho, o programa experimental teve por objetivo determinar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado, com seção “T”, reforçadas com barras de CFRP e aço, coladas internamente (NSMR), e mantas de fibra de carbono, coladas externamente (EBR).

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 da UnB, sobre reforço à flexão e ao cisalhamento com FRP, onde 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. Este trabalho tem como objetivo dar prosseguimento às pesquisas de Castro (2003) e Lima (2004).

O desenvolvimento do programa experimental constou de ensaios até à ruptura de sete vigas de concreto armado de seção transversal “T”, em escala real, reforçadas com barras de aço e de fibra de carbono, coladas com a técnica NSMR, e com mantas de fibra de carbono, coladas com a técnica EBR.

Estas vigas foram divididas em dois grupos, denominados de A e B, conforme mostrado na Tabela 3.1. A principal diferença entre os grupos foi a taxa de armação. As vigas do grupo A tinham taxa de armadura longitudinal, ρ , de 0,63 % (barras de 20 mm de diâmetro), e as do grupo B, 1,57 % (4 barras de 20 mm de diâmetro). Duas das vigas serviram como referência, uma de cada grupo, enquanto as demais foram reforçadas pelas técnicas NSMR e EBR.

As vigas receberam a seguinte nomenclatura: VX-YYY, onde V significa viga, X refere-se ao grupo a qual a viga faz parte, A ou B, e YYY faz referência ao tipo de reforço empregado, conforme siglas: RBC (Reforço com Barra de fibra de Carbono), RBA

(Reforço com Barra de Aço) e RMC (Reforço com Manta de fibra de Carbono). Para as vigas de referência, foi adotada a sigla REF.

Tabela 3.1 – Características das vigas do programa experimental

	Viga	Armadura de flexão	Características da viga
Grupo A	VA – REF	2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	Viga de referência, sem reforço
	VA – RBC		1 barra de CFRP, com 10 mm de diâmetro (NSMR)
	VA – RBA		1 barra de aço, com 8 mm de diâmetro (NSMR)
	VA – RMC		2 camadas de manta de fibra de carbono, com espessura de 0,165 e largura de 150 mm (EBR)
Grupo B	VB – REF	5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	Viga de referência, sem reforço
	VB – RBA		1 barra de aço, com 8 mm de diâmetro (NSMR)
	VB – RMC		2 camadas de manta de fibra de carbono, com espessura de 0,165 e largura de 150 mm (EBR)

Dentre os pontos observados no programa experimental pode-se citar :

- Rigidez da viga;
- Retardamento no escoamento da armadura longitudinal;
- Incremento na capacidade de carga;
- Modo de ruptura;
- Comportamento da viga antes e após fissuração do concreto;
- Padrão de fissuração .

3.2 - DETALHAMENTO DAS VIGAS

3.2.1 - Comprimento e seção transversal

Todas as vigas ensaiadas tiveram seção transversal em “T”, com base superior $b_f = 550$ mm, base inferior $b_w = 150$ mm, altura total $h = 400$ mm, altura da mesa $h_f = 100$ mm e comprimento total de $L = 4400$ mm.

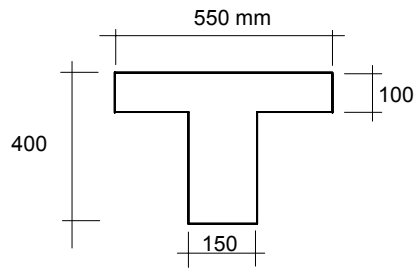


Figura 3.1 – Seção transversal das vigas

3.2.2 - Esquema estático de carregamento

Todas as vigas foram biapoiadas, tendo vão de 4000 mm, e ensaiadas com duas cargas concentradas a 1500 mm de cada apoio, com relação $a/d = 4,46$. A Figura 3.2 apresenta o esquema estático de carregamento dos ensaios realizados.

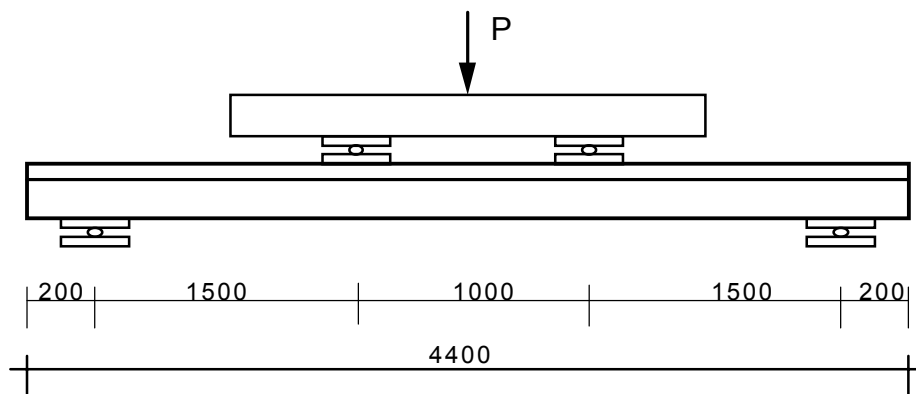


Figura 3.2 – Esquema estático de carregamento

O carregamento foi aplicado de forma incremental até ruptura, com a utilização de um macaco hidráulico Yellow Power instalado em um pórtico rígido, e controlado por uma célula de carga Kratos, ambos com capacidade de 1000 kN, conforme Figura 3.3



Figura 3.3 – Esquema de ensaio das vigas

3.2.3 - Capacidade de resistência das vigas de referência

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.

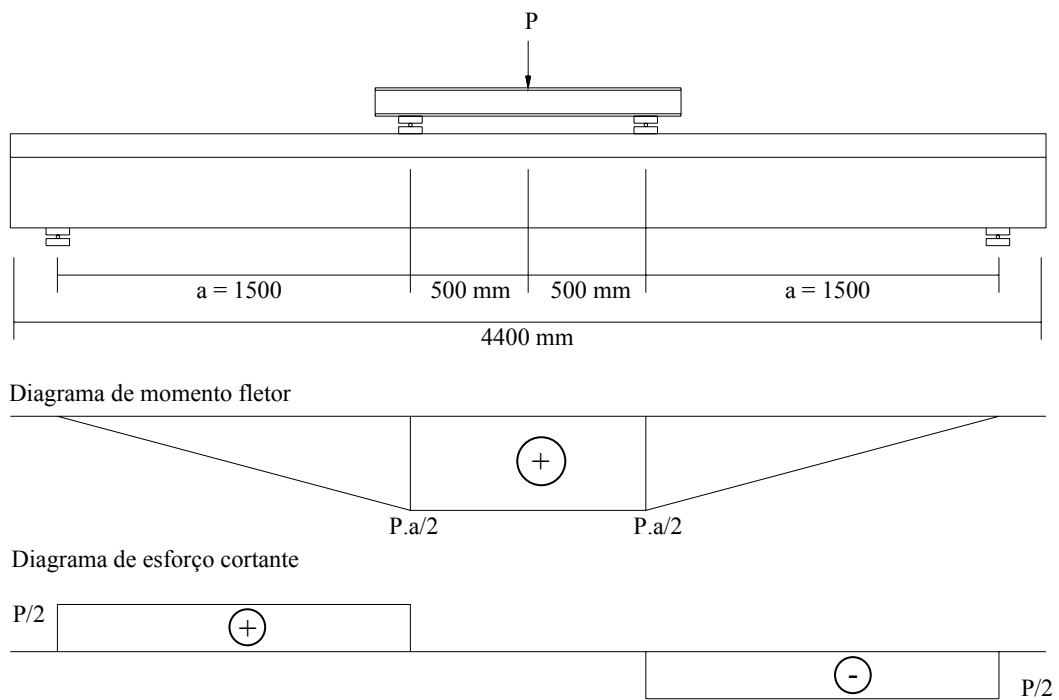


Figura 3.4 – Diagramas de esforços das vigas

3.2.3.1 - Resistência à flexão

O cálculo da resistência à flexão das vigas a serem ensaiadas foi feito adotando coeficientes de ponderação prescritos por norma. Além da seção transversal e armação longitudinal indicadas anteriormente, foi prevista uma resistência à compressão do concreto, f_c , de 40 MPa, e a tensão de escoamento do aço, f_y , de 500 MPa,. Seguindo os preceitos da NBR 6118:2003, chegaram-se as capacidades resistentes da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Verificação da capacidade resistente à flexão das vigas de referência

Viga	Armação	A_s (mm ²)	f_c (MPa)	x (mm)	d (mm)	x/d	M_u (kN.m)	P_u (kN)
VA - REF	2 Ø 20	628	40	32,6	352	0,093	93	124
VB - REF	5 Ø 20	1571	40	59,5	336	0,177	213	284

3.2.3.2 - Resistência ao cisalhamento

Quanto ao cisalhamento, a armadura foi dimensionada para que não ocorresse ruptura por cisalhamento da viga, mesmo quando reforçada, de forma que toda ruptura ocorresse por flexão. A tensão de escoamento, f_y , utilizada para o aço foi de 500 MPa. Já para o concreto foi adotada a resistência à compressão de 40 MPa.

A Tabela 3.3 representa os valores calculados das parcelas resistentes do esforço cortante, oriunda do concreto, V_c , e da armadura transversal, V_{sw} . As vigas do grupo A foram armadas com estribos verticais com 6,28 cm²/m e as do grupo B com 12,57 cm²/m. As parcelas foram calculadas pelas normas NBR 6118:20003 (modelo I) e ACI 318 (2002). V_R é o cortante resistente de cálculo.

Tabela 3.3 – Verificação da resistência ao cisalhamento

Viga	V_c (kN)		V_{sw} (kN)		$V_R=V_c+ V_{sw}$ (kN)	
	NBR 6118	ACI	NBR 6118	ACI	NBR 6118	ACI
VA-REF	77,9	57,4	111,3	123,7	189,3	181,1
VB-REF	74,1	59,7	216,0	233,0	284,1	293,0

3.2.4 - Detalhamento das armaduras de flexão e cisalhamento

A Figura 3.5 e a Figura 3.6 apresentam o detalhamento das oito vigas ensaiadas. A armadura longitudinal inferior do primeiro grupo foi constituída por duas barras de aço CA 50 com 20 mm de diâmetro, correspondendo a uma taxa de armadura longitudinal geométrica de 0,68% e a do segundo grupo foi constituída por cinco barras de aço CA 50 com 20 mm de diâmetro, correspondendo a uma taxa de armadura longitudinal geométrica de 1,74 %.

A armadura transversal foi composta por estribos verticais e horizontais do aço CA 50, de 8,0 mm e 6,3 mm de diâmetro, respectivamente, e espaçados de 16 cm para o grupo A e 8 cm, para o grupo B. Como porta-estribos foram utilizadas seis barras de 6,3 mm de diâmetro de aço CA 50.

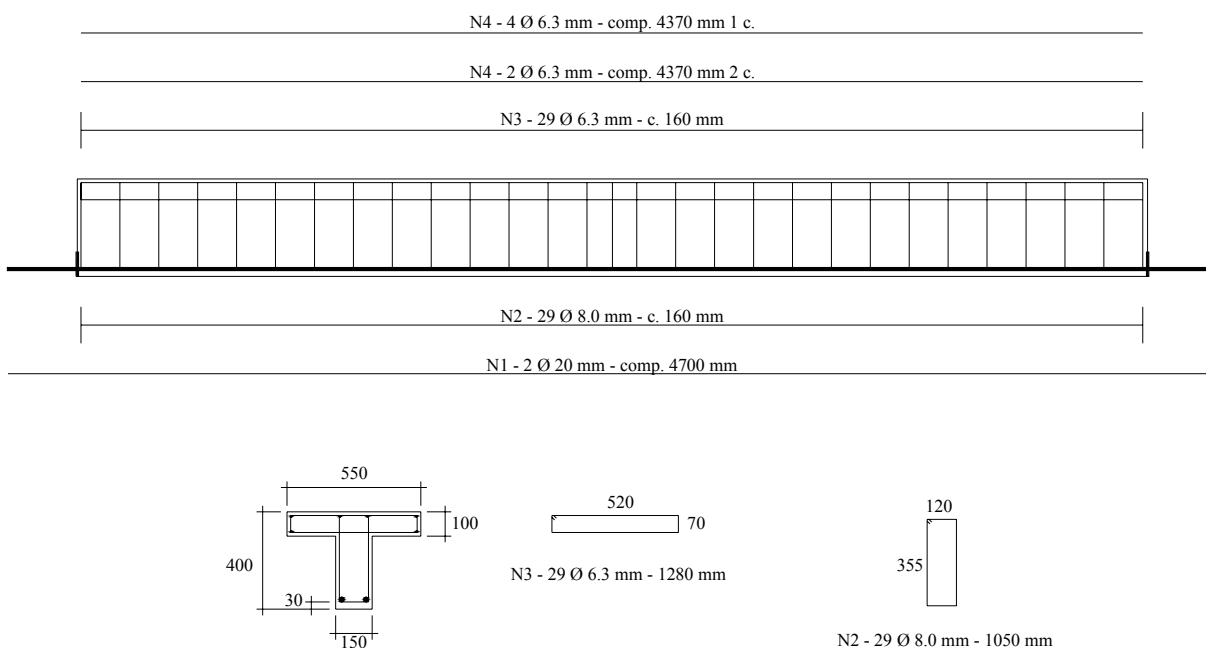


Figura 3.5 – Detalhamento da armadura das vigas do Grupo A

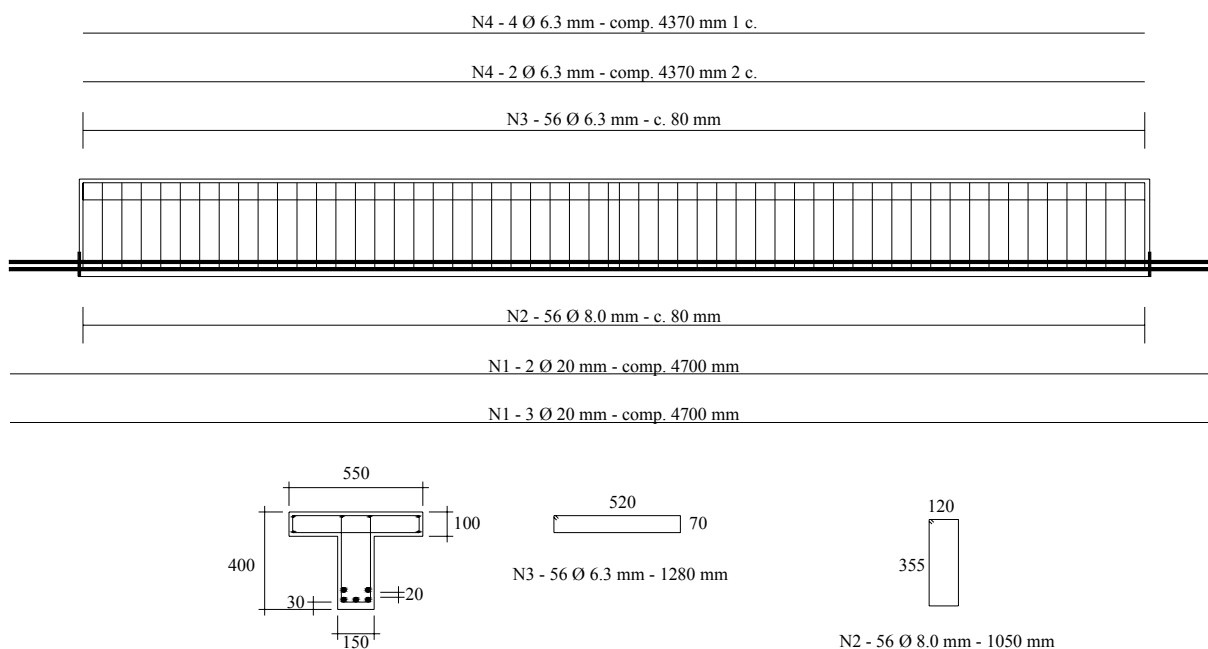


Figura 3.6 – Detalhamento da armadura das vigas do Grupo B

3.2.4.1 - Ancoragem e cobrimento da armadura

O cobrimento da armadura adotado no bordo inferior da viga foi de 30 mm, de acordo com os itens 6.4.2 e 7.4.2 da norma NBR 6118:2003, para ambiente urbano, de agressividade moderada e pequeno risco de deterioração da estrutura. Nas demais faces foi adotado o cobrimento de 15 mm.

Quanto à ancoragem das barras longitudinais, que possuem diâmetro elevado, foi adotado um sistema de ancoragem, previsto no item 9.4.7 da NBR 6118:2003, utilizando um dispositivo mecânico em substituição ao dobramento das mesmas. Para tanto, foi adotado um sistema utilizando chapas de aço de dimensões 150 mm x 150 mm, com espessura de 10 mm, como mostrado na Figura 3.7, soldadas à armação principal de flexão, rente às faces extremas das vigas, conforme Figura 3.8. Este procedimento de ancoragem vem sendo utilizado nas pesquisas realizadas no Laboratório de Estruturas com bons resultados (Salles Neto, 2000; Silva Filho, 2001; Araújo, 2002; Lima, 2004, Castro et al, 2004).

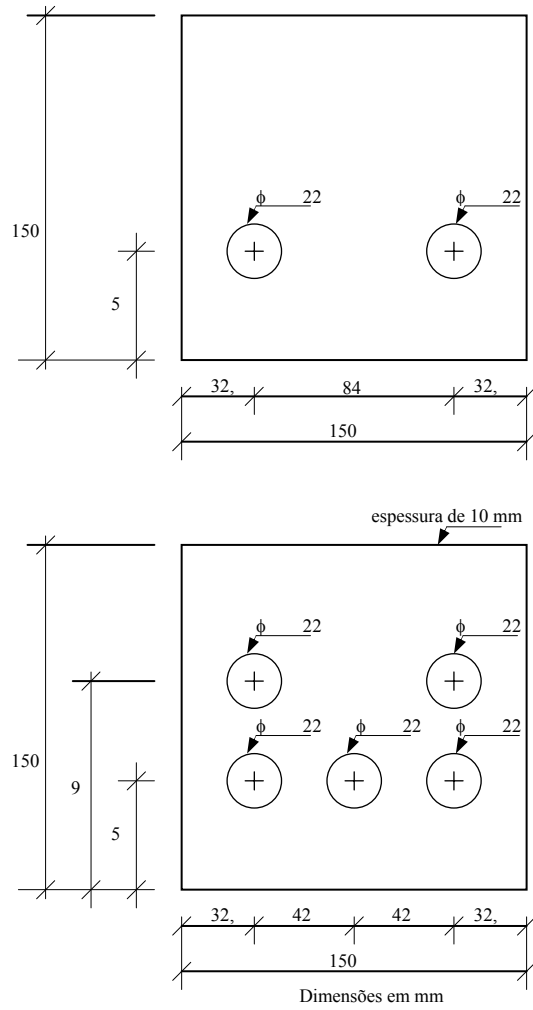


Figura 3.7 – Detalhamento das chapas de ancoragem



Figura 3.8 – Detalhe da chapa na forma

3.2.5 - Reforço das vigas

3.2.5.1 - Propriedades do material de reforço

Foram utilizados 3 tipos de reforço, colados internamente, barras de CFRP e aço, pela técnica NSMR, ou externamente, mantas de fibra de carbono (MFC), pela técnica EBR, conforme descrito a seguir:

- a) Barra de CFRP, denominada *Leadline Bar*, fabricada pela *Mitsubishi Chemical Corporation, Japan*. A barra é obtida a partir da pultrusão e impregnação com resina epóxi. A barra empregada tinha diâmetro de 10 mm;
- b) Barra de aço GG 50, fabricada pela Gerdau, sendo especificada como aço para concreto armado CA-50, com 8,0 mm de diâmetro;
- c) Manta de fibra de carbono, MFC 130, fornecida pela Rogertec Engenharia e Comércio Ltda, com 500 mm de largura e 0,165 mm de espessura.

As características dos reforços estão detalhadas na Tabela 3.4, conforme especificações dos fabricantes. E é o módulo de elasticidade, f_u o limite de resistência à tração e ϵ_u a deformação última.

Tabela 3.4 – Características dos reforços empregados no reforço

<i>Produto</i>	<i>Discriminação</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	E (GPa)	f_u (MPa)	ϵ_u (‰)	<i>Fabricante</i>
<i>Leadline bar</i>	barra de CFRP	Diâmetro = 10	147	1970	13,4	Mitsubishi Chemical
<i>Barra GG 50</i>	barra de aço	Diâmetro = 8	210	500	*	Gerdau
<i>MFC 130</i>	Manta de fibra de Carbono	Largura = 500 Espessura = 0,165	249,1	3483	15	Rogertec

* Indefinido

3.2.5.2 - Definição do reforço

Para efeito de comparação entre os diferentes tipos de reforço, foi utilizado como parâmetro, na definição dos reforços, a compatibilidade da rigidez axial (EA), onde A é a área da seção transversal do material e E o módulo de elasticidade do mesmo. Assim, seria esperado que as vigas tivessem comportamentos similares enquanto os materiais de reforço

estivessem em regime elástico. Na Tabela 3.5 é mostrado o reforço empregado em cada viga:

Tabela 3.5 – Dimensões dos reforços

<i>Vigas</i>	<i>Reforço</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>E (GPa)</i>	<i>A (mm²)</i>	<i>(EA)_R (kN)</i>
VA – RBC	1 barra de CFRP	Diâmetro = 10	147,0	78,54	11545
VA – RBA e VB – RBA	1 barra de aço	Diâmetro = 8	210,0	50,27	10556
VA – RMC e VB – RMC	2 camadas de MFC	Espessura= 0,165 Largura = 150	249,1	49,50	12330

3.2.5.3 - Detalhamento do reforço com barras de CFRP e de aço

As barras foram coladas em entalhes executados na face inferior das vigas com a resina epóxi. Para a determinação do tamanho dos entalhes, foi utilizada a sugestão de De Lorenzis et al. (2004), onde foi realizada uma análise estatística de um banco de dados, que sugere que a largura e a profundidade do entalhe seja na razão de duas vezes o diâmetro da barra. O comprimento das barras foi de 3840 mm, comprimento máximo para que as barras ficassem fora da região de apoio da viga.

Desta forma, a Tabela 3.6 especifica as dimensões dos entalhes realizados nas vigas, e a Figura 3.9 e a Figura 3.10 mostram o detalhe do entalhe realizado na viga VA – RBC reforçada com uma barra de CFRP. O reforço das vigas VA – RBA e VB – RBA é similar à da viga VA-RBC, com a diferença das dimensões dos entalhes, conforme Figura 3.11. A Figura 3.12 mostra o comprimento e a posição das barras no sentido longitudinal da viga.

Tabela 3.6 – Dimensões dos entalhes realizados nas vigas

<i>Vigas</i>	<i>Reforço</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>Dimensões do entalhe (mm)</i>
VA – RBC	1 barra de CFRP	Diâmetro = 10	Largura = 20 Profundidade = 20
VA – RBA e VB – RBA	1 barra de aço	Diâmetro = 8	Largura = 16 Profundidade = 16

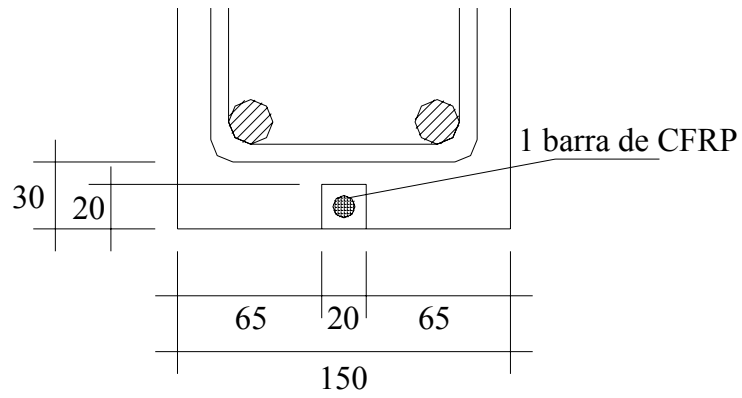


Figura 3.9 – Detalhamento do reforço com 1 barra de CFRP



Figura 3.10 - Detalhe do entalhe para reforço com barra de CFRP

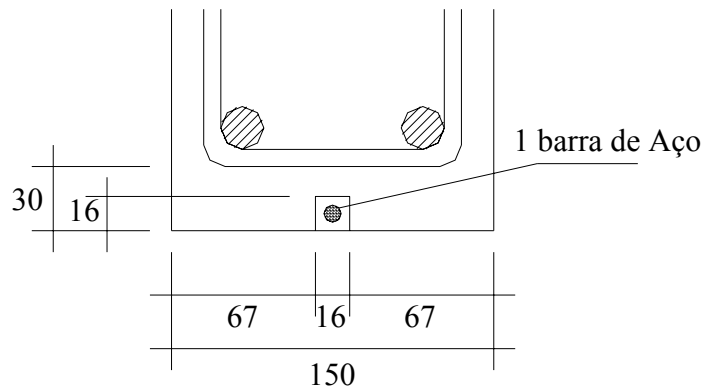


Figura 3.11 – Detalhamento do reforço com 1 barra de aço

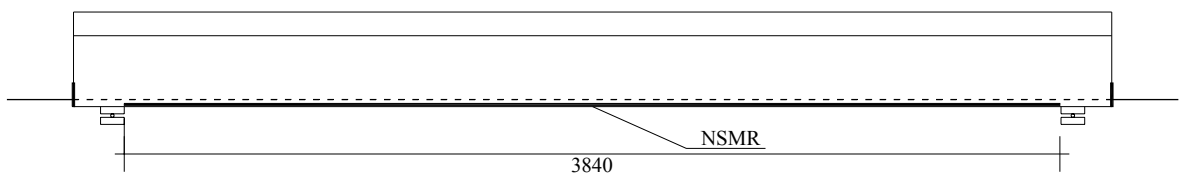


Figura 3.12 – Detalhamento longitudinal do reforço com a técnica NSMR

3.2.5.4 - Detalhamento do reforço com manta de CFRP

A Figura 3.13 e a Figura 3.14 mostram o reforço realizado nas vigas VA – RMC e VB – RMC, constituído na colagem externa de duas camadas de MFC com a resina epoxídica especificada. O comprimento adotado foi o mesmo para as barras, 3840 mm. A fim de melhorar a ancoragem do reforço, foi realizado um engravatamento nas extremidades do reforço com tiras de MFC com 15 cm de largura e 90 cm de comprimento.

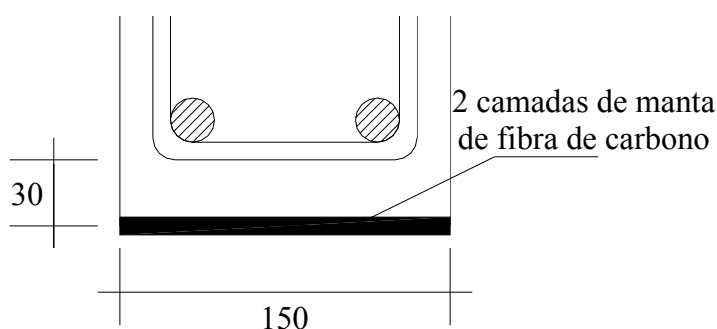


Figura 3.13 - Detalhamento do reforço com manta de CFRP

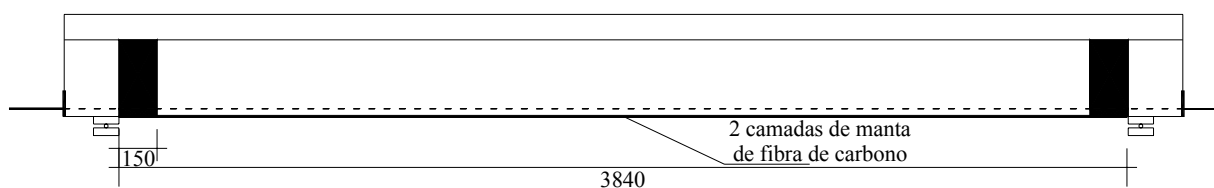


Figura 3.14 – Detalhamento longitudinal do reforço colado externamente

3.2.6 - Resistência à flexão das vigas reforçadas

Para calcular a resistência à flexão das vigas reforçadas com MFC, VA – RMC e VB – RMC, foram utilizados os critérios do ACI 440:2002. Para o cálculo da viga VA – RBC, reforçada com barra de FRP, foram feitas algumas adaptações na norma ACI 440:2002 segundo proposta de Alkhrdaji et al. (2002), em anexo. As vigas VA – RBA e VB – RBA, reforçadas com barra de aço, foram calculadas de forma semelhante à viga VA – RBC, no entanto, sem aplicação dos coeficientes relativos à limitação da deformação do FRP.

Também estão mostrados os cálculos usando os preceitos da NBR 6118:2003, mas para as vigas reforçadas foram feitas adaptações no método de cálculo permitindo o cálculo das mesmas, conforme anexo A.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados do momento resistente (M_{res}) e carga última (P_u) das vigas reforçadas. Contudo, os valores das características dos materiais utilizados nos cálculos foram os obtidos com os fabricantes dos materiais, que podem ser discrepantes em relação às características atingidas nos ensaio dos materiais no laboratório. Estes cálculos estão apresentados no anexo B.

Tabela 3.7 – Resistência estimada à flexão das vigas reforçadas

		ACI 440 (2000)		NBR 6118:2003	
		M_{res} (kN.m)	P_u (kN)	M_{res} (kN.m)	P_u (kN)
Grupo A 2 ϕ 20 mm	VA – RBC	148,2	197,5	154,3	205,8
	VA – RBA	117,1	156,2	116,2	154,9
	VA – RMC	160,2	213,6	165,4	220,6
Grupo B 5 ϕ 20 mm	VB – RBA	257,8	343,8	256,5	342,0
	VB – RMC	302,3	403,07	300,7	400,9

3.3 - INSTRUMENTAÇÃO

3.3.1 - Deformações das armaduras de flexão e cisalhamento

Para a determinação das deformações das armaduras, foram utilizados extensômetros elétricos posicionados na armadura, conforme a Figura 3.15 e Figura 3.16, onde os extensômetros L0 e L1 mediram as deformações da armadura longitudinal, e o extensômetro T mediu a deformação da armadura transversal.

No caso específico do grupo A, onde se esperava deformações maiores nas armaduras de flexão, foram instalados extensômetros nas duas barras, denominados extensômetros L0l e L0w, que eram compatibilizados formando a deformação denominada extensômetro L0.

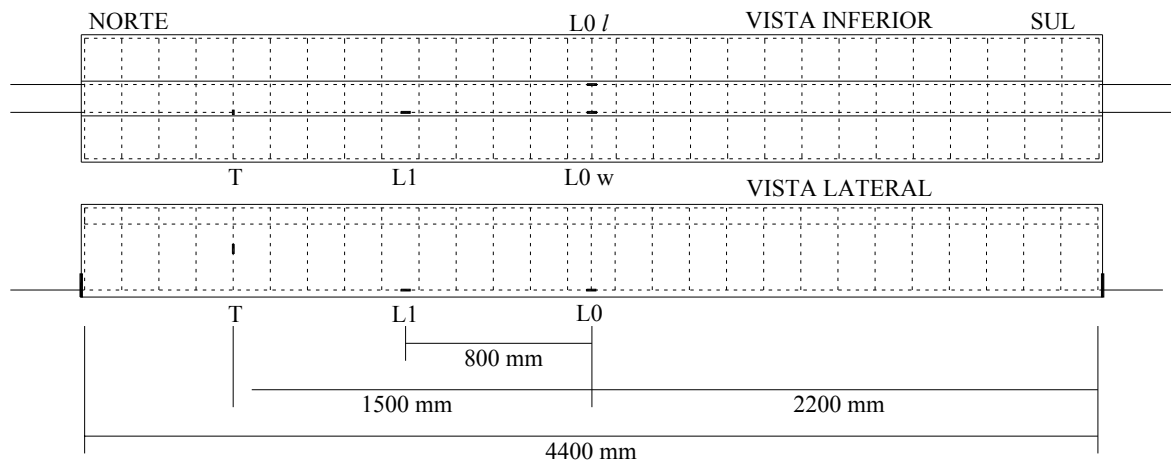


Figura 3.15 – Localização dos extensômetros elétricos na armadura do Grupo A

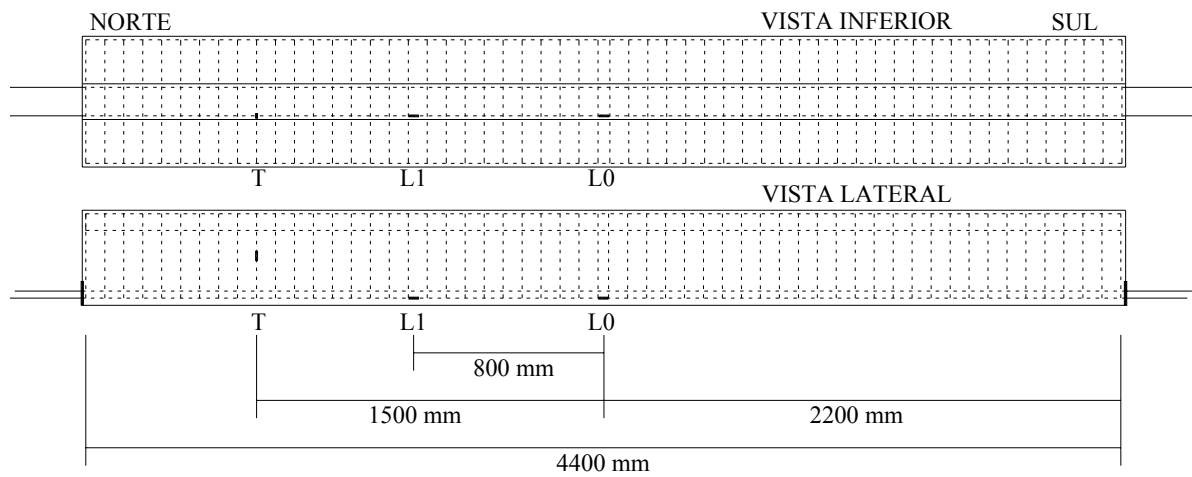


Figura 3.16 - Localização dos extensômetros elétricos na armadura do Grupo B

Para conseguir uma maior precisão na obtenção da deformação da armadura longitudinal, foram colocados dois extensômetros nas barras, diametralmente opostos. As deformações indicadas adiante foram obtidas da média aritmética dos valores registrados.

Os extensômetros elétricos usados para medir a deformação da armadura, em conjunto com seus respectivos fatores de correção, estão listados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Marca e características dos extensômetros

Marca	Tipo	Fator de correção	Comprimento do extensômetro	Local utilizado
Tokyo Sokki Kenkyujo	PL-5-11	2,02	5 mm	Armadura Longitudinal
Kyowa Electronic Instruments	KFG-5-120-C1-11	2,11	5 mm	Armadura Transversal

Estas deformações foram registradas por um sistema de aquisição de dados fabricado pela HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik*), constituído por unidades de leitura eletrônica denominadas Spider8 e um programa de gerenciamento destas unidades designado como CatMan, conforme figura 3.17. Nos módulos Spider8 eram ligados os extensômetros em $\frac{1}{4}$ de ponte e no programa eram digitados os fatores de correção dos extensômetros, permitindo que ele fizesse a leitura direta das deformações.



Figura 3.17 – Spider8 e o notebook com o programa CatMan

O procedimento para a instalação destes extensômetros iniciou com a regularização da superfície das barras através de lixamento, conforme Figura 3.18. Posteriormente foi feita a limpeza da superfície aplicando álcool isopropílico, condicionador e neutralizador, exatamente nesta ordem. Para a fixação dos extensômetros, foi utilizada uma cola tipo cianoacrilática da marca Kyowa, conforme Figura 3.19. Em seguida eram soldados os fios para transmissão dos sinais elétricos. Por último foi realizada a proteção dos mesmos, cobrindo-os com uma fina camada de resina da marca Araldite, uma proteção mecânica a base de silicone envolvida com uma fita isolante de autofusão.



Figura 3.18 – Preparo da superfície do aço



Figura 3.19 – Extensômetro colado no aço

3.3.2 - Deformações dos reforços

Para fazer a medição das barras de CFRP e de aço, e do reforço com MFC, foram utilizados extensômetros elétricos da marca Kyowa Electronic Instruments, tipo KFG-5-120-C1-11, fator de correção igual a 2,12 e comprimento de 5 mm. Estas barras também foram instrumentadas com dois extensômetros, no caso das barras eles estão diametralmente opostos, e na manta, paralelos, nos pontos determinados pela Figura 3.20.

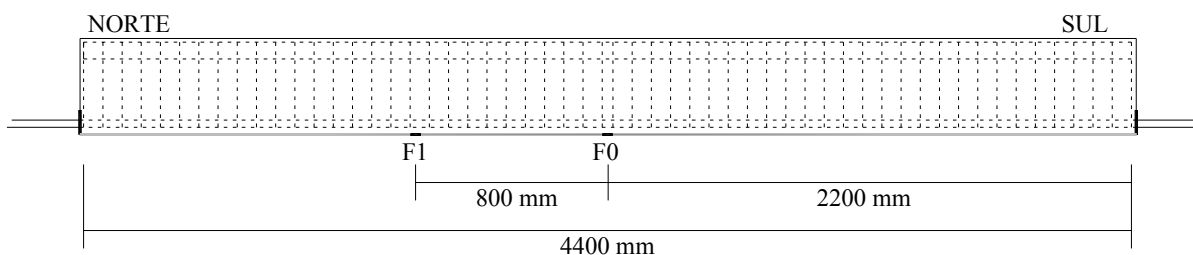


Figura 3.20 – Localização dos extensômetros elétricos no reforço

O procedimento para a fixação destes extensômetros na barra de aço foi o mesmo descrito no item anterior. Contudo, os procedimentos adotados para a MFC e as barras de CFRP tiveram algumas peculiaridades, como a regularização da superfície, que era feito através de lixamento, mas visando somente retirar a resina saturante para chegar na fibra, como mostram a Figura 3.21 e a Figura 3.22.



Figura 3.21 – Regularização da superfície das barras de CFRP



Figura 3.22 – Regularização da superfície da manta de CFRP

Posteriormente era feita a limpeza da superfície utilizando somente álcool isopropílico. Para a fixação dos extensômetros na barra de carbono, aplicou-se uma delgada base de resina da marca Araldite, e posteriormente utilizou-se uma cola tipo cianoacrilática da marca Kyowa, conforme Figura 3.23. Em seguida eram soldados os fios para transmissão dos sinais elétricos do extensômetro. Por último era feita a proteção do mesmo, cobrindo-os com uma fina camada de resina da marca Araldite, uma proteção mecânica a base de silicone envolvida com uma fita isolante de autofusão.

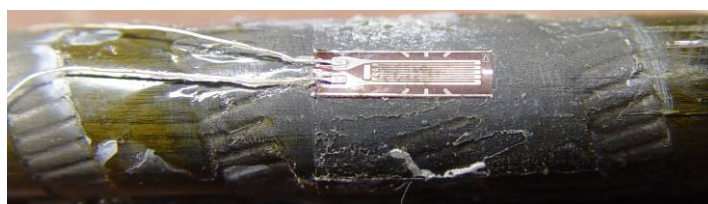


Figura 3.23 – Colagem do extensômetro na barra de CFRP

Para a fixação dos extensômetros no reforço com MFC, os extensômetros foram colados diretamente com o adesivo instantâneo da Loctite em gel, número 454, conforme Figura 3.24. Em seguida foram soldados os fios, mas não foi feita qualquer proteção mecânica, pois não era necessária tal precaução.



Figura 3.24 – Colagem do extensômetro no reforço com MFC

O procedimento de se aplicar uma base de Araldite foi utilizado nas barras de CFRP porque os extensômetros não apresentaram uma boa aderência às barras, quando coladas diretamente utilizando a cola Kyowa. Contudo, observou-se posteriormente, durante a execução dos ensaios, que a colagem dos extensômetros no reforço com MFC utilizando uma fina base de resina Araldite ocasionou problemas no registro das deformações do reforço na viga VB – RMC, o que tornou necessário adotar o procedimento acima citado na colagem do extensômetro, produzindo melhores resultados na viga VA – RMC.

3.3.3 - Deformação do concreto

Para o acompanhamento das deformações do concreto, foram utilizados extensômetros elétricos da marca Kyowa, tipo KC-70-120-A1-11, com fator de correção de 2,11 e comprimento de 67 mm, posicionados na face superior da mesa da viga como mostra a Figura 3.25.

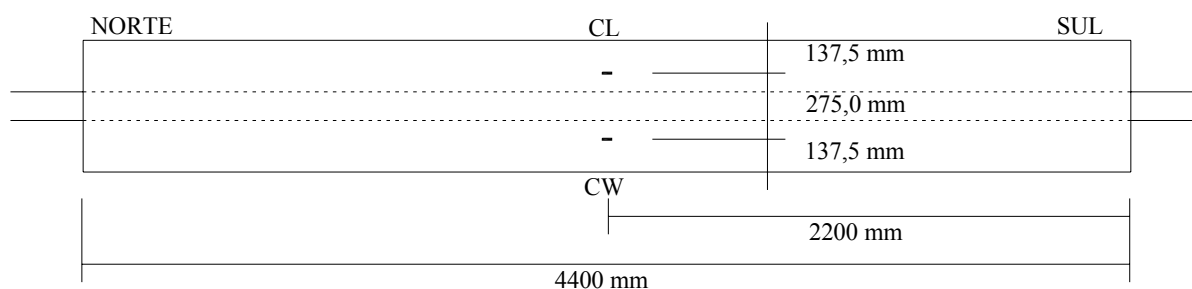


Figura 3.25 – Localização dos extensômetros elétricos no concreto

A colagem destes extensômetros, mostrado na Figura 3.26, foi feita conforme o seguinte roteiro: preparação da superfície do concreto através do lixamento e da limpeza por jato de ar; aplicação de uma fina camada de regularização da resina flexível da marca Araldite, que também serve como base para a cola, e colagem dos extensômetros com cola tipo cianoacrilática da marca Kyowa.

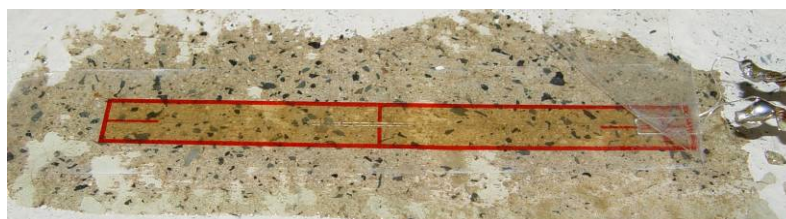


Figura 3.26 – Colagem do extensômetro elétrico no concreto

3.3.4 - Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais foram medidos por meio de defletômetros mecânicos, da marca Huggenberger, com precisão de 0,01 mm e amplitude de leitura de 50 mm, instalados no meio da viga e nos dois pontos de aplicação de carga, como indicado nas Figura 3.27 e Figura 3.28.

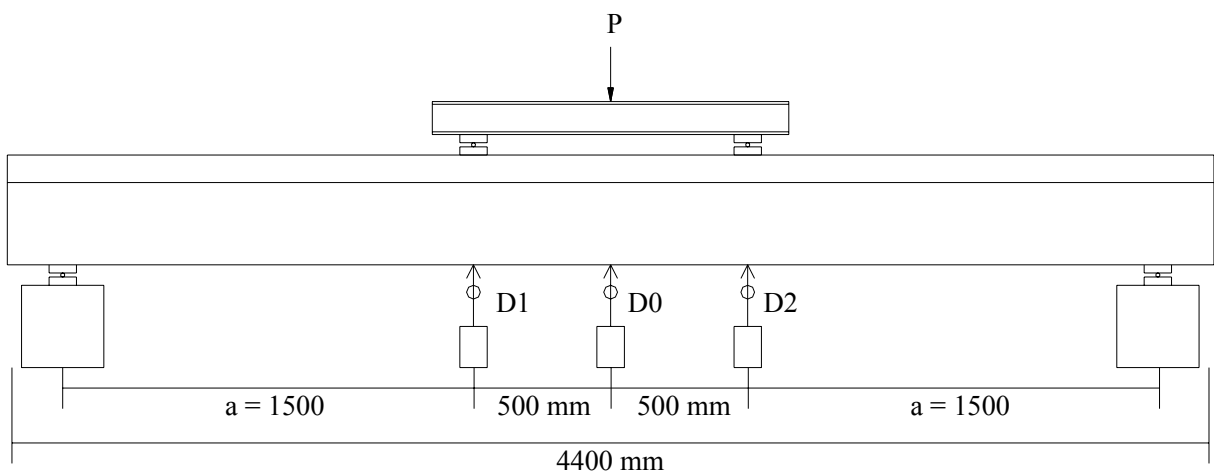


Figura 3.27 – Posicionamento dos defletômetros



Figura 3.28 – Defletômetro montado na viga

3.4 - CONFECÇÃO DAS VIGAS

3.4.1 - Montagem e concretagem das vigas

Inicialmente foi realizada a montagem das armaduras de aço e confecção das formas de madeira. Na inserção da armadura na forma, foram utilizados espaçadores a fim de manter o cobrimento determinado no detalhamento da viga.

Na ocasião da concretagem, foi tomado o cuidado de vibrar adequadamente o concreto, antes de sua pega, a fim de evitar brocas no mesmo. E para obter a resistência do concreto, foram moldados nove corpos de prova, com dimensões de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, para cada viga concretada, totalizando setenta e dois corpos de prova. Esses corpos de prova foram utilizados nos ensaios de compressão simples, de tração e de módulo de elasticidade do concreto, na mesma data do ensaio de cada viga.

No período de cura do concreto fresco foram utilizados sacos de algodão umedecidos e lona preta, a fim de manter a umidade na superfície do concreto, durante os 7 primeiros dias de idade, simulando condições ideais de cura, conforme Figura 3.29.



Figura 3.29 – Cura das vigas

3.4.2 - Execução do reforço das vigas

3.4.2.1 - Reforço das vigas utilizando a técnica NSMR

Para a execução do reforço pela técnica NSMR, primeiramente as vigas foram invertidas, ficando na posição de um “T” invertido. Para realizar os cortes, foi utilizado uma serra mármore da marca Bosch, em conjunto com um disco diamantado de corte com 4”. Este corte foi feito por via úmida para evitar o superaquecimento do disco de corte e para evitar a dispersão de pó no ambiente de trabalho, conforme mostra Figura 3.30.



Figura 3.30 – Corte do concreto com a serra mármore via úmida

Depois do corte, o entalhe foi formado com a retirada do concreto com o auxílio de uma talhadeira. Depois da retirada do miolo, era feita a limpeza com jato de ar, ficando com o aspecto mostrado na Figura 3.10. Na região dos extensômetros, foi necessário fazer um alargamento do entalhe para acomodar barra e instrumentação sem dificuldades, conforme Figura 3.31.



Figura 3.31 – Detalhe do reforço na região do extensômetro

Antes da colagem das barras, foi realizada uma limpeza para retirar qualquer resíduo na superfície das mesmas, por meio de um saco de algodão seco, ficando com o aspecto mostrado na Figura 3.32.

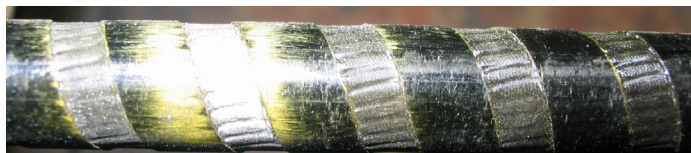


Figura 3.32 – Barra de CFRP pronta para colagem

Para a colagem das barras, foi utilizada uma resina epóxi estruturante tixotrópica FC, de consistência mais viscosa. Esta resina é composta de duas partes, denominadas parte A (azul) e parte B (âmbar), de características mostradas na Tabela 3.9, conforme especificações do fornecedor.

Tabela 3.9 – Características da resina epóxi estruturante tixotrópica FC

Epóxi estruturante tixotrópica FC	
Resistência à tração	57 MPa
Deformação na tração	24 ‰
Módulo à tração	2,998 GPa
Resistência à flexão	131 MPa
Módulo à flexão	3,684 GPa
Resistência à compressão	81 MPa
Módulo à compressão	2,560 GPa
Relação de mistura	1:1



Figura 3.33 – Balança utilizada para a dosagem dos componentes

Os dois componentes da resina eram primeiramente mexidos isoladamente para poder garantir a uniformidade dos componentes. Posteriormente, foram dosados em peso e misturados conforme Figura 3.33, até sua homogeneização, mostrado na Figura 3.34.



Figura 3.34 – Mistura dos componentes A e B da resina epóxi

Antes de inserir a barra no entalhe, o mesmo era preenchido até a metade com a resina. Contudo, a viscosidade da resina ficou abaixo do esperado, o que permitiu derramar a resina no entalhe, conforme Figura 3.35, em face da viga T estar invertida. Esse procedimento seria impraticável na posição real da viga, pois a resina provavelmente escorreria para fora do entalhe.



Figura 3.35 – Aplicação da resina no entalhe

Posteriormente, as barras eram inseridas no entalhe, sendo levemente pressionadas de forma que a resina as envolvesse e preenchendo os espaços entre a barra e os lados do entalhe, conforme Figura 3.36. Porém, as barras de CFRP apresentaram a tendência de

emergir da resina, saindo do entalhe, provavelmente devido à baixa viscosidade da resina e a diferença de peso específico dos materiais. Assim foi necessário criar um mecanismo para evitar a ascensão das barras, conforme mostrado na Figura 3.37 e na Figura 3.38.

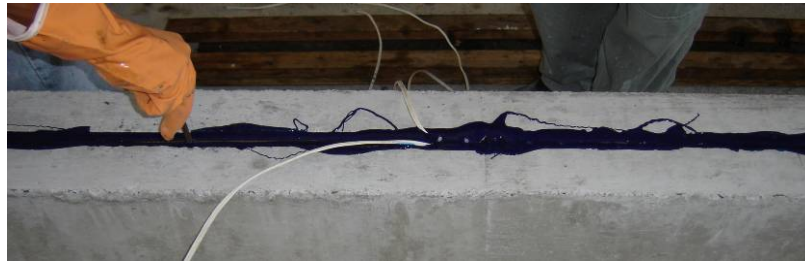


Figura 3.36 – Inserção da barra de CFRP no entalhe



Figura 3.37 – Peso sobre a barra para evitar a barra emergir do entalhe



Figura 3.38 – Sistema para evitar a ascensão da barra de CFRP

Finalmente era colocado no entalhe mais um pouco de resina e feito uma regularização para dar um acabamento final e evitar qualquer vazio entre a barra e o entalhe.

3.4.2.2 - Reforço da viga com a manta de CFRP

Para a aplicação do reforço, foi necessário preparar o substrato das vigas, realizado por meio de lixamento mecânico, retirando-se a nata de cimento que cobre toda a superfície de concreto. O lixamento também teve o cuidado de arredondar as arestas vivas das peças na

região das gravatas, pois estas poderiam comprometer o dispositivo complementar de ancoragem com tiras de MFC. O resultado está apresentado na Figura 3.39.



Figura 3.39 – Superfície do concreto para colagem da manta de FRP

Para a colagem da manta, foi utilizado o primer epóxico FC, como base entre o sistema de reforço e o concreto, a argamassa epóxica FC, que serviu para regularizar a superfície onde foi aplicada a MFC, e o epóxi estruturante FC, que foi a resina utilizada para colar a manta. As características dos materiais empregados estão apresentadas na Tabela 3.10, com dados fornecidos pelo fabricante. Vale salientar que todas estas resinas foram dosadas em peso.

Tabela 3.10 – Características das resinas do reforço com MFC

	Primer epóxico FC	Argamassa epóxica FC	Epóxi estruturante FC
Resistência à tração	320 MPa	14 MPa	57 MPa
Deformação na tração	10 a 30 ‰	15 ‰	24 ‰
Módulo à tração	0,678 GPa	1,710 GPa	2,998 GPa
Resistência à flexão	26 MPa	28 MPa	131 MPa
Módulo à flexão	0,570 GPa	0,860 GPa	3,684 GPa
Resistência à compressão	20 MPa	26 MPa	81 MPa
Módulo à compressão	0,619 GPa	1,010 GPa	2,560 GPa
Relação de mistura	5:1	4:1	1:1

Antes da aplicação da primeira camada de primer epóxico FC, foi realizada uma limpeza para retirar todo o pó criado pelo lixamento mecânico. Esta limpeza foi feita, primeiramente, pela remoção manual com um pano seco seguida da remoção com um pano embebido em álcool.

A aplicação do primer epóxico FC, por ser bastante fluido, foi realizada com rolo de pintura de pêlo de carneiro. Após a aplicação, a superfície apresentava um aspecto molhado, como mostrado na Figura 3.40.



Figura 3.40 – Substrato impregnado com primer epóxico FC

Após a imprimação do substrato, foi aplicada uma camada de argamassa epóxica FC para regularização da superfície, como mostra a Figura 3.41, segundo orientações do fornecedor. A aplicação foi executada com uma espátula de aço



Figura 3.41 – Superfície com a argamassa epóxica FC

Após o endurecimento desta argamassa, cerca de 12 horas após sua aplicação, passou-se à colagem da MFC. Esta fibra apresenta-se na forma de um tecido com os filamentos alinhados em uma única direção, possuindo uma grade facilidade de manuseio. Para a obtenção das tiras de MFC nas dimensões desejadas, basta a utilização de uma trena e de uma tesoura.

Para a realização da colagem da MFC na superfície da peça, usa-se um terceiro tipo de resina, o epóxi estruturante FC. Este epóxi foi primeiramente impregnado na superfície da peça por meio de um rolo de pintura com pêlo de carneiro. Contudo, a resina apresentava uma viscosidade maior que a comum, inviabilizando a utilização de rolos de pintura, sendo aplicado e espalhado com o auxílio de uma espátula, mostrado na Figura 3.42.



Figura 3.42 – Impregnação da superfície de concreto com Epóxi Estruturante FC

A manta era colocada em contato direto com o substrato da viga, que estava impregnado com resina saturante, sendo posicionada de acordo com o detalhamento, conforme Figura 3.43. Para poder impregnar a manta com a resina, colocou-se mais resina por cima da manta e passou-se o rolo tira bolhas para impregnar totalmente manta, como mostra a Figura 3.44. Este procedimento também retirava as bolhas que poderiam ficar entre a manta e o substrato do concreto.



Figura 3.43 – Posicionamento da manta de CFRP na viga



Figura 3.44 – Impregnação da manta de CFRP com a resina saturante

Para a colagem da segunda camada, foi adotado procedimento semelhante, conforme mostra a Figura 3.45.



Figura 3.45 – Aplicação da segunda camada da manta de CFRP

Depois da aplicação das duas camadas, foram coladas as gravatas para melhorar a ancoragem da manta, conforme mostra a Figura 3.46.



Figura 3.46 – Aplicação da gravada de ancoragem do reforço com MFC

3.4.2.3 - Observações quanto à resina

Posteriormente à execução dos reforços das vigas, foi observada certa demora no endurecimento das resinas saturantes utilizadas, que segundo o fabricante, deveria ser em torno de uma hora e meia. Depois de cerca de duas semanas a resina não tinha ficado totalmente rígida, podendo ainda ser mexidas em alguns pontos, pois apresentava certa viscosidade conforme apresenta a Figura 3.47. A resina também apresentava algumas bolhas que surgiram durante o endurecimento, de pequenos tamanhos, mas que podem ter surgido durante as reações químicas entre os componentes.

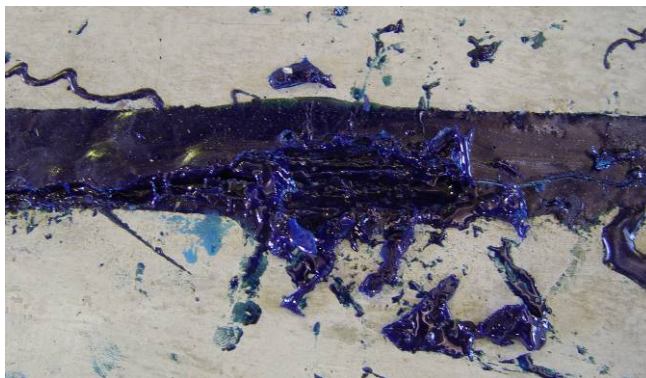


Figura 3.47 – Detalhe da resina

O fabricante, no primeiro contato feito após a observação do ocorrido, informou que a resina podia ser dosada na relação 1:1 em peso ou volume, obtendo a mesma qualidade do adesivo estruturante.

Contudo, visto o ocorrido em laboratório, foram feitos alguns testes quanto à dosagem em peso e volume através da moldagem de alguns pequenos corpos de prova de resina estruturante, com o objetivo de acompanhar o endurecimento das mesmas. Pode-se confirmar que a resina com dosagem de 1:1 em volume endureceu em um tempo curto, apresentando uma grande rigidez após o tempo estipulado pelo fabricante. Em compensação a resina dosada em 1:1 em peso também teve um endurecimento em tempo curto, contudo apresentando características não tão rígidas como as primeiras amostras e peculiaridades semelhantes as das resinas dos reforços, como a formação de bolhas e a superfície pegajosa, o que indica que há diferença da qualidade final do adesivo estruturante variando o método de dosagem.



Figura 3.48 – Corpos de prova da resina

Quanto à fluidez da resina tixotrópica, inadequada para as aplicações de reforços de baixo pra cima, o fabricante alega que houve má interpretação do pedido, visto que eles fornecem o epóxi estruturante na consistência tixotrópica para o reforço com barras na face inferior da viga, já no cartucho duplo ou em galões para posterior mistura.

3.4.3 - Ensaio de ruptura das vigas

Na montagem do pórtico, foi tomado todo o cuidado para que o carregamento ficasse simétrico na viga, tirando o nível da viga, dos apoios e do perfil distribuidor da carga, e verificando os eixos da viga e do perfil. Para permitir que os apoios e os pontos de aplicação ficassem rotulados, foi utilizado o sistema apresentado na Figura 3.49. Vale observar que a madeira foi colocada do lado de dentro da viga, para evitar qualquer acidente durante o ensaio, mas que não influenciou nos resultados.



Figura 3.49 – Detalhe do apoio

O procedimento padrão de ruptura das vigas foi de aplicar uma pré-carga de acomodação do sistema de 10 kN e, depois de retirada toda a pré-carga, fazer o carregamento

progressivamente, onde a cada incremento de carga eram registrados os valores da carga aplicada, das deformações, dos deslocamentos, e acompanhamento das fissuras no concreto.

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 - PRELIMINARES

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais dos ensaios das vigas de referência e das vigas reforçadas, em conjunto com ensaios para a obtenção das resistências do aço, do concreto e da manta de fibra de carbono. Também estão apresentadas as deformações dos materiais utilizados, as flechas das vigas ensaiadas e o padrão de fissuração.

4.2 - MATERIAIS

4.2.1 - Aço

As armaduras utilizadas na confecção das vigas tinham as seguintes bitolas: 20 mm para armadura de flexão, 8 mm para armadura de cisalhamento vertical e 6,3 mm para os estribos horizontais da mesa e porta estribos. De cada uma das bitolas foram retiradas aleatoriamente três amostras de 600 mm e submetidas ao ensaio de tração, segundo prescrições da norma NBR-6152 (1992). Das três amostras, uma era rompida para determinação da carga de ruptura e as outras duas amostras de aço foram ensaiadas à tração, e as suas deformações medidas com extensômetro mecânico.

A Figura 4.1, a Figura 4.2 e a Figura 4.3 apresentam gráficos tensão-deformação médios dos ensaios à tração do aço utilizado na armação das vigas.

Aço CA - 50 \varnothing 6,3 mm

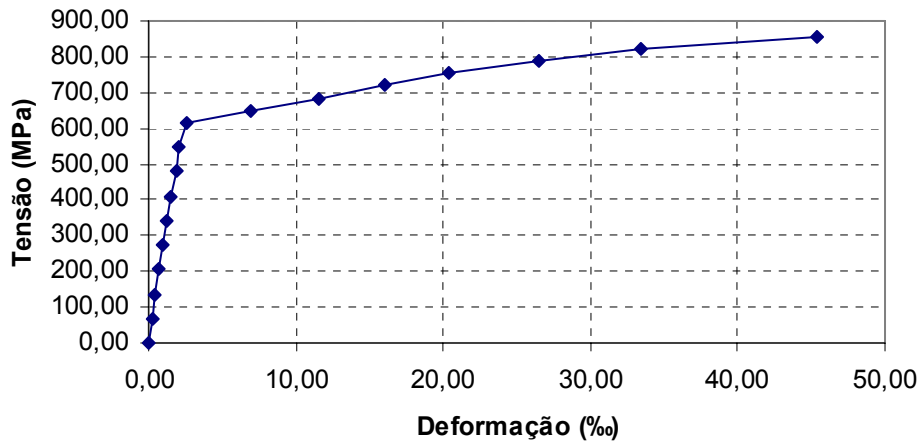


Figura 4.1 – Gráfico tensão-deformação do aço \varnothing 6,3 mm

Aço CA - 50 \varnothing 8,00 mm

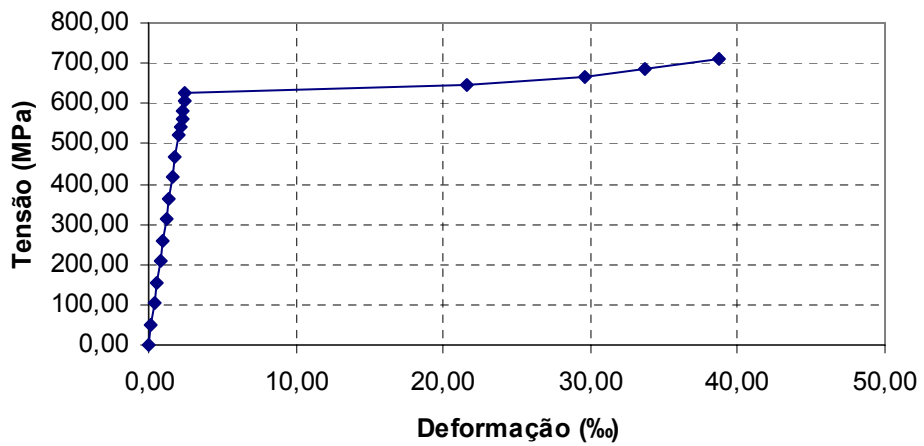


Figura 4.2 - Gráfico tensão-deformação do aço \varnothing 8,0 mm

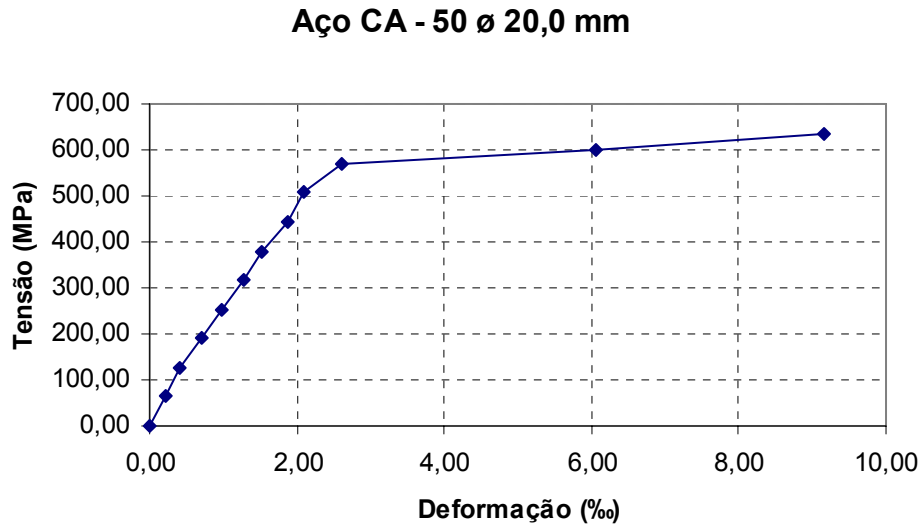


Figura 4.3 - Gráfico tensão-deformação do aço ø 20,0 mm

É possível observar que as barras de 6,3 mm, 8 mm e de 20 mm de diâmetro apresentaram um patamar de escoamento definido, onde pode-se notar o valor da tensão de escoamento, f_y , e deformação específica de escoamento, ϵ_y . Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores de f_y e ϵ_y , assim como a tensão de ruptura, f_u , e o módulo de elasticidade, E_s , cujo valor foi afetado pela medição de deformação apenas de um lado do corpo de prova.

Tabela 4.1 – Características das barras de aço

Diâmetro Nominal (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (MPa)	E_s (GPa)
6,3	615	915	2,6	237
8,0	625	709	2,5	250
20,0	570	740	2,6	219

4.2.2 - Concreto

O concreto utilizado nos ensaios foi fornecido pela empresa Concrecon, requisitado para uma resistência à compressão, f_c , de 40 MPa, e abatimento de 10 ± 2 cm. Na ocasião do recebimento do concreto, o abatimento era medido utilizando as recomendações da norma NBR NM 67 (1998).

Para cada uma das vigas concretadas, foram moldados nove corpos de provas cilíndricos, de dimensões 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura, procedimento feito de acordo

com a norma NBR 5738 (1994). estes corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão, de acordo com a NBR 5739 (1994), ao ensaio de compressão diametral, segundo a NBR 7222 (1983), e ao ensaio para o traçado do diagrama tensão-deformação do concreto, de acordo com a NBR 8522 (2003), utilizando 3 amostras em cada ensaio.

No ensaio do traçado do diagrama tensão-deformação foi utilizado o plano de carga do item 7.3.3 da norma, onde para medir a deformação foram utilizados defletômetros Soiltest Inc. fixados em suas bases de medida espaçadas de 137 mm, com a menor divisão de escala igual a 0,00254 mm (0,0001”), conforme Figura 4.4.



Figura 4.4 – Detalhe do ensaio de módulo de deformação secante do concreto

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 mostram diagramas tensão-deformação médio dos corpos de prova das vigas VA – REF e VB – REF.

O módulo de elasticidade (ou módulo de deformação tangente inicial), E_{ci} , determinado para a tensão de 30% de f_c do concreto utilizado nos ensaios estão indicados na Tabela 4.2, em conjunto com a resistência a compressão e de tração do concreto.

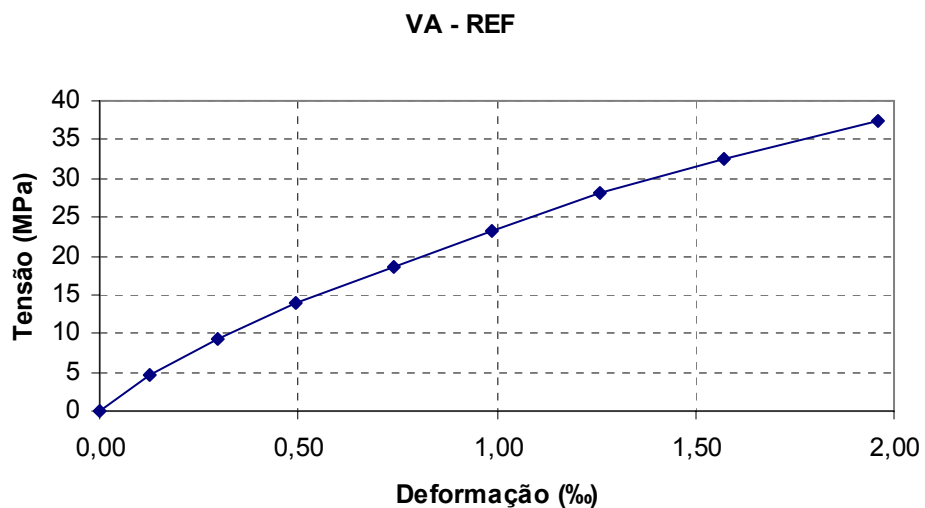


Figura 4.5 – Diagrama tensão-deformação do concreto na viga VA – REF

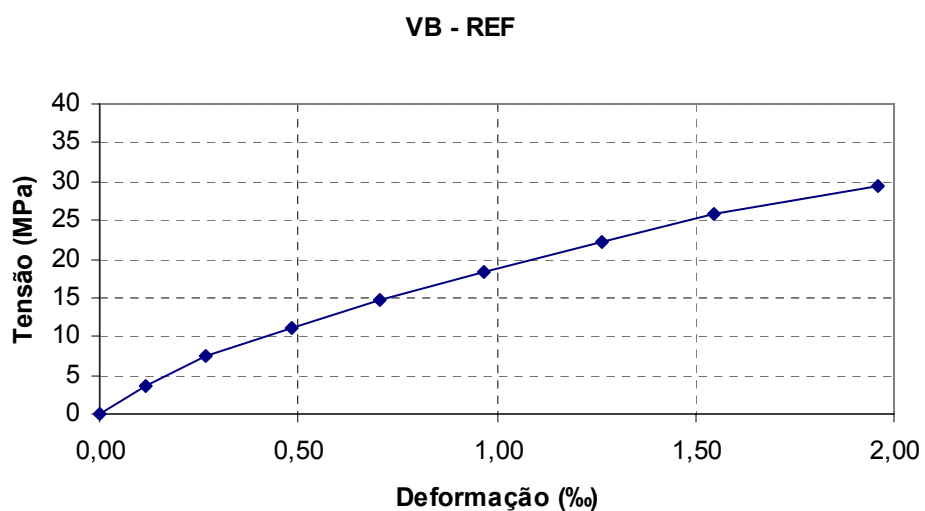


Figura 4.6 – Diagrama tensão-deformação do concreto na viga VB – REF

Tabela 4.2 – Características do concreto

	Viga	Idade (dias)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_{ci} (GPa)
Grupo A	VA – REF	134	46,6	5,1	27,3
	VA – RBC	146	47,4	5,7	30,0
	VA – RBA	145	47,2	5,5	29,3
	VA – RMC	140	46,8	5,7	28,0
Grupo B	VB – REF	90	36,8	4,4	22,4
	VB – RBA	102	35,8	4,4	22,3
	VB – RMC	96	36,3	4,4	22,1

4.2.3 - Resina epóxi

As características e propriedades mecânicas das resinas utilizadas foram fornecidas pelos fabricantes e nenhum ensaio de verificação foi realizado. As propriedades das resinas estão apresentadas nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Características da resina utilizada nas barras de aço e de fibra de carbono

Epóxi estruturante tixotrópica FC	
Resistência à tração	57 MPa
Deformação na tração	24 ‰
Módulo à tração	2,998 GPa
Resistência à flexão	131 MPa
Módulo à flexão	3,684 GPa
Resistência à compressão	81 MPa
Módulo à compressão	2,560 GPa
Relação de mistura	1:1

Tabela 4.4 – Características das resinas utilizadas na manta de fibra de carbono

	Primer epóxico FC	Argamassa epóxica FC	Epóxi estruturante FC
Resistência à tração	320 MPa	14 MPa	57 MPa
Deformação na tração	10 a 30 ‰	15 ‰	24 ‰
Módulo à tração	0,678 GPa	1,710 GPa	2,998 GPa
Resistência à flexão	26 MPa	28 MPa	131 MPa
Módulo à flexão	0,570 GPa	0,860 GPa	3,684 GPa
Resistência à compressão	20 MPa	26 MPa	81 MPa
Módulo à compressão	0,619 GPa	1,010 GPa	2,560 GPa
Relação de mistura	5:1	4:1	1:1

Contudo, conforme observado durante a aplicação dos reforços, estas resinas não apresentaram uma consistência rígida com a dosagem em 1:1 em peso, dosagem adotada durante a aplicação dos reforços. Conforme citado, o fabricante afirmou que a qualidade final da resina seria a mesma se a resina fosse dosada em 1:1 em peso ou em 1:1 em volume, mas em testes posteriores não foi detectada tal similaridade na prática. Conforme averiguado anteriormente, pode-se confirmar que a resina com dosagem de 1:1 em volume endureceu em um tempo curto, apresentando uma grande rigidez após o tempo estipulado pelo fabricante. Em compensação a resina dosada em 1:1 em peso também teve um endurecimento em tempo curto, contudo apresentando características não tão rígidas como as primeiras amostras e peculiaridades semelhantes às das resinas dos reforços, como a formação de bolhas e a superfície pegajosa, o que indica que há diferença da qualidade

final do adesivo estruturante variando o método de dosagem. Assim não se pode afirmar que tais características finais das Tabela 4.3 e Tabela 4.4 foram as obtidas depois da colagem dos reforços.

4.2.4 - Barra de fibra de carbono

As características e propriedades mecânicas da barra de fibra de carbono foram fornecidas pelos fabricantes e adotadas sem nenhum ensaio de verificação. As propriedades da barra estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Características da barra de fibra de carbono

Material	Dimensões (mm)	E (GPa)	F _{tu} (MPa)	ε _{tu} (‰)	Fabricante
barra de CFRP	Diâmetro = 10,0	147,0	1970,0	13,4	Marshall Industries

4.2.5 - Manta de fibra de carbono

Para o ensaio da manta de fibra de carbono, foi utilizado como guia a norma ASTM D 3039, de nome *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Para tanto, foram confeccionados 3 corpos de prova retirados de um laminado preparado com a mesma resina empregada no reforço das vigas, com dosagem 1:1 em volume, com dimensões mostradas na Figura 4.7, que foram adotadas de acordo com a norma que define parâmetros para que a amostra possa ser corretamente fixada na máquina de ensaios na Figura 4.8.

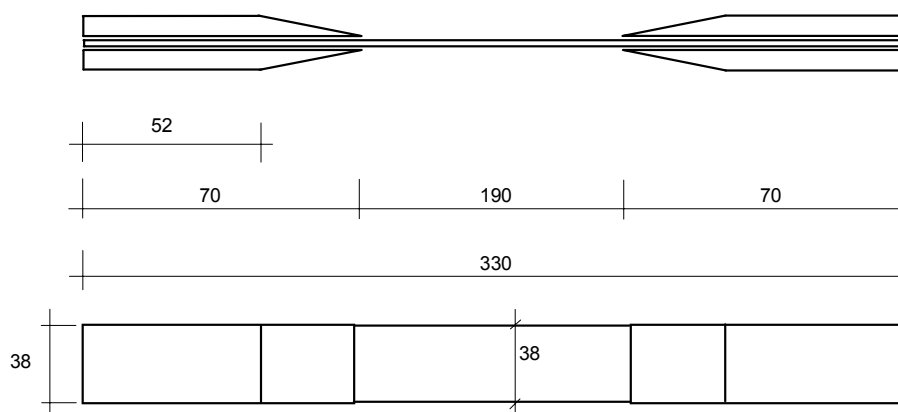


Figura 4.7 – Dimensões dos corpos de prova do laminado com fibra de carbono (em mm)



Figura 4.8 – Máquina de ensaios de materiais

No ensaio das amostras, realizado na máquina MTS 810 Material Test System, com uma célula de carga de capacidade de 100 kN e bomba hidráulica MTS 647 Hydraulic, foi adotada uma velocidade de carregamento de 1 mm/min, pois, a utilização do valor padrão definido pela norma, de 2 mm/min, não permitiu a aquisição de mais pontos do gráfico, conforme ocorreu com a primeira amostra. A tensão aplicada na garra foi de 16 MPa e o gráfico tensão-deformação está apresentado na Figura 4.9. Detalhes da ruptura estão apresentados na Figura 4.10, classificada como ruptura AGM (*angle gage middle*) pela norma ASTM D3039.

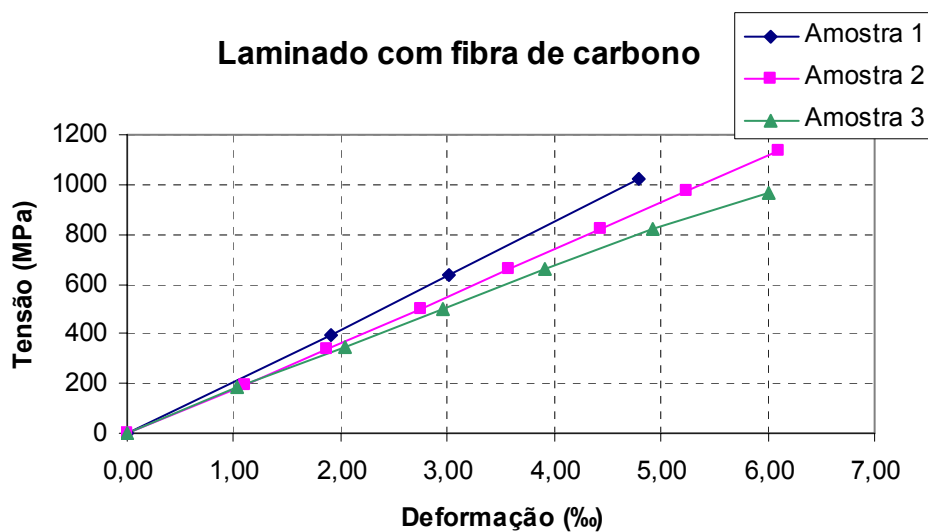


Figura 4.9 - Diagrama tensão-deformação do laminado com fibra de carbono

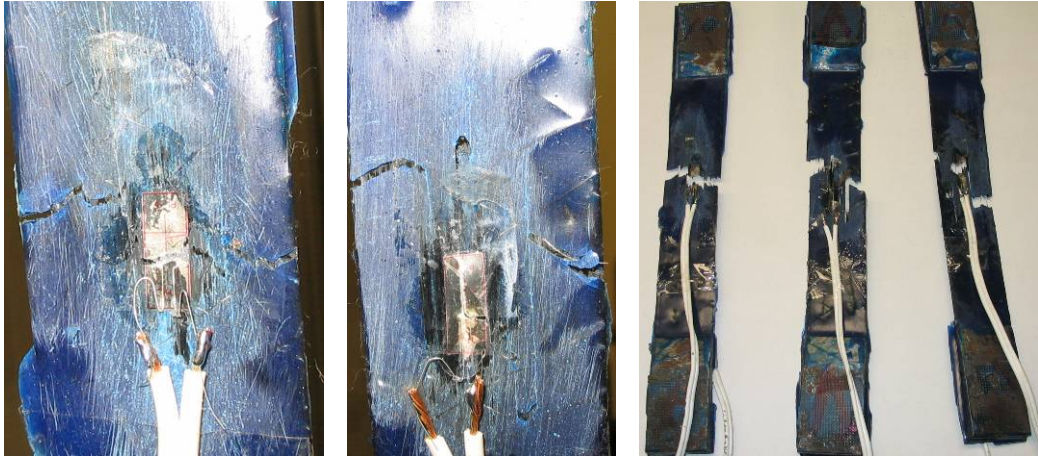


Figura 4.10 – Detalhes da ruptura dos corpos de prova do laminado de fibra de carbono

É possível observar um comportamento linear durante a aplicação de carga até a ruptura do laminado. Na Tabela 4.6 estão apresentados a tensão de ruptura, f_u , obtido da média dos valores das três amostras, o módulo de elasticidade ou de Young, E_s , calculado a partir da média das inclinações das curvas, e a deformação última, ε_{fu} , onde se dividiu o f_u por E_s .

Tabela 4.6 - Características do laminado com manta de fibra de carbono

Material	f_u (MPa)	E_s (GPa)	ε_{fu} (‰)
MFC 130	1202	187	6,4

Os resultados ficaram abaixo dos valores informados pelo fabricante, principalmente a deformação última, especificada em 15 ‰, e conseqüentemente, a tensão última, especificada em 3483 MPa. O módulo de elasticidade informado foi de 249 GPa.

Amostras de laminado de fibra de carbono utilizando resinas dosadas em 1:1 em peso, na mesma dosagem utilizada na colagem dos reforços, foram confeccionadas, contudo durante o ensaio a tração das amostras houve um escorregamento do laminado na região das garras, não permitindo a obtenção de bons resultados.

4.3 - ENSAIO DAS VIGAS DE REFERÊNCIA

4.3.1 - Ensaio da viga de referência VA – REF

A viga VA – REF apresentou no estado limite último uma deformação plástica excessiva da armadura de flexão, com a carga máxima de 155,0 kN. Este ensaio foi paralisado

quando não foi mais possível incrementar o carregamento, o que também ocorreu nas vigas seguintes que apresentaram o mesmo modo de ruptura. A Figura 4.11 mostra a viga VA – REF após o ensaio.



Figura 4.11 – Viga VA – REF após o ensaio

4.3.1.1 - Deformação da armadura de flexão

A Figura 4.12 mostra o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão na viga VA – REF. A maior deformação que conseguiu ser medida foi de 12,49 %, no extensômetro L0, no meio do vão.

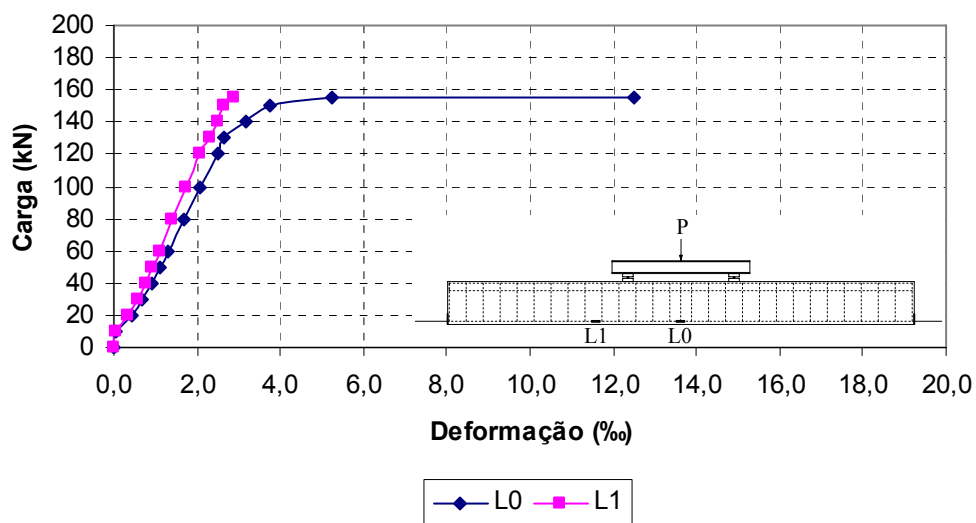


Figura 4.12 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – REF

4.3.1.2 - Deformação da armadura de cisalhamento

A Figura 4.13 apresenta o gráfico carga-deformação específica da armadura de cisalhamento na viga VA – REF. A máxima deformação medida foi de 0,62 ‰.

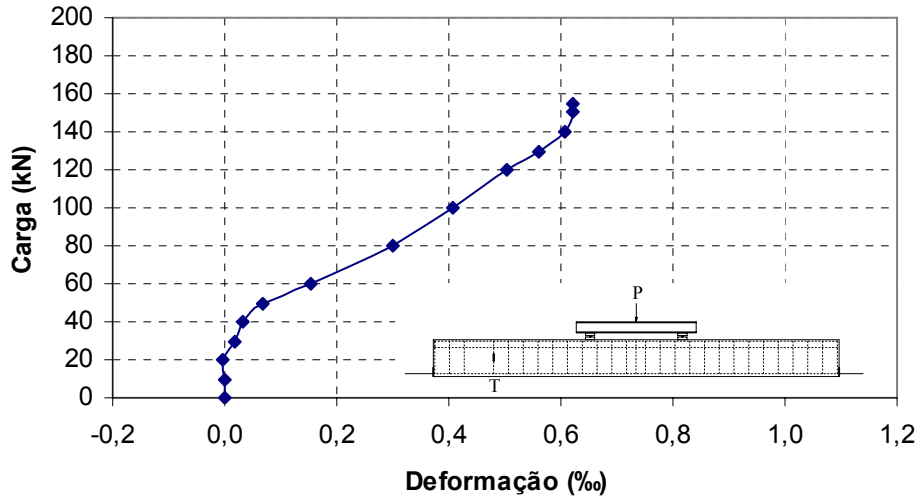


Figura 4.13 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – REF

4.3.1.3 - Deformação do concreto

A Figura 4.14 exhibe o comportamento da deformação do concreto no bordo superior. A deformação máxima de encurtamento do concreto que se conseguiu mensurar foi de 1,25 ‰ em CW.

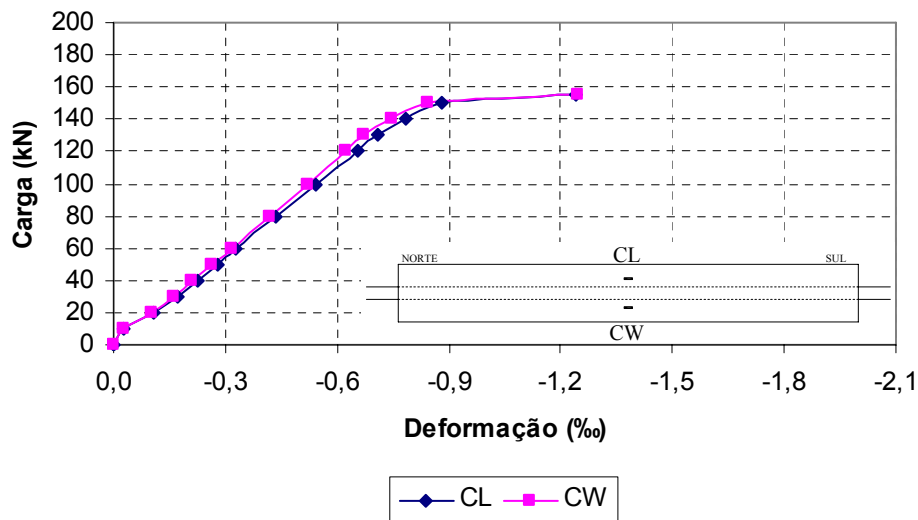


Figura 4.14 – Carga-deformação da superfície do concreto na viga VA – REF

4.3.1.4 - Deslocamentos verticais

O gráfico carga-deslocamento apresentado na Figura 4.15 mostra o deslocamento vertical na viga VA – REF. O deslocamento máximo medido no meio do vão foi de 36,61 mm.

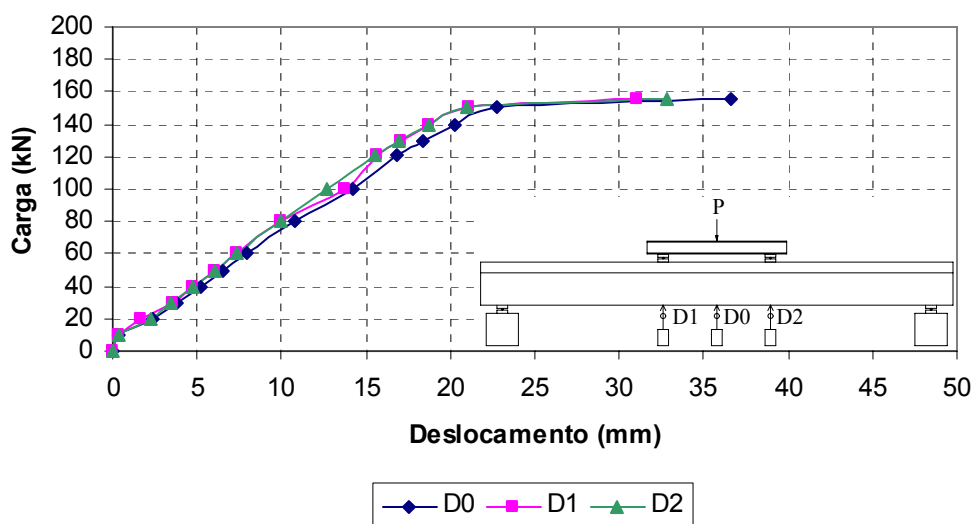


Figura 4.15 – Carga-deslocamento na viga VA – REF

4.3.2 - Ensaio da viga de referência VB – REF

A viga VB – REF apresentou no estado limite último uma deformação plástica excessiva da armadura de flexão, com a carga máxima de 374,0 kN. A Figura 4.16 mostra a viga VB – REF após o ensaio.



Figura 4.16 – Viga VB – REF após o ensaio

4.3.2.1 - Deformação da armadura de flexão

A Figura 4.17 mostra o gráfico carga-deformação específica da armadura de flexão na viga VB – REF. A maior deformação que conseguiu ser medida foi de 12,84 ‰, no extensômetro L0, no meio do vão.

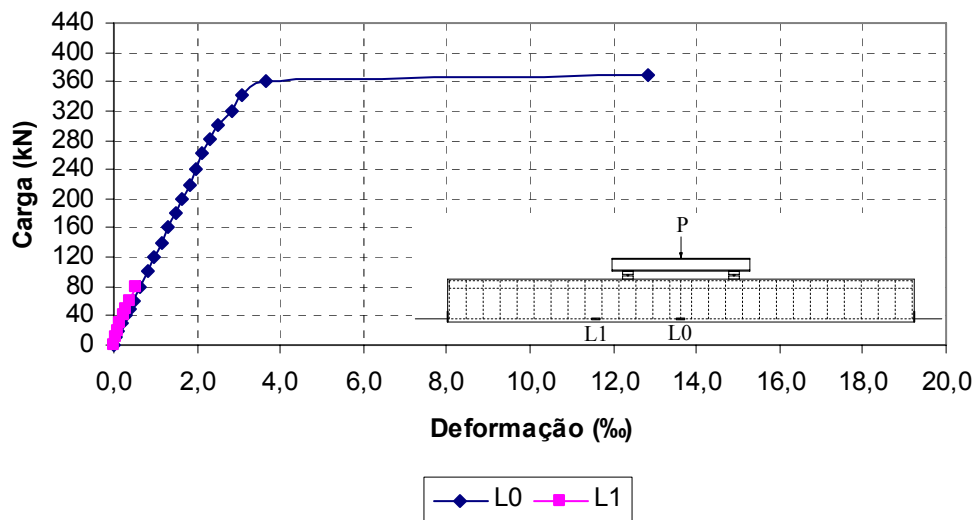


Figura 4.17 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – REF

4.3.2.2 - Deformação da armadura de cisalhamento

A Figura 4.18 apresenta o gráfico carga-deformação específica da armadura de cisalhamento na viga VB – REF. A máxima deformação medida foi de 1,11 ‰.

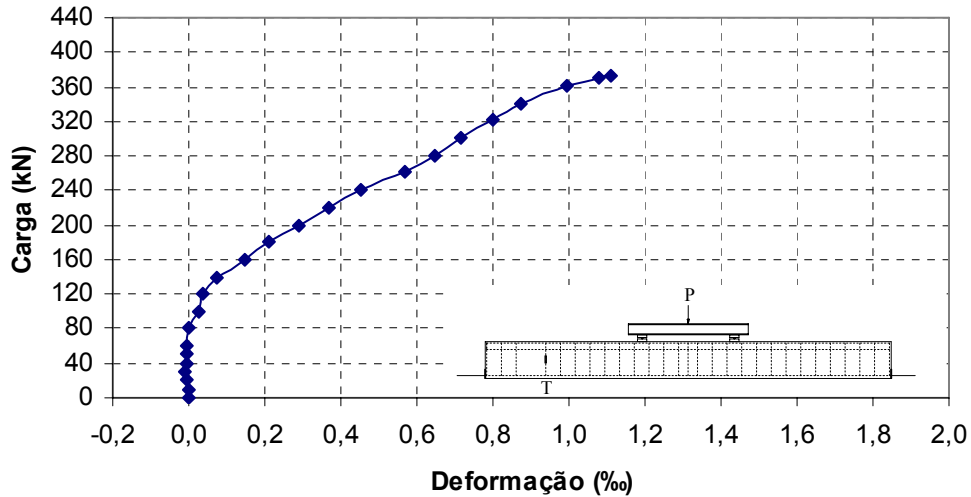


Figura 4.18 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VB – REF

4.3.2.3 - Deformação do concreto

A Figura 4.19 exibe o comportamento do concreto no bordo superior. A deformação máxima de encurtamento na superfície do concreto que se conseguiu mensurar foi de 1,72 ‰ em CW.

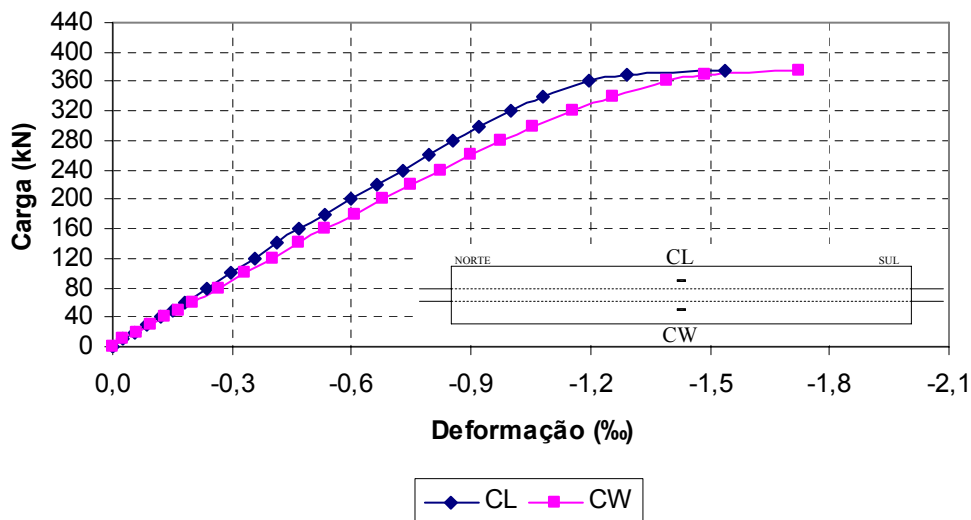


Figura 4.19 – Carga-deformação da superfície do concreto na viga VB – REF

4.3.2.4 - Deslocamentos verticais

O gráfico carga-deslocamento apresentado na Figura 4.20 mostra o deslocamento vertical na viga VB – REF. O deslocamento máximo medido no meio do vão foi de 43,09 mm.

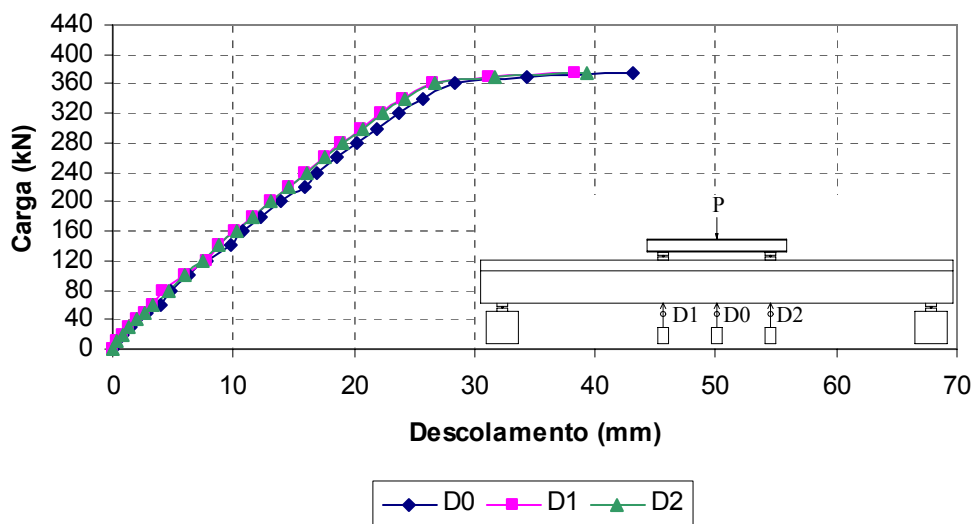


Figura 4.20 – Carga-descolamento na viga VB – REF

4.4 - ENSAIO DAS VIGAS REFORÇADAS

4.4.1 - Vigas reforçadas do grupo A

As três vigas do grupo A estavam armadas longitudinalmente com 2 barras de 20 mm de diâmetro, sendo reforçadas com diferentes tipos de reforço. A viga VA – RBC estava reforçada com uma barra de fibra de carbono, a viga VA – RBA reforçada com uma barra de aço e, finalmente, a viga VA – RMC reforçada com duas camadas de fibra de carbono.

4.4.1.1 - Modo e carga de ruptura

A viga VA – RBC teve uma carga última de 166,0 kN, com deformação plástica excessiva da armadura longitudinal, contudo apresentando um escorregamento da barra de carbono,

evidenciado na Figura 4.21. Os extensômetros confirmaram este acontecimento, pois enquanto o extensômetro F0, posicionado no meio do vão, registrava uma deformação de 0,95 %, o extensômetro F1, posicionado próximo de F0, apresentava uma deformação de 1,96 %, localizado oposto ao lado que sofreu o escorregamento.

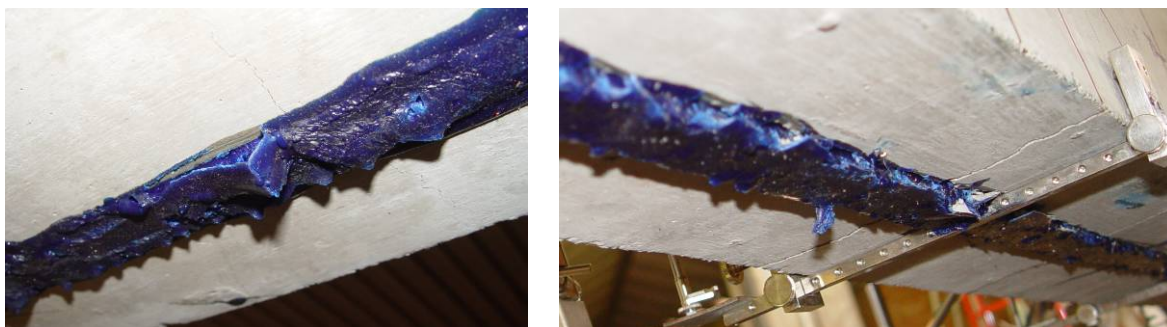


Figura 4.21 – Detalhes da resina da barra de CFRP na viga VA – RBC durante o ensaio



Figura 4.22 – Viga VA – RBC após o ensaio

A viga VA – RBA apresentou uma carga última de 164,7 kN, apresentando um escorregamento da barra de reforço nas duas extremidades, mostrado na Figura 4.23, seguido de uma deformação plástica excessiva da armadura de flexão. Os extensômetros também evidenciaram este ocorrido, pois a máxima deformação medida foi de 1,55 % no extensômetro F0, enquanto a armadura longitudinal apresentou uma deformação máxima de 5,13 %, no extensômetro L0.

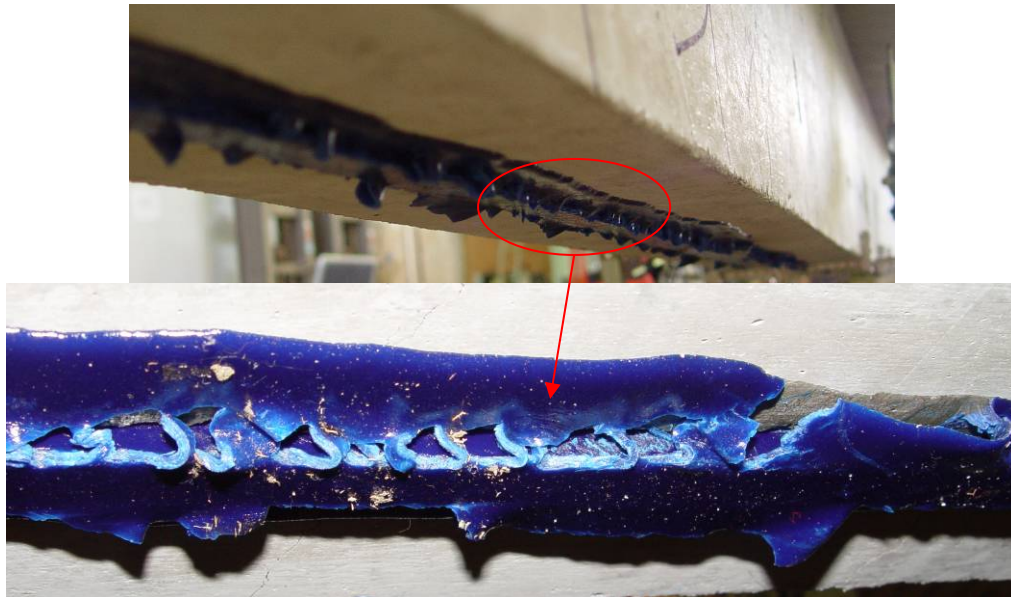


Figura 4.23 – Detalhe do escorregamento da resina da barra de aço na viga VA – RBA durante o ensaio



Figura 4.24 - Viga VA – RBA após o ensaio

A viga VA – RMC rompeu com uma carga de 193,00 kN, por ruptura do compósito de fibra de carbono no meio do vão, conforme Figura 4.25. O extensômetro aderido ao reforço apresentou uma deformação máxima de 6,70 % no extensômetro F0.



Figura 4.25 – Detalhe do compósito de CFRP na viga VA – RMC após a ruptura



Figura 4.26 - Viga VA – RMC após o ensaio

A Tabela 4.7 mostra os valores das cargas últimas experimentais, P_u , obtidas após a ruptura das vigas de referência e das vigas reforçadas do grupo A, bem como os modos de ruptura.

Tabela 4.7 – Carga de ruptura das vigas ensaiadas do grupo A

	Viga	P_u (kN)	Modo de ruptura
Grupo A	VA – REF	155,0	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBC	166,0	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBA	164,7	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA - RMC	193,0	Ruptura do reforço com manta de fibra de carbono

4.4.1.2 - Deformação na armadura de flexão

A Figura 4.27, a Figura 4.28 e a Figura 4.29 apresentam os gráficos carga-deformação das armaduras de flexão nas vigas reforçadas do grupo A. A viga VA – RBC apresentou uma deformação máxima de 18,73 ‰ no extensômetro L0, enquanto a viga VA – RBA a máxima deformação que se conseguiu mensurar foi de 5,13 ‰ no extensômetro L0, apresentando problemas no extensômetro antes da carga última. Já na viga VA – RMC, a deformação máxima foi de 16,80 ‰, no extensômetro L0.

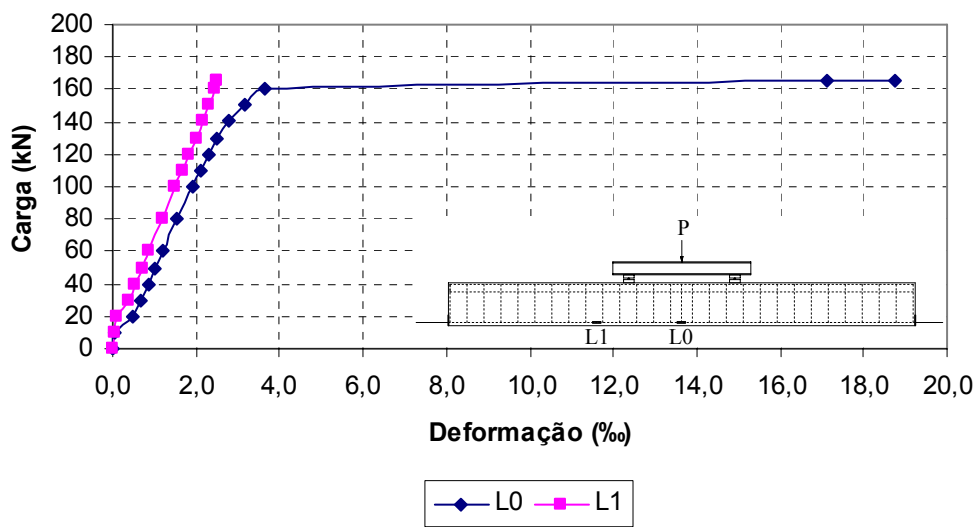


Figura 4.27 - Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – RBC

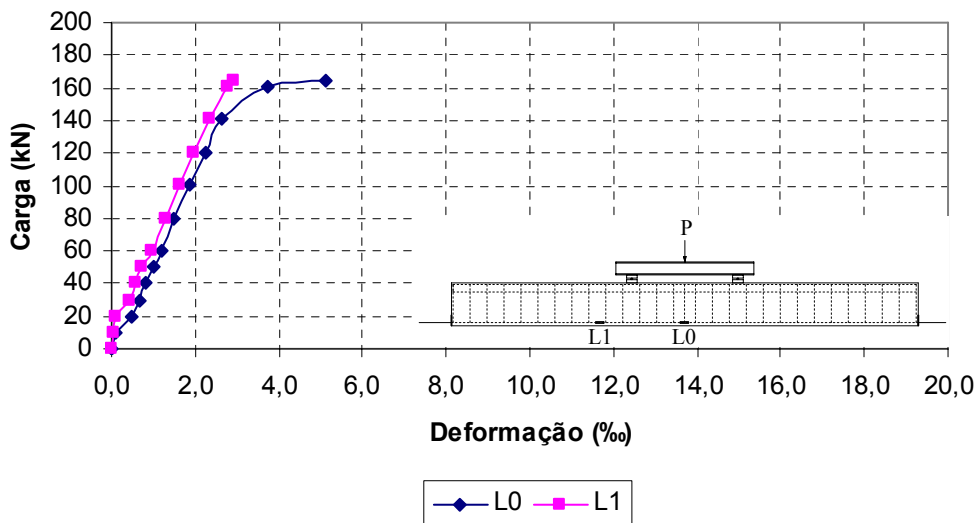


Figura 4.28 - Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – RBA

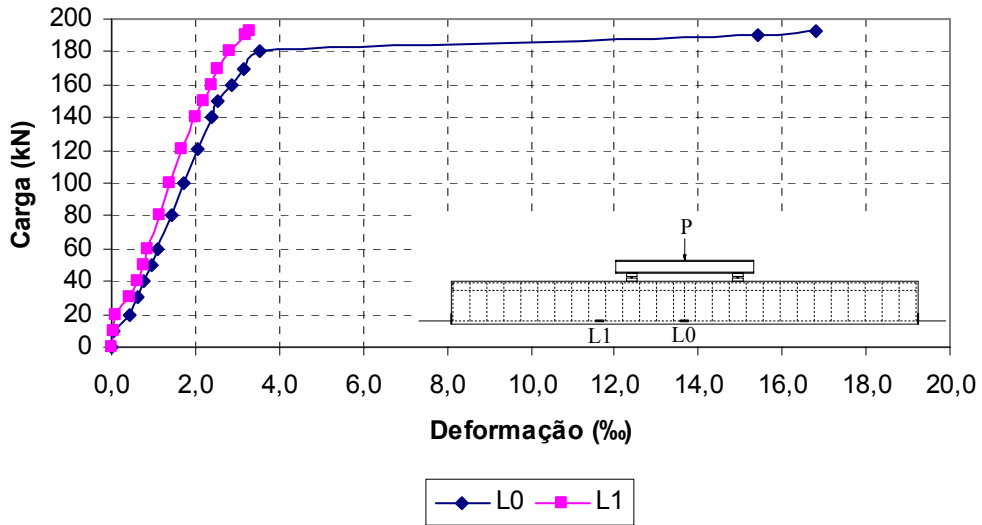


Figura 4.29 - Carga-deformação da armadura de flexão na viga VA – RMC

4.4.1.3 - Deformação na armadura de cisalhamento

Os gráficos de carga-deformação das armaduras de cisalhamento nas vigas reforçadas do grupo A estão apresentadas na Figura 4.30, na Figura 4.31 e na Figura 4.32. As máximas deformações registradas foram de 0,55 ‰ na viga VA – RBC, de 1,12 ‰ na viga VA – RBA e de 0,34 ‰ na viga VA – RMC.

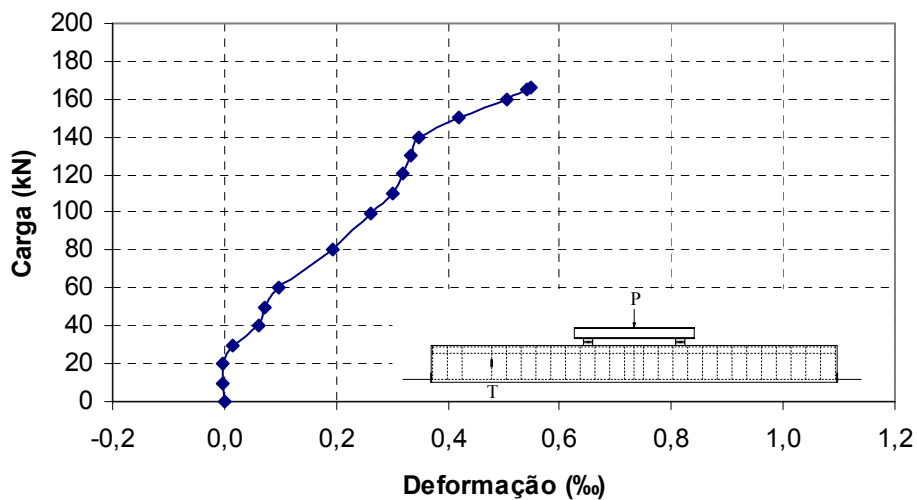


Figura 4.30 - Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – RBC

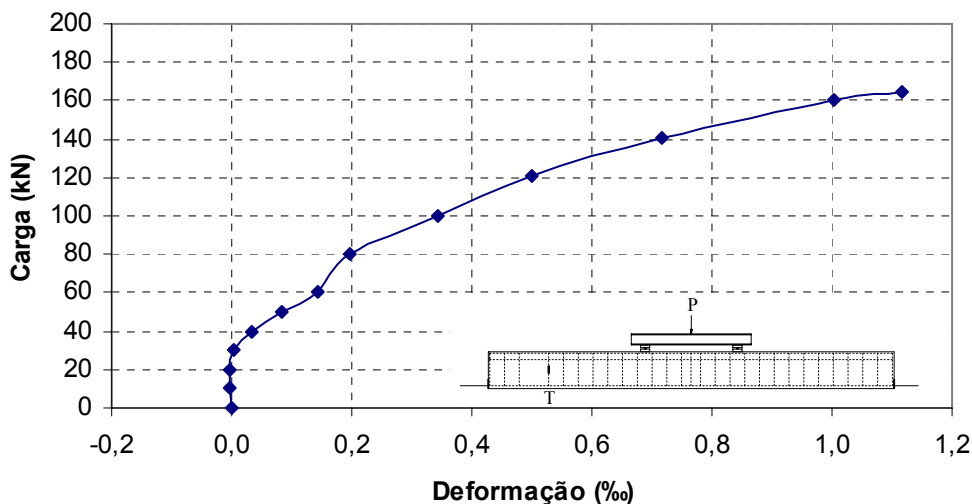


Figura 4.31 - Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – RBA

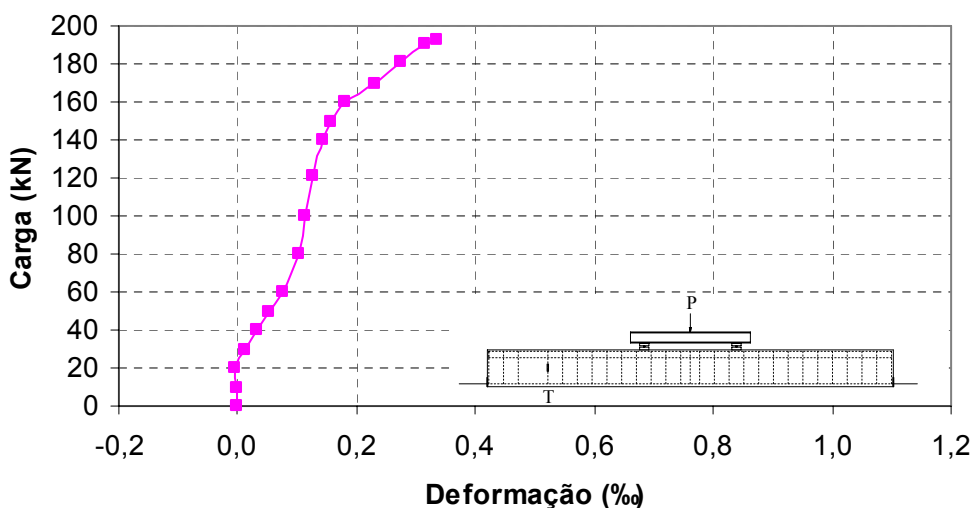


Figura 4.32 - Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VA – RMC

4.4.1.4 - Deformação no concreto

Na Figura 4.33, na Figura 4.34 e na Figura 4.35 constam os gráficos carga-deformação no concreto no bordo superior das vigas reforçadas VA – RBC, VA – RBA e VA – RMC. As deformações máximas de encurtamento foram de 1,50 ‰, 1,85 ‰ e 1,26 ‰, respectivamente.

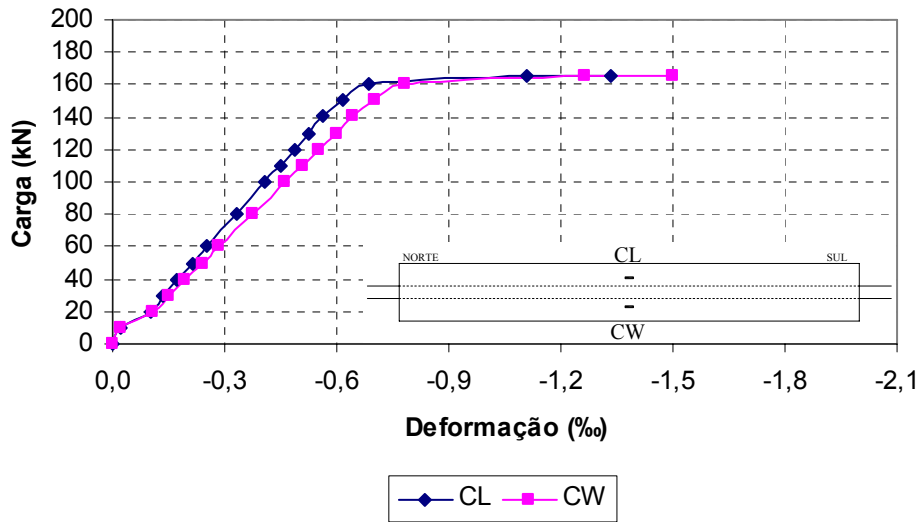


Figura 4.33 – Carga-deformação do concreto na viga VA – RBC

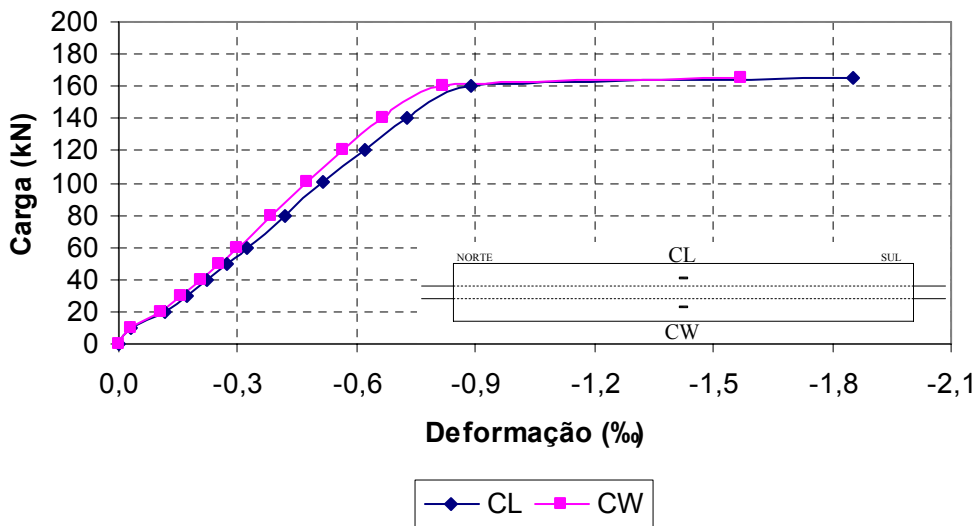


Figura 4.34 – Carga-deformação do concreto na viga VA – RBA

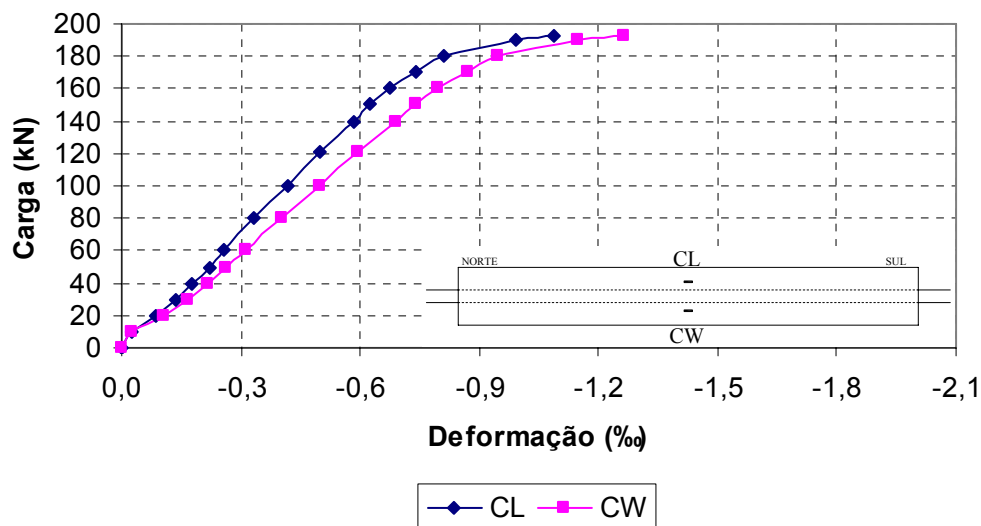


Figura 4.35 – Carga-deformação do concreto na viga VA – RMC

4.4.1.5 - Deformação nos reforços das vigas

O comportamento dos reforços utilizados nas vigas estão representados nos gráficos carga-deformação da Figura 4.36 à Figura 4.38, referentes aos ensaios de ruptura das vigas reforçadas do grupo A. As maiores deformações foram de 1,99 % na viga VA – RBC, extensômetro F1, de 1,55 % na viga VA – RBA, extensômetro F0, e de 6,70 % na viga VA – RMC, extensômetro F0.

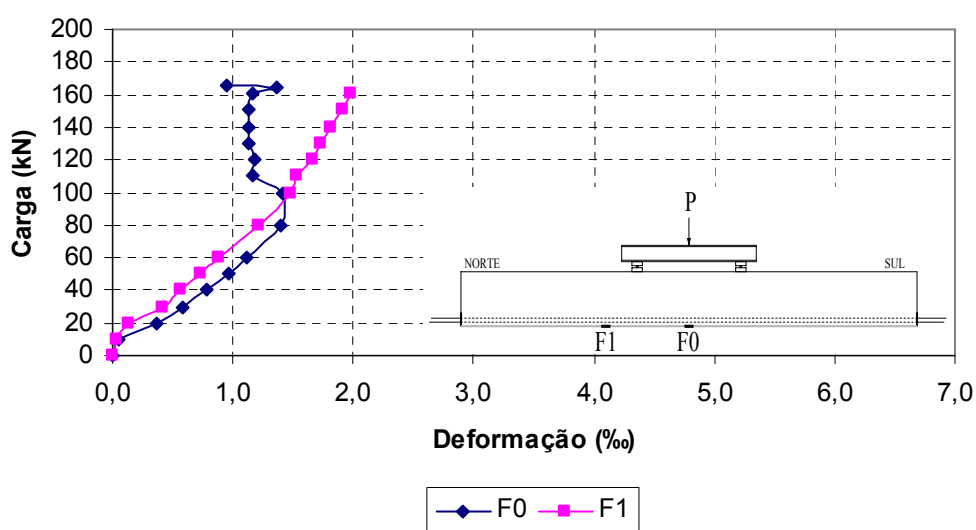


Figura 4.36 – Carga-deformação da barra de fibra de carbono na viga VA – RBC

O escorregamento dos reforços das vigas VA – RBC e VA – RBA ficaram bem evidentes na Figura 4.36 e Figura 4.37, onde as deformações dos reforços começaram a diminuir com o incremento de carga.

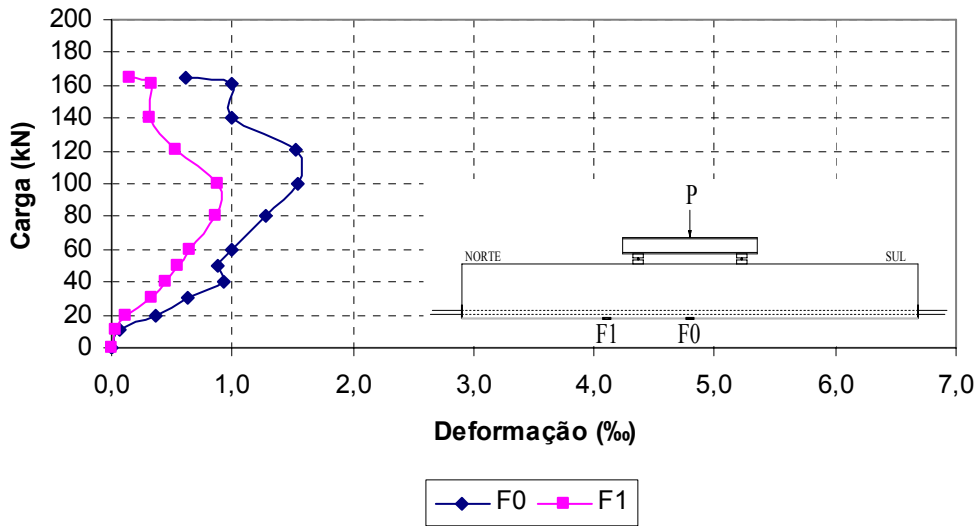


Figura 4.37 – Carga-deformação da barra de aço na viga VA – RBA

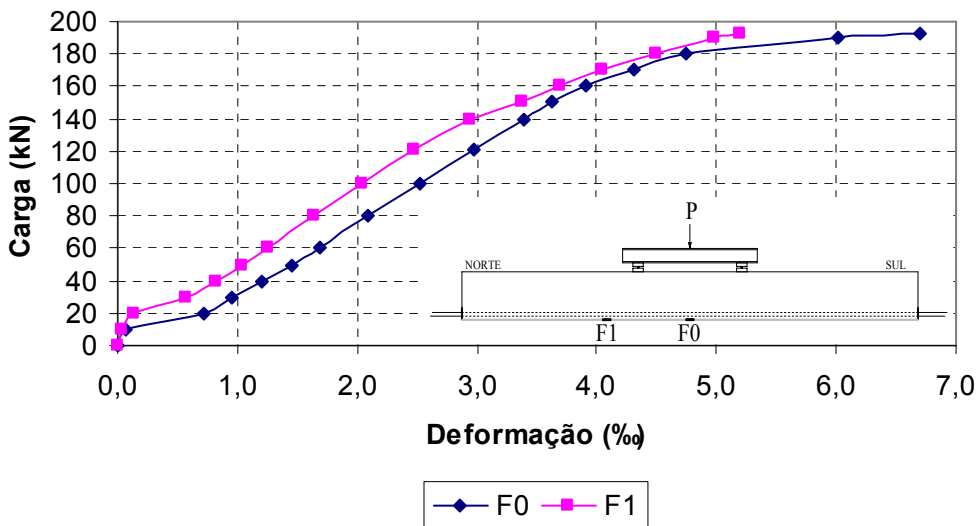


Figura 4.38 – Carga-deformação da manta de fibra de carbono na viga VA – RMC

4.4.1.6 - Deslocamentos verticais

A Figura 4.39, a Figura 4.40 e a Figura 4.41 ilustram os gráficos carga-deslocamento para os ensaios das vigas reforçadas do grupo A. A viga VA – RBC apresentou um grande

incremento na deformação vertical após o escorregamento do reforço e o escoamento da barra, o que impossibilitou a medida do deslocamento após o passo de carga de 160 kN. As medições dos deslocamentos verticais apresentaram os valores máximos no meio do vão de 48,63 mm, de 42,22 mm e de 42,10 mm nas vigas VA – RBC, VA – RBA e VA – RMC, respectivamente.

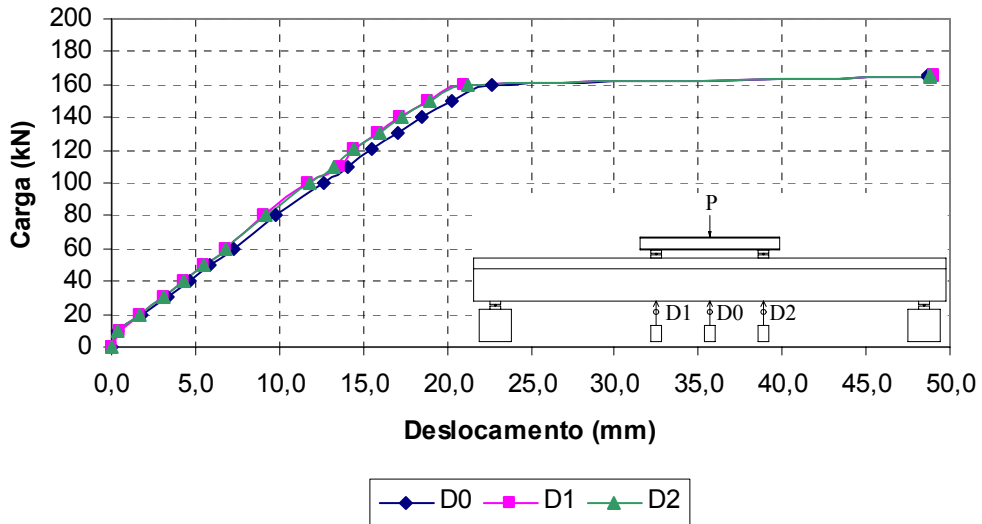


Figura 4.39 – Carga-deslocamento na viga VA – RBC

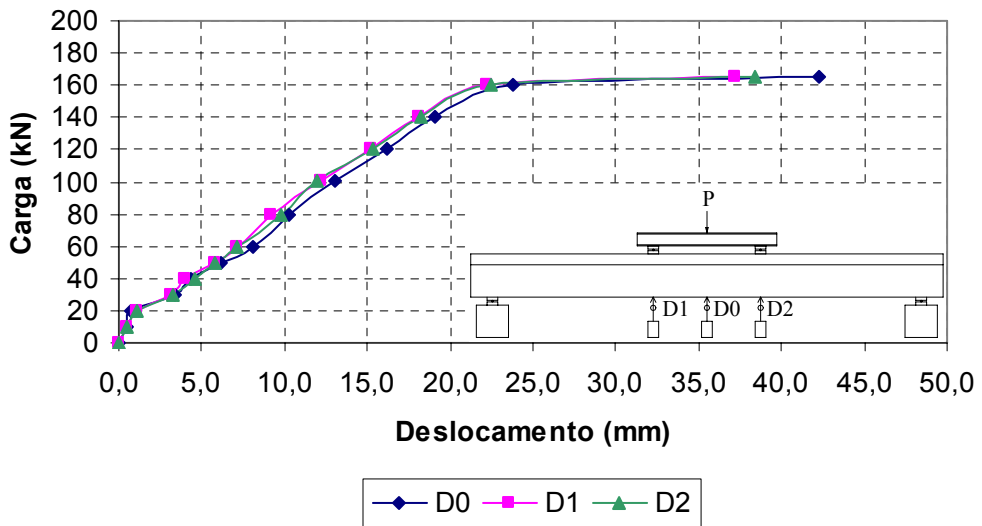


Figura 4.40 – Carga-deslocamento na viga VA – RBA

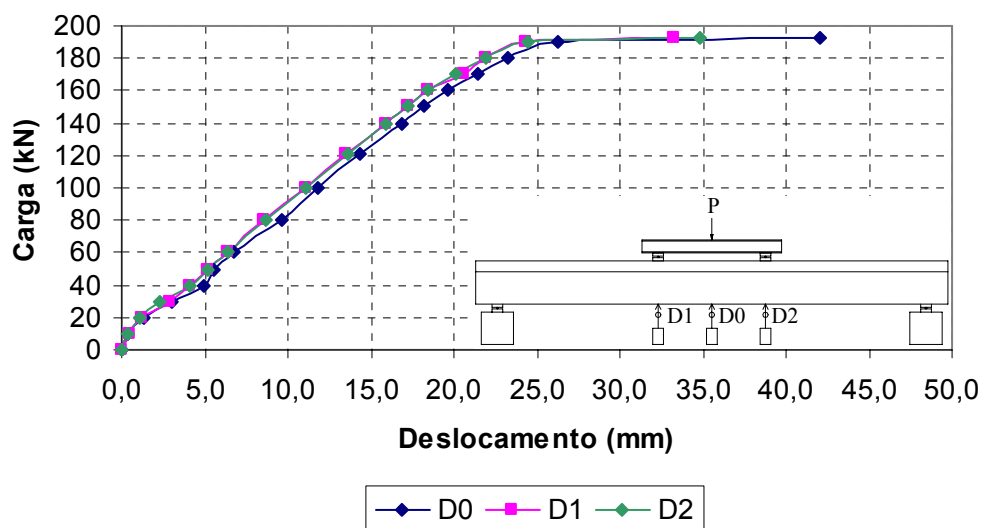


Figura 4.41 – Carga-deslocamento na viga VA – RMC

4.4.2 - Vigas do grupo B

As vigas do grupo B foram armadas à flexão com 5 barras de aço de 20 mm de diâmetro. As duas vigas reforçadas desse grupo, VB – RBA e VB – RMC, tinham dois tipos distintos de reforço, a viga VB – RBA foi reforçada com uma barra de aço de 8 mm utilizando a técnica NSMR e a viga VB – RMC foi reforçada com 2 camadas de manta de fibra de carbono coladas externamente.

4.4.2.1 - Modo e carga última

A viga VB – RBA, reforçada com a técnica NSMR com uma barra de aço de 8 mm de diâmetro, teve uma carga de ruptura de 397,7 kN. A ruptura ocorreu por escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto no meio do vão, conforme a Figura 4.42 e a Figura 4.43. A máxima deformação medida na barra de aço utilizada no reforço foi de 23,34 %, após o esmagamento, no extensômetro F0, e o máximo encurtamento medido na superfície do concreto foi de 1,60 %, no extensômetro CL, pois os extensômetros do concreto perderam sua eficiência perto da carga última.



Figura 4.42 – Detalhe do concreto na viga VB – RBA após a ruptura



Figura 4.43 – Viga VB – RBA após a ruptura

A viga VB – RMC, reforçada com mantas de fibra de carbono coladas externamente, teve uma carga última de 414,8 kN, com a ruptura do reforço, como indicado na Figura 4.44 e na Figura 4.45. A máxima deformação medida no compósito foi de 1,50 %, deformação muito menor que a deformação do aço da armadura de flexão, que estava em 13,94 % no estado limite último, mas o compósito deve ter deformado muito mais que os registrados pelos extensômetros pois o mesmo não escorregou, chegando à sua ruptura. Este fato deve ter ocorrido provavelmente pelo procedimento de colagem dos extensômetros adotados nesta viga.



Figura 4.44 – Detalhe da ruptura do reforço na viga VB – RMC



Figura 4.45 – Viga VB – RMC após o ensaio

A Tabela 4.8 mostra os valores das cargas últimas obtidas após a ruptura das vigas de referência e das vigas reforçadas do grupo B, bem como os modos de ruptura.

Tabela 4.8 – Carga de ruptura das vigas ensaiadas do grupo B

	Viga	P_u (kN)	Modo de ruptura
Grupo B	VB – REF	374,0	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VB – RBA	397,7	Escoamento do aço do reforço seguido pela ruptura do concreto
	VB - RMC	414,8	Ruptura do reforço com manta de fibra de carbono

4.4.2.2 - Deformação na armadura de flexão

Os gráficos de carga-deformação das armaduras de flexão das vigas reforçadas do grupo B estão apresentados na Figura 4.46 e na Figura 4.47. A viga VB – RBA apresentou uma deformação máxima de 23,34 ‰, registrado no extensômetro elétrico L0. Na viga VB – RMC a máxima deformação foi de 13,94 ‰, no extensômetro L0.

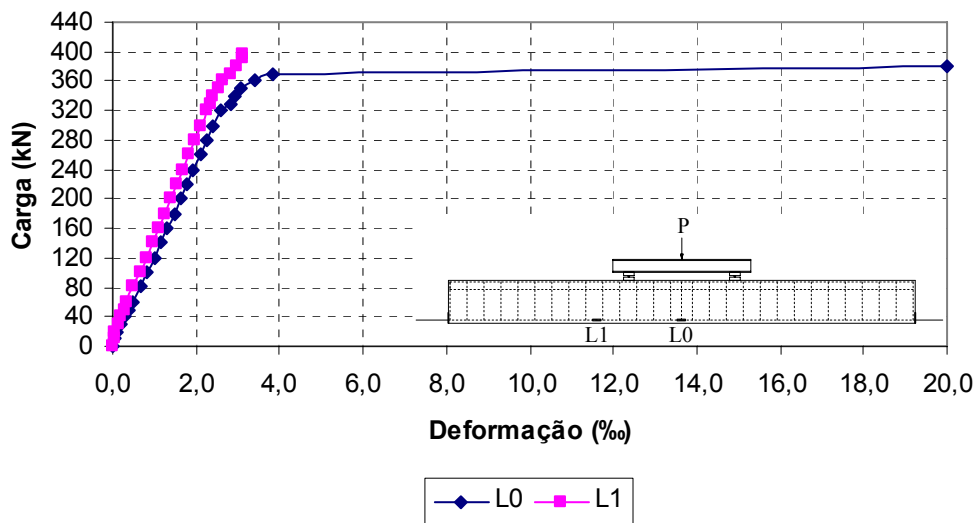


Figura 4.46 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – RBA

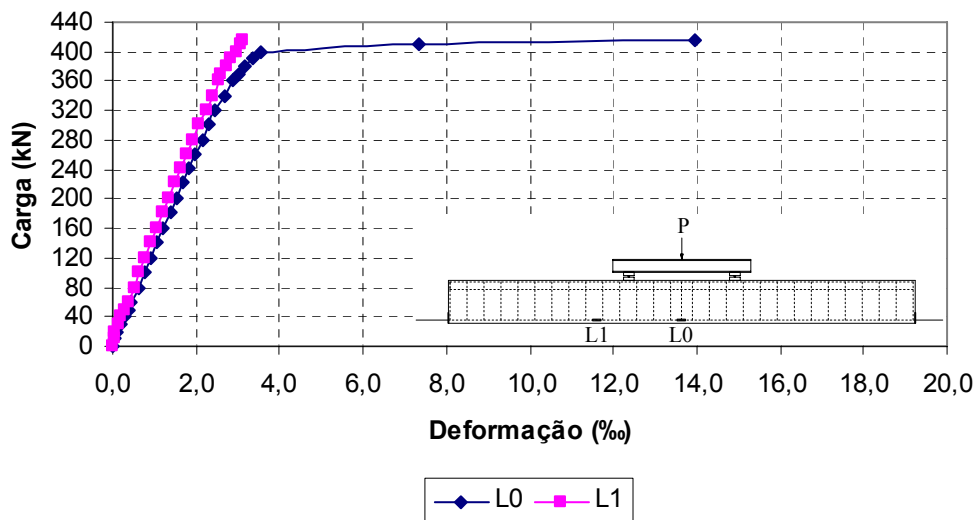


Figura 4.47 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – RMC

4.4.2.3 - Deformação na armadura de cisalhamento

Na Figura 4.48 e na Figura 4.49 encontram-se ilustrados os gráficos carga-deformação das armaduras de cisalhamento das vigas reforçadas do grupo B. As máximas deformações registradas foram de 1,93 ‰ na viga VB – RBA e de 1,31 ‰ na viga VB - RMC

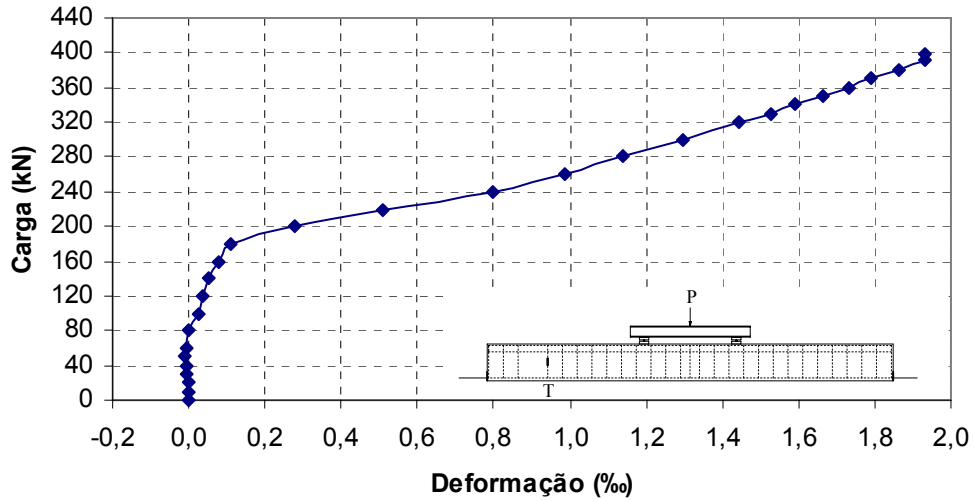


Figura 4.48 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VB – RBA

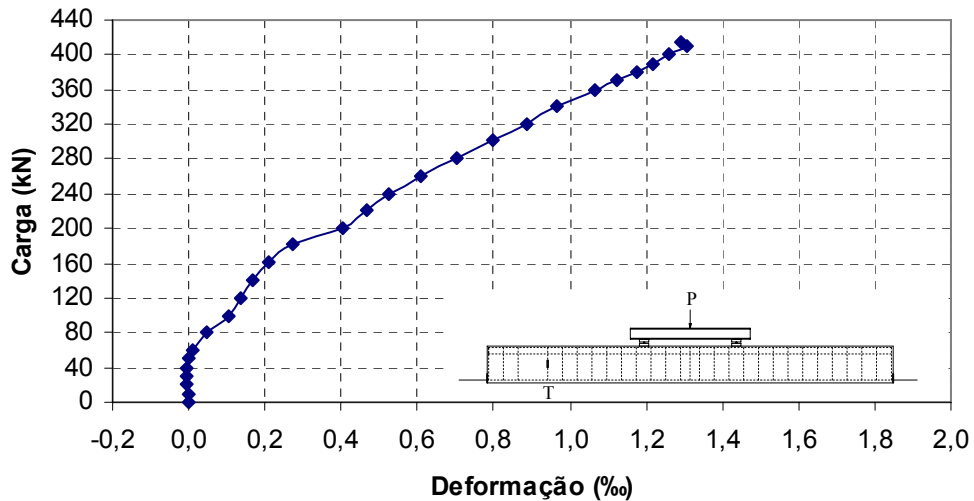


Figura 4.49 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento na viga VB – RMC

4.4.2.4 - Deformação no concreto

A Figura 4.50 e a Figura 4.51 apresentam os gráficos carga-deformação no concreto no bordo superior ensaios de ruptura das vigas reforçadas VB – RBA e VB – RMC, que apresentaram encurtamentos máximos de 1,60 ‰ e 1,88 ‰, respectivamente.

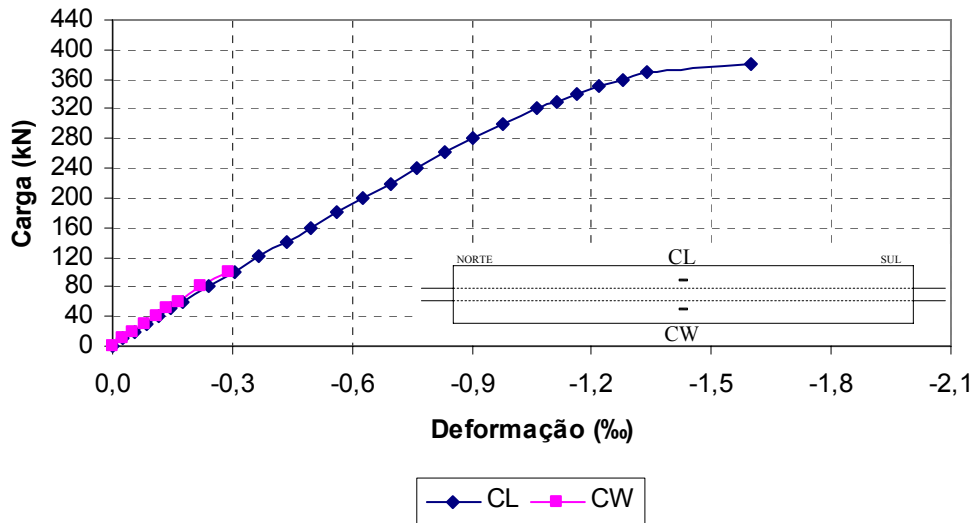


Figura 4.50 – Carga-deformação do concreto na viga VB - RBA

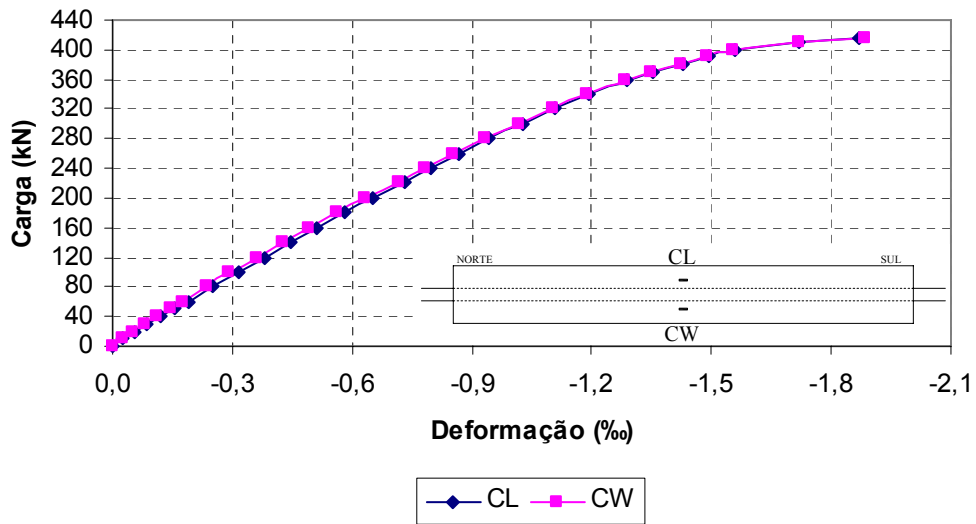


Figura 4.51 – Carga-deformação do concreto na viga VB – RMC

4.4.2.5 - Deformação no reforço das vigas

O comportamento dos reforços das vigas está apresentado nos gráficos carga-deformação da Figura 4.52 e da Figura 4.53, referentes aos ensaios de ruptura das vigas reforçadas do grupo B. As maiores deformações registradas foram de 23,34 ‰ (F0) na viga VB – RBA e 1,50 ‰ (F0) na viga VB – RMC.

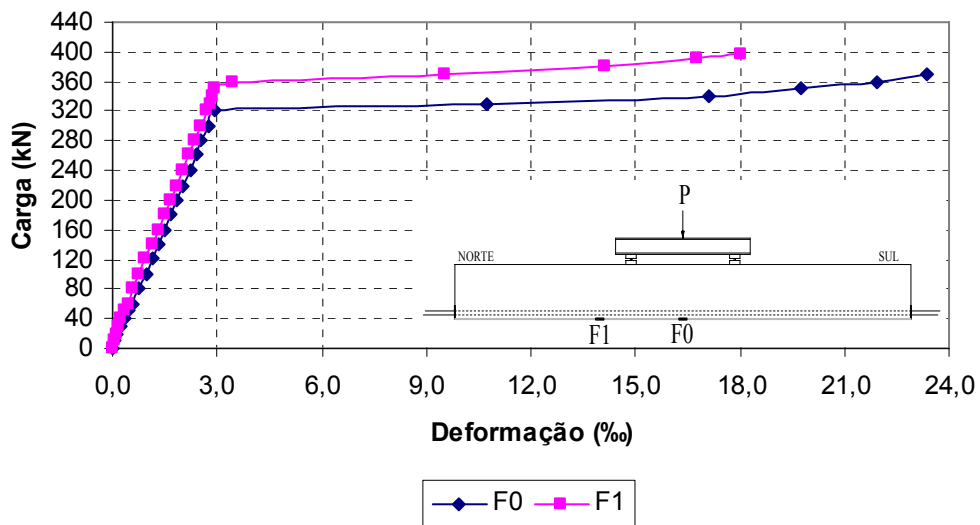


Figura 4.52 – Carga-deformação da barra de aço na viga VB – RBA

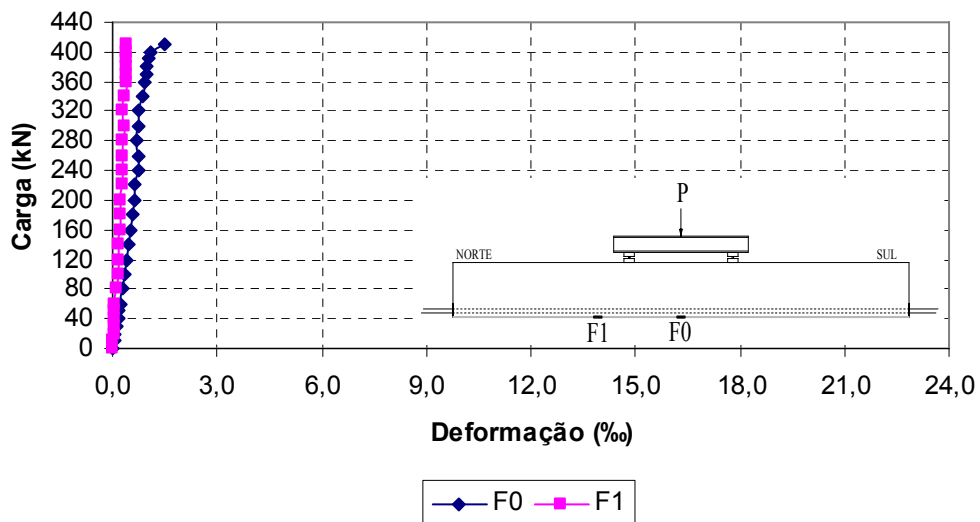


Figura 4.53 – Carga-deformação da armadura de flexão na viga VB – RMC

Vale ressaltar que o procedimento para a colagem dos extensômetros na viga VB – RMC aparentemente não foi eficaz, pois não permitiu registrar a real deformação do reforço, procedimento modificado na colagem dos extensômetros na viga VA – RMC, levando a bons resultados.

4.4.2.6 - Deslocamentos verticais

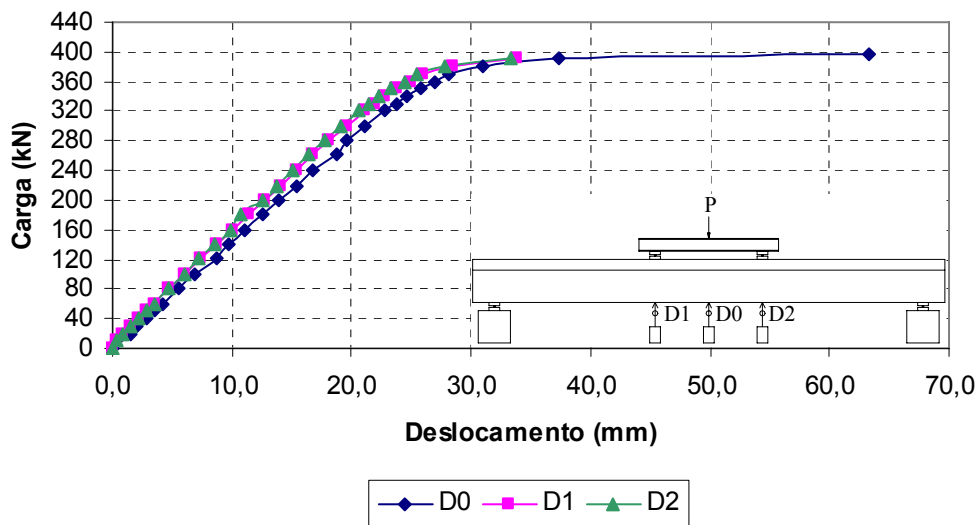


Figura 4.54 – Carga-deslocamento na viga VB - RBA

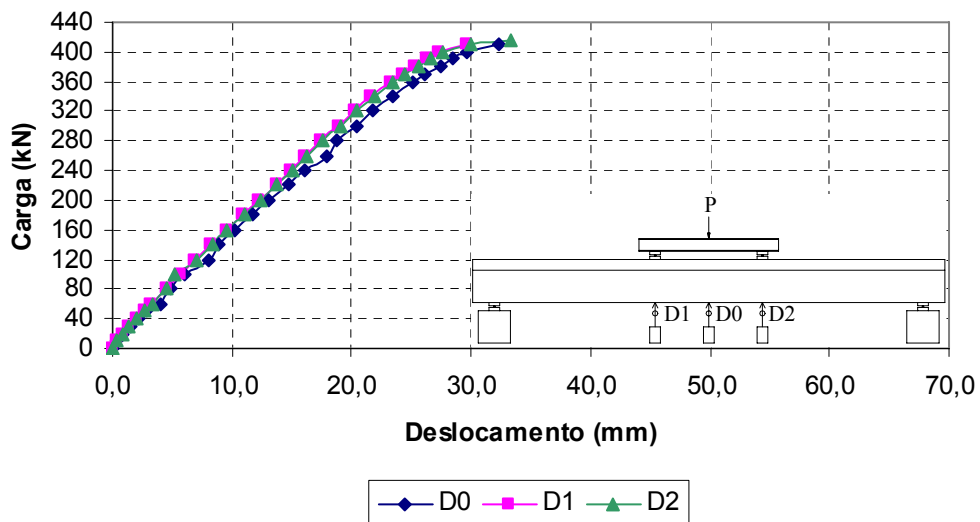


Figura 4.55 – Carga-deslocamento na viga VB – RMC

A Figura 4.54 e a Figura 4.55 ilustram os gráficos carga-deslocamento das vigas reforçadas do grupo B. Na viga VB – RBA, que apresentou um deslocamento vertical de 63,23 mm, foi necessário reposicionar o defletômetro após o término do curso de 50 mm dos mesmos, a fim de registrar novas leituras, o que pode gerar uma pequena imprecisão. Os deslocamentos verticais apresentaram valores máximos no meio do vão de 63,23 mm e 32,37 mm nas vigas VB – RBA e VB – RMC, respectivamente.

4.4.3 - Fissuração das vigas

A Figura 4.56 à Figura 4.62 apresentam as fissuras nas vigas de referência e nas vigas reforçadas observadas.



Figura 4.56 – Fissuração na viga VA – REF, após o ensaio

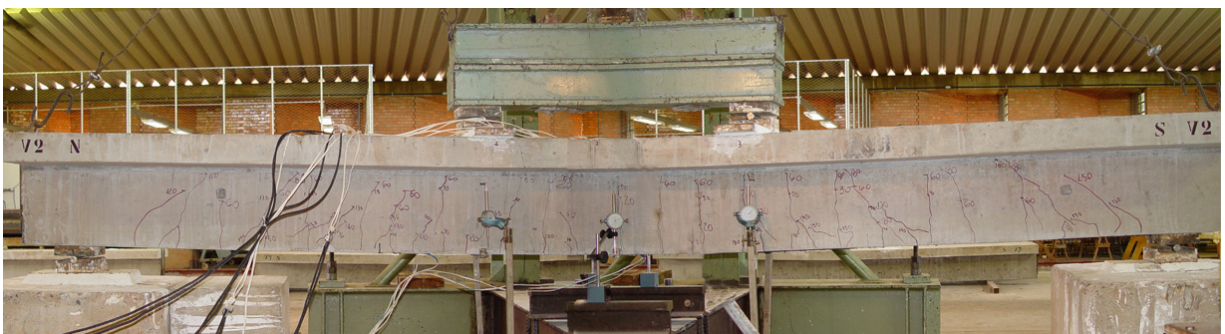


Figura 4.57 – Fissuração na viga VA – RBC, após o ensaio



Figura 4.58 – Fissuração na viga VA – RBA, após o ensaio



Figura 4.59 – Fissuração na viga VA – RMC, após o ensaio



Figura 4.60 – Fissuração na viga VB – REF, após o ensaio



Figura 4.61 – Fissuração na viga VB – RBA, após o ensaio



Figura 4.62 – Fissuração na viga VB – RMC, após o ensaio

A Tabela 4.9 apresenta as cargas da primeira fissura de flexão e de cisalhamento, observadas durante o ensaio. Estes dados tem a precisão de 10 kN devido os mesmos serem obtidos por observação visual.

Tabela 4.9 – Cargas da primeira fissura nas vigas e observações do ensaio

Viga	Carga da 1ª fissura de flexão (kN)	Carga da 1ª fissura de cisalhamento (kN)	Observações
VA – REF	20	80	
VA – RBC	20	80	
VA – RBA	20	60	
VA – RMC	20	80	Com 140 kN surgiram fissuras de dentro das gravatas
VB – REF	20	140	
VB – RBA	30	120	
VB – RMC	30	120	Com 220 kN surgiram fissuras de dentro das gravatas

Na Figura 4.63 está o esquema de fissuração das vigas, obtido através das leituras superficiais das fissuras:

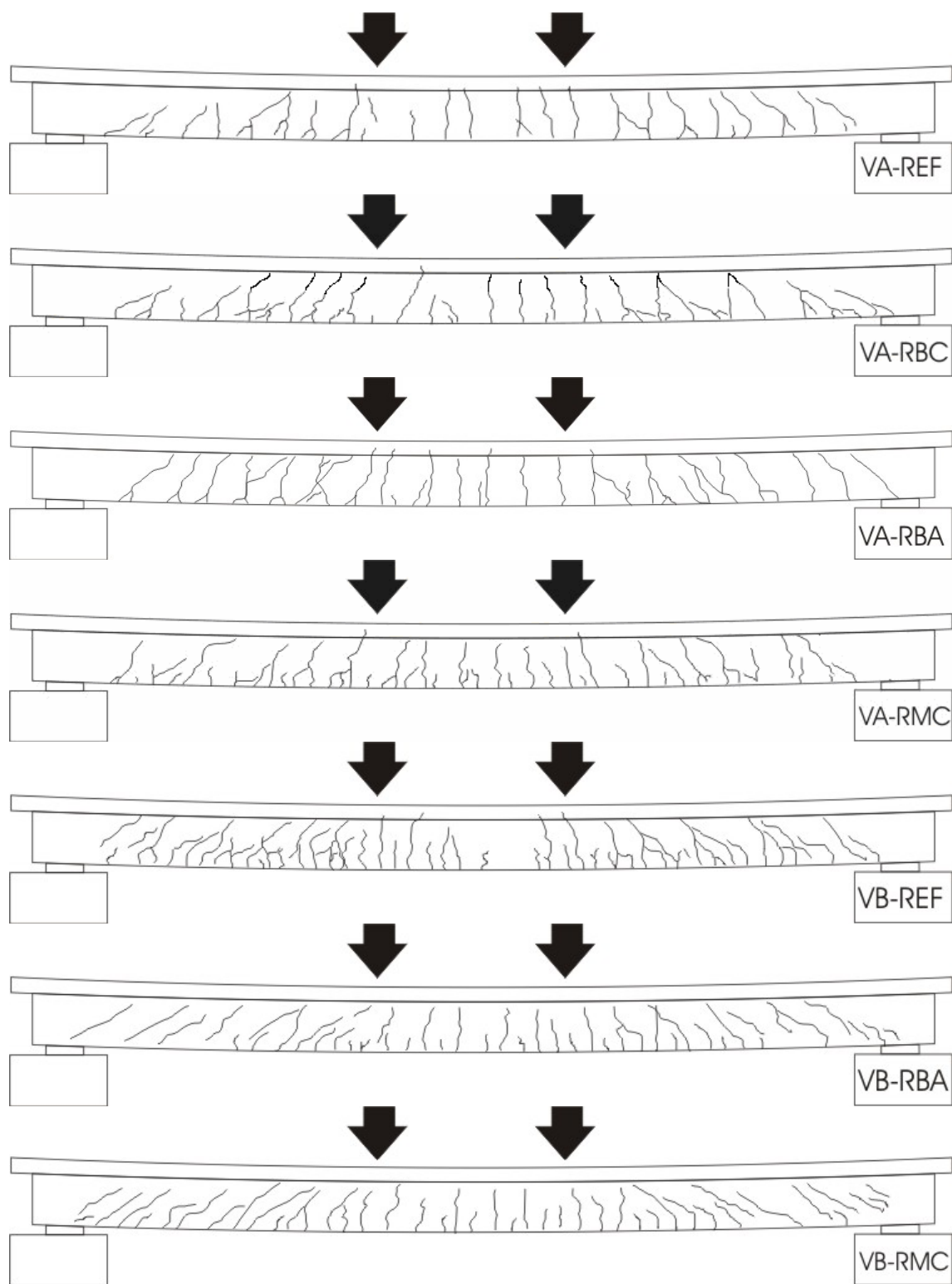


Figura 4.63 – Esquema de fissuração das vigas, após o ensaio

Observando o padrão de fissuração apresentado acima, pode-se concluir que:

- A simetria do padrão de fissuração em relação ao eixo vertical da seção central da viga indica que a carga aplicada no perfil foi distribuída simetricamente na viga ensaiada;
- A carga de fissuração em todas as vigas do grupo A foi de 20 kN, enquanto nas vigas do grupo B, ficou entre 20 kN e 30 kN;
- Nas vigas do grupo B foram observadas ramificações das fissuras de flexão próximas ao bordo inferior devido a maior taxa de armação utilizada. Fissuras de cisalhamento foram observadas com maior intensidade nesse grupo em face da maior capacidade de carga das vigas.

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - PRELIMINARES

Neste capítulo é apresentado o recálculo das vigas, considerando-se as resistências dos materiais obtidas em laboratório, e a análise dos resultados obtidos no programa experimental.

5.2 - ANÁLISE DAS VIGAS ENSAIADAS

5.2.1 - Carga última e modos de ruptura

A Tabela 5.1 apresenta a carga última experimental das vigas ensaiadas, P_u , o acréscimo de resistência à flexão em relação às vigas de referência e os modos de ruptura observados. A rigidez axial do reforço $(AE)_R$ foi também incluída na tabela.

Os resultados das vigas reforçadas do grupo A, VA - RBC e VA - RBA, foram prejudicados pelo descolamento muito prematuro do reforço em razão dos problemas relacionados ao adesivo citados no capítulo 3.

Tabela 5.1 – Acréscimo na carga última de flexão para cada uma das vigas reforçadas

	<i>Viga</i>	$(AE)_R$ (kN)	P_u (kN)	<i>Incremento</i> (%)	<i>Modo de ruptura</i>
<i>Grupo A</i> 2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF	-	155	-	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBC	11545	166	7,1%	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBA	10556	165	6,5 %	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RMC	9257	193	24,5 %	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão
<i>Grupo B</i> 5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF	-	374	-	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VB – RBA	10556	398	6,4 %	Esmagamento do concreto após escoamento da barra de aço de reforço
	VB – RMC	9257	415	11,0 %	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão

As vigas reforçadas com MFC coladas externamente foram as que tiveram maior incremento de resistência, com destaque para a viga VA – RMC, que teve um ganho de 24,5 % em relação à viga VA – REF, e a viga VB – RMC, que teve um ganho de 11,0 % em relação a sua viga de referência. Isto se deve a influência da relação entre a taxa de armação da viga e o reforço utilizado, ou seja, para um mesmo reforço, quanto maior a taxa de armação da viga, menor o acréscimo de resistência à flexão proporcionada pelo reforço. As vigas VA – RBC e VA – RBA apresentaram ganhos de 7,1 % e 6,5 %, respectivamente, apesar do descolamento do reforço citado. A viga VB – RBA teve um ganho de 6,4 % em relação à viga de referência, menor do que o obtido na viga VB – RMC, em face do reforço com barra de aço deixar de contribuir a partir do escoamento do aço, o que ocorre em deformações entre 2 ‰ a 3 ‰, bem abaixo do valor último normalmente observados nos FRP.

As vigas reforçadas por Lima (2004) apresentaram ganhos maiores para o mesmo tipo e quantidade de reforço. Para as vigas reforçadas com barra de carbono ficaram em 53,5% ($\rho = 0,63\%$) e 14,5% ($\rho = 1,57\%$) e nas vigas reforçadas com manta de fibra de carbono ficaram em 51,1% ($\rho = 0,63\%$) e 25,6% ($\rho = 1,57\%$). No segundo caso, apesar do material ter a mesma especificação, o mesmo apresentou resistência abaixo do caracterizado pelo fabricante.

5.2.2 - Deformação da armadura de flexão

A Figura 5.1 apresenta o gráfico carga-deformação no extensômetro L0, situado no meio do vão. Todas as vigas apresentaram escoamento da armadura antes da ruptura, evidenciado pelo patamar de escoamento bem definido apresentado no gráfico.

Nas vigas do grupo A, a maior deformação registrada foi de 18,7 ‰ na viga VA – RBC, viga reforçada com uma barra de carbono. No grupo B, a maior deformação foi de 20 ‰, na viga VB – RBA, reforçada com uma barra de aço.

Pode-se notar que as cargas que iniciaram o escoamento das armaduras de flexão nas vigas reforçadas foram maiores que as das vigas de referência. As cargas de escoamento nas vigas VA - RMC e VB – RMC tiveram incrementos de 20 kN e 20 kN, ficando 15 % e 6 % acima das observadas nas respectivas vigas de referência. Provavelmente este

expressivo retardo no início de escoamento das armaduras ocorreria com a viga VA – RBC, reforçada com uma barra de carbono, contudo, não ficou evidenciado devido ao escorregamento do reforço. Também houve retardo no início do escoamento das armaduras das vigas VA – RBA e VB – RBA, ambas reforçadas com uma barra de aço, contudo com um menor ganho, em torno de 10 e 20 kN, respectivamente, ficando 8 % e 7 % acima das cargas observadas nas respectivas vigas de referência. A carga de escoamento das vigas reforçadas com 1 barra de aço foram inferiores às observadas nas vigas reforçadas com MFC, pois o aço do reforço deve ter escoado, o que ocorre para uma deformação entre 2‰ e 3‰, deixando de proporcionar incrementos adicionais de resistência e rigidez.

As barras de aço da armadura de flexão atingiram a deformação de escoamento em torno da deformação de 2,6 ‰, confirmando a deformação de escoamento atingida durante o ensaio das barras, que foi de 2,6 ‰.

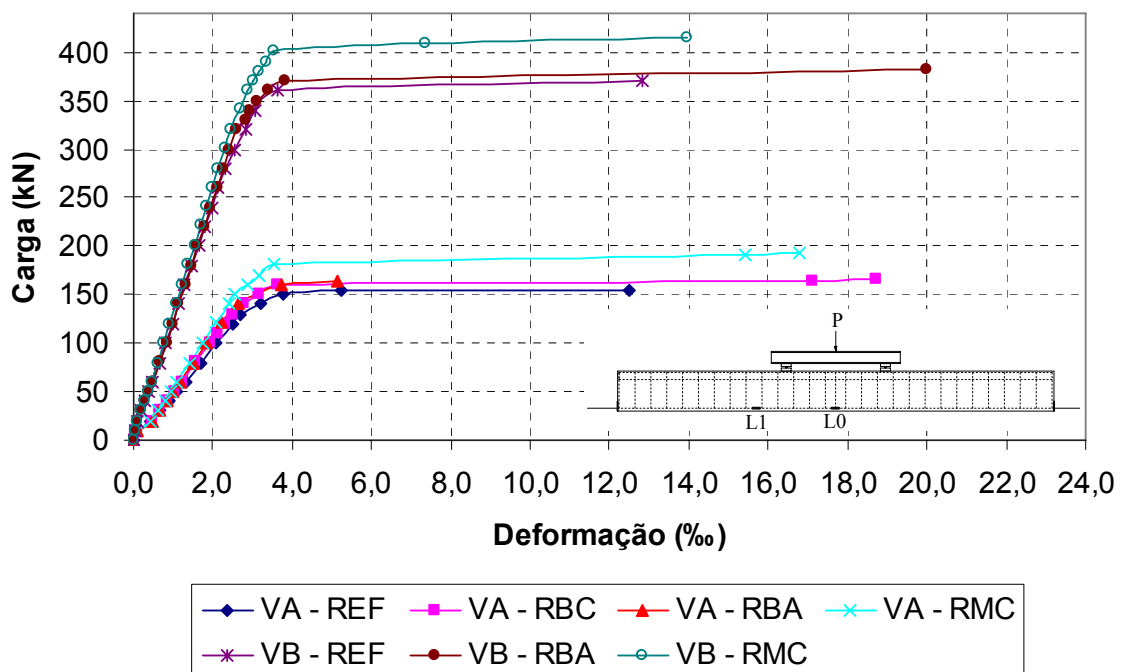


Figura 5.1 – Deformação da armadura de flexão das vigas – extensômetro L0

Na Figura 5.2 é apresentado o gráfico carga-deformação do extensômetro L1, situado a 80 cm do meio do vão, ou seja, a 120 cm do apoio. Notou-se que as barras de aço da armadura de flexão estavam no limite elástico nesta região, com o início do escoamento em algumas vigas, como por exemplo na viga VA – RMC.

A Tabela 5.2 mostra as deformações últimas e as cargas de início de escoamento registradas na armadura de flexão.

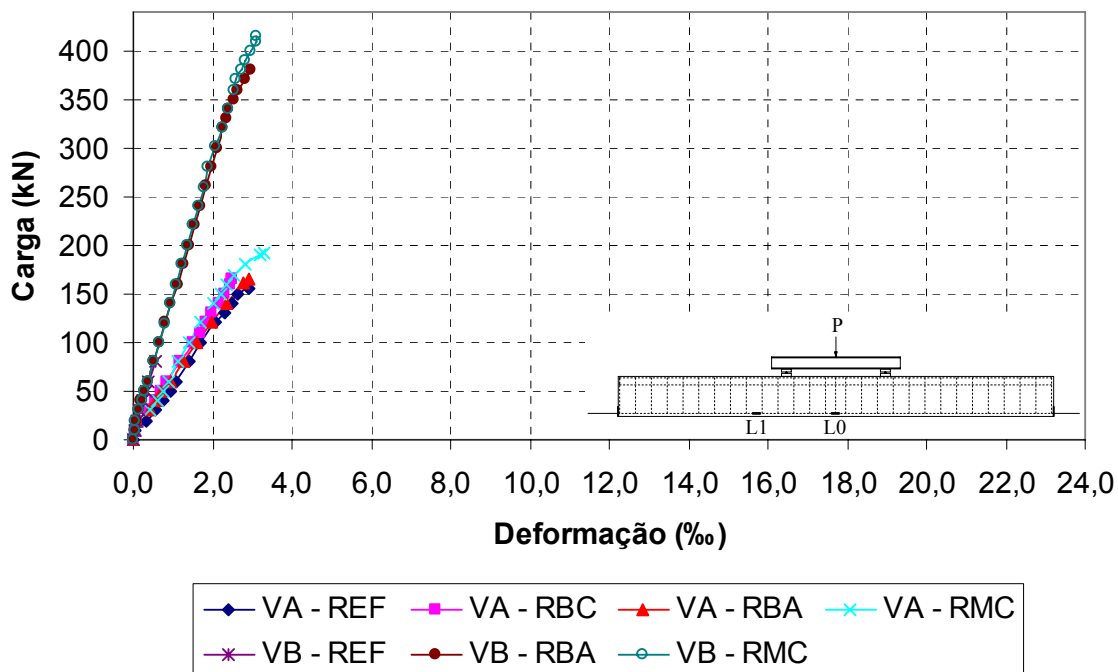


Figura 5.2 – Deformação da armadura de flexão das vigas – extensômetro L1

Tabela 5.2 – Deformação e carga de escoamento da armadura de flexão

	Viga	Máxima deformação do aço (‰)		Carga de escoamento (kN) Extensômetro L0	Carga de ruptura (kN)
		Extensômetro L0	Extensômetro L1		
<i>Grupo A</i> 2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF	12,5	2,9	130	155
	VA – RBC	18,7	2,5	140	166
	VA – RBA	5,1*	2,9	140	165
	VA – RMC	16,8	3,3	150	193
<i>Grupo B</i> 5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF	12,8	0,5*	300	374
	VB – RBA	20,0	3,0	320	398
	VB – RMC	13,9	3,1	320	415
Deformação de escoamento do aço ϕ 20,0 mm: 2,6 ‰					

* Problemas no extensômetro

5.2.3 - Deformação da armadura de cisalhamento

Na Figura 5.3 é mostrada as deformações medidas na armadura transversal de cisalhamento no extensômetro T.

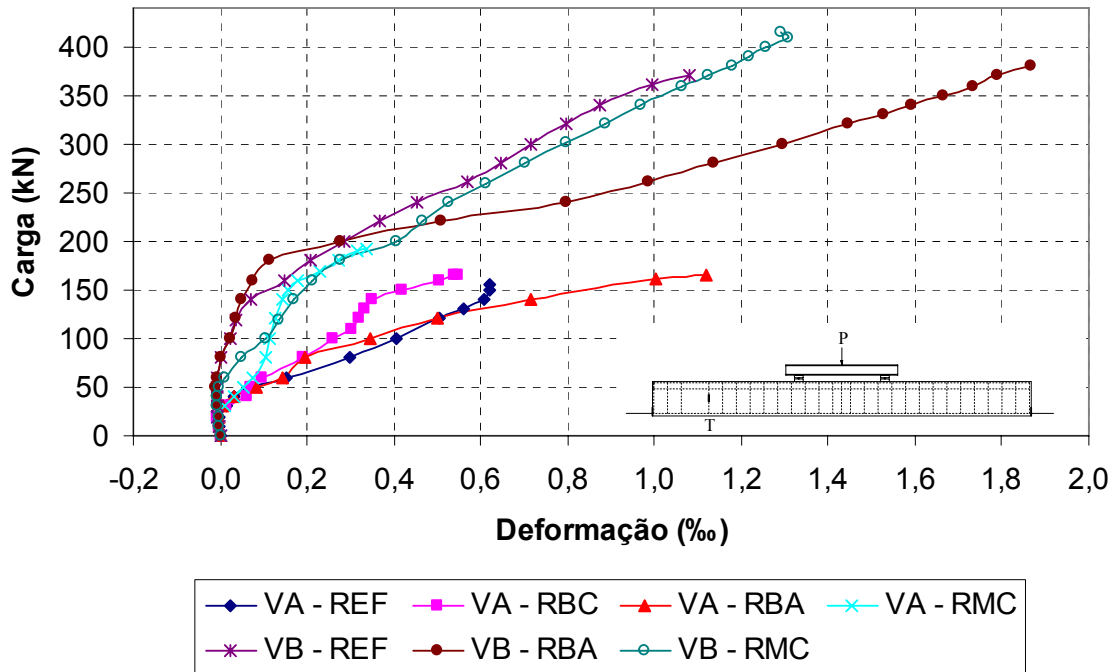


Figura 5.3 – Deformação da armadura de cisalhamento – extensômetro T

Em nenhuma das vigas foi atingida a deformação de escoamento das barras de aço da armadura de cisalhamento.

Em todos os gráficos os extensômetro dos estribos apresentaram deformações de encurtamento no início do carregamento. Isto ocorre porque os estribos instrumentados estavam no caminho do arco comprimido antes da fissuração diagonal. Após a fissuração os estribos passaram a ser tracionados.

É visível a redução da deformação no estribo da viga VA – RMC em comparação com as demais vigas, provavelmente devido à contribuição do reforço na resistência aos esforços cisalhantes ou devido às fissuras diagonais de cisalhamento não terem atuado próximo ao estribo instrumentado. A deformação da armadura transversal na viga VB – RBA ficou acima da observada na viga VB – REF, fato ocorrido provavelmente devido às fissuras de cisalhamento terem atuado próximo ao estribo instrumentado. Na Tabela 5.3 mostra as deformações máximas registradas com suas respectivas cargas.

Tabela 5.3 – Deformação da armadura de cisalhamento – extensômetro T

	Viga	Máxima deformação (‰)	Carga de ruptura (kN)
<i>Grupo A</i> 2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF	0,6	155
	VA – RBC	0,6	166
	VA – RBA	1,1	165
	VA – RMC	0,3	193
<i>Grupo B</i> 5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF	1,1	374
	VB – RBA	1,9	398
	VB – RMC	1,3	415
Deformação de escoamento do aço ϕ 8,0 mm: 2,5 ‰			

5.2.4 - Deformação do concreto

A Figura 5.4 e a Figura 5.5 apresentam os gráficos carga-deformação do concreto no bordo superior, medida com os extensômetro elétricos CL e CW. Como mostrado nos gráficos, não foram observadas deformações que levassem ao esmagamento do concreto, pois em todas as vigas não foram registradas deformações de encurtamento acima do limite de 3,0‰ do ACI 318:02 e de 3,5 ‰ da NBR 6118:03, conforme Tabela 5.4. Cabe ressaltar que não foi possível mensurar a deformação última do concreto na ruptura da viga VB – RBA, por esmagamento do concreto, em razão de problemas nos extensômetros.

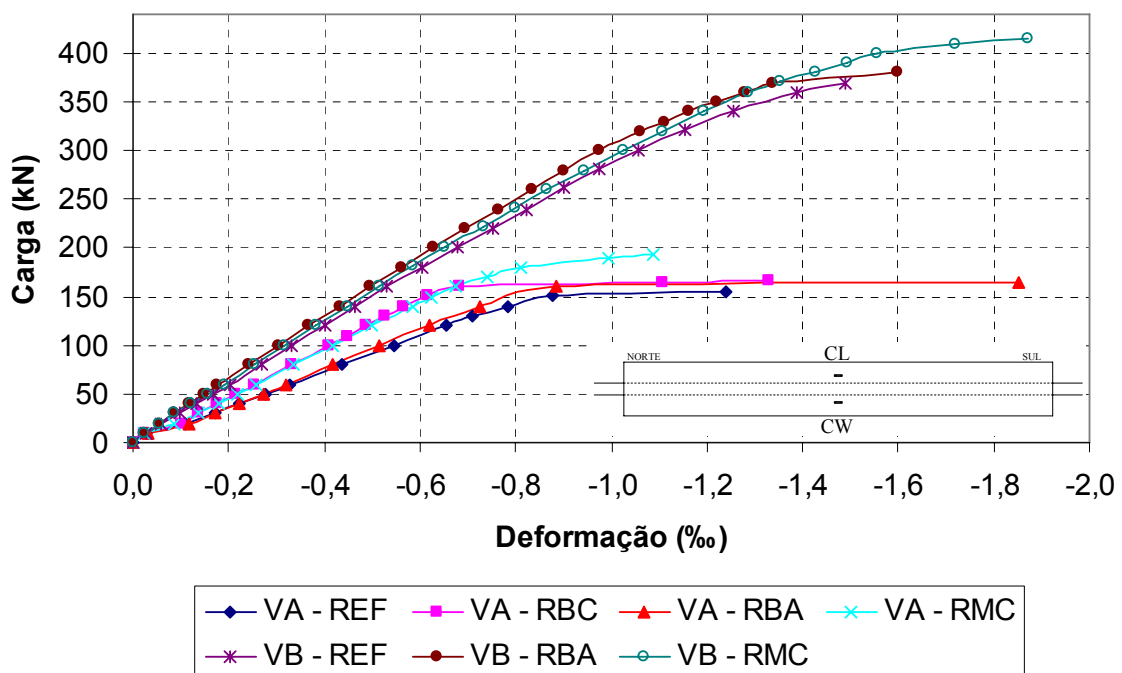


Figura 5.4 – Deformação na superfície do concreto – extensômetro CL

Pode-se notar que no grupo A houve um aumento de rigidez nas vigas VA – RBC e VA – RMC, evidenciado no extensômetro CL, mas não confirmado pelo extensômetro CW, sendo que na viga VA - RBC as deformações do concreto mudaram seu comportamento após o escorregamento do reforço, ficando com desempenho semelhante ao da viga VA – REF.

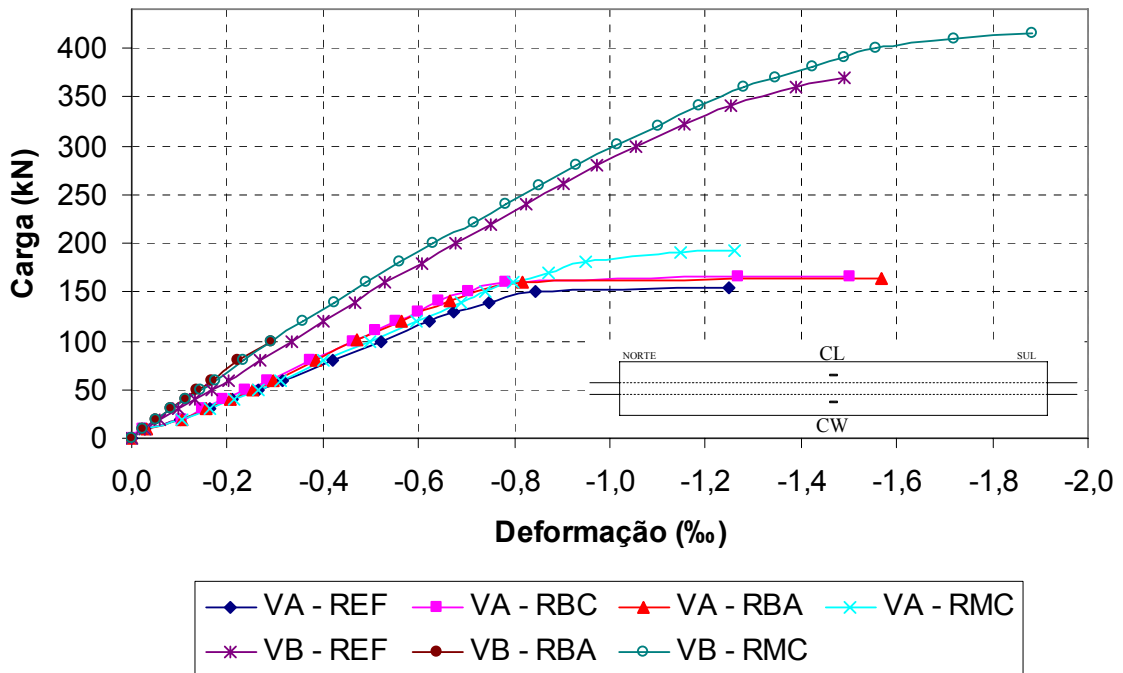


Figura 5.5 – Deformação na superfície do concreto – extensômetro CW

Tabela 5.4 – Deformação do concreto

	Viga	Máxima deformação medida (‰)		Carga de ruptura (kN)
		Extensômetro CL	Extensômetro CW	
<i>Grupo A</i> 2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF	1,2	1,3	155
	VA – RBC	1,3	1,5	166
	VA – RBA	1,9	1,6	165
	VA – RMC	1,1	1,3	193
<i>Grupo B</i> 5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF	1,5	1,5	374
	VB – RBA	1,6	0,3*	398
	VB – RMC	1,9	1,9	415

* Extensômetro defeituoso

5.2.5 - Deformação dos reforços

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 apresentam as deformações dos reforços utilizados nas vigas nos extensômetros F0 e F1, colados no meio do vão e a 80 cm do vão, respectivamente.

As deformações medidas pelos extensômetro F0 confirmam que houve o descolamento dos reforços das vigas VA – RBC e VA – RBA para uma carga próxima de 100 kN, em torno de 60 % da carga última, pela visível variação de deformações durante o ensaio.

Verificou-se uma mudança de inclinação na curva carga-deformação na viga VA – RMC, aproximadamente na carga de 150 kN, devido ao início do escoamento da armadura de flexão. O reforço com MFC atingiu sua deformação limite durante o ensaio, comprovado pela sua ruptura, na deformação de 6,7%. Na iminência da ruína da viga, as deformações no aço estavam bem superiores às do reforço, sugerindo que o reforço já estava em processo de ruptura antes da carga última observada. Os resultados na viga VB – RMC não ficaram compatíveis com os esperados em razão de problemas no procedimento de colagem dos extensômetros relatados no item 3.3.2. A viga VB – RBA, que não apresentou descolamento do reforço, mostrou um patamar de escoamento bem definido, iniciado na carga de 320 kN, para F0, e de 350 kN para F1.

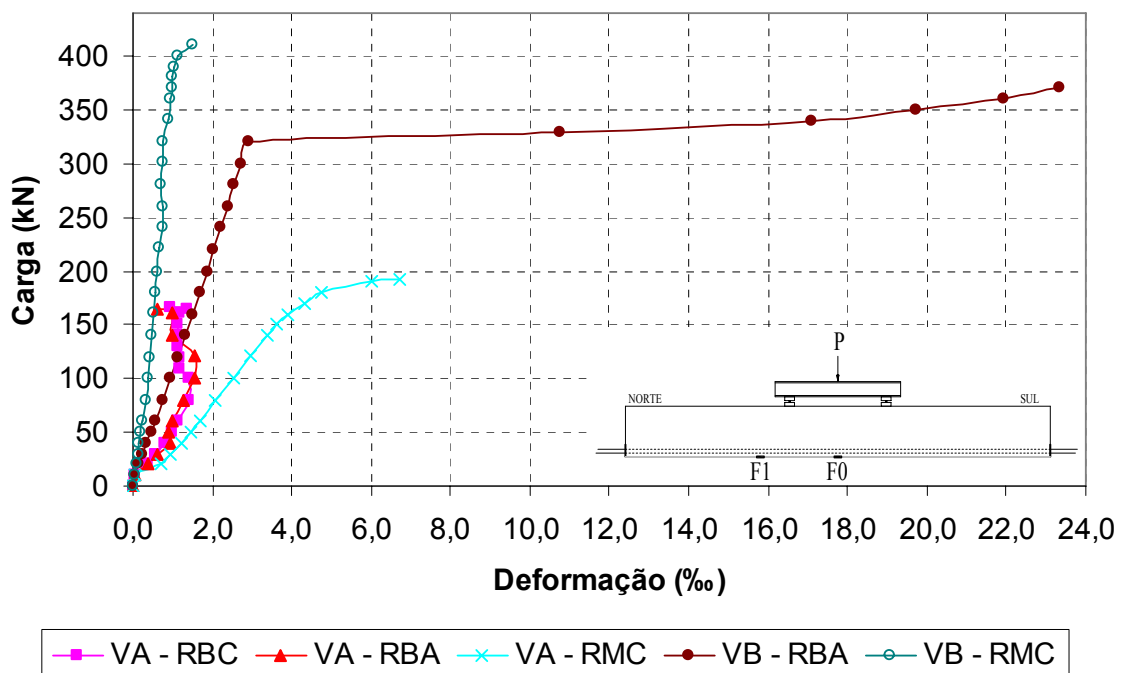


Figura 5.6 – Deformação dos reforços – extensômetro F0

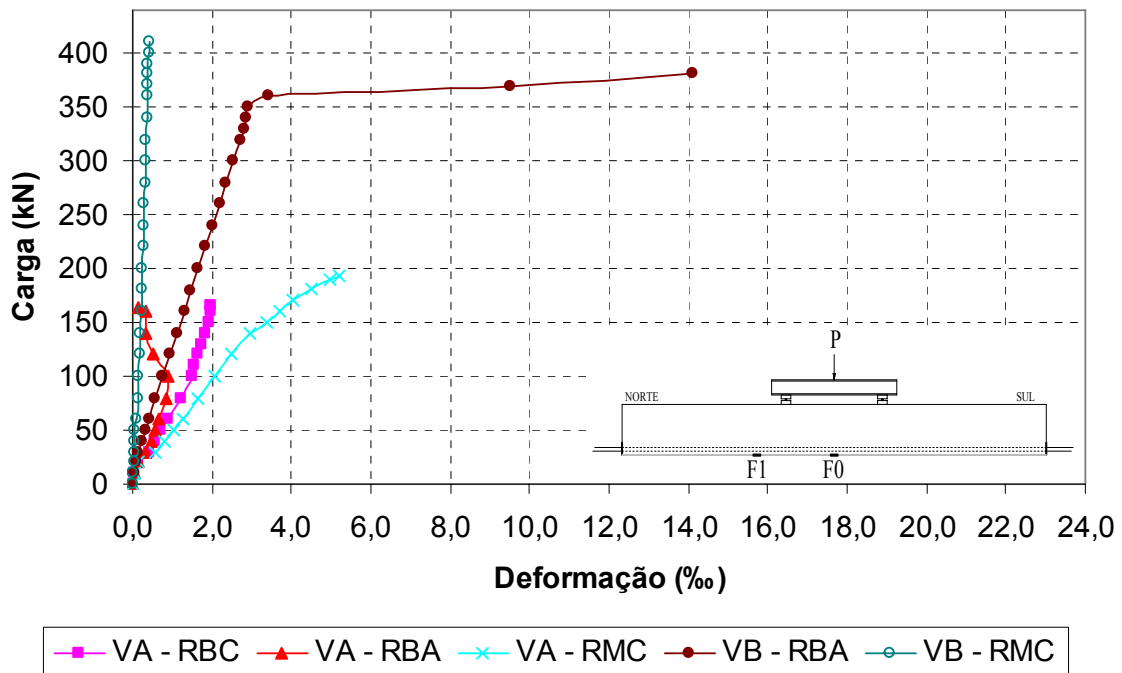


Figura 5.7 – Deformação dos reforços – extensômetro F1

Tabela 5.5 – Deformação dos reforços e as respectivas cargas

	Viga	Extensômetro F0		Extensômetro F1		Carga de ruptura (kN)
		Máx. deformação (‰)	Carga registrada (kN)	Máx. deformação (‰)	Carga registrada (kN)	
<i>Grupo A</i> 2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – RBC	1,6*	100	2,0*	160	166
	VA – RBA	1,4*	100	0,9*	100	165
	VA – RMC	6,7	193	5,2	193	193
<i>Grupo B</i> 5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – RBA	23,3	370	18,0	397	398
	VB – RMC	1,5**	410	0,4**	410	415
Deformação de escoamento do aço ϕ 8,0 mm: 2,5 ‰ Deformação última da barra de FRP ϕ 10,0 mm: 13,4 ‰ Deformação última da manta de FRP: 6,4 ‰						

* Descolamento prematuro do reforço

** Problema na colagem dos extensômetros

5.2.6 - Deslocamentos verticais

A Figura 5.8, a Figura 5.8 e a Figura 5.10 apresentam os resultados dos deslocamentos verticais, mostrados nos defletômetros D0, posicionado no meio do vão, D1 e D2, posicionados nos pontos de aplicação das cargas.

Na Figura 5.8, as vigas do grupo A apresentaram praticamente a mesma rigidez que a viga de referência, com exceção da viga VA – RMC, que mostrou uma maior rigidez que as demais. A presença do reforço, além de inibir a formação e abertura das fissuras, evitando uma maior redução na rigidez da viga, retarda o início de escoamento da armadura de flexão. Este fato é evidenciado pelo início do comportamento plástico, observado na viga VA-REF a partir da carga de 130 kN, com deslocamento de 18,4 mm, e na viga VA-RMC a partir da carga de 150 kN, com deslocamento de 18,3 mm. Na carga de 130 kN, a viga VA – RMC apresentava deslocamento de cerca de 15,6 mm, 17,1 % abaixo do valor observado na viga de referência.

As vigas VA – RBC e VA – RBA tiveram comportamento semelhante ao da viga de referência em razão do descolamento prematuro e conseqüente perda de ação do reforço.

Comportamento semelhante foi observado nas vigas do grupo B, contudo não apresentando o patamar de escoamento tão definido das vigas do grupo A. Mas pode-se observar que as vigas reforçadas tiveram um ganho de rigidez, comprovando a eficiência do reforço nestas vigas. Na carga de início do comportamento plástico da viga VB – REF, de 300 kN, o deslocamento estava em 21,8 mm, enquanto nas vigas reforçadas, VB – RBA e VB – RMC, foram de 21,2 mm e 20,4 mm, respectivamente, 2,8 % e 6,9 % abaixo do valor observado na viga de referência.

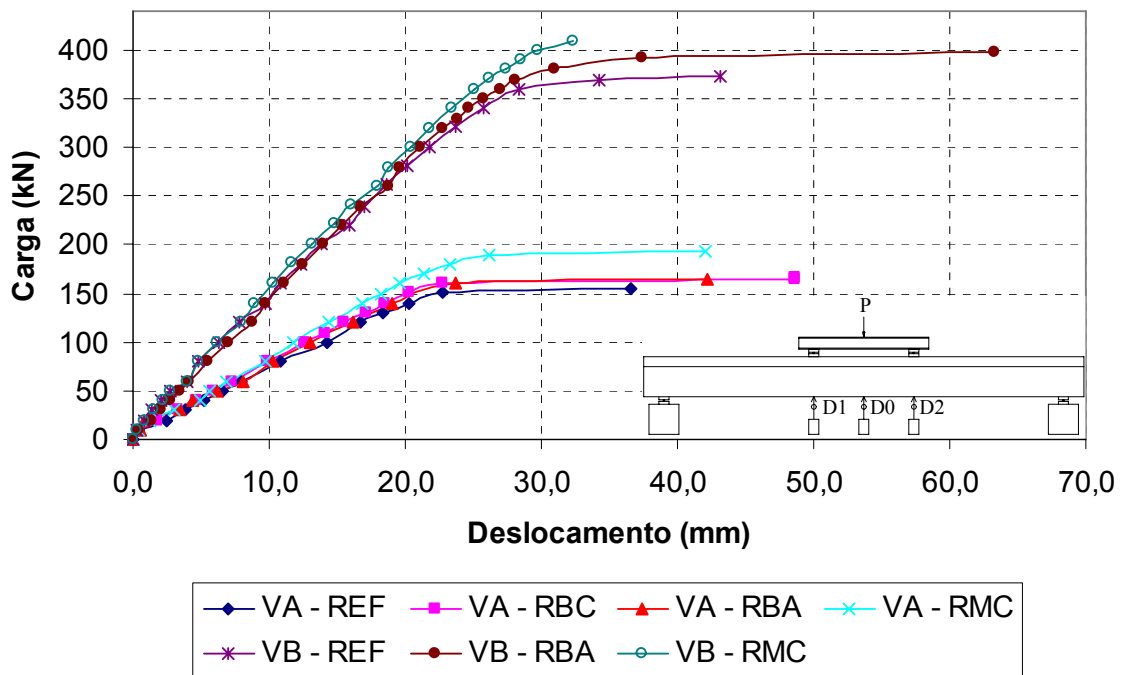


Figura 5.8 – Deslocamento vertical – Defletômetro D0

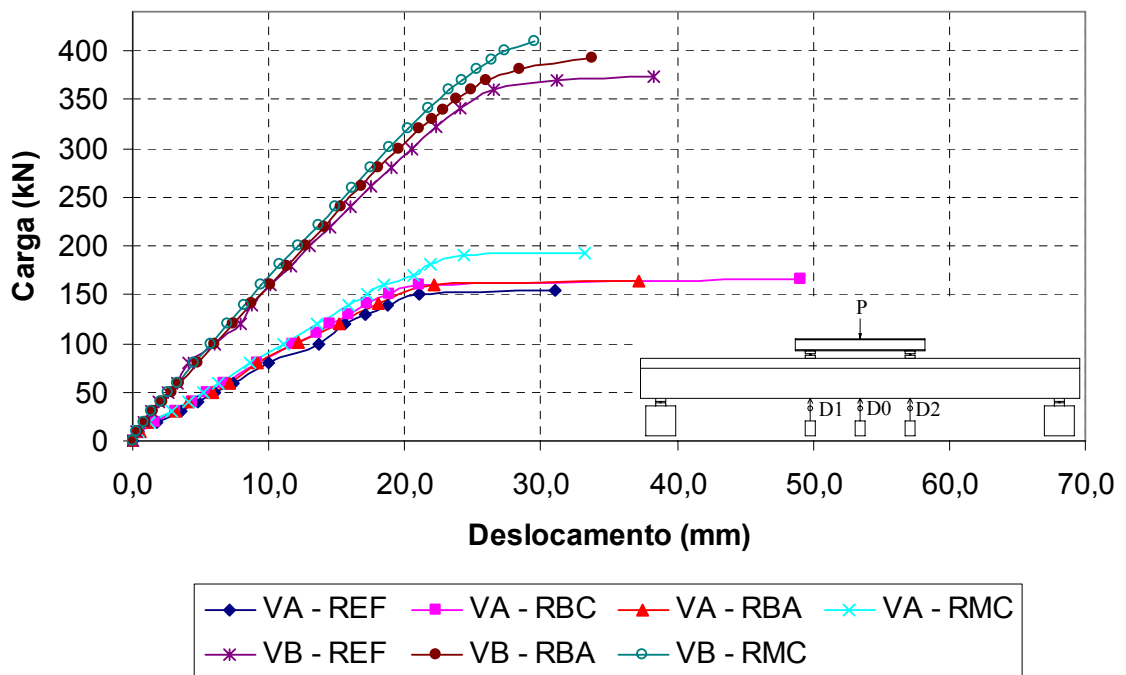


Figura 5.9 – Deslocamento vertical – Defletômetro D1

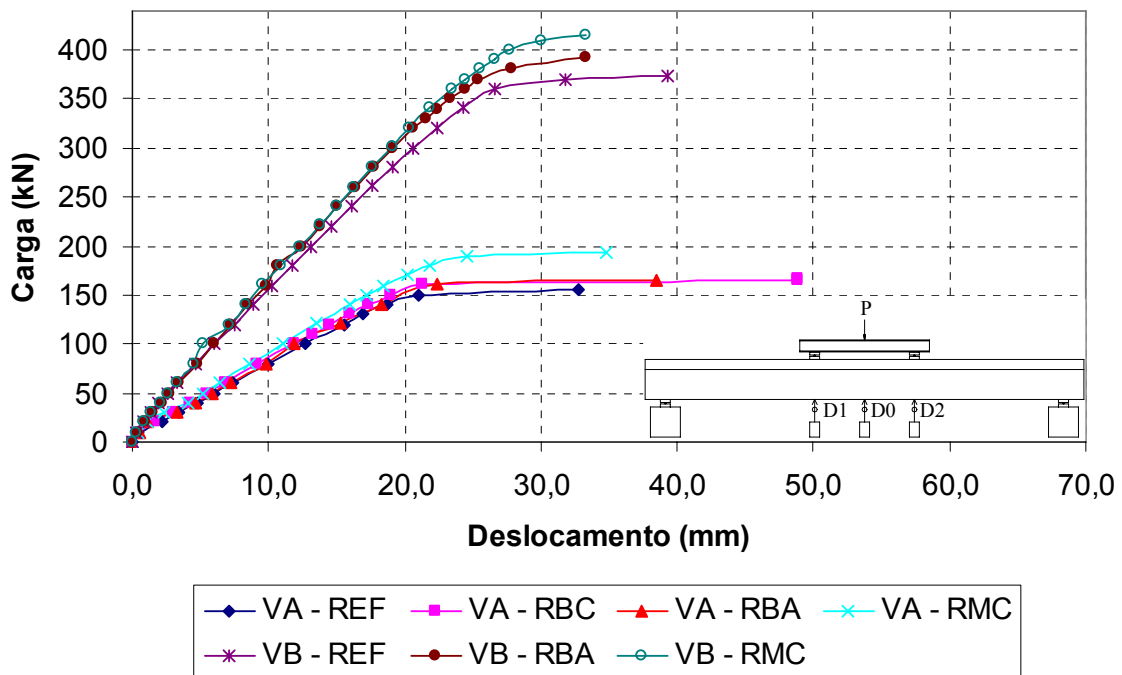


Figura 5.10 – Deslocamento vertical – Defletômetro D2

Os defletômetros D1 e D2, posicionados embaixo dos pontos de aplicação das cargas, tiveram, como esperado, deslocamentos menores que os localizados no meio do vão das vigas, porém comportamentos similares ao observado no ponto correspondente ao defletômetro D0.

Na Tabela 5.6 estão os deslocamentos verticais das vigas na carga de fissuração, δ_r , na carga de escoamento da armadura de flexão, δ_y , e no estado limite último, δ_u .

Tabela 5.6 – Deslocamentos verticais das vigas nas cargas de fissuração, de escoamento da armadura de flexão e na carga última

Viga	δ_r (mm)	P_r (kN)	δ_y (mm)	P_y (kN)	δ_u (mm)	P_u (kN)
VA – REF	2,4	20	18,4	130	36,6	155
VA – RBC	1,8	20	18,5	140	48,6	166
VA – RBA	0,8	20	19,1	140	42,2	165
VA – RMC	1,3	20	18,3	150	42,1	193
VB – REF	0,8	20	21,8	300	43,1	374
VB – RBA	2,1	30	22,8	320	63,2	398
VB – RMC	1,5	30	21,8	320	*	415

* a viga na ruptura apresentou deslocamento maior que o curso do defletômetro (50 mm)

5.3 - CÁLCULO TEÓRICO DAS VIGAS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Serão apresentados a seguir os resultados do cálculo das vigas, no estado limite último, segundo as normas ACI 318M:2002, ACI 440:2002 e NBR 6118:2003, e a análise comparativa com os resultados experimentais, todos com as propriedades do concreto, do aço e do reforço, em aço e fibra de carbono, determinadas experimentalmente.

5.3.1 - Cálculo das vigas com o ACI 318M:2002 e ACI 440:2002

A Figura 5.11 e a Tabela 5.7 mostram os resultados experimentais e teóricos obtidos com a norma ACI 318M:2002 e ACI 440:2002. As vigas de referência, VA – REF e VB – REF, foram calculadas de acordo com o ACI 318M. As vigas reforçadas com MFC, VA – RMC e VB – RMC, foram calculadas pelo ACI 440. Para o cálculo da viga VA – RBC, reforçada com barra de FRP, foram feitas algumas adaptações na norma ACI 440:2002 segundo proposta de Alkhrdaji et al (2002), em anexo. As vigas VA – RBA e VB – RBA, reforçadas com barra de aço, foram calculadas de forma semelhante à viga VA – RBC, no entanto, sem aplicação dos coeficientes relativos à limitação da deformação do FRP.

Verificou-se que nas vigas, com exceção da viga VA – RBC, as cargas últimas experimentais ficaram acima das cargas últimas de cálculo, o que indica que os procedimentos de cálculo estão satisfatórios. Na viga VA – RBC o resultado experimental ficou abaixo do esperado em função do descolamento prematuro citado anteriormente. A viga VA – RBA, mesmo tendo apresentado problemas de descolamento prematuro do reforço, mostrou resultado satisfatório, com a relação entre a carga última de experimental e a carga última teórica acima de 1,0. Essas vigas tiveram descolamento demasiadamente prematuro do reforço por problemas já relatados.

Tabela 5.7 – Carga última experimental e carga teórica das vigas, segundo o ACI318M:2002 e ACI 440:2002

	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 2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF*	147,4	155,0	1,05	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBC**	188,8	166,0	0,88	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBA**	159,8	164,7	1,03	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RMC#	167,4	193,0	1,15	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão
Grupo B 5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF*	338,4	374,0	1,11	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VB – RBA**	345,6	397,7	1,15	Esmagamento do concreto após escoamento da barra de aço de reforço
	VB – RMC#	351,3	414,8	1,18	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão

* Calculada segundo o ACI 318M:2002

** Calculada segundo o ACI 440:2002 com adaptações

Calculada segundo o ACI 440:2002

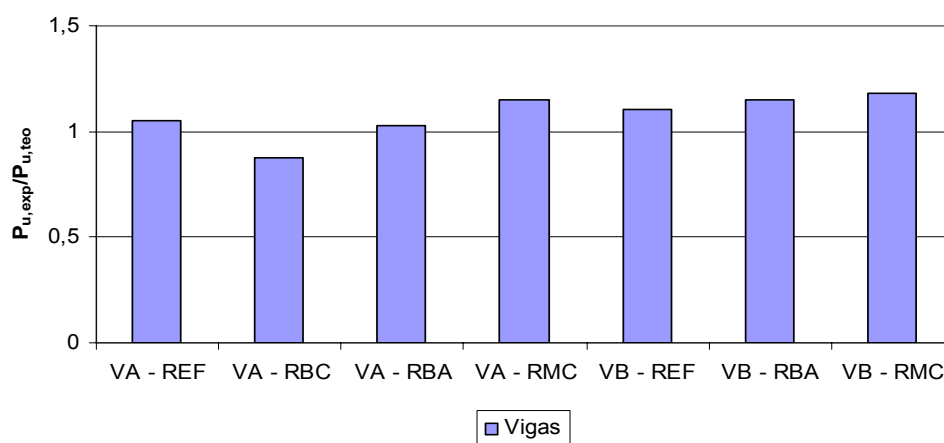


Figura 5.11 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados pelo ACI 318:2002 e ACI 440:2003

5.3.2 - Cálculo das vigas segundo a NBR 6118:2003

São apresentadas na Tabela 5.8 e na Figura 5.12 as comparações entre os resultados experimentais e os teóricos obtidos com a norma NBR 6118:2003. A ponderação do reforço com fibra de carbono foi realizada de acordo com as recomendações do TR 55 (*Concrete Society Technical Report 55*). Para as vigas reforçadas foram feitas adaptações no método de cálculo permitindo o cálculo de vigas reforçadas, conforme anexo A. Os resultados foram satisfatórios, com exceção da viga VA – RBC, ficando pouco abaixo dos valores obtidos com o ACI. O resultado experimental obtido para a viga VA – RBC foi prejudicado pelo descolamento prematuro já citado. A viga VA – RBA, mesmo tendo apresentado problemas de descolamento prematuro do reforço, mostrou resultado satisfatório, com a relação entre a carga última de experimental e a carga última teórica acima de 1,0.

Tabela 5.8 – Carga última experimental e carga teórica das vigas, segundo a NBR 6118:2003

	<i>Viga</i>	<i>Carga última teórica</i> $P_{u,teo}$ (kN)	<i>Carga última experimental</i> $P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,exp} / P_{u,teo}$	<i>Modo de ruptura</i>
<i>Grupo A</i> 2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF	140,9	155,0	1,10	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBC*	181,9	166,0	0,91	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RBA*	150,6	164,7	1,09	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VA – RMC*	158,9	193,0	1,22	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão
<i>Grupo B</i> 5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF	324,7	374,0	1,15	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
	VB – RBA*	326,8	397,7	1,22	Esmagamento do concreto após escoamento da barra de aço de reforço
	VB - RMC*	333,7	414,8	1,24	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão

* Calculando segundo a NBR 6118:2003 com adaptações

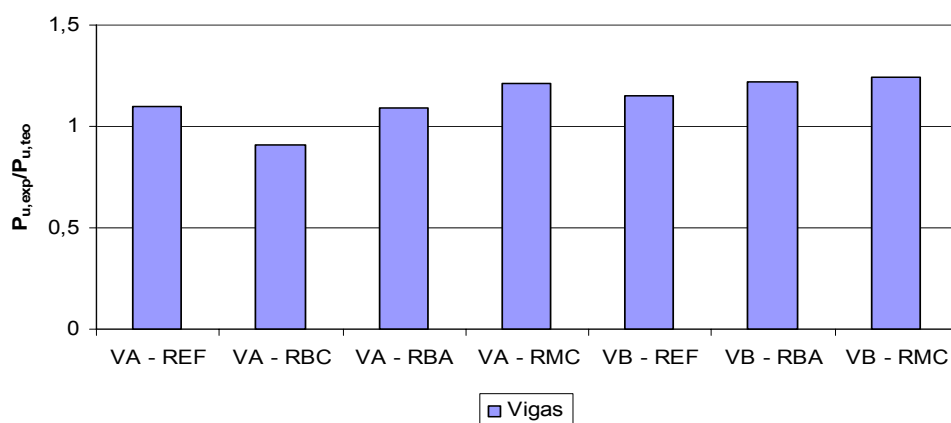


Figura 5.12 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados pela NBR 6118:2003

5.4 - COMPARAÇÕES ENTRE OS TIPOS DE REFORÇO E DE RUPTURA

Neste item foram comparados os modos de ruptura esperados das vigas, com base nas prescrições das normas ACI 318M:2002, ACI 440:2002 e NBR 6118:2003, e os observados nos ensaios.

Da Tabela 5.9 notou-se que as vigas reforçadas tinham no seu modo de ruptura esperado ou o escoamento da armadura seguido do esmagamento do concreto ou o escoamento da armadura seguida da ruptura do reforço. As rupturas finais ficaram dentro do esperado, com exceção das vigas VA – RBC e VA – RBA, que apresentaram problemas de descolamento do reforço. Contudo, antes dessa ruptura final, todas as vigas apresentaram o escoamento da armadura longitudinal de aço, ou seja, antes da ruína as vigas apresentaram certa ductilidade, principalmente nas vigas do grupo A.

Tabela 5.9 – Comparação entre os modos de ruptura esperados pelas normas ACI318M:2002 e ACI 440:2002 e os observados experimentalmente

	<i>Armadura Longitudinal de aço</i>	<i>Viga</i>	<i>Ruptura esperada</i>	<i>Ruptura observada</i>
Grupo A	2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF	Esmagamento do concreto após escoamento da armadura	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VA – RBC	Ruptura da barra de CFRP após escoamento da armadura de flexão	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VA – RBA	Esmagamento do concreto após escoamento da barra de aço de reforço	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VA – RMC	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão
Grupo B	5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF	Esmagamento do concreto após escoamento da armadura	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VB – RBA	Esmagamento do concreto após escoamento da barra de aço de reforço	Esmagamento do concreto após escoamento da barra de aço de reforço
		VB – RMC	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão

Da Tabela 5.10 notou-se que as vigas reforçadas tinham um modo de ruptura esperado caracterizado ou por deformação plástica excessiva da armadura de flexão ou pelo escoamento da armadura seguida da ruptura do reforço. As rupturas das vigas ocorreram dentro do esperado, com exceção das vigas VA – RBC e VA – RBA, ambas com problemas de descolamento durante o ensaio.

Tabela 5.10 – Comparação entre os modos de ruptura esperados pela norma NBR 6118:2003 e os observados experimentalmente

	Armadura Longitudinal de aço	Viga	Ruptura esperada	Ruptura observada
Grupo A	2 ϕ 20 mm $\rho = 0,63\%$	VA – REF	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VA – RBC	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VA – RBA	Deformação plástica excessiva da barra de aço do reforço	Descolamento do reforço seguido de deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VA – RMC	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão
Grupo B	5 ϕ 20 mm $\rho = 1,57\%$	VB – REF	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão	Deformação plástica excessiva da armadura de flexão
		VB – RBA	Deformação plástica excessiva da barra de aço do reforço	Esmagamento do concreto após escoamento da barra de aço de reforço
		VB – RMC	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão	Ruptura do reforço após escoamento da armadura de flexão

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas da realização de ensaios em 7 vigas de concreto armado de seção transversal em “T”, sendo 2 vigas de referência, 1 viga reforçada à flexão com barra de CFRP pela técnica NSMR, 2 vigas reforçadas com barra de aço pela técnica NSMR e 2 vigas reforçadas com manta de fibra de carbono pela técnica EBR.

As vigas foram divididas em dois grupos, conforme a taxa de armadura longitudinal de aço, sendo o Grupo A, composto por 4 vigas com $\rho = 0,63\%$, e Grupo B, composto por 3 vigas com $\rho = 1,57\%$. Cada grupo teve uma viga de referência.

6.2 - CONCLUSÕES

6.2.1 - Dos materiais

Concreto – O concreto apresentou uma variação de resistência em relação ao solicitado, mas a resistência do mesmo ficou semelhante para as vigas pertencentes ao mesmo grupo, não gerando problemas na interpretação dos resultados

Aço – O aço apresentou resistência um pouco maior que o informado pelo fabricante, mas sem prejuízo aos resultados experimentais.

Manta de fibra de carbono – Os resultados de ensaios do material revelaram valores bem abaixo do especificado pelo fabricante, principalmente a deformação última e a tensão última, o que gerou uma grande preocupação quanto à necessidade de caracterização destes materiais. Os valores registrados nos ensaios das vigas confirmaram os obtidos no ensaio do material.

Adesivo – As propriedades do adesivo utilizado foram fornecidas pelos fabricantes e nenhum ensaio de verificação foi realizado. No entanto, problemas quanto à dosagem,

especificada pelo fabricante, levaram às propriedades inadequadas do adesivo, ocasionando os problemas de descolamento dos reforços. Assim, verificou-se a necessidade de ensaios de caracterização destas resinas utilizadas no reforço das vigas. E problemas quando a aplicação da resina nas barras de CFRP e aço foram detectadas, o que pode-se concluir que a resina utilizada não é adequada para este tipo de reforço (NSMR).

Barra de CFRP – As propriedades desse material não foram verificadas em face das dificuldades encontradas na realização do ensaio de caracterização.

6.2.2 - Do comportamento das vigas de referência e reforçadas

Carga última e modo de ruptura – As vigas reforçadas com MFC (manta de fibra de carbono) colada externamente foram as que tiveram maior incremento de resistência, foram as vigas nas quais o material de reforço pode ser solicitado até a ruptura, apesar do adesivo utilizado ter apresentado os problemas já citados. A viga VA – RMC (Grupo A - $\rho = 0,63\%$) teve um ganho de 24,5 % em relação à viga de referência, enquanto a viga VB – RMC (Grupo B - $\rho = 1,57\%$) teve um ganho de 11,0 % em relação à viga de referência, observando-se que para um mesmo reforço, o acréscimo de resistência à flexão proporcionada por este reforço será maior em vigas com menores taxas de armadura. As vigas VA – RBC e VA – RBA, com os reforços inseridos em ranhuras, apresentaram rupturas prematuras, por conta do adesivo utilizado, e por conseguintes pequenos ganhos de resistência, 7,1 % e 6,5 % ,respectivamente em relação à viga de referência. A viga VB – RBA teve um ganho de 6,4 % em relação à viga de referência, menor do que o obtido na viga VB – RMC, em face do reforço com barra de aço deixar de contribuir a partir do escoamento do aço, o que ocorre em deformações entre 2 ‰ a 3 ‰, bem abaixo do valor último normalmente observados nos FRP.

Deformação do concreto no bordo superior – Não foram observadas deformações que levassem ao esmagamento do concreto. A maior deformação registrada foi de 1,9 ‰, longe dos limites de 3,0 ‰ do ACI 318:02 e de 3,5 ‰ da NBR 6118:03. Não foi possível obter-se a deformação última do concreto da viga VB – RBA (Grupo B), que rompeu por esmagamento do concreto, devido a problemas nos extensômetros.

Deformação dos reforços – As deformações medidas nos extensômetros do meio do vão confirmaram o descolamento dos reforços das vigas VA – RBC e VA – RBA, do Grupo A ($\rho = 0,63\%$), com os reforços inseridos em entalhes, para uma carga em torno de 60% da carga última. Para a viga VA – RMC, do Grupo A ($\rho = 0,63\%$), que apresentou a ruptura do reforço para uma deformação de 6,7%, observou-se mudança de inclinação na curva carga-deformação na carga de 150 kN, correspondente a 77,7% da carga última, devido ao início do escoamento da armadura de flexão. Na iminência da ruína dessa viga as deformações no aço estavam bem superiores às do reforço, sugerindo que o reforço já estava em processo de ruptura.

Deslocamentos verticais – As vigas do grupo A ($\rho = 0,63\%$) apresentaram praticamente a mesma rigidez que a viga de referência, com exceção da viga VA – RMC, na qual o reforço funcionou apropriadamente. A presença do reforço, além de inibir a formação e abertura das fissuras, evitando uma maior redução na rigidez da viga, retardou o início de escoamento da armadura de flexão. Para as vigas do grupo B ($\rho = 1,57\%$), comportamento semelhante foi observado, contudo com as vigas não apresentando patamar de escoamento tão definido, mas pode-se observar que as vigas reforçadas tiveram um ganho de rigidez, comprovando a eficiência do reforço nestas vigas.

6.2.3 - Comparação entre as técnicas de reforço colado em entalhes no concreto (NSMR) e de reforço colado na superfície do concreto (EBR).

Devido ao pequeno número de ensaios, e principalmente devido às rupturas prematuras obtidas nas vigas VA - RBC e VA - RBA, reforçadas pela técnica NSMR, em função do destacamento ocorrido devido a problemas com a resina fornecida, os resultados desta pesquisa não puderam colaborar muito para comprovar que o reforço à flexão de vigas “T” de concreto armado utilizando a técnica NSMR é mais eficiente que a técnica EBR.

Por outro lado, observou-se que mesmo com a resina utilizada foi possível obter-se a ruptura do reforço nas vigas VA - RMC e VB - RMC, reforçadas com manta de carbono.

6.2.4 - Comparação entre os resultados estimados pelas normas e os obtidos experimentalmente

Cargas últimas estimadas

As cargas últimas foram estimadas com a NBR 6118:2003, com o ACI 318:2002 e com o ACI 440:2002, única norma dentre essas, específica para reforço de estruturas com compósito colado externamente. Para o cálculo com reforço pela técnica NSMR foram adotadas as sugestões propostas por Alkhrdaji et al. (2002). No cálculo pela NBR 6118, a ponderação do reforço com fibra de carbono foi realizada de acordo com as recomendações do TR 55 (*Concrete Society Technical Report 55*). Nas comparações foram utilizados todos os coeficientes de ponderação e a resistência do concreto das vigas (f_c) foi admitido igual ao f_{ck} . Com base nos resultados pode-se concluir que:

Pelo ACI 318:2002/ ACI 440:2002 – As cargas últimas experimentais ficaram acima das cargas últimas de cálculo, o que indica que os procedimentos de cálculo estão satisfatórios. A exceção ficou por conta da viga VA – RBC em função do descolamento prematuro.

Pela NBR6118:2003 – Os resultados foram satisfatórios, com exceção da viga VA – RBC, ficando pouco abaixo dos valores obtidos com o ACI. O resultado experimental obtido para a viga VA – RBC foi prejudicado pelo descolamento prematuro já citado.

Comparações entre tipos ruptura estimados e obtidos

Os modos de ruptura previstos pelas normas ACI 318 / ACI 440 e NBR 6118 ficaram de acordo com os observados nos resultados dos ensaios, com exceção das vigas VA – RBC e VA – RBA em razão do descolamento prematuro do reforço em função dos problemas no adesivo. O cálculo das vigas de referência pelo ACI 318 previu o esmagamento do concreto, no entanto, os ensaios foram interrompidos, por limitação no sistema de instrumentação, quando a viga apresentava deformação plástica excessiva da armadura de flexão, certamente próximo do esmagamento do concreto.

6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Estudo detalhado das resinas a serem utilizadas na colagem dos reforços. Nesta pesquisa ficou evidenciado que as empresas que utilizam as resinas não conhecem bem os materiais que utilizam. Obviamente a utilização incorreta dessas resinas pode comprometer todo o reforço utilizado;
- Realização de ensaios de aderência com os compósitos de FRP utilizados nessa pesquisa;
- Realização de mais ensaios utilizando reforços com as técnicas EBR e NSMR:
 - com variação da taxa de armação, mantendo-se o reforço constante;
 - com variação do reforço, mantendo-se a taxa de armação constante;
- Verificar a eficácia da técnica de colagem de FRP em entalhes no cobrimento do concreto no reforço ao cisalhamento;
- Um melhor estudo das características dos materiais utilizados em reforços;
- Realização de um estudo numérico do reforço.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKHRDAJI, T.; NANNI A. (1999) – *Surface Bonded FRP Reinforcement for Strengthening/Repair of Structural Reinforced Concrete*. ICRI – NRCC Workshop, Baltimore, MD. Outubro de 1999, 19 p..

ALKHRDAJI, T.; HASSAN, T.; NANNI A.; PARRETTI, R. (2002) – *Proposed Addition to Aci 440F Guide – Strengthening with Near-Surface Mounted Frp Reinforcement*. Outubro de 2002, 17 p..

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2002) - ACI 318M – 02 – *Building Code Requirements for Structural Concrete*, Detroit, Michigan, EUA, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 440 – (2000a) – *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. JuJy, 2000, 96p..

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 440 - (2000b) – *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*. November de 2000, 95p..

ARAÚJO, A. S. de (2002) – *Reforço ao Cisalhamento de Vigas “T” de Concreto Armado com Fibra de Carbono com dois Tipos de Ancoragem*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília – UnB – Brasília – DF, Março de 2002, 201 p..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003) - NBR 6118 - *Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1998) - NBR NM 67 – *Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone*. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994) - NBR 5738 – *Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndrico ou prismáticos de concreto*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994) - NBR 5739 – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) - NBR 6152 – *Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003) - NBR 8522 – *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e a curva tensão-deformação*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983) - NBR 7222 – *Argamassas e Concretos – Determinação das resistências à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1983.

BEBER, A. J. (2003) – *Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de carbono*. Projeto de Tese. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre - RS, 2003.

BEBER, A. J. (1999) – *Avaliação do Desempenho de Vigas de Concreto Reforçadas com Lâminas de Fibra de Carbono*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. CPGEC/UFRGS, 108 pp, Rio Grande do Sul, março 1999.

BLASCHKO, M.; ZILCH, K. (1999) – *Rehabilitation of concrete Structures with CFRP strips Glued into slits*. 12o International Conference on Composite Materials, Paris, 1999.

CÁNOVAS, M. F. (1988) – *Patologia e Terapia do concreto Armado*. Ed. PINI, São Paulo, 1988, 522 p..

CARNEIRO, R. J. F. M. (2003) – *Reforço de Estruturas com Compósitos Estruturados com Fibra de Carbono*. Projeto de tese e qualificação para doutoramento em estruturas. Universidade de Brasília, Brasília - DF, Julho de 2003.

CASTRO, E. K. (2003) – *Reforço à Flexão de Vigas “T” de Concreto Armado com Vários Tipos de Compósitos situados Próximos à Superfície*. Exame de Qualificação, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2003, 99 p..

CASTRO, E. K.; MELO, G. S.; NAGATO, Y. (2004) – *Reforço À Flexão De Vigas “T” De Concreto Armado Com Vários Tipos De Compósitos Colados Em Entalhes Na Superfície Do Concreto*. Ibracon, Florianópolis, 13p.

CHAALLAL, O., NOLLET, M. J., PERRATON, D. (1998) – *Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced-Plastic Plates: Design Guidelines for Shear and Flexure*. Canadian Journal Civil Engineering, Montreal, v.2, n. 25, p. 692 – 704, mar./apr. 1998.

CHUNG, C. F.; ROBERT, J.; ALAYED, H. - *Deck Replacement for the Skewed Truss Bridge on MD24 over Deer Creek in Harford County, Maryland Utilizing a Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Deck*. The Proceedings of the 19th Annual International Bridge Conference, June 11-12, 2002, Pittsburgh, Pennsylvania

CLÍMACO, J. C. T. (1995) – *Patologia, Recuperação e Manutenção de Estruturas*. Notas de aula. Universidade de Brasília.

CLÍMACO, J. C. T. (2004) – *Estruturas de Concreto Armado – Fundamentos de Projeto, Dimensionamento e Verificação*. Universidade de Brasília. 252p.

DE LORENZIS, L.; LUNDGREN, K.; RIZZO, A.; (2004) – *Anchorage Length of Neas-Surface Mounted Fibre-Reinforced Polymer Bars for Concrete Strengthening – Experimental Invertigation and Numerical Modeling*. ACI Structural Journal, Março-Abril 2004, 10p.

DE LORENZIS L., NANNI A. (2003) – *Design Procedure of NSM FRP Reinforcement for Strengthening of RC Beams*. FRPRCS – 6, Singapore, 8 – 10 July 2003.

DE LORENZIS, L. & NANNI, A. (2002) - *Bond between Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods and Concrete in Structural Strengthening*. ACI Structural Journal V. 99, No.2 – March – April 2002.

DE LORENZIS, L.; NANNI, A. (2001) - *Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods*. ACI Structural Journal V. 98, No.1 January-February- 2001.

FIB (CEB – FIP, 2001) - *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. Technical Report - Bulletin 14 – July 2001.

FORTES, A. S. (2000) – *Vigas de concreto armado reforçadas com fibra de carbono*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

FORTES, A. S., BARROS, J.A.O. (2002) - *Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits*, 5o. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Madrid, 3-6 junio, 2002.

GALLARDO, S. M. A. G. (2002) – *Reforço à Flexão em Vigas de Concreto Utilizando Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Fevereiro de 2002, 212 p..

GORETTI, M. L., OLIVEIRA JUNIOR, F. S.. - *Investigação Experimental de Vigas Reforçadas À Flexão com Fibras de Carbono*. Projeto Final de Curso de Graduação, Universidade de Brasília, 2000.

HASSAN, T. & RIZKALLA, S. - *FRP Reinforcing Bars for Bridge Decks*”, *Canadian Journal for Civil Engineering*. Vol. 27, Alberta, Canada, 2001.

HASSAN, TAREK (2002) – *Flexural Behavior and Bond Characteristics of FRP Strengthening Techniques for Concrete Structures*. Ph.D. Thesis, University of Manitoba, Canada, 2002, 304 p..

JUVANDES, L. F. P. (1999) - *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de "CFRP"*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999. 302 p. Tese de Doutorado em Engenharia.

LIMA, A. B.; (2004) – *Reforço à Flexão de Vigas "T" de Concreto Armado Através da Inserção de Compósitos de FRP no Concreto de Cobrimento*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 218p.

MACGREGOR, J. G. (1992) – *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. Prentice Hall Editora, New Jersey, 1992, 848 p..

MACHADO, A. P. (2002) - *Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono*. Ed. PINI, São Paulo, 2002, 282 p..

MALEK, A. M.; SAADATMANESH H. & EHSANI, M. R.(1998) - *Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End*. ACI Structural Journal – Vol. 95, No. 1, January-February 1998.

MEIER, U. (2003) – *Fibrous Composites in Structural Engineering*. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 5-10 junho, São Paulo, 2003.

NANNI, A. (1993) – *Flexural behavior and design of RC members. using FRP reinforcement*, Journal of Structural Engineering,. ASCE, Vol. 119, No. 111

NINCE, A. A. (1996) – *Levantamento de Dados Sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 1996, 176 p.

NORDIN H., TÄLJSTEN B. (2003) – *Concrete Beams Strengthened with Pre-Stressed Near Surface Mounted Reinforcement*. FRPRCS – 6, Singapore, 8 – 10 July 2003.

RAYOL, J. A. S. (1999) – *Comportamento experimental de vigas de concreto de alta resistencia com armadura nao metalica tipo gfrp*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

SALLES NETO, M. (2000) - *Comportamento ao Cisalhamento de Vigas “T” de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2000, 220 p.

SILVA FILHO, J. N. (2001) - *Vigas “T” em Concreto Armado Reforçadas ao cisalhamento com Compósitos de Fibra de Carbono*. Dissertação de Mestrado em Estrutura, Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília – UnB, Brasília –DF, Março de 2001.

SILVA, A. O.B. (2001) - *Reforço à Flexão de Vigas de Concreto de Elevada Resistência por Meio da Colagem de Manta Polimérica com Fibras de Carbono*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas SP, 403 pp, 2001.

SIQUEIRA, C. H.; MACHADO, G. M. (1999) – *Avaliação e análise comparativa de reforços estruturais à flexão executados com fibra de carbono*. Monografia de final de curso, Universidade de Brasília.

SOUZA, A. V. L. (2001) – *Reforço de pilares curtos de concreto armado de secao quadrada com mantas de polimero reforçado com fibras de carbono*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. (1998) - *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. PINI, São Paulo, 225 p.

SUSSEKIND, J. C. (1989) - *Curso de concreto: concreto armado*. Volume I. 6ª edição. Editora Globo, São Paulo, 366 p.

TALJSTEN, B.; CAROLIN, A. (2001) - *Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Laminates*. FRPRCS-5. Thomas Telford. London, 2001, 6 p..

TRIAANTAFILLOU ,T. C.(1998) - *Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites*. ACI Structural Journal, V. 95, N° 2, p.107 – 115, March-April 1998.

A - PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA O DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE ESTRUTURAS REFORÇADAS COM FRP

A.1 - RECOMENDAÇÕES DO ACI 440.2R (2002)

O ACI 440.2R (2002) fornece orientações quanto à seleção, projeto e instalação de sistemas de reforço com FRP colados externamente. Segundo essa norma, o reforço executado com polímeros reforçados com fibra deverá ser projetado para absorver esforços de tração mantendo a compatibilidade de deformação entre o material compósito e o substrato de concreto. As recomendações de projeto são baseadas nos estados limites, o que conduz a níveis aceitáveis de carregamento de modo a atender tanto o estado limite último (“ELU”) quanto o estado limite de serviço (“ELS”). Dessa forma, o projeto de reforço tem como base os critérios do ACI 318M (2002), com as considerações adicionais específicas para a aplicação do reforço com FRP colado externamente e/ou internamente nas estruturas. O projeto de reforço deve observar as seguintes recomendações:

- Estabelecer uma resistência mínima para a peça sem reforço, para prevenir colapso no caso de ausência do reforço por atitudes incontrolláveis como incêndio, vandalismo, etc.;
- Garantir o comportamento dúctil da estrutura após reforço com a fibra;
- Utilizar coeficientes de ponderação apropriados;
- Garantir o comportamento monolítico da estrutura após o reforço;
- Verificar as condições dos danos da estrutura a ser reforçada e/ou recuperada.

Dessa forma, são apresentados os critérios de utilização do FRP a fim de fornecer orientações para execução do reforço à flexão, colado longitudinalmente na face tracionada de um elemento estrutural de concreto armado.

A.1.1 - Hipóteses de cálculo

As seguintes hipóteses são feitas no cálculo da resistência à flexão de uma seção reforçada com os polímeros reforçados com fibra colados externamente e/ou internamente à superfície do concreto:

- Os cálculos do projeto devem utilizar as dimensões reais, a disposição da armação e as propriedades dos materiais existentes do elemento a ser reforçado;
- As deformações no aço e concreto são diretamente proporcionais à distância da linha neutra, ou seja, as seções transversais permanecem planas, antes e depois do carregamento;
- A máxima deformação de compressão permitida para o concreto é de 3 ‰ ACI 318M (2002);
- A resistência à tração do concreto é desprezada;
- O reforço com FRP tem comportamento elástico linear até sua ruptura;
- Admite-se aderência perfeita entre o concreto e o reforço com FRP.

A.1.1 - Propriedades de cálculo da fibra

As equações A.1 a A.3 dão as propriedades que devem ser usadas no dimensionamento dos reforços, onde o fator de redução devido ao ambiente de exposição, C_E , está na.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (A.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (A.2)$$

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (A.3)$$

Tabela A.1 – Coeficiente de redução ambiental para vários tipos de sistemas de FRP e condições de exposição

Condições de exposição	Fibra e tipo de resina	Coeficiente de redução ambiental C_E
Exposição interior	Carbono/epóxi	0,95
	Vidro/epóxi	0,75
	Aramida/epóxi	0,85
Exposição exterior (pontes, portos e garagens fechadas)	Carbono/epóxi	0,85
	Vidro/epóxi	0,65
	Aramida/epóxi	0,75
Ambiente Agressivo (ataque químico e estações de tratamento de esgoto)	Carbono/epóxi	0,85
	Vidro/epóxi	0,50
	Aramida/epóxi	0,70

A.1.2 - Deformação Existente do Elemento Reforçado

A menos que todas as cargas atuantes no elemento, inclusive peso próprio, sejam retiradas antes da instalação do reforço com FRP, o substrato no qual será aplicado o reforço, já estará deformado. Esta deformação deverá ser considerada como deformação inicial, devendo ser excluída da deformação do compósito. A deformação inicial no substrato, “ ε_{bi} ”, pode ser determinada a partir de uma análise elástica, levando em consideração todas as cargas que estarão atuando no elemento durante a instalação do FRP.

A.1.3 - Capacidade Resistente

O critério de resistência última estabelece que a capacidade resistente à flexão do elemento deve superar a prevista para o elemento estrutural, como mostra a equação A.4.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (\text{A.4})$$

Onde:

ϕ - Fator de minoração da resistência para considerar possíveis variações nas dimensões e resistências dos materiais;

M_n - Momento resistente nominal;

M_u - Momento solicitante ponderado, devido o carregamento atuante.

A capacidade de flexão nominal de um elemento de concreto reforçado com FRP pode ser determinada com base na compatibilidade de deformações, equilíbrio das forças internas, e no modo de ruptura. A Figura A.1 ilustra uma condição de resistência última em uma peça de concreto armado com a configuração das deformações e tensões, e os esforços resultantes a serem considerados no equilíbrio das forças internas.

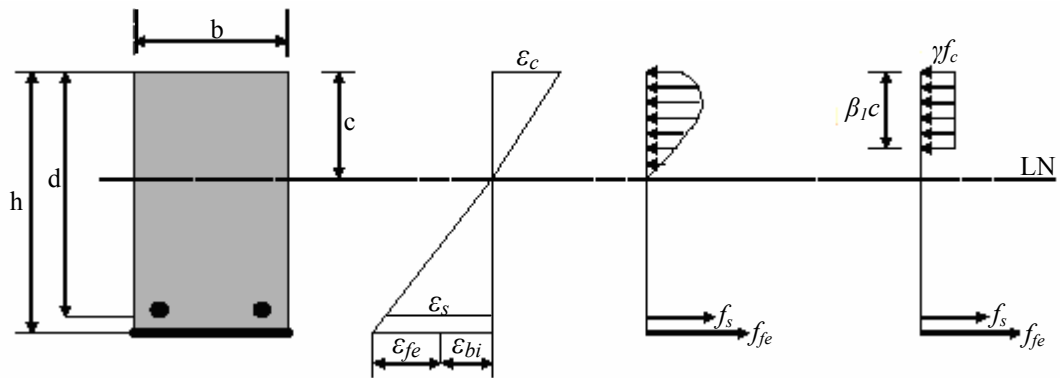


Figura A.1 - Seção de Concreto Reforçada com FRP no Estado Limite Último

A capacidade resistente nominal de flexão pode ser calculada pela equação A.5. Um fator de redução adicional, “ ψ_f ”, é aplicado à contribuição do aumento da resistência à flexão promovida pelo FRP. Este fator de redução leva em conta a baixa confiabilidade do reforço com FRP quando comparado ao desempenho de outros tipos utilizados.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (\text{A.5})$$

A.1.4 - Modo de Ruptura

A capacidade resistente à flexão depende do modo de ruptura considerado, que devem ser verificados para seções reforçadas com FRP. Dessa forma, a ruptura poderá ocorrer por um dos itens abaixo:

- Esmagamento do concreto comprimido antes do escoamento da armadura tracionada;
- Escoamento da armadura tracionada seguido de ruptura do laminado de FRP;
- Escoamento da armadura tracionada seguido pelo esmagamento do concreto;
- Destacamento da camada de cobrimento do concreto por cortante/tração;
- Descolamento do FRP do substrato de concreto.

O esmagamento do concreto acontece se a deformação alcançar seu valor máximo (“ $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ ”). A ruptura do FRP acontece se a deformação no compósito alcançar sua deformação de ruptura (“ $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ ”). O desprendimento do cobrimento e o descolamento do da fibra podem ocorrer se o substrato não resistir às tensões produzidas pelo FRP.

A.1.5 - Compatibilidade de Deformação

O nível de deformação no FRP determinará o nível de tensão que será desenvolvido (comportamento linear-elástico até a ruptura). Desta forma, a deformação no FRP, “ ε_{fe} ”, pode ser obtida a partir da determinação da deformação no estado limite último do substrato de concreto, “ ε_{cu} ”, subtraído do valor da deformação inicial do substrato de concreto, “ ε_{bi} ”, se existir, conforme equação A.6.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu} \quad (\text{A.6})$$

Segundo o ACI 440.2R (2002), o descolamento e/ou a delaminação (destacamento) dos polímeros (FRP) podem ocorrer se os esforços que estiverem ocorrendo nas fibras não puderem ser absorvidos integralmente pelo substrato do concreto. Com a finalidade de prevenir esses tipos de ruptura, foi introduzido um coeficiente segurança “ k_m ”, inferior a 0,90 a fim de limitar a deformação nos polímeros conforme apresentado na equação A.7. Este termo “ k_m ” reconhece que os laminados mais rígidos estão mais sujeitos ao despreendimento do material de reforço.

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000} \right) \leq 0,90 \text{ para } nE_f t_f \leq 180000 \\ k_m = \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{nE_f t_f} \right) \leq 0,90 \text{ para } nE_f t_f > 180000 \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Sendo:

n - Número de camadas do reforço, formando um laminado;

t_f - Espessura de uma camada em mm;

E_f - Módulo de elasticidade do FRP em MPa;

ε_{fu} - Deformação de ruptura em projeto do FRP.

Com base no nível de deformação do FRP, a deformação na armadura de tração pode ser determinada pela equação A.8.

$$\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}} \right) = \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \Rightarrow \varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \quad (\text{A.8})$$

A.1.6 - Fator de Redução do Aumento de Rigidez

O uso de compósitos colados externamente (EB) reduz a ductilidade dos elementos reforçados. Para que seja mantido um suficiente grau de ductilidade, a deformação no aço deve ser superior a 5 ‰ quando o concreto esmagar ou a fibra de FRP romper, incluindo as rupturas prematuras por descolamento ou delaminação. Portanto, o coeficiente de redução de resistência que leva em consideração essa redução de ductilidade, variando entre 0,90 (seções dúcteis) e 0,70 (seção frágil), pode ser expresso pela equação A.9 a seguir.

$$\phi_R = \begin{cases} 0,90 \text{ para } \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,70 + \frac{0,20(\varepsilon_s - \varepsilon_y)}{0,005 - \varepsilon_y} \text{ para } \varepsilon_y < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,70 \text{ para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

Onde:

ε_s - Nível de deformação do aço;

ε_y - Deformação de escoamento do aço.

A.1.7 - Equilíbrio das Forças Internas

O equilíbrio de forças internas é obtido com base no nível de tensão em cada material. No aço, o nível tensão é calculado considerando um comportamento elástoplástico. Já a tensão efetiva no FRP é obtida assumindo um comportamento perfeitamente elástico (Equações A.10 e A.11).

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (\text{A.10})$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (\text{A.11})$$

O equilíbrio das forças internas é satisfeito se, e somente se, a equação A.12 for atendida para uma determinada profundidade “ c ” da linha neutra.. Vale ressaltar que os termos “ γ ” e “ β_1 ” são parâmetros que definem um bloco de tensão retangular no concreto, equivalente à distribuição não-linear de tensão. Sugere-se adotar “ $\gamma = 0.85$ ” e “ β_1 ” o valor dado pela seção 10.2.7.3 do ACI 318M (2002).

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c \beta_1 b} \quad (\text{A.12})$$

A.2 - PROPOSTA DE ADIÇÃO AO ACI 440

Uma proposta de adição ao ACI 440 feita por Alkhrdaji et. Al. (2002) fornece orientações quanto projeto de sistemas de reforço inseridos na camada de cobertura de concreto. Nela constam praticamente as mesmas recomendações do ACI 440.2R (2002) com algumas pequenas modificações na compatibilidade de Deformação e o valor de “ k_m ”:

A.2.1 - Compatibilidade de Deformação

FRP pode ser obtida multiplicando-se a área de FRP pela relação entre os módulos de elasticidade do FRP e do concreto (Figura A.2).

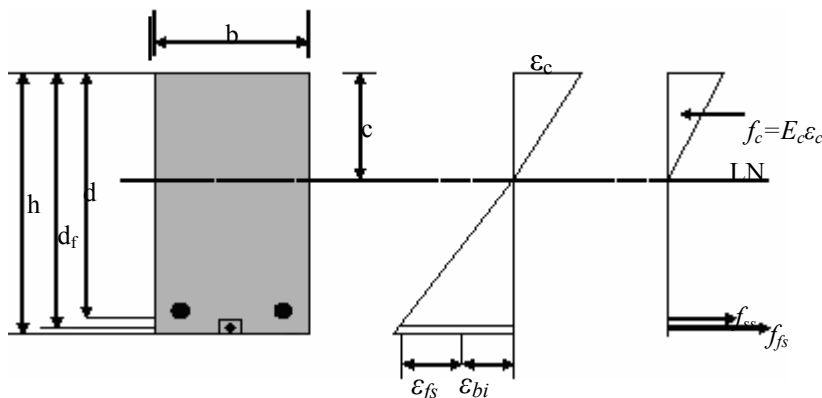


Figura A.2 – Seção de Concreto Reforçada com FRP no Estado Limite de Serviço

O nível de deformação no FRP determinará o nível de tensão que será desenvolvido (comportamento linear-elástico até a ruptura). Desta forma, a deformação no FRP, “ ε_{fe} ”,

pode ser obtida a partir da determinação da deformação no estado limite último do substrato de concreto, “ ε_{cu} ”, subtraído do valor da deformação inicial do substrato de concreto, “ ε_{bi} ”, se existir, conforme equação A.13.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu} \quad (\text{A.13})$$

A.2.2 - Coeficiente k_m

Segundo esta proposta, o termo “ k_m ” é um fator dependente da aderência entre o reforço e a viga, e não deve ser maior que 0,70, prevenindo o descolamento ou a delaminação. Contudo, este termo é baseado somente em estudos gerais e experiência prática dos engenheiros que utilizam este tipo de reforço. Um estudo mais aprofundado nos esforços que atuam no reforço, no adesivo e no substrato do concreto podem resultar num processo mais apurado de determinação deste coeficiente. Assim, o comitê recomenda que se usa o valor do “ k_m ” acima citado para a deformação última do reforço e prevenir o descolamento.

Com base no nível de deformação do FRP, a deformação na armadura de tração pode ser determinada pela equação A.13.

$$\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}} \right) = \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \Rightarrow \varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (\text{A.14})$$

A.2.3 - Observações quando ao reforço com barras de aço

Quando foi calcular a resistência à flexão de vigas reforçadas a flexão através de barras de aço com a técnica NSMR, os coeficientes “ C_E ” e “ k_m ” é que quando o reforço utilizado é o aço, não é utilizado este coeficiente para limitar sua deformação última, visto que não faz sentido, visto que o mesmo está em estado plástico, isto é, não apresenta ganho de tensão nesta fase de ruptura.

A.3 - RECOMENDAÇÕES DA NBR 6118 (2003)

Embora não exista uma norma brasileira específica para cálculo de estruturas de concreto considerando o reforço com FRP, os procedimentos previstos para o dimensionamento de estruturas de concreto armado convencionais podem ser aplicados em situações de reforço dos elementos estruturais.

A.3.1 - Hipóteses de Cálculo

- As seções transversais permanecem planas, antes e depois do carregamento;
- A máxima deformação de compressão permitida para o concreto é de 0.0035;
- A resistência à tração do concreto é desprezada;
- O reforço com FRP tem comportamento elástico linear até sua ruptura;
- Admite-se aderência perfeita entre o concreto e o reforço com FRP.

A.3.2 - Aço escoando Seguido pelo Esmagamento do Concreto

A ruptura na seção crítica ocorre com o escoamento do aço seguido pelo esmagamento do concreto, enquanto o FRP permanece intacto. O momento resistente é calculado com base nos princípios do projeto de estruturas de concreto armado onde a posição da linha neutra é obtida a partir da compatibilidade de deformações e do equilíbrio das forças internas. A Figura A.3 mostra o esquema das deformações e resultantes produzidas na seção reforçada com a fibra colada internamente (NSM).

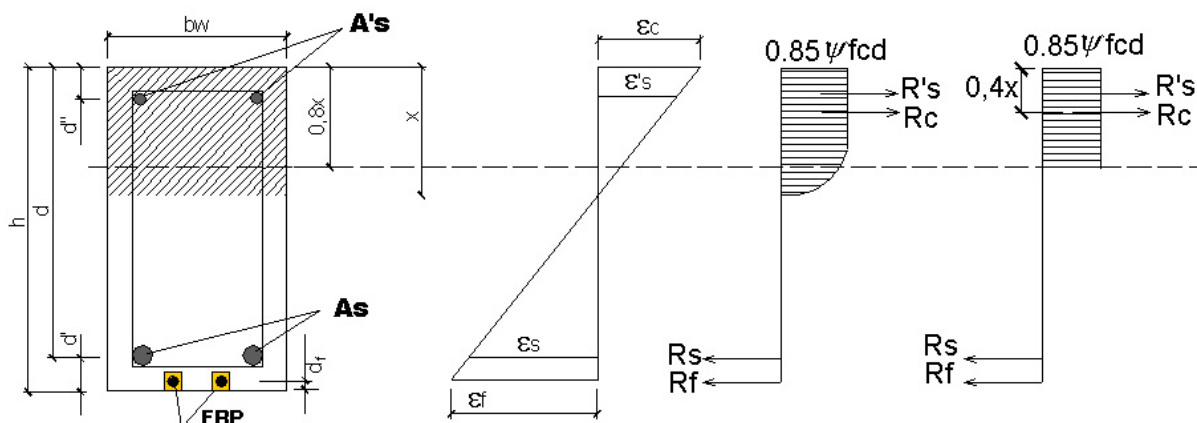


Figura A.3 – Esquema de deformações e resultantes produzidas na flexão no ELU

O momento resistente pode ser obtido através do seguinte procedimento:

- Cálculo da profundidade da linha neutra:

$$0,85\psi f_{cd} b_w x + A'_s E_s \varepsilon'_s = A_s f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f / \phi$$

(A.15)

Onde “ $\psi = 1$ ” e “ $\phi = 1,54$ ”,

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cmáx} \frac{x - d''}{x}$$

(A.16)

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cmáx} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0$$

(A.17)

Onde “ ε_0 ” é a deformação inicial produzida pelo carregamento existente.

Como a norma brasileira não tem definido coeficiente de segurança para os reforços, foi adotado o valor de 1,54, fator sugerido *Concrete Society Technical Report 55* para a parcela de fibra de carbono. O mesmo fator foi adotado para a barra de aço, visto que a mesma foi aplicada utilizando a mesma técnica.

- Momento resistente

$$M_{Rd} = R_s (d - 0,4x) + R_f (h - d'_f - 0,4x) + R'_s (0,4x - d'')$$

(A.18)

$$M_{Rd} = A_s f_{yd} (d - 0,4x) + A_f E_f \varepsilon_f / \phi (h - d'_f - 0,4x) + A'_s E_s \varepsilon'_s (0,4x - d'')$$

(A.19)

A.3.3 - Aço escoando Seguido pela Ruptura da Fibra

Situação caracterizada pelo domínio 2 com o concreto sendo submetido a valores de tensões abaixo dos valores que o levaria a ruptura. Nesse modo ruptura é bastante provável que o descolamento ocorra antes da ruptura da fibra. Considerando então o descolamento

premature, a análise desse mecanismo pode ser efetuada fazendo as seguintes modificações: “ $\varepsilon_{cmáx}$ ” passa a ser substituído por “ ε_c ”; “ ε_f ” por “ ε_{fud} ”, no caso de ruptura do compósito; e “ ψ ” passa a ser dado pelas seguintes equações:

$$\psi = \begin{cases} 0,85 \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{2‰} \right)^2 \right] & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 0,85 & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

B - MEMORIAL DE CÁLCULO

Neste anexo constam alguns exemplos de cálculo das vigas ensaiadas

B.1 - VIGA VA – REF SEGUNDO A NBR 6118:2003

Tabela B.1 – Dimensionamento à flexão da viga VA – REF segundo a norma NBR 6118, onde as resistências dos materiais são as informadas pelos fabricantes

VA - REF

Dimensionamento à Flexão NB1 (10%) (Teórico)

f'_c (MPa)	E_c (MPa)	g	b_f (mm)	b_w (mm)	h_f (mm)	h (mm)	f'_y (MPa)	E_s (MPa)	a (m)
40	29725	0,85	550	150	100	400	500	210000	1,5000
							$y \leq h_f$		
A'_s (mm ²)	d'	f'_y (MPa)	A_s (mm ²)	d_1 (mm)	d (mm)	a/d	$r_{s,geo}$ %	E'_s (MPa)	
187,03	26,15	500	628,32	48,0	352	4,26	0,6771	210000	

x	e_c	e'_s	e_s	g	x
32,50	0,001017	0,000199	0,010000	0,6448	32,74
32,74	0,001026	0,000206	0,010000	0,6482	32,53
32,53	0,001018	0,000200	0,010000	0,6452	32,71
32,71	0,001025	0,000206	0,010000	0,6478	32,55
32,55	0,001019	0,000200	0,010000	0,6455	32,69
32,69	0,001024	0,000205	0,010000	0,6476	32,57
32,57	0,001020	0,000201	0,010000	0,6457	32,68
32,68	0,001023	0,000204	0,010000	0,6473	32,58
32,58	0,001020	0,000201	0,010000	0,6459	32,67
32,67	0,001023	0,000204	0,010000	0,6472	32,59
32,59	0,001020	0,000202	0,010000	0,6461	32,66
32,66	0,001023	0,000204	0,010000	0,6470	32,60
32,60	0,001021	0,000202	0,010000	0,6462	32,65
32,65	0,001022	0,000204	0,010000	0,6469	32,61
32,61	0,001021	0,000202	0,010000	0,6463	32,65
32,65	0,001022	0,000203	0,010000	0,6469	32,61
32,61	0,001021	0,000202	0,010000	0,6464	32,64
32,64	0,001022	0,000203	0,010000	0,6468	32,62
32,62	0,001021	0,000202	0,010000	0,6464	32,64
32,64	0,001022	0,000203	0,010000	0,6467	32,62
32,62	0,001021	0,000203	0,010000	0,6465	32,64
32,64	0,001022	0,000203	0,010000	0,6467	32,62
32,62	0,001021	0,000203	0,010000	0,6465	32,63
32,63	0,001022	0,000203	0,010000	0,6467	32,62
32,62	0,001021	0,000203	0,010000	0,6465	32,63
32,63	0,001022	0,000203	0,010000	0,6467	32,62
32,62	0,001021	0,000203	0,010000	0,6465	32,63

M_d (kN.m)	P_u (kN)
92,7	123,6

B.2 - VIGA VA – RBC SEGUNDO AO ACI 440:2002

Tabela B.2 – Dimensionamento à flexão da viga VA – RBC segundo o ACI 440, onde as resistências dos materiais são as obtidas experimentalmente

VA - RBC

Dimensionamento à Flexão ACI (3%) (Experimental)

f'_c (MPa)	E_c (MPa)	g	b_f (mm)	b_w (mm)	h_f (mm)	h (mm)	f_y (MPa)	E_s (MPa)	a (m)
47,37	30030	0,85	550	150	100	400	570	219000	1,5000
							$y \leq h_f$		
A'_s (mm ²)	d' (mm)	f'_y (MPa)	A_s (mm ²)	d_1 (mm)	d (mm)	a/d	$r_{s,geo}$ %	E'_s (MPa)	β (mm)
187,03	26,15	615	628,32	48,0	352	4,26	0,6771	237000	0,7065
A_f (mm ²)	d_f (mm)	f_f (MPa)	E_f (MPa)	e_{fu}	$k_m * e_{fu}$				
78,54	390,00	1970	147000	0,0134	0,0094				

x	e_c	e'_s	e_s	e_{fe}	x
30,00	0,000782	0,000100	0,008390	0,009380	29,53
29,53	0,000768	0,000088	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56
29,56	0,000769	0,000089	0,008391	0,009380	29,56

M_d (kN.m)	P_u (kN)
141,6	188,8

B.3 - VIGA VA – RMC SEGUNDO AO ACI 440:2002 COM PONDERAÇÃO

Tabela B.3 – Dimensionamento à flexão da viga VA – RMC segundo o ACI 440, onde as resistências dos materiais são as obtidas experimentalmente

VA - RMC

Dimensionamento à Flexão ACI (3‰) (Experimental)

f'_c (MPa)	E_c (MPa)	g	b_f (mm)	b_w (mm)	h_f (mm)	h (mm)	f_y (MPa)	E_s (MPa)	a (m)
46,76	27960	0,85	550	150	100	400	570	219000	1,5000
							$y \leq h_f$		
A'_s (mm ²)	d' (mm)	f'_y (MPa)	A_s (mm ²)	d_l (mm)	d (mm)	a/d	$r_{s,geo}$ %	E'_s (MPa)	β (mm)
187,03	26,15	615	628,32	48,0	352	4,26	0,6771	237000	0,7109
A_f (mm ²)	d_f (mm)	f_f (MPa)	E_f (MPa)	e_{fu}^*	C_E	e_{fu}	k_m	$k_m \cdot e_{fu}$	
49,5	400,00	1202	187000	0,0064	0,9500	0,0061	0,9000	0,0055	

x	e_c	e'_s	e_s	e_{fc}	x
30,00	0,000444	0,000057	0,004762	0,005472	26,14
26,14	0,000383	0,000000	0,004769	0,005472	26,31
26,31	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30
26,30	0,000385	0,000002	0,004769	0,005472	26,30

M_d (kN.m)	P_u (kN)
125,6	167,4

C - LEITURAS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

C.1 - VIGA VA – REF

Tabela C.1 – Deformações na viga VA – REF

File comment:	Ensaio Viga VA - REF		Data:	14/1/2005	Hora:	09:40		fck	46,54 Mpa		
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Concreto 1L	Concreto 1W	Aço L0al	Aço L0bl	Aço L1a	Aço L1b	Aço L0aw	Aço L0bw	Aço T
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	10	9,7	-27	-27	40	40	30	34	37	37	-1
20	20	17,5	-109	-103	461	431	347	357	444	454	-2
30	30	27,8	-170	-162	752	685	558	604	698	481	16
40	40	37,6	-224	-212	973	883	734	786	897	820	31
50	50	47,6	-278	-263	1191	1082	899	963	1098	1005	68
60	60	57,5	-329	-315	1412	1288	1056	1129	1292	1204	152
80	80	77,4	-438	-419	1833	1707	1349	1447	1695	1488	298
100	100	97,3	-545	-521	2227	2106	1656	1761	2083	1861	408
120	120,4	116,9	-653	-621	2616	2500	2005	2135	2467	2329	504
130	130	127,7	-709	-673	2809	2695	2203	2404	2659	2500	562
140	140	137,1	-784	-747	3427	3221	2371	2582	3092	2999	609
150	150,4	145,6	-879	-845	4116	3722	2563	2753	3628	3531	621
155	155		-1239	-1248	8998	4382	2790	3014	3883	3731	622
160	152		-1457	-1410	-	-	2755	2985	14937	10052	621

Tabela C.2 – Deslocamentos na viga VA – REF

File comment:	Ensaio Viga VA -REF							
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	D1A	D0A	D2A	D2B	D0B	D1B
kN	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0	0	48,73	47,8	46,91	47,62	48,59	48,51
10	10	9,7	48,15	47,25	46,38	47,42	48,38	48,31
20	20	17,5	46,75	45,65	44,96	45,09	45,9	47,06
30	30	27,8	44,9	43,73	43,23	44,43	45,09	45,33
40	40	37,6	43,6	42,3	41,9	43,19	43,76	44,14
50	50	47,6	42,27	40,86	40,58	41,93	42,41	42,88
60	60	57,5	40,9	39,41	39,24	40,65	41,02	41,59
80	80	77,4	38,24	36,55	36,62	38,11	38,29	39,06
100	100	97,3	34,4	33,54	34,81	34,36	34,38	35,36
120	120,4	116,9	32,45	30,47	30,91	32,54	32,36	33,53
130	130	127,7	30,95	28,89	29,5	31,06	30,8	32,09
140	140	137,1	29,36	27,01	27,76	29,33	28,93	30,4
150	150,4	145,6	26,95	24,51	25,53	27,07	26,44	28,11
155	155		16,39	10,62	13,7	15,23	12,56	18,73
160	152							

C.2 - VIGA VA – RBC

Tabela C.3 – Deformações na viga VA – RBC

File comment:	Ensaio Viga VA - RBC		Hora:	09:15		fck	46,54 Mpa					
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Reforço F0a	Reforço F0b	Reforço F1a	Reforço F1b	Aço L0al	Aço L0bl	Aço L1a	Aço L1b	Aço L0aw	Aço L0bw
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	10	9,5	51	47	34	37	37	39	29	30	37	35
20	20	18	376	360	131	146	450	488	79	77	501	529
30	30	26,7	596	567	389	436	622	675	400	393	674	701
40	40	37,7	802	757	537	598	800	857	556	547	847	863
50	50	47,3	997	935	686	761	978	1054	720	720	1026	1041
60	60	57,5	1146	1070	829	919	1154	1246	857	872	1200	1214
80	80,2	76,3	1441	1348	1148	1270	1487	1613	1144	1209	1544	1554
100	100	95,4	1471	1364	1405	1559	1835	1999	1431	1565	1899	1912
110	110	108,3	1175	1165	1446	1608	2051	2224	1593	1763	2113	2127
120	120,2	116,5	1188	1182	1568	1745	2224	2402	1741	1948	2281	2297
130	130	127,1	1147	1127	1634	1841	2418	2601	1870	2130	2469	2486
140	140,2	137,1	1118	1128	1701	1926	2706	2881	2006	2293	2695	2763
150	150,5	145,1	1109	1147	1783	2027	3156	3260	2149	2453	3096	3136
160	160,3	155,9	1134	1191	1854	2111	3633	3763	2282	2599	3540	3574
165	165		1368	1353	1860	2123	-	-	2343	2663	20650	13565
170	166		940	968	1833	2097	-	-	2352	2676	23357	14113

Tabela C.4 – Deformações e deslocamentos na viga VA – RBC

File comment:	Ensaio Viga VA - RBC		Data:	26/1/2005							
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Concreto 1L	Concreto 1W	Aço T	D1A	D0A	D2A	D2B	D0B	D1B
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0	0	0	0	0	49,4	48,04	49,24	48,42	49,22	48,78
10	10	9,5	-22	-24	-2	48,8	47,48	48,73	48,14	48,95	48,49
20	20	18	-101	-106	-5	47,55	46,05	47,4	46,96	47,66	47,38
30	30	26,7	-136	-147	14	46,05	44,52	45,97	45,6	46,17	45,95
40	40	37,7	-174	-192	61	44,73	43,16	44,7	44,4	44,86	44,74
50	50	47,3	-214	-238	73	43,59	41,87	43,47	43,23	43,6	43,59
60	60	57,5	-252	-284	96	42,32	40,5	42,12	41,98	42,28	42,37
80	80,2	76,3	-330	-374	193	39,95	37,89	39,69	39,58	39,7	39,99
100	100	95,4	-408	-461	261	37,37	35,1	37,04	36,97	36,95	37,43
110	110	108,3	-450	-511	302	36,06	33,57	35,63	35,59	35,45	35,03
120	120,2	116,5	-487	-553	320	34,63	32,19	34,37	34,34	34,08	34,69
130	130	127,1	-526	-599	335	33,13	30,59	32,87	32,86	32,51	33,24
140	140,2	137,1	-564	-642	349	31,82	29,12	31,54	31,55	31,11	31,94
150	150,5	145,1	-617	-703	420	30,16	27,39	29,86	29,86	29,3	30,28
160	160,3	155,9	-683	-781	506	28,02	25	27,57	27,57	26,89	28,16
165	165		-1107	-1267	540						
170	166		-1331	-1501	549						

C.3 - VIGA VA – RBA

Tabela C.5 – Deformações na viga VA – RBA

File comment:	Ensaio Viga VA - RBA		Hora:	09:39		fck	46,54 Mpa					
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Reforço F0a	Reforço F0b	Reforço F1a	Reforço F1b	Aço L0al	Aço L0bl	Aço L1a	Aço L1b	Aço L0aw	Aço L0bw
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m
0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1
10	10,4	9,7	62	62	32	32	77	77	30	30	78	87
20	20	18	373	348	115	133	460	497	73	72	461	-
30	30	27,9	610	643	312	365	644	682	-	413	637	-
40	40	38	798	1076	417	485	824	858	-	568	807	-
50	50	47,5	982	773	509	597	996	1030	-	725	970	-
60	60	57,6	1144	834	595	701	1173	1207	-	941	1140	-
80	80	76,7	1499	1047	803	926	1505	1557	-	1282	1457	-
100	100,2	97,6	1723	1376	809	950	1855	1918	-	1618	1789	-
120	120,7	114,8	1548	1507	486	572	2241	2314	-	1985	2153	-
140	140,6	136,4	1053	952	274	369	2652	2736	-	2345	2539	-
160	160,7	154	1088	919	280	390	3734	4049	-	2769	3429	-
170	164,7		649	574	34	251	5127	-	-	2909	-	-

Tabela C.6 – Deformações e deslocamentos na viga VA – RBA

File comment:	Ensaio Viga VA - RBA		Data:	25/1/2005							
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Concreto 1L	Concreto 1W	Aço T	D1A	D0A	D2A	D2B	D0B	D1B
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0	0	0	0	0	48,68	48,8	48,65	48,23	49,46	49,13
10	10,4	9,7	-30	-30	-2	48,1	48,2	48,08	47,83	49,05	48,72
20	20	18	-118	-106	-4	47,96	47,92	47,9	46,74	48,83	47,65
30	30	27,9	-172	-157	5	45,3	45,18	45,22	45,17	46,2	46,11
40	40	38	-224	-206	32	44,93	44,72	43,85	43,84	44,78	44,79
50	50	47,5	-274	-251	85	42,61	42,41	42,57	42,6	43,46	43,56
60	60	57,6	-321	-296	142	41,34	41	41,22	41,3	41,04	42,24
80	80	76,7	-417	-384	197	39,83	38,31	38,61	38,73	39,4	39,73
100	100,2	97,6	-514	-472	345	36,25	35,56	36,93	36,14	36,64	37,16
120	120,7	114,8	-619	-565	500	33,25	32,41	33,02	33,25	33,52	34,2
140	140,6	136,4	-725	-666	717	30,35	24,25	30,05	30,32	30,39	31,28
160	160,7	154	-886	-815	1003	26,25	24,81	25,87	26,13	25,95	27,18
170	164,7		-1851	-1570	1117	11,74	5,96	10,12	9,92	7,86	11,6

C.4 - VIGA VA – RMC

Tabela C.7 – Deformações e deslocamentos na viga VA - RMC

File comment:	Ensaio Viga VA - RMC		Hora:	09:27		fck	46,54 Mpa					
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Reforço F0a	Reforço F0b	Reforço F1a	Reforço F1b	Aço L0al	Aço L0bl	Aço L1a	Aço L1b	Aço L0aw	Aço L0bw
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m
0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	10	9,9	56	70	40	42	48	48	31	32	41	45
20	20	17,7	643	781	125	133	432	422	112	110	449	418
30	30	26,7	849	1045	564	564	616	617	423	432	614	592
40	40	37,7	1097	1314	802	834	793	799	609	625	781	760
50	50	46,9	1333	1576	1010	1048	957	973	726	762	934	920
60	60	56,9	1560	1817	1234	1272	1117	1142	858	898	1085	1078
80	80	76	1942	2230	1635	1640	1430	1461	1114	1151	1392	1377
100	100	96,2	2370	2670	2035	2050	1757	1809	1381	1423	1711	1687
120	120,7	116,9	2816	3133	2464	2475	2092	2157	1651	1698	2030	2007
140	140	135,8	3215	3582	2926	2971	2413	2490	1970	2038	2331	2312
150	150	146,9	3424	3813	3285	3470	2575	2657	2174	2243	2478	2456
160	160	157,3	3705	4114	3586	3803	2871	2916	2338	2398	2791	2834
170	170	166,6	4089	4522	3960	4126	3199	3327	2514	2560	3029	3045
180	180,7	177,7	4499	4983	4415	4580	3656	3808	2833	2820	3356	3396
190	190,3	184,8	6023	-	4863	5096	17347	21885	3206	3164	13646	8803
200	193		6704	-	5064	5333	19154	22301	3312	3284	16997	8738

Tabela C.8 – Deformações e deslocamentos na viga VA - RMC

File comment:	Ensaio Viga VA - RMC		Data:	20/1/2005							
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Concreto 1L	Concreto 1W	Aço T	D1A	D0A	D2A	D2B	D0B	D1B
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0	0	0	0	0	47,23	48,11	46,95	46,8	48,26	48,09
10	10	9,9	-25	-26	-3	46,66	47,57	46,4	46,53	47,97	47,8
20	20	17,7	-86	-105	-5	45,87	46,67	45,6	45,89	47,16	47,08
30	30	26,7	-135	-164	12	44,19	44,9	44,92	44,19	45,43	45,46
40	40	37,7	-178	-216	31	42,91	43,36	42,65	42,93	43,11	44,25
50	50	46,9	-219	-264	52	41,8	42,34	41,52	41,82	42,92	43,16
60	60	56,9	-258	-310	75	40,64	41,11	40,32	40,64	41,68	42,02
80	80	76	-335	-401	104	38,38	38,72	38,05	38,41	38,29	39,75
100	100	96,2	-416	-498	115	35,91	36,13	35,6	35,91	36,66	37,3
120	120,7	116,9	-500	-596	126	33,46	33,54	33,15	33,45	34,09	34,84
140	140	135,8	-583	-691	142	31,1	31,08	30,82	31,13	31,55	32,49
150	150	146,9	-625	-741	157	29,76	29,69	29,51	29,8	30,19	31,16
160	160	157,3	-676	-797	180	28,5	28,35	28,27	28,56	28,8	29,9
170	170	166,6	-743	-871	229	26,86	26,54	26,56	26,86	26,99	27,24
180	180,7	177,7	-812	-948	274	25,07	24,66	24,82	25,14	25,09	26,48
190	190,3	184,8	-994	-1147	316	22,56	21,75	22,2	22,53	22,2	24
200	193		-1087	-1262	337	13,24	5,72	11,44	12,65	6,46	15,64

C.5 - VIGA VB – REF

Tabela C.9 – Deformações na viga VB - REF

File comment:	Ensaio Viga VB - REF		Data:	Hora:	15:10			12/1/2005	
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Concreto 1L	Concreto 1W	Aço L1a	Aço L0bl	Aço L1a	Aço L1b	Aço T
kN	kN	kN	µm/m	µm/m		µm/m		µm/m	µm/m
0	0		0	0	-	0	-	0	0
10	10		-24	-26	-	38	-	31	-2
20	20		-56	-60	-	111	-	83	-5
30	30	18,1	-87	-96	-	208	-	154	-8
40	40	28,1	-119	-133	-	303	-	231	-7
50	50	37,2	-150	-167	-	390	-	312	-7
60	60	46,6	-181	-201	-	477	-	394	-7
80	80	57	-238	-268	-	643	-	544	1
100	100	76,3	-297	-333	-	810	-	-	25
120	120	95,2	-356	-401	-	979	-	-	38
140	140	114,4	-410	-465	-	1139	-	-	72
160	160	134,9	-466	-531	-	1292	-	-	148
180	180	154,7	-533	-606	-	1471	-	-	209
200	200	176,1	-596	-677	-	1638	-	-	288
220	220	194,4	-662	-751	-	1803	-	-	366
240	240	215	-726	-824	-	1964	-	-	455
260	261,2	234,5	-794	-901	-	2134	-	-	570
280	280,6	255,8	-856	-975	-	2293	-	-	645
300	300	275,3	-920	-1055	-	2524	-	-	717
320	321	294	-1001	-1155	-	2836	-	-	798
340	340,5		-1082	-1255	-	3085	-	-	875
360	360,4	333,1	-1197	-1389	-	3639	-	-	995
370	370	353,2	-1292	-1489	-	12842	-	-	1081
380	374	357,4	-1535	-1722	-	-	-	-	1109

Tabela C.10 – Deformações e deslocamentos na viga VB - REF

File comment:	Ensaio Viga VB - REF		fck	36,83 Mpa					
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	D1A	D0A	D2A	D2B	D0B	D1B	
kN	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
0	0		48,46	16,69	48,31	49,89	46,04	47,32	
10	10		48,11	46,31	47,93	49,66	45,76	47,07	
0	0		48,46	46,64	48,27	49,87	45,98	47,3	
10	10		48,08	46,28	47,91	49,63	45,74	47,05	
20	20		47,62	45,78	47,45	49,16	45,23	46,59	
30	30	18,1	47,07	45,17	46,88	48,58	44,62	46,02	
40	40	28,1	46,46	44,53	46,27	47,98	43,98	45,42	
50	50	37,2	45,8	43,82	45,6	47,31	43,27	44,78	
60	60	46,6	45,14	42,14	44,94	46,63	42,57	44,11	
80	80	57	44,8	41,75	43,6	45,3	41,18	42,81	
100	100	76,3	42,44	40,29	42,24	43,88	39,68	41,4	
120	120	95,2	40,05	38,81	40,82	42,42	38,15	39,97	
140	140	114,4	39,7	36,36	39,47	41,04	36,69	38,57	
160	160	134,9	38,3	35,85	38,03	39,59	35,18	37,15	
180	180	154,7	36,9	34,35	36,6	38,16	33,65	35,72	
200	200	176,1	35,44	32,77	35,12	36,69	32,1	34,25	
220	220	194,4	33,94	30,18	33,61	35,2	30,53	32,75	
240	240	215	32,46	29,62	32,14	33,74	29	31,31	
260	261,2	234,5	30,91	28	30,59	32,23	27,4	29,78	
280	280,6	255,8	29,45	26,44	29,13	30,8	25,87	28,36	
300	300	275,3	27,95	24,81	27,6	-	-	-	
320	321	294	26,13	22,83	25,75	27,5	22,35	25,07	
340	340,5		24,24	20,81	23,88	25,68	20,38	23,26	
360	360,4	333,1	21,81	18,17	21,46	23,34	17,8	20,89	
370	370	353,2	17,11	12,17	16,34	18,29	11,82	16,2	
380	374	357,4	9,99	3,34	8,7	10,76	3,11	9,11	

C.6 - VIGA VB – RBA

Tabela C.11 – Deformações na viga VB - RBA

File comment:	Ensaio Viga VB - RBA		Hora:	09:20		fck	36,83 Mpa			
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Reforço F0a	Reforço F0b	Reforço F1a	Reforço F1b	Aço L0al	Aço L0bl	Aço L1a	Aço L1b
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	10	9,8	44	44	34	34	37	36	29	31
20	20	19,1	118	119	89	84	97	97	69	74
30	30	28,2	218	218	169	154	180	182	127	132
40	40	38	340	338	265	243	282	290	203	202
50	50	48,5	446	447	350	331	372	380	278	275
60	60	56,9	551	551	446	424	464	471	355	352
80	80,2	76,4	761	740	562	604	670	645	500	503
100	100	97,2	961	936	706	781	853	805	643	661
120	120,3	114,3	1146	1124	887	946	1020	954	788	814
140	140,3	135,4	1330	1306	1142	1116	1193	1108	941	984
160	160	155,7	1512	1487	1311	1288	1359	1258	1090	1153
180	180	175,2	1690	1667	1462	1468	1522	1405	1225	1296
200	200	195,8	1871	1848	1656	1648	1691	1555	1371	1440
220	220	214,9	2050	2024	1837	1815	1854	1703	1513	1574
240	240	235,4	2226	2198	2021	1988	2021	1853	1663	1712
260	260,5	255,6	2408	2378	2207	2164	2189	2008	1822	1853
280	280	275,7	2571	2539	2375	2319	2343	2150	1972	1982
300	300	293,4	2760	2723	2565	2499	2521	2313	2128	2122
320	320	315,4	2926	2886	2741	2660	2691	2470	2276	2266
330	330	326,5	11131	10350	2835	2747	3005	2645	2359	2345
340	340	334,9	16884	17323	2904	2812	3087	2794	2427	2410
350	350	344,6	19402	20061	2971	2877	3237	2949	2545	2526
360	360,2	355,5	22006	21852	3190	3670	3559	3255	2680	2627
370	370	362,5	23901	22788	7757	11285	4086	3566	2844	2770
380	381,2	370,7	-	-	13260	14983	-	20004	3011	2942
390	392	377,4	-	-	16869	16674	-	-	3166	3089
400	397,7		-	-	18736	17341	-	-	3147	3076

Tabela C.12 – Deformações e deslocamentos na viga VB - RBA

File comment:	Ensaio Viga VB - RBA		Data:	24/1/2005							
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Concreto 1L	Concreto 1W	Aço T	D1	D2	D3	D4	D5	D6
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0	0	0	0	0	48,36	48,15	48,4	47,94	48,69	47,15
10	10	9,8	-25	-23	-2	47,99	47,81	48,06	47,52	48,29	46,73
20	20	19,1	-54	-52	-3	47,43	46,22	47,49	47,03	47,75	46,25
30	30	28,2	-85	-82	-5	46,8	45,56	46,86	46,46	47,13	45,66
40	40	38	-116	-112	-7	46,1	44,81	46,16	45,82	46,47	45,04
50	50	48,5	-147	-137	-9	45,44	44,11	45,52	45,23	45,82	44,45
60	60	56,9	-177	-166	-8	44,75	43,4	44,87	44,6	45,16	43,83
80	80,2	76,4	-241	-220	1	43,41	41,98	43,55	43,36	43,81	42,58
100	100	97,2	-305	-292	25	42,05	40,56	42,27	42,09	42,44	41,31
120	120,3	114,3	-367	-	35	40,77	39,23	41,02	40,89	40,14	40,08
140	140,3	135,4	-434	-	51	39,38	37,78	39,7	39,6	39,7	38,71
160	160	155,7	-497	-	76	37,99	36,32	38,32	38,25	38,26	37,37
180	180	175,2	-561	-	112	36,67	34,91	37,03	37,98	36,89	36,09
200	200	195,8	-627	-	278	35,33	33,48	35,7	35,68	35,47	34,76
220	220	214,9	-694	-	509	34,01	32,09	34,44	34,44	34,1	33,46
240	240	235,4	-763	-	798	32,64	30,65	33,11	33,11	32,66	32,11
260	260,5	255,6	-834	-	985	31,26	29,2	31,76	31,77	30,21	30,74
280	280	275,7	-901	-	1138	29,95	27,81	30,48	30,5	29,8	29,44
300	300	293,4	-975	-	1296	28,48	26,27	29,06	29,07	28,27	28
320	320	315,4	-1060	-	1446	26,96	24,63	27,56	27,58	26,64	26,46
330	330	326,5	-1113	-	1527	26,02	23,63	26,65	26,67	25,64	25,53
340	340	334,9	-1161	-	1590	25,2	22,75	25,83	25,86	24,74	24,7
350	350	344,6	-1219	-	1663	24,2	21,66	24,84	24,87	23,66	23,7
360	360,2	355,5	-1279	-	1733	23,13	20,49	23,79	23,81	22,5	22,64
370	370	362,5	-1338	-	1791	22,08	19,36	22,75	22,76	21,33	21,58
380	381,2	370,7	-1599	-	1865	19,57	16,44	20,35	20,37	18,38	19,13
390	392	377,4	-	-	1932	14,19	10,06	14,91	14,93	11,98	13,83
400	397,7	-	-	-	1931	-	-15,81	-	-	-13,81	-

C.7 - VIGA VB – RMC

Tabela C.13 – Deformações e deslocamentos na viga VB - RMC

File comment:	Ensaio Viga VB - RMC		Data:	18/1/2005	Hora:	09:05		fck	36,83 Mpa				
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	Concreto 1L	Concreto 1W	Reforço F0a	Reforço F0b	Reforço F1a	Reforço F1b	Aço L0a1	Aço L0b1	Aço L1a	Aço L1b	Aço T
kN	kN	kN	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m
0	0		0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
10	10		-25	-23	15	48	19	19	37	35	28	29	-2
20	20		-53	-50	32	120	34	29	101	93	67	73	-4
30	30		-87	-81	45	196	53	39	188	174	125	137	-6
40	40		-122	-112	50	258	67	34	278	261	202	228	-5
50	50		-157	-144	65	335	83	56	377	355	274	306	-1
60	60		-189	-174	74	387	98	63	464	436	345	381	9
80	80		-253	-234	113	506	151	111	625	586	481	528	48
100	100		-314	-293	133	582	176	124	778	730	609	666	106
120	120		-381	-359	161	679	213	140	938	878	749	816	136
140	140		-448	-425	182	763	237	149	1121	1025	902	960	167
160	160,3		-513	-490	203	851	266	166	1273	1167	1040	1099	211
180	180,9		-583	-561	230	939	301	188	1458	1317	1183	1247	275
200	200		-652	-631	231	995	305	178	1615	1456	1323	1389	406
220	221,5		-733	-715	268	1036	332	197	1775	1607	1471	1539	466
240	240,7		-798	-783	273	1188	342	192	1945	1745	1604	1667	525
260	260		-867	-854	296	1242	369	205	2091	1881	1738	1797	611
280	280		-942	-930	318	1089	395	221	2263	2020	1877	1932	702
300	300,7		-1026	-1017	338	1183	415	233	2410	2169	2029	2083	797
320	320		-1107	-1101	331	1178	403	212	2566	2303	2261	2214	887
340	340,7		-1195	-1188	411	1340	465	261	2825	2538	2405	2360	968
360	360		-1288	-1281	439	1452	488	276	3043	2716	2542	2498	1063
370	370,2		-1353	-1348	446	1489	484	269	3186	2856	2611	2569	1125
380	380,7		-1428	-1425	462	1537	483	268	3331	3023	2751	2698	1177
390	390,4		-1492	-1491	475	1599	494	270	3489	3191	2852	2822	1219
400	400,5		-1557	-1555	520	1707	520	287	3731	3389	3012	2920	1258
410	410		-1721	-1721	738	2261	519	283	8496	6193	3153	3034	1309
420	414,8		-1871	-1883	-	-	-	-	17921	9966	3164	3083	1292

Tabela C.14 – Deformações e deslocamentos na viga VB - RMC

File comment:	Ensaio Viga VB - RMC							
Passo de Carga	Carga Aplicada	Carga Residual	D1A	D0A	D2A	D2B	D0B	D1B
kN	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0		46,51	47,69	48,75	47,81	48,37	46,5
10	10		46,11	47,29	48,34	47,54	48,1	46,23
20	20		45,6	46,75	47,82	47,11	47,62	45,78
30	30		45	46,09	47,22	46,54	47,01	45,22
40	40		44,35	45,4	46,56	45,9	46,32	44,58
50	50		43,74	44,73	45,95	45,29	45,77	43,98
60	60		43,12	43,07	45,33	44,68	45,02	43,37
80	80		41,94	42,77	44,1	43,48	43,74	42,18
100	100		40,7	41,44	43,84	42,23	42,42	40,94
120	120		39,45	39,08	41,54	40,95	41,05	39,67
140	140		38,17	38,68	40,22	39,65	39,65	38,39
160	160,3		36,91	37,31	38,95	38,4	38,3	37,15
180	180,9		35,55	35,82	37,55	37,05	36,85	35,79
200	200		34,19	34,39	36,2	35,72	35,39	34,44
220	221,5		32,71	32,76	34,7	34,25	33,81	32,98
240	240,7		31,49	31,43	33,45	33,03	32,49	31,75
260	260		30,25	29,07	32,18	31,78	31,13	30,5
280	280		28,95	28,65	30,86	30,49	29,76	29,19
300	300,7		27,5	27,1	29,41	29,05	28,21	27,72
320	320		26,18	25,65	28,08	27,72	26,78	26,4
340	340,7		24,71	24,05	26,56	26,25	25,19	24,94
360	360		23,17	22,35	25,01	24,73	23,55	23,43
370	370,2		22,15	21,25	23,99	23,75	22,5	22,46
380	380,7		21,05	19,99	22,82	22,65	21,29	21,37
390	390,4		19,98	18,81	21,75	21,64	20,17	20,35
400	400,5		18,92	17,62	20,65	20,6	19,03	19,33
410	410		16,69	14,91	18,22	18,27	16,41	17,14
420	414,8		-	-	14,86	15,05	-	-

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)