



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

MYLENE DE MELO VIEIRA

ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS
À FLEXÃO COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO

FORTALEZA

2014

MYLENE DE MELO VIEIRA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS
À FLEXÃO COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Miranda Mont'Alverne.

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- V716e Vieira, Mylene de Melo.
 Estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono / Mylene de Melo Vieira. – 2014.
 244 f. : il., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2014.
 Área de Concentração: Construção Civil.
 Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
 Coorientação: Prof. Dr. Alexandre Miranda Mont'Alverne.
1. Engenharia Estrutural. 2. Vigas de concreto. 3. Estruturas de concreto – Manutenção e reparos. I. Título.

MYLENE DE MELO VIEIRA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS
À FLEXÃO COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO**

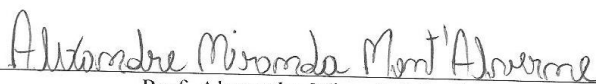
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 30/05/2014.

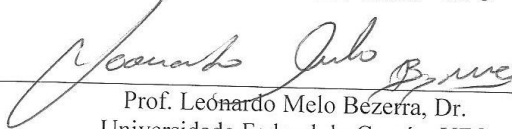
BANCA EXAMINADORA



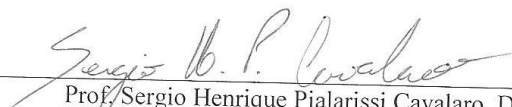
Prof. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, Dr. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Alexandre Miranda Mont'Alverne, Dr.
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Leonardo Melo Bezerra, Dr.
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Sergio Henrique Píalarissi Cavalari, Dr.
Universitat Politècnica de Catalunya

Ao Bom Deus.

Aos meus pais, Arcanjo e Mirleide.

AGRADECIMENTO

A Jesus, o Shalom do Pai, meu Amado Senhor, por Sua graça que alcança toda a minha vida em tudo o que faço e sou e por ter me dado a inspiração e a coragem para deixar o mercado de trabalho e perseguir o sonho antigo da vida acadêmica.

À Maria, mãe de Deus e minha mãe, por sua maternidade e interseção sempre! Sou toda tua ó Maria!

A São José, a quem particularmente me confio e entreguei toda a empreitada dessa pesquisa. De carpinteiro a serviços de engenharia, São José não falha!

Aos meus pais, minhas irmãs Arleide, Adriana, Mychelle, todos os cunhados, meu irmão Daniel, minha cunhada Marina e meus sobrinhos (meus amores), grande presente e presença nesse tempo, por todo apoio, orações, cuidado.

À minha querida Comunidade Católica Shalom, meu lugar na Santa Mãe Igreja, especialmente aos irmãos de Fortaleza e às minhas autoridades, pelas orações e compreensão nas minhas ausências nesse tempo e à minha formadora Laura Martins que discerniu e acompanhou comigo todo esse processo do mestrado.

Ao meu caríssimo orientador Prof. Eduardo Cabral, pela confiança, orientação e assistência em todo o caminho para a realização da pesquisa, e por ser tão engenheiro (desenrolado).

Ao meu coorientador Prof. Alexandre Mont'Alverne, pela paciência em me fazer voltar a estudar a área de estruturas e por todo o acompanhamento na parte analítica da pesquisa, sem palavras para lhe agradecer.

Ao Prof. Leonardo Bezerra, pela inestimável ajuda na pesquisa, especialmente na parte experimental, meu reconhecimento e gratidão.

À minha turma de mestrado, especialmente aos amigos que comigo formam a “dupla” de cinco: Viviane (Vivi), Enza, Bruno e William, vocês fizeram a diferença nesse tempo. Como é bom fazer e ter amigos!

Ao meu amigo Maurício, do Laboratório de Materiais de Construção, que abraçou a minha pesquisa como se fosse sua, por toda ajuda em tudo! Não teria conseguido fazer nada sem você e sem o seu “padrão FIFA”!

Aos meus queridos bolsistas da pesquisa: Rafaela, Wedney e Marina. A disponibilidade de vocês para um trabalho tão intenso e por vezes exaustivo, muito me ajudou e edificou. Minha gratidão!

À Empresa Módulo Engenharia, na pessoa do seu diretor Dr. Luís Carlos, pelo incentivo e trabalho realizado na pesquisa. Muito obrigada pela confiança!

À Empresa Tecmix, na pessoa do seu gerente-CE, Ribamar, pela pronta disponibilidade em fornecer o concreto para a pesquisa.

À Empresa Solução, pelo fornecimento dos livros sobre fibra de carbono e pelas mantas geotêxteis.

À Empresa de Representações e Comércio Nossa Senhora de Fátima Ltda., na pessoa do Sr. Guilherme, pela gentileza de fornecer os espaçadores plásticos para a pesquisa.

À empresa CONTEC - Serviço de Controle Tecnológico de Materiais, na pessoa da diretora técnica Dra. Joselídia, pela gentileza em realizar os ensaios de módulo de elasticidade do concreto.

À equipe da Divisão de Materiais do NUTEC, na pessoa da Dra. Fátima e de todos os funcionários, pela grande colaboração e paciência em me deixar, por quase cinco meses, ocupar grande parte da estrutura física do DIMAT para preparar e realizar os ensaios e pelo interesse de todos, em sempre e de algum modo, me dar uma ajuda. Vocês são especiais!

Aos professores da área de estruturas que, mesmo à distância, muito me ajudaram enviando seus trabalhos e tirando dúvidas: Prof. Vladimir Ferrari, Prof. Andriei Beber e Prof. Adriano Fortes, a minha gratidão.

Aos professores do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, pela contribuição em todo o conhecimento que adquiri nesse mestrado, aos funcionários, especialmente minha querida Valdinha, pela sua simplicidade e por todos os cafés e ao Sr. Gadelha da Prefeitura do Campus do Pici, pela prontidão em me ajudar sempre.

À CAPES-PROPAG, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À FUNCAP pelo incentivo financeiro tornando possível essa pesquisa.

A todos aqui citados e tantos outros que direta ou indiretamente foram instrumentos da Divina Providência para mim nessa pesquisa, minha gratidão. Deus lhes pague!

“Eis que vou fazer obra nova, a qual já surge:
não a vedes? Vou abrir uma via pelo deserto, e
fazer correr arroios pela estepe.”

(Is. 43,19)

RESUMO

As estruturas de concreto armado, quando convenientemente projetadas e executadas têm sua vida útil prolongada, porém, a falta de manutenção adequada, as solicitações de cargas superiores às de projeto, as manifestações patológicas devido ao meio ambiente agressivo e a ocorrência de acidentes podem comprometer o desempenho da estrutura exigindo a necessidade de uma recuperação ou reforço estrutural. A técnica de reforço estrutural com a aplicação de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) colados externamente a peças de concreto armado apresenta vantagens como a rápida execução que, somada a características do compósito como alto módulo de elasticidade fazem largo o seu uso. O objetivo desse trabalho é analisar através de um programa experimental o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC. A metodologia utilizada foi a produção de três grupos de vigas de concreto armado, com a mesma dimensão de seção transversal retangular para ensaio à flexão. O primeiro grupo, denominado grupo VA, foi dimensionado com seção normalmente armada. O segundo e terceiro grupo de vigas, aqui denominados grupo VB e grupo VC, respectivamente, foram dimensionados com seção subarmada, com taxas de armaduras distintas. Cada grupo possuía cinco vigas, sendo que, uma viga não foi reforçada (de referência) e as demais vigas foram reforçadas com duas, três, quatro e cinco camadas de fibra de carbono. Os ensaios experimentais comprovaram a eficiência do reforço, constatando-se um aumento de rigidez de todas as vigas reforçadas. Observou-se também o aumento da capacidade resistente em todos os grupos de vigas, variando entre 9,11% e 16,69%, 55,14% e 86,83%, 89,46% e 126,18%, das vigas dos grupos VA, VB e VC, respectivamente, em relação à viga de referência de cada grupo. O estudo demonstrou o excelente desempenho do reforço à flexão com fibra de carbono, especialmente nas vigas com menores taxas de armadura (grupo VC), além de reunir uma série de informações que podem ser úteis para critérios de projeto de estruturas recuperadas e reforçadas.

Palavras-chave: Reforço à flexão. PRFC. Viga de concreto armado.

ABSTRACT

The reinforced concrete structures, when properly designed and performed, have prolonged its life. However, the lack of proper maintenance, acting loads greater than the design ones, pathological manifestations due to aggressive environment and accidents can impair the performance of the structure requiring the need for repair or structural strengthening. The technique of structural strengthening with application of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), bonded externally to the reinforced concrete has advantages such as fast execution, which added to the characteristics of the composite as a high modulus of elasticity make wide its use. The aim of this study is to analyze through an experimental program the structural behavior of reinforced concrete beams strengthened in bending with CFRP. The methodology used was the production of three groups of five RC beams each one, with the same dimension of rectangular cross section, for bending test. The first group of beams was called VA. The second and third groups, called VB and VC and had different ratio of reinforcement. In each group of five beams, one beam was not strengthened (reference beam) and the remaining beams were strengthened with two, three, four and five layers of carbon fiber. The experimental results indicate the efficiency of strengthening, noting an increase in stiffness in all strengthened beams. The increase of load capacity was also observed in all groups of beams varying between 9,11% and 16,69%, 55,14% and 86,83%, 89,46% and 126,18%, of the beams of group VA, VB and VC, respectively in relation to the reference beam of each group. Of the carried through study was observed the excellent performance of strengthening in bending with carbon fiber especially in beams with the lowest ratios of reinforcement (group C), besides gathering a lot of information that can be useful for design criteria of the recovered and strengthened structures.

Keywords: Flexural strengthening. CFRP. Reinforced concrete beams.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Viaduto que liga Analândia à Itirapina	25
Figura 2 - Viaduto de Santa Teresa em Belo Horizonte - MG	26
Figura 3 - Reforço da estrutura do estádio do Maracanã.....	28
Figura 4 - Desempenho de uma estrutura de concreto	34
Figura 5 - Manifestações patológicas em estruturas de concreto	35
Figura 6 - Formas de intervenções nas estruturas	37
Figura 7 - Remoção de manchas com a lavagem da superfície.....	38
Figura 8 - Recuperação de fissuras com o uso de injeção selante	39
Figura 9 - Reforço com chapa de aço colada.....	40
Figura 10 - Geometria dos cabos de protensão.....	41
Figura 11 - Encamisamento com concreto projetado e adição de armadura.....	42
Figura 12 - Materiais constituintes do compósito PRF	43
Figura 13 - Tipos de fibra do PRF	44
Figura 14 - Curva tensão-deformação das fibras utilizadas em sistema PRF	46
Figura 15 - Componentes do sistema pré-fabricado de PRFC	50
Figura 16 - Componentes do sistema curado <i>in situ</i> de PRFC	51
Figura 17 - Detalhe da aplicação de laminado em estrutura de concreto	53
Figura 18 - Detalhe da aplicação de manta de fibra de carbono.....	54
Figura 19 - Domínios de deformação	55
Figura 20 - Seção transversal e distribuição das tensões e deformações.....	57
Figura 21 - Ruína por esmagamento do concreto.....	61
Figura 22 - Ruína por escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto.....	62
Figura 23 - Ruptura do reforço por tração	62
Figura 24 - Ruína por cisalhamento	63
Figura 25 - Ruína por descolamento ocasionado por fissura de flexão.....	64
Figura 26 - Ruína por descolamento ocasionado por fissura de flexão/cisalhamento.....	64
Figura 27 - Ruína por descolamento ocasionado por fissura diagonal crítica.....	65
Figura 28 - Ruína por ruptura do concreto de cobrimento	65
Figura 29 - Ruína por descolamento do reforço	66
Figura 30 - Ruína por descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento	67
Figura 31 - Ruptura interlaminar do reforço	68
Figura 32 - Ruína por descolamento na interface adesivo-concreto	68

Figura 33 - Ruína por descolamento na interface adesivo-PRFC	69
Figura 34 - Detalhamento do esquema de ensaio das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003) (medidas em mm)	71
Figura 35 - Detalhamento das armaduras das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003) (medidas em mm)	71
Figura 36 - Detalhe do modo de ruptura.....	73
Figura 37 - Curvas carga-deslocamento vertical das vigas do grupo F ensaiadas por Beber (2003)	74
Figura 38 - Detalhamento das armaduras das vigas de Ferrari (2007) (medidas em mm).....	76
Figura 39 - Detalhamento do carregamento e do reforço das vigas de Ferrari	76
Figura 40 - Detalhe das vigas na ruína	77
Figura 41 - Curvas força-deslocamento vertical das vigas de Ferrari (2007)	78
Figura 42 - Detalhamento das armaduras e do carregamento das vigas ensaiadas por Costa (2011) (medidas em mm)	79
Figura 43 - Detalhamento do sistema de reforço das vigas ensaiadas por Costa (2011) (medidas em mm)	80
Figura 44 - Configuração das vigas na ruína.....	81
Figura 45 - Curvas carga-deslocamento vertical das vigas ensaiadas por Costa (2011).....	81
Figura 46 - Detalhamento do carregamento e da geometria das vigas BF de Matthys (2000) (medidas em mm)	83
Figura 47 - Detalhamento da armadura e do reforço das vigas BF de Matthys (2000) (medidas em mm)	83
Figura 48 - Detalhe da ruína das vigas reforçadas do grupo BF	84
Figura 49 - Curvas carga-deslocamento vertical das vigas do grupo BF de Matthys (2000).	85
Figura 50 - Detalhamento da armadura, do reforço e do carregamento das vigas de Ahmed <i>et al.</i> (2011)	87
Figura 51 - Detalhe do modo de ruína típico das vigas reforçadas sem ancoragem	88
Figura 52 - Curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas de Ahmed <i>et al.</i> (2011)	88
Figura 53 - Detalhamento da armadura, do reforço e do carregamento das vigas RF de Obaidat <i>et al.</i> (2011).....	90
Figura 54 - Detalhe típico da ruína das vigas reforçadas RF	91
Figura 55 - Curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas de Obaidat <i>et al.</i> (2011)	92

Figura 56 - Detalhamento da armadura, do carregamento e do reforço das vigas CR do trabalho de Dong <i>et al.</i> (2013).....	93
Figura 57 - Detalhes das vigas na ruína.....	95
Figura 58 - Curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas CR de Dong <i>et al.</i> (2013)	95
Figura 59 - Dimensões e carregamento das vigas	97
Figura 60 - Detalhe dos espaçadores plásticos	98
Figura 61 - Detalhamento das armaduras das vigas VA	99
Figura 62 - Detalhamento das armaduras das vigas VB.....	99
Figura 63 - Detalhamento das armaduras das vigas VC.....	100
Figura 64 - Posicionamento do reforço nas vigas.....	101
Figura 65 - Detalhes do ensaio de módulo de elasticidade no concreto.....	103
Figura 66 - Detalhe do ensaio de tração das barras de aço.....	106
Figura 67 - Formas utilizadas na concretagem das vigas	109
Figura 68 - Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	109
Figura 69 - Detalhes da concretagem	110
Figura 70 - Detalhes cura úmida.....	111
Figura 71 - Preparo da fibra de carbono	112
Figura 72 - Preparo da superfície	112
Figura 73 - Aplicação do <i>primer</i>	113
Figura 74 - Aplicação da resina de regularização (<i>stuc</i>)	114
Figura 75 - Aplicação da resina saturante	114
Figura 76 - Aplicação das camadas de fibra.....	115
Figura 77 - Conclusão do reforço	115
Figura 78 - Nomenclatura e posicionamento dos extensômetros (viga em perfil).....	116
Figura 79 - Instrumentação da armadura.....	118
Figura 80 - Instrumentação do concreto	119
Figura 81 - Instrumentação do reforço	119
Figura 82 - Transdutores no meio do vão e no ponto de aplicação da carga	120
Figura 83 - Transdutor no apoio	120
Figura 84 - Nomenclatura e posicionamento dos transdutores.....	121
Figura 85 - Ilustração do esquema geral do ensaio das vigas.....	122
Figura 86 - Componentes do ensaio das vigas	122
Figura 87 - Dispositivos auxiliares.....	123

Figura 88 - Monitoramento das fissuras	123
Figura 89 - Sistema de aquisição de dados.....	124
Figura 90 - Detalhes da ruína da viga VA-R.....	126
Figura 91 - Detalhes da ruína da viga VA-2.....	127
Figura 92 - Configuração da ruína das vigas VA-3, VA-4 e VA-5.....	128
Figura 93 - Detalhes da ruína das vigas VA-4 e VA-5.....	128
Figura 94 - Detalhes da ruína da viga VB-R	129
Figura 95 - Configuração da ruína das vigas VB-2 e VB-3	130
Figura 96 - Configuração da ruína das vigas VB-4 e VB-5	131
Figura 97 - Detalhes da ruína das vigas VB-2 e VB-4	131
Figura 98 - Detalhes da ruína da viga VC-R	132
Figura 99 - Configuração da ruína das vigas VC-2 e VC-3	133
Figura 100 - Configuração da ruína das vigas VC-4 e VC-5	134
Figura 101 - Detalhes da ruína das vigas VC-3 e VC-4	134
Figura 102 - Detalhe da fissuração da viga VA-R.....	137
Figura 103 - Detalhe da fissuração da viga VA-5	138
Figura 104 - Detalhe da fissuração da viga VB-R.....	139
Figura 105 - Detalhe da fissuração da viga VB-5	139
Figura 106 - Detalhe da fissuração da viga VC-R.....	140
Figura 107 - Detalhe da fissuração da viga VC-5	141
Figura 108 - Curvas P- δ no meio do vão das vigas VA	142
Figura 109 - Curvas P- δ no meio do vão das vigas VB	144
Figura 110 - Curvas P- δ no meio do vão das vigas VC	146
Figura 111 - Curvas carga-deformação na armadura no meio do vão das vigas VA.....	148
Figura 112 - Curvas carga-deformação na armadura no meio do vão das vigas VB	150
Figura 113 - Curvas carga-deformação na armadura no meio do vão das vigas VC	152
Figura 114 - Curvas carga-deformação na armadura de cisalhamento das vigas VA.....	154
Figura 115 - Curvas carga-deformação na armadura de cisalhamento das vigas VB	156
Figura 116 - Curvas carga-deformação na armadura de cisalhamento das vigas VC	157
Figura 117 - Curvas carga-deformação no reforço no meio do vão das vigas VA	159
Figura 118 - Curvas carga-deformação no reforço no meio do vão das vigas VB.....	161
Figura 119 - Curvas carga-deformação no reforço no meio do vão das vigas VC.....	163
Figura 120 - Curvas carga-deformação no concreto no meio do vão das vigas VA.....	165
Figura 121 - Curvas carga-deformação no concreto no meio do vão das vigas VB	167

Figura 122 - Curvas carga-deformação no concreto no meio do vão das vigas VC	169
Figura 123 - Diferença percentual das cargas últimas de todas as vigas reforçadas	170
Figura 124 - Deformações no reforço até 90% da carga última de cada viga	172
Figura 125 - Detalhamento do carregamento e das reações de apoio	199
Figura 126 - Diagrama de esforço normal	199
Figura 127 - Diagrama de esforço cortante	199
Figura 128 - Diagrama de momento fletor	200
Figura 129 - Seção transversal das vigas	200
Figura 130 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 5,0 mm	202
Figura 131 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 6,3 mm	203
Figura 132 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 8,0 mm	204
Figura 133 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 10,0 mm	205
Figura 134 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 12,5 mm	206
Figura 135 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 16,0 mm	207

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Possíveis causas das manifestações patológicas nas estruturas de concreto	35
Tabela 2 - Principais manifestações patológicas superficiais e técnicas de recuperação	38
Tabela 3 - Propriedades na tração de fibras utilizadas em sistema de PRF.....	46
Tabela 4 - Propriedades das matrizes termofixas (<i>Bulletin 40 FIB, 2007</i>).....	48
Tabela 5 - Propriedades das matrizes termoplásticas (<i>Bulletin 40 FIB, 2007</i>).....	48
Tabela 6 - Descrição das mantas e tecidos empregados no sistema curado <i>in situ</i>	52
Tabela 7 - Esquema do reforço das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003)	72
Tabela 8 - Cargas e modos de ruptura das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003).....	73
Tabela 9 - Cargas e modos de ruptura das vigas do trabalho de Ferrari (2007).....	77
Tabela 10 - Modos de ruína e cargas últimas das vigas	80
Tabela 11 - Resultados experimentais das vigas BF de Matthys (2000).....	84
Tabela 12 - Cargas últimas e modos de ruína das vigas do trabalho de Ahmed <i>et al.</i> (2011)..	87
Tabela 13 - Resultados experimentais das vigas do grupo RF de Obaidat <i>et al.</i> (2011).....	91
Tabela 14 - Características das vigas CR do trabalho de Dong <i>et al.</i> (2013).....	94
Tabela 15 - Resultados experimentais das vigas CR de Dong <i>et al.</i> (2013)	94
Tabela 16 - Reforço das vigas	101
Tabela 17 - Material do concreto usinado	102
Tabela 18 - Resultados dos ensaios no concreto	103
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de compressão	104
Tabela 20 - Resultados do ensaio de tração em amostras das barras de aço	105
Tabela 21 - Propriedades da manta de fibra de carbono.....	107
Tabela 22 - Características da manta de fibra de carbono	107
Tabela 23 - Características do <i>primer</i> e da resina de regularização	108
Tabela 24 - Características e nomenclatura das vigas ensaiadas.....	125
Tabela 25 - Cargas últimas experimentais das vigas	136
Tabela 26 - Deslocamentos verticais das vigas VA	143
Tabela 27 - Deslocamentos verticais das vigas VB.....	144
Tabela 28 - Deslocamentos verticais das vigas VC.....	146
Tabela 29 - Cargas e deformações na armadura positiva das vigas VA.....	149
Tabela 30 - Cargas e deformações na armadura positiva das vigas VB.....	151
Tabela 31 - Cargas e deformações na armadura positiva das vigas VC.....	153
Tabela 32 - Deformações últimas na armadura de cisalhamento das vigas VA.....	155

Tabela 33 - Deformações últimas na armadura de cisalhamento das vigas VB.....	156
Tabela 34 - Deformações últimas na armadura de cisalhamento das vigas VC.....	158
Tabela 35 - Deformações últimas no reforço das vigas VA.....	160
Tabela 36 - Deformações últimas no reforço das vigas VB	162
Tabela 37 - Deformações últimas no reforço das vigas VC	164
Tabela 38 - Deformações no concreto comprimido das vigas VA.....	166
Tabela 39 - Deformações no concreto comprimido das vigas VB	168
Tabela 40 - Deformações no concreto comprimido das vigas VC	169
Tabela 41 - Valores analíticos e experimentais das cargas últimas.....	173
Tabela 42 - Valores analíticos e experimentais das deformações últimas no reforço.....	175
Tabela 43 - Comparativo entre as deformações no reforço.....	176
Tabela 44 - Características das vigas de Beber (2003) e de Ferrari (2007).....	178
Tabela 45 - Cargas últimas e taxas equivalentes das vigas	180
Tabela 46 - Deslocamento vertical das vigas comparadas	181
Tabela 47 - Deformação no reforço das vigas ensaiadas.....	182
Tabela 48 - Custos unitários e totais dos sistemas de reforço das vigas	184
Tabela 49 - Relações custo-capacidade de carga e custo-aumento da capacidade de carga para as vigas.....	185
Tabela 50 - Dados do dimensionamento das vigas de referência.....	201
Tabela 51 - Resultados experimentais da viga VA-R	208
Tabela 52 - Resultados experimentais da viga VA-2	209
Tabela 53 - Resultados experimentais da viga VA-3	210
Tabela 54 - Resultados experimentais da viga VA-4	211
Tabela 55 - Resultados experimentais da viga VA-5	212
Tabela 56 - Resultados experimentais da viga VB-R.....	213
Tabela 57 - Resultados experimentais da viga VB-2	214
Tabela 58 - Resultados experimentais da viga VB-3	215
Tabela 59 - Resultados experimentais da viga VB-4	216
Tabela 60 - Resultados experimentais da viga VB-5	217
Tabela 61 - Resultados experimentais da viga VC-R.....	218
Tabela 62 - Resultados experimentais da viga VC-2	219
Tabela 63 - Resultados experimentais da viga VC-3	220
Tabela 64 - Resultados experimentais da viga VC-4	221
Tabela 65 - Resultados experimentais da viga VC-5	222

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CFC	Composto reforçado com fibra
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
CRFC	Compósito reforçado com fibra de carbono
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELU	Estado limite último
FIB	Fédération Internationale du Béton
ISIS	Intelligent Sensing for Innovative Structures
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PRF	Polímero reforçado com fibra
PRFA	Polímero reforçado com fibra de aramida
PRFC	Polímero reforçado com fibra de carbono
PRFV	Polímero reforçado com fibra de vidro
OAE	Obra de Arte Especial
PROARTE	Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f	Área de fibra de carbono
A_s	Área da seção transversal da armadura tracionada
A'_s	Área da seção transversal da armadura comprimida
b	Largura da base da viga
b_f	Largura do reforço à flexão
b_r	Largura do reforço
d	Distância do bordo mais comprimido até o centro de gravidade da armadura tracionada
d'	Distância do bordo mais tracionado até o centroide da armadura tracionada
d''	Distância do bordo mais comprimido até o centroide da armadura comprimida
d_s	Altura útil da viga a partir do centro de gravidade da barra de aço
$D_{máx}$	Diâmetro máximo do agregado graúdo
E_s	Módulo de elasticidade da armadura tracionada ou inferior
E'_s	Módulo de elasticidade da armadura comprimida ou superior
E_f	Módulo de elasticidade da fibra de carbono
E_{ci}	Módulo tangente inicial de deformação do concreto
E_r	Módulo de elasticidade do reforço
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{cd}	Resistência à compressão de cálculo do concreto
f_{cm}	Resistência média à compressão do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{ct}	Resistência à tração direta do concreto
f_{st}	Resistência à tração do aço
f_{yd}	Resistência ao escoamento de cálculo da armadura tracionada ou inferior
f'_{yd}	Resistência ao escoamento de cálculo da armadura comprimida ou superior
h	Altura total da seção transversal
k_m	Coefficiente de limitação da deformação no reforço
l	Comprimento aderido de fibra no vão
l_b	Comprimento de ancoragem da fibra
L_e	Comprimento de ancoragem efetivo do reforço
L_r	Comprimento de ancoragem do reforço
M_d	Momento fletor resistente de cálculo

n	Número de camadas do reforço
P	Carga aplicada
P_a	Carga de projeto última característica
P_e	Carga última experimental
P_u	Carga de colapso
P_y	Carga de escoamento da armadura positiva
t_r	Espessura de uma camada de manta
R_{cd}	Força do concreto
R_{cdi}	Força inicial do concreto
R_f	Força da fibra de carbono
R_{sd}	Força da armadura tracionada ou inferior
R'_{sd}	Força da armadura comprimida ou superior
R_{sdi}	Força inicial da armadura tracionada ou inferior
R'_{sdi}	Força inicial da armadura comprimida ou superior
x	Posição da linha neutra da seção
x_i	Posição inicial da linha neutra da seção
β_p	Coefficiente de largura do reforço
β_l	Fator que relaciona L_e com L_r
δ	Deslocamento vertical
ϵ_c	Deformação do concreto na fibra mais comprimida
ϵ_{ci}	Deformação inicial do concreto
ϵ_f	Deformação da fibra de carbono
ϵ_{fi}	Deformação inicial da fibra de carbono
ϵ_{ru}	Deformação de ruptura de projeto do reforço
ϵ_s	Deformação da armadura tracionada ou inferior
ϵ'_s	Deformação da armadura comprimida ou superior
ϵ_{si}	Deformação inicial da armadura tracionada ou inferior
ϵ'_{si}	Deformação inicial da armadura comprimida ou superior
ϵ_y	Deformação específica de escoamento do aço
ϵ_{y*}	Deformação específica de escoamento do aço para o diagrama tensão-deformação bilinear
ρ_{eq}	Taxa de reforço equivalente
σ_{sd}	Tensão na armadura tracionada

σ'_{sd}	Tensão na armadura comprimida
σ_{fd}	Tensão na fibra de carbono
σ_{ru}	Tensão máxima admissível no reforço
σ_y	Tensão de escoamento da armadura
β_p	Coefficiente de largura do reforço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	29
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	29
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	29
1.3	METODOLOGIA	30
1.4	APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1	INTRODUÇÃO	32
2.2	PATOLOGIA	34
2.3	TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	37
2.4	TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	39
2.4.1	<i>Chapas de aço ou perfis metálicos colados externamente</i>	39
2.4.2	<i>Protensão externa</i>	40
2.4.3	<i>Encamisamento com concreto ou argamassa com ou sem armadura</i>	41
2.5	SISTEMA DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA (PRF)	43
2.5.1	<i>Elementos constituintes do sistema PRF – fibras</i>	44
2.5.1.1	<i>Fibra de carbono</i>	44
2.5.1.2	<i>Fibra de aramida</i>	45
2.5.1.3	<i>Fibras de vidro</i>	45
2.5.1.4	<i>Propriedades na tração das fibras utilizadas no sistema PRF</i>	46
2.5.2	<i>Elementos constituintes do sistema PRF – matrizes (resina saturante)</i>	47
2.5.2.1	<i>Resinas termofixas</i>	47
2.5.2.2	<i>Resinas termoplásticas</i>	48
2.5.3	<i>Elementos constituintes do sistema PRF – outras resinas</i>	49
2.5.4	<i>Formas de comercialização do sistema PRF</i>	49
2.5.4.1	<i>Sistemas pré-fabricados (laminados)</i>	50
2.5.4.2	<i>Sistemas curados in situ</i>	50
2.5.5	<i>Execução do reforço com o sistema PRF</i>	52
2.5.5.1	<i>Execução do sistema pré-fabricado</i>	52
2.5.5.2	<i>Execução do sistema curado in situ</i>	53
2.5.6	<i>Dimensionamento do reforço à flexão com PRFC</i>	54
2.5.7	<i>Modelos analíticos de ruínas prematuras</i>	58
2.5.7.1	<i>Modelo de Chen & Teng (2001)</i>	59
2.5.7.2	<i>ACI 440.2R (2002)</i>	60
2.5.7.3	<i>Beber (2003)</i>	60
2.5.8	<i>Modos de ruína</i>	60
2.6	ESTUDOS EXPERIMENTAIS SOBRE REFORÇO COM PRFC	70
2.6.1	<i>Estudos nacionais</i>	70

2.6.2	<i>Estudos internacionais</i>	82
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	97
3.1	INTRODUÇÃO	97
3.2	CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS	97
3.2.1	<i>Vigas normalmente armadas (VA)</i>	98
3.2.2	<i>Vigas subarmadas (VB)</i>	99
3.2.3	<i>Vigas subarmadas (VC)</i>	100
3.2.4	<i>Reforço</i>	100
3.3	MATERIAIS	101
3.3.1	<i>Concreto</i>	101
3.3.2	<i>Aço</i>	106
3.3.3	<i>Reforço</i>	106
3.4	CONFECÇÃO DAS VIGAS	108
3.4.1	<i>Formas</i>	108
3.4.2	<i>Concretagem</i>	109
3.4.3	<i>Retirada das formas e cura</i>	110
3.4.4	<i>Aplicação do reforço com PRFC</i>	111
3.4.5	<i>Instrumentação</i>	116
3.4.5.1	<i>Extensômetros elétricos de resistência</i>	116
3.4.5.2	<i>Transdutores de deslocamento (LVDT's)</i>	120
3.4.6	<i>Descrição dos ensaios</i>	121
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	125
4.1	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	125
4.1.1	<i>Modos de ruína</i>	125
4.1.1.1	<i>Vigas normalmente armadas (VA)</i>	126
4.1.1.2	<i>Vigas subarmadas (VB)</i>	129
4.1.1.3	<i>Vigas subarmadas (VC)</i>	132
4.1.2	<i>Cargas últimas experimentais</i>	135
4.1.3	<i>Fissuração</i>	137
4.1.3.1	<i>Fissuração nas vigas normalmente armadas (VA)</i>	137
4.1.3.2	<i>Fissuração nas vigas subarmadas (VB)</i>	138
4.1.3.3	<i>Fissuração nas vigas subarmadas (VC)</i>	140
4.1.4	<i>Deslocamentos verticais</i>	141
4.1.4.1	<i>Deslocamentos verticais das vigas normalmente armadas (VA)</i>	142
4.1.4.2	<i>Deslocamentos verticais das vigas subarmadas (VB)</i>	143
4.1.4.3	<i>Deslocamentos verticais das vigas subarmadas (VC)</i>	145
4.1.5	<i>Cargas de escoamento e deformações na armadura</i>	147
4.1.5.1	<i>Cargas de escoamento e deformações na armadura das vigas normalmente armadas (VA)</i>	148
4.1.5.2	<i>Cargas de escoamento e deformações na armadura das vigas subarmadas (VB)</i>	150
4.1.5.3	<i>Cargas de escoamento e deformações na armadura das vigas subarmadas (VC)</i>	152
4.1.6	<i>Deformações na armadura de cisalhamento</i>	153

4.1.6.1	<i>Deformações na armadura de cisalhamento das vigas normalmente armadas (VA)</i>	154
4.1.6.2	<i>Deformações na armadura de cisalhamento das vigas subarmadas VB</i>	155
4.1.6.3	<i>Deformações na armadura de cisalhamento das vigas subarmadas (VC)</i>	157
4.1.7	<i>Deformações no reforço</i>	158
4.1.7.1	<i>Deformações no reforço das vigas normalmente armadas (VA)</i>	158
4.1.7.2	<i>Deformações no reforço das vigas subarmadas (VB)</i>	160
4.1.7.3	<i>Deformações no reforço das vigas subarmadas (VC)</i>	162
4.1.8	<i>Deformações no concreto comprimido</i>	164
4.1.8.1	<i>Deformações no concreto comprimido das vigas normalmente armadas (VA)</i>	165
4.1.8.2	<i>Deformações no concreto comprimido das vigas subarmadas (VB)</i>	166
4.1.8.3	<i>Deformações no concreto comprimido das vigas subarmadas (VC)</i>	168
4.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	170
4.2.1	<i>Comparativo das cargas últimas entre os grupos de vigas</i>	170
4.2.2	<i>Comparativo das deformações no reforço entre grupos de vigas</i>	171
4.2.3	<i>Comparativo entre os resultados experimentais e analíticos</i>	173
4.2.3.1	<i>Cargas últimas</i>	173
4.2.3.2	<i>Deformações últimas no reforço</i>	174
4.2.4	<i>Comparação com outras vigas reforçadas</i>	177
4.2.5	<i>Análise de custo dos sistemas PRFC</i>	183
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	187
5.1	CONCLUSÕES	187
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	191
	REFERÊNCIAS	
	APÊNDICE A	
	APÊNDICE B	
	APÊNDICE C	

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de serviços de recuperação e reforço de estruturas de concreto como as pontes e viadutos brasileiros, em grande parte construída há décadas, muitas vezes sem manutenção adequada em sua vida útil e que se encontram com a estrutura deteriorada ou defasada em relação às cargas transportadas, é grande e urgente.

Em entrevista a Nakamura (2009) da Revista *Téchne*, o professor da Universidade Federal do Paraná (UFPR) Mauro Lacerda, observou que as normas internacionais consideram que a vida útil dessas construções deve estar ao redor de cinquenta anos, portanto nossas pontes estão entrando no limite. O Engenheiro do CREA-PR, Claudimor Faé, em entrevista a mesma revista, lembra que muitas pontes, chamadas obras de arte, foram construídas para suportarem entre 30 e 40 tf de carga e hoje estariam recebendo até 70 tf.

Relato do DNIT, órgão que conta com mais de 4.300 pontes, viadutos e pontilhões existentes nas rodovias federais sob sua responsabilidade, anunciou investimentos da ordem de R\$ 1bilhão para a recuperação, reforço e alargamento de 500 obras de arte especiais (OAEs), por meio do Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais (PROARTE), no período entre 2011 e 2012.

O PROARTE tem como meta, restaurar até 2018 cerca de 2.500 OAEs em todo o país, com um investimento total estimado em R\$ 5,8 bilhões. Ainda segundo o DNIT (2011), 86% das estruturas no país precisam de reforço, manutenção ou alargamento e os 14% restantes precisam de manutenção e reforço.

Segundo Arquez (2010), nas rodovias, algumas empresas concessionárias como a Centrovias Sistemas Rodoviários S.A, vem realizando investimentos no setor como o serviço de reforço realizado em 2005 no viaduto que liga as cidades de Analândia com Itirapina, no interior paulista.

O viaduto construído na década de 1970 (Figura 1-a), apresentava um quadro de fissuração generalizada na face inferior da laje (Figura 1-b) necessitando de um reforço estrutural para atender às condições do trem-tipo da classe 45.

Para o reforço foi realizada a execução de uma sobrelaje em toda a extensão do tabuleiro e aplicação de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) na face inferior dos dois tramos maiores (Figura 1-c).

Figura 1 - Viaduto que liga Analândia à Itirapina



a) vista do viaduto



b) fissuração generalizada



c) reforço com PRFC

Fonte: Arquez (2010).

De acordo com Garcez (2007), em meados da década de 80, a substituição de chapas de aço por polímeros reforçados com fibra (PRF), começou a ser discutida e investigada no EMPA, laboratório de pesquisa localizado na Suíça. Desde então, a técnica começou a ser difundida e aplicada na Europa, no Canadá, no Japão e nos Estados Unidos.

O governo japonês, segundo Machado (2002), foi um dos maiores impulsionadores para o desenvolvimento da técnica do uso de materiais compósitos na construção civil, para recuperar, reforçar e prevenir danos às estruturas sujeitas a abalos sísmicos, especialmente em 1995, com o terremoto de Kobe.

Segundo Meier (2000), a primeira aplicação externa de laminados de PRFC de elevada resistência à tração, ocorreu em 1991, em Luzern, na Suíça. A ponte Ibach, construída em 1969, necessitava de reforço estrutural para se adequar às novas cargas rodoviárias. No reforço foi utilizado 6,2 kg de laminados de PRFC e pôde ser realizado com uma plataforma móvel, durante a noite, sem necessitar de gastos com uma grande estrutura de andaimes e sem

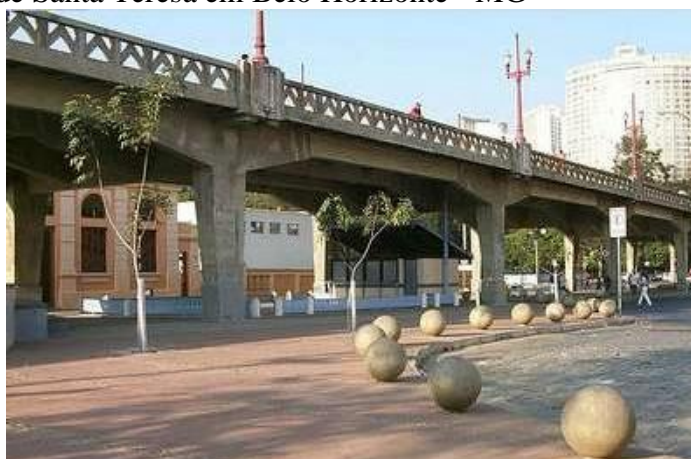
interrupção do tráfego sobre a ponte. O reforço, se feito com chapa de aço colada com resina, nessa obra, utilizaria 175 kg de aço.

O uso PRFC para o reforço de estruturas de concreto é crescente no mundo inteiro, inclusive no Brasil.

No Brasil, segundo Machado (2002), a primeira obra de reforço com a técnica de PRFC foi o viaduto de Santa Teresa, localizado em Belo Horizonte – MG (Figura 2-a), no ano de 1998. O viaduto tombado pelo Patrimônio Histórico e Cultural do Estado de Minas Gerais tem uma extensão de 397 m e foi construído em 1927 e precisou de reforço para atender às novas demandas de carga (classe 45 tf), mas não poderia ter suas dimensões alteradas.

A solução para o reforço foi o sistema de PRFC (Figura 2-b), que garantiu o aumento da capacidade de carga sem praticamente alterar suas dimensões e características estéticas originais (Figura 2-c).

Figura 2 - Viaduto de Santa Teresa em Belo Horizonte - MG



a) vista lateral do viaduto



b) reforço com PRFC



c) aspecto após a conclusão dos serviços de reforço

Fonte: Fortes (2004).

Em matéria para a Revista *Téchne*, Nakamura (2009) cita que a ponte de acesso ao Piér III do Terminal Marítimo da Ponta da Madeira, em São Luís (MA), precisou ter sua estrutura reforçada depois que uma mudança no fornecedor das correias transportadoras alterou as cargas sobre os balanços das travessas de apoio.

Ainda nessa matéria, foi citado que entre as primeiras técnicas estudadas para o reforço, que teriam prazo de execução entre 60 e 90 dias, optou-se pelo uso da técnica com lâminas de fibra de carbono inseridas nas fendas do concreto de cobrimento das armaduras de tração já existentes, um serviço executado em apenas 30 dias e sem interromper os serviços no terminal marítimo.

Pita (2011), da revista *Infraestrutura Urbana*, explana que o viaduto Santo Amaro, que passa por cima da Avenida Bandeirantes e leva ao Porto de Santos, não atendia mais às necessidades de transporte do local, uma vez que seu vão de 4,3 m ficou ultrapassado para o tamanho dos veículos de transporte de carga e diversos caminhões se chocaram com o tabuleiro.

O viaduto construído em 1969 em concreto protendido tem cerca de 280 m de extensão e 11 m de largura e estava precisando ser alteado em 1,1 m e alargado, para atender às novas exigências de demanda. A técnica escolhida para o reforço no viaduto foi o uso da fibra de carbono.

Em entrevista a Pita (2011), da Revista *Infraestrutura Urbana*, Regis Oliveira, superintendente de obras de São Paulo, explicou alguns dos motivos para o uso da fibra de carbono, sendo eles: minimizar a interferência que a obra poderia ter no trânsito, já caótico de São Paulo, uma vez que o uso do material diminuiria o tempo de interdição na Avenida Bandeirantes e com a técnica convencional seriam necessários seis meses a mais de obra; a fibra responde a outra necessidade do projeto que é o alteamento, isso porque a técnica permite o aumento da resistência sem aumentar ainda mais o gabarito.

Ainda em entrevista à mesma revista, Oliveira afirma que o custo elevado da fibra não foi um empecilho a sua adoção, uma vez que a redução no tempo de duração da obra e, portanto dos custos com mão de obra e indiretos acabam compensando. Segundo Fares Eduardo Assali, da empresa responsável pelo projeto do viaduto, o determinante para a adoção da fibra de carbono é encontrar uma empresa que o aplique corretamente, porque o serviço requer especialização.

Leoni e Souza (2013), também em matéria para a Revista *Téchne*, observaram que com a inserção de uma nova cobertura no estádio do Maracanã, 60 pilares tiveram de ser reforçados. Diante do desafio de entregar o estádio do Maracanã pronto para a copa das

Confederações da FIFA, campeonato teste para a copa do Brasil de 2014, a opção pelo reforço com tela de PRFC (Figura 3-a) em duas camadas, permitiu que o serviço fosse realizado em aproximadamente 30 dias, uma média de quatro pilares por dia.

Além dos pilares, ainda nessa matéria, Leoni e Souza (2013), observaram que um trecho de 14 mil metros quadrados de arquibancada antiga teve que ser reforçada. Com malha de aço o reforço consumiria 75 dias de obra com 32 pessoas trabalhando. Com a tela de PRFC (Figura 3-b) o reforço foi executado em 22 dias e por apenas duas pessoas.

Figura 3 - Reforço da estrutura do estádio do Maracanã



a) reforço nos pilares



b) reforço na arquibancada

Fonte: Leoni e Souza (2013).

Dessa forma, diante da grande demanda de serviços de recuperação e reforço nas estruturas de concreto, o estudo de técnicas de eficiente solução estrutural, de rápida execução e financeiramente viável é justificado.

Esta pesquisa está inserida no projeto PAPPE-0060-00086.01.00/11, de título “Desenvolvimento de concreto projetado reforçado com compósitos para recuperação e reforço em estruturas”, aqui denominado de projeto global. Esse projeto é financiado pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento e Científico Tecnológico (FUNCAP), e realizado em parceria do Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas (GPMATE) da Universidade Federal do Ceará e a empresa Módulo Engenharia, especializada em serviços de recuperação e reforço estrutural e sediada em Fortaleza – CE.

A necessidade de um estudo sobre o comportamento de vigas de concreto reforçadas à flexão com PRFC com taxas de armadura e taxas de reforço variáveis, para a busca da área ótima de fibra de carbono em função do acréscimo de carga que se deseja obter

e consequente redução do custo do reforço com a utilização dessa técnica, motivou esta pesquisa.

Entre os objetivos específicos do projeto global está o ensaio experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com o uso da técnica de PRFC colados externamente. Os resultados obtidos experimentalmente nessa pesquisa serão utilizados nos resultados e nas análises do projeto global.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar por meio de ensaios laboratoriais o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) colados externamente, submetidas a carregamentos monotônicos até à ruptura.

1.2.2 Objetivos específicos

- analisar o modo de ruína das vigas ensaiadas;
- avaliar a carga máxima resistida pelas vigas para cada grupo de vigas ensaiadas;
- avaliar a propagação da fissuração para cada grupo de vigas ensaiadas até o colapso das mesmas;
- avaliar os deslocamentos verticais para cada grupo de vigas ensaiadas;
- analisar as deformações na armadura, no concreto e no reforço para cada grupo de vigas;
- fazer um comparativo das cargas últimas experimentais entre os grupos de vigas;
- fazer um comparativo das deformações últimas no reforço entre os grupos de vigas;
- fazer um comparativo entre os valores analíticos e experimentais das cargas últimas e das deformações últimas no reforço das vigas ensaiadas;
- comparar os resultados experimentais obtidos com os de outros trabalhos que utilizaram a mesma técnica de reforço;
- realizar uma análise de custo entre os sistemas de reforço utilizados na pesquisa.

1.3 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida como parte do projeto global já citado no item 1.1 do capítulo 1.

Após a revisão bibliográfica, foi planejado o ensaio de flexão a quatro pontos de quinze vigas de concreto armado com mesma seção transversal retangular, divididas em três grupos de vigas com taxas de armadura distintas. Cada grupo possuía uma viga de referência (sem reforço) e as demais reforçadas à flexão com duas a cinco camadas de fibra de carbono.

As vigas foram moldadas, instrumentadas e ensaiadas na DIMAT do NUTEC.

Os resultados experimentais são apresentados, analisados e discutidos nos seguintes aspectos: modos de ruína, cargas últimas, fissuração, deslocamentos verticais, deformações na armadura, no concreto e no reforço. Os valores experimentais das cargas últimas e deformações no reforço são comparados com os valores estimados por modelos analíticos.

Alguns resultados experimentais são comparados com os resultados de outros trabalhos experimentais que utilizaram a mesma técnica dessa pesquisa.

Por fim é feita uma análise de custo do sistema de reforço utilizado nas vigas ensaiadas.

1.4 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, descrevendo a preparação, o desenvolvimento e os resultados obtidos na pesquisa.

No Capítulo 1, Introdução, faz-se a justificativa da pesquisa com uma breve apresentação da necessidade de recuperação e reforço das estruturas de concreto armado e um histórico do uso da técnica de reforço estrutural com PRFC. Apresentam-se também os objetivos e a metodologia da pesquisa.

No Capítulo 2, Revisão bibliográfica, se faz uma abordagem geral sobre manifestações patológicas, recuperação e reforço de estruturas de concreto, técnicas de recuperação e reforço estrutural, sistema de polímero reforçado com fibra (PRF), o dimensionamento de reforço à flexão com PRFC, modelos de ruína prematura e modos de falha. Finalmente são mostrados alguns trabalhos experimentais nacionais e internacionais referentes ao reforço à flexão com PRFC colados externamente.

No Capítulo 3, Programa experimental, se explana o programa experimental desenvolvido para o estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão PRFC colados externamente, as características das vigas e do reforço, dos materiais utilizados, da instrumentação e o procedimento dos ensaios.

No Capítulo 4, Apresentação, análise e discussão dos resultados, são apresentados, analisados e discutidos os principais resultados obtidos experimentalmente nas vigas de concreto armado, o desempenho do reforço por meio de comparações entre as vigas reforçadas e a de referência de cada grupo e a discussão dos resultados entre os grupos de vigas ensaiadas. Finalmente são feitas comparações dos resultados experimentais obtidos na pesquisa com os de vigas de outros trabalhos que utilizaram a mesma técnica de reforço e uma análise de custo do sistema de reforço nos grupos de vigas da pesquisa.

No Capítulo 5: Conclusão e sugestões para trabalhos futuros: se apresenta as principais conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

As referências bibliográficas e os apêndices com os dados do dimensionamento das vigas de referência, com os gráficos das curvas tensão-deformação das barras de aço utilizadas na armadura das vigas e com as leituras dos instrumentos de medição são apresentados na sequência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Foram mais de vinte séculos para o concreto, desde o início de sua descoberta como um mero aglomerante e hoje um produto de grande produção mundial, se tornar um material estrutural.

O desenvolvimento do assim chamado cimento Portland, por Josef Aspdin (1824) na Inglaterra, somado a idéia de colocação de barras de aço na parte tracionada das peças feitas em argamassa de cimento, posta em prática na França por Lambot (1855, para construção de barcos) e por Monier (1861, na fabricação de um jarro de flores), constituiu-se no embrião que gerou o concreto armado. (SUSSEKIND, 1987, p.01).

A excelente resistência mecânica do conjunto concreto-aço – compressão e tração, respectivamente, permite boa resistência aos esforços solicitantes usuais.

De acordo com Sussekind (1987), três razões básicas tornam o concreto armado uma solução viável, durável e de enorme confiabilidade, sendo elas: a aderência entre o concreto e o aço que assegura o trabalho em conjunto, os coeficientes de dilatação térmica praticamente iguais dos dois materiais e a proteção de oxidação do aço da armadura fornecida pelo concreto que garante a durabilidade da estrutura.

De acordo com Isaia (2011), a suscetibilidade do aço à corrosão e a agressividade do meio ambiente às quais estão expostas as estruturas de concreto armado resultou em obras com degradação prematura. Essa questão trouxe às estruturas de concreto, conceitos como vida útil, desempenho, durabilidade e manutenção, entre outros.

Vida útil segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013) é o período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos considerando a periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção.

Segundo Reyes (2003), é de fundamental importância que uma estrutura cumpra de forma adequada a função para qual foi projetada, durante o tempo que seus projetistas definiram como vida útil.

Bertolini (2010) define vida útil de uma estrutura como o período durante o qual a estrutura é capaz de garantir não apenas sua estabilidade, mas todas as funções para as quais foi projetada.

Medeiros *et al.* (2011) afirmam que vida útil deve ser sempre analisada envolvendo aspectos como projeto, execução, materiais, uso, operação e manutenção sob um enfoque de desempenho, qualidade e sustentabilidade.

Por desempenho, de acordo com Souza e Ripper (1998), se entende que é o comportamento em serviço de cada produto durante sua vida útil como resultado do trabalho desenvolvido nas etapas de projeto, execução e manutenção.

Ainda segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), desempenho é o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas.

Segundo o *Bulletin 55 FIB* (2010), desempenho é o comportamento da estrutura ou elemento estrutural em consequência das ações a que é submetido ou que gera.

De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2007), durabilidade consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Mailvaganam e Wiseman (2003) observam que durabilidade das estruturas de concreto pode ser definida como a sua habilidade de manter a operacionalidade para qual foi projetada.

Segundo o *Bulletin 55 FIB* (2010), durabilidade é a capacidade de estruturas, produtos e materiais serem utilizados após um longo período prolongado de tempo de uso.

Atualmente, segundo Folic´ e Zenunovic´ (2010), a durabilidade das estruturas de concreto e a resistência a processos de degradação são requisitos básicos para clientes, projetistas e contratantes.

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), manutenção é o conjunto de atividades e serem realizadas ao longo da vida total da edificação para conservar ou recuperar a sua capacidade funcional e de seus sistemas constituintes de atender as necessidades e segurança dos seus usuários.

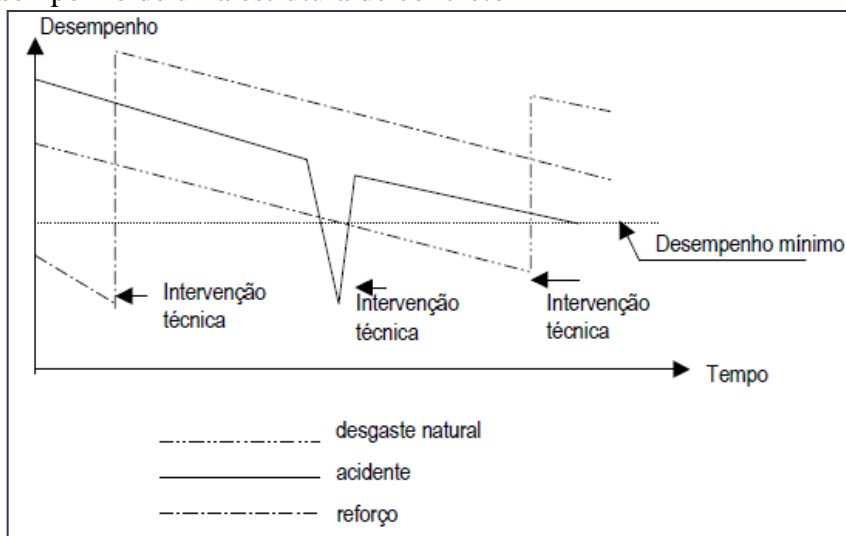
Ainda de acordo com *Bulletin 55 FIB* (2010), é um conjunto de atividades planejadas (geralmente periódicas) realizadas durante a vida útil da estrutura visando prevenir ou corrigir efeitos de deterioração, degradação ou desgaste mecânico da estrutura ou de seus componentes, a fim de manter sua capacidade futura no nível previsto pelo projetista.

Manutenção preventiva, de acordo com Baker e Christer (1994), consta de atividades realizadas em intervalos, com a intenção de reduzir ou eliminar falhas que possam ocorrer, ou reduzir as consequências de possíveis falhas, em termos de redução de custos e de tempo de inatividade.

Manutenção corretiva, segundo Helene (1992), corresponde aos trabalhos de diagnóstico, prognóstico, reparo e proteção das estruturas que já apresentaram manifestações patológicas, ou seja, correção de problemas evidentes.

Na Figura 4 é apresentada a variação de desempenho de uma estrutura de concreto armado ao longo do tempo.

Figura 4 - Desempenho de uma estrutura de concreto



Fonte: Souza & Ripper (1998).

2.2 PATOLOGIA

De acordo com Helene (1992) por patologia se entende como a parte da engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema.

Manifestações patológicas, segundo Azevedo (2011), são danos que se manifestam nas estruturas de concreto e que constituem indícios de comportamento irregular de componentes do sistema, devendo ser devidamente avaliados e adequadamente corrigidos para que não venham a comprometer as condições de estabilidade e segurança do elemento danificado ou até da edificação.

Na Tabela 1 estão apresentadas, de acordo com Beber (2003), as etapas e as possíveis causas das manifestações patológicas nas estruturas de concreto.

Tabela 1 - Possíveis causas das manifestações patológicas nas estruturas de concreto

Etapas	Possíveis causas
Concepção da estrutura projeto	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elementos de projeto inadequados, má definição das ações atuantes, modelo analítico não apropriado, deficiência no cálculo, etc.; 2. Falta de compatibilidade entre a estrutura e a arquitetura, assim como com os demais projetos; 3. Especificação inadequada de materiais; 4. Detalhamento insuficiente ou errado; 5. Detalhes construtivos inexequíveis; 6. Falta de padronização das representações (convenções); 7. Erros de dimensionamento;
Execução da estrutura construção	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baixa capacitação e experiência dos profissionais; 2. Instalação inadequada do canteiro de obra; 3. Deficiência na confecção de formas, escoramentos; 4. Deficiência no posicionamento e quantidade de armadura; 5. Baixa qualidade dos materiais e componentes; 6. Baixa qualidade do concreto, desde sua fabricação até a cura;
Utilização da estrutura manutenção	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilização inadequada; 2. Falta de um programa de manutenção apropriado.

Fonte: Beber (2003).

Como exemplo de manifestações patológicas nas estruturas de concreto pode-se citar: fissuras (Figura 5-a), manchas, desagregação do concreto (Figura 5-b), carbonatação do concreto, perda de aderência e desgaste do concreto.

Figura 5 - Manifestações patológicas em estruturas de concreto



a) fissuras



b) desagregação do concreto

Fonte: A autora.

Em geral, segundo Tirpude *et al.* (2014), exposições a condições ambientais adversas, incluindo carregamentos, têm sido observadas como a principal causa de deterioração das estruturas de concreto.

Entre os mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), pode-se listar:

- Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto: lixiviação (águas puras e ácidas), expansão (sulfatos, magnésio), expansão (reação álcali-agregado), reações deletérias (eflorescências);
- Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura: corrosão devida à carbonatação, corrosão por elevado teor de cloreto;
- Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita: ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), ações lentas (fluência), relaxação entre outros.

Por diagnóstico, segundo *Bulletin 55 FIB* (2010), entende-se como a identificação da causa ou explanação do mecanismo cujo fenômeno afeta o comportamento ou a condição de uma estrutura ou de seus componentes, baseado nas investigações de sinais e indicações demonstrados.

De acordo com Helene (1992), por terapia entende-se a medida terapêutica de correção dos problemas que tanto podem incluir pequenos reparos localizados quanto a recuperação generalizada da estrutura ou reforços de fundações, pilares, vigas e lajes.

Segundo Karbhari e Zhao (2000), duas estratégias podem ser adotadas diante da necessidade de uma intervenção em uma estrutura: a reabilitação ou a substituição.

Por reabilitação, de acordo com o *Bulletin 55 FIB* (2010), entende-se como a intervenção para restaurar o desempenho de uma estrutura ou de parte de seus componentes, que estão defeituosos, degradados ou deteriorados, em relação ao nível de desempenho original, geralmente sem restrições de materiais e métodos empregados.

Entre os processos de reabilitação de uma estrutura de concreto podem-se citar: a recuperação e o reforço.

De acordo com o ACI 546 R (1996), a recuperação consiste em substituir, corrigir componentes ou elementos da estrutura de concreto que sejam defeituosos, ou estejam danificados ou deteriorados. Ainda segundo o *Bulletin 55 FIB* (2010), na recuperação, as

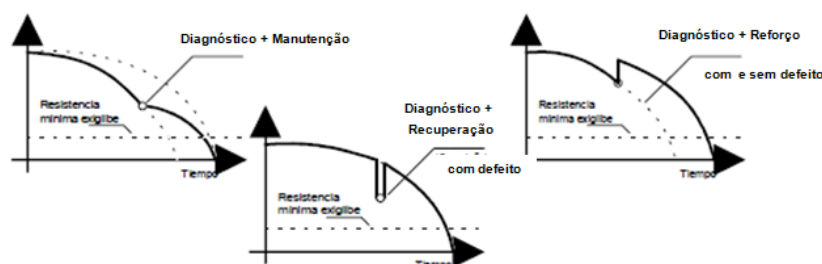
intervenções são feitas para restabelecer a um nível aceitável o desempenho de uma estrutura ou de seus componentes previsto anteriormente em projeto.

Segundo o *Bulletin 55 FIB* (2010), o reforço é uma intervenção feita para aumentar a capacidade resistente ou a rigidez de uma estrutura ou de seus componentes, visando melhorar a estabilidade e/ou a robustez estrutural global para um nível de desempenho maior que o previsto pelo projetista.

De acordo com Pendhari *et al.* (2008), o reforço é necessário devido a problemas de degradação da estrutura pela exposição ambiental, problemas de projeto, má execução ou necessidade de atender atuais exigências de projeto.

Para Reyes (2003), atualmente é frequente intervir sobre estruturas já construídas para verificar, manter, recuperar e/ou aumentar sua capacidade de serviço para que sempre a sua resistência seja maior que as solicitações (Figura 6).

Figura 6 - Formas de intervenções nas estruturas



Fonte: Reyes (2003).

2.3 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Na Tabela 2 estão apresentadas algumas das técnicas de recuperação em estruturas de concreto de acordo com Celedón (1999) e nas Figuras 7 e 8 estão apresentadas as técnicas de recuperação de estruturas por meio de lavagem da superfície e por meio de injeção com selante, respectivamente.

Tabela 2 - Principais manifestações patológicas superficiais e técnicas de recuperação

Manifestação patológica	Técnica de recuperação
Manchas removíveis	lavagem da superfície
Manchas permanentes	tratamento com ácidos estucamento jatos abrasivos
Microfissuras	polimento estucamento
Fissuras ativas	calafetação injeção com selantes
Fissuras passivas	calafetação injeção com materiais rígidos estucamento
Deslocamentos ou segregações profundas e desagregações	recomposição do cobrimento com argamassa, graute ou concreto com cimento Portland
Deslocamentos ou segregações rasas	tratamento com ácidos recomposição com argamassa polimento

Fonte: Celedón (1999).

Figura 7 - Remoção de manchas com a lavagem da superfície



Fonte: axis.eng.br/page (acessado em 2014).

Figura 8 - Recuperação de fissuras com o uso de injeção selante



Fonte: www.exemplo.eng.br (acessado em 2014).

2.4 TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Segundo Robery e Innes (1997), a escolha da técnica de reforço de uma estrutura deve levar em consideração o custo, o desempenho, a durabilidade, a facilidade e rapidez na execução do reforço.

2.4.1 Chapas de aço ou perfis metálicos colados externamente

De acordo com Reis (2001), o reforço com colagem de chapas de aço (Figura 9) externas à peça estrutural, baseia-se na colagem de chapa de espessura adequada através de adesivo e de parafusos autofixantes, criando uma armadura secundária solidária à peça estrutural.

Essa técnica, segundo Barnes e Mays (2006), tem como vantagens, em relação a outras técnicas, o mínimo efeito no vão livre, o baixo custo, a facilidade de manutenção e a possibilidade de reforçar uma estrutura enquanto está em uso.

Sevuk e Arslan (2005) apontam ainda como vantagens a fácil execução e aumento mínimo da seção transversal da estrutura. Reis (1998) observa também algumas vantagens na execução, tais como: a rapidez na execução, a não utilização de materiais úmidos, a ausência de vibrações e baixo nível de ruídos, e a não necessidade de instalações auxiliares importantes.

Como desvantagens dessa técnica pode-se citar o aumento do peso próprio da estrutura, a possibilidade de corrosão e o difícil manuseio das peças metálicas para a execução do reforço.

Reis (1998), ainda observa como desvantagens da técnica a impossibilidade de visualização de fissuras que possam vir a ocorrer na estrutura reforçada com chapa colada e a baixa resistência a altas temperaturas tanto da chapa de aço quanto da resina de aderência.

A execução do reforço com chapa colada segue os seguintes procedimentos: preparação da superfície de concreto para garantir uma rugosidade uniforme, limpeza da superfície por meio de jato de ar, tratamento da superfície metálica a ser empregada no reforço com a decapagem por meio da aplicação de jato de abrasivo, aplicação do adesivo distribuindo-o entre o concreto e a chapa, fixação de conectores (chumbadores) para garantir a ancoragem do material metálico ao concreto e pintura de proteção e acabamento da superfície da chapa.

Figura 9 - Reforço com chapa de aço colada



Fonte: A autora.

2.4.2 Protensão externa

Segundo Fortes (2004), o reforço por protensão de cabos não aderentes (Figura 10) consiste na introdução de uma força externa com o objetivo de compensar um estado de tensões indesejado, aumentando a capacidade resistente do elemento estrutural.

De acordo com Souza e Ripper (1998), a utilização dessa técnica é justificada nos seguintes casos: costura de fendas de vigas, pela introdução de uma deformação que se

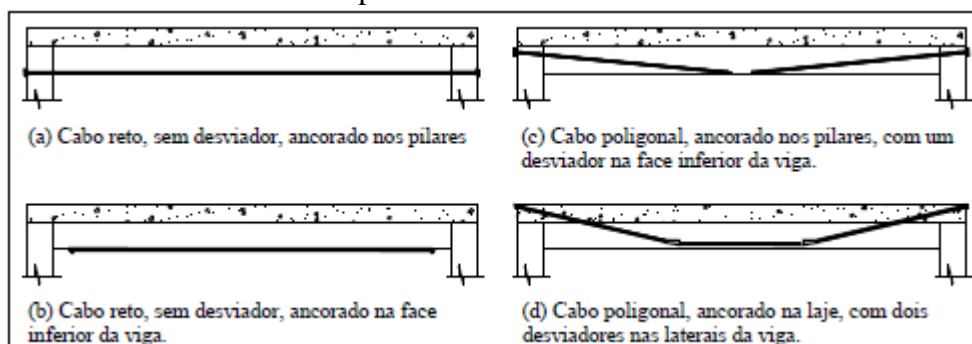
oponha à deformação de serviço, redução de deformações, redistribuição de esforços com o intuito de aliviar alguma peça e aumento da capacidade resistente da estrutura.

Entre as principais vantagens dessa técnica, de acordo com Vaz (2013), pode-se citar: a possibilidade de execução de reforço sem a necessidade de descarregar a estrutura, pois seu benefício se manifesta logo após a protensão, a possibilidade de ser eliminada grande parte das deformações existentes no elemento, o aumento da resistência à flexão e ao esforço cortante sem aumentar significativamente o peso próprio da estrutura, as fissuras de flexão existentes antes da execução do reforço podem ser fechadas completamente após o reforço e a possibilidade dos cabos podem ser inspecionados, protegidos e até substituídos.

Naaman e Breen (1990), ainda apontam entre as vantagens da técnica a rapidez na execução e possibilidade de no futuro os cabos serem novamente tensionados.

Como desvantagens da técnica, Vaz (2013) aponta a suscetibilidade à corrosão dos cabos externos e a exposição ao fogo, ao impacto e aos atos de vandalismo.

Figura 10 - Geometria dos cabos de protensão



Fonte: Almeida (2001).

2.4.3 Encamisamento com concreto ou argamassa com ou sem armadura

É uma técnica antiga e muito utilizada, onde o reforço é feito através de uma camada adicional que pode ser de concreto (moldado *in loco* ou projetado), microconcreto, argamassa (moldada *in loco* ou projetada) com ou sem adição de armadura.

De acordo com Piancastelli (1997), é necessário garantir a aderência entre o concreto de reforço e o concreto existente da peça a ser reforçada.

Almeida (2001) aponta entre as vantagens dessa técnica o amplo conhecimento dos materiais e técnicas a utilizar, o menor custo quando comparado a outras técnicas de reforço e rapidez na execução. Em relação às desvantagens pode-se citar o acréscimo de carga

permanente na estrutura, a necessidade de escoramentos e formas, o tempo de cura e o aumento da seção transversal da estrutura.

Entre os procedimentos básicos para a execução encamisamento com concreto projetado e adição de armadura, pode-se citar a verificação de escoramentos e exceção de escoramentos se necessário, corte do concreto na região que deve ser acrescentada a armadura, preparo do substrato (geralmente por apicoamento), colocação das barras de aço fixando à estrutura com chumbadores, limpeza do substrato e das barras novas e existentes com jatos de areia (Figura 11-a), pintura de proteção contra corrosão das barras (Figura 11-b), colocação das formas, umedecimento da superfície do substrato, projeção do concreto (Figura 11-c) e acabamento da superfície com desempenadeira (Figura 11-d).

Figura 11 - Encamisamento com concreto projetado e adição de armadura



a) limpeza com jato de areia



b) pintura da armadura



c) projeção do concreto

Fonte: A autora.



d) acabamento da superfície

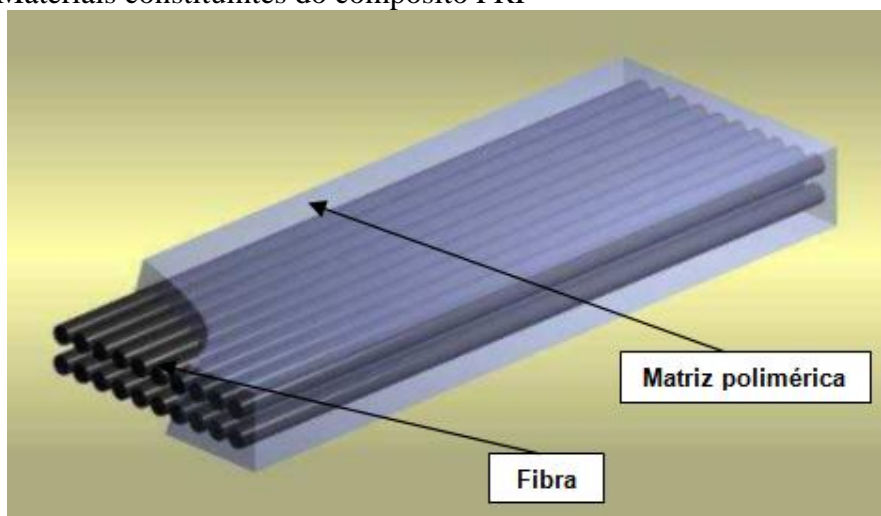
2.5 SISTEMA DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA (PRF)

Segundo o ACI 440.2R (2008), os materiais constituintes dos sistemas de reforço com PRF e disponíveis comercialmente, incluindo todas as resinas, imprimadores, regularizadores de superfície, saturantes, adesivos e fibras têm sido desenvolvidos por membros da área de reforço estrutural de concreto baseados em testes materiais e estruturais.

De acordo com o *Bulletin* 14 FIB (2001), o compósito de polímero reforçado com fibras (PRF) ou fiber reinforced polymers (FRP) consiste em um grande número de fibras pequenas, contínuas, direcionadas, não metálicas e com características avançadas, agrupadas em uma matriz de resina (Figura 12).

Segundo o ACI 440.2R (2002), características do PRF como baixo peso, material não corrosivo, alta resistência à tração, possibilidade de ser moldado conforme a geometria da estrutura e a facilidade de ser aplicado em áreas de difícil acesso para as técnicas convencionais tornam crescente o interesse por esse tipo de material.

Figura 12 - Materiais constituintes do compósito PRF



Fonte: Curty (2009).

Os compósitos são denominados de acordo com o tipo de fibra, sendo os mais comuns (ACI 440.2R, 2008):

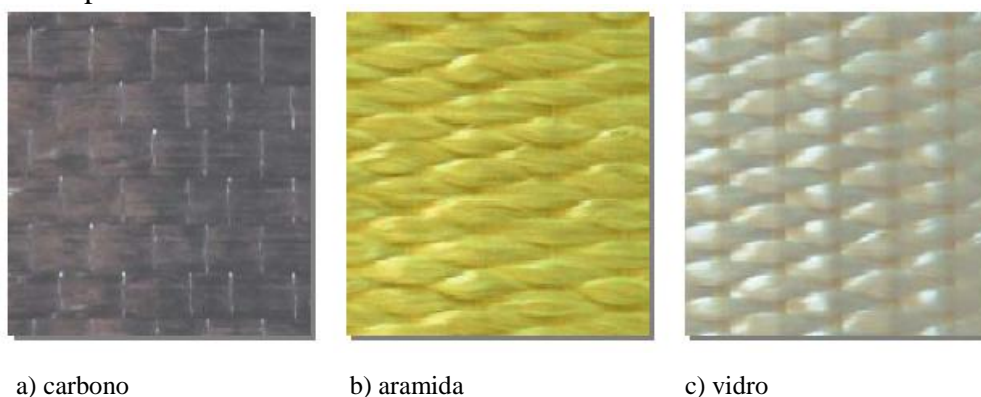
- PRFC – polímero reforçado com fibra de carbono;
- PRFA – polímero reforçado com fibra de aramida;
- PRFV – polímero reforçado com fibra de vidro.

2.5.1 Elementos constituintes do sistema PRF – fibras

De acordo com o *Bulletin 40 FIB* (2007), as fibras são usadas nos compósitos poliméricos porque são resistentes, rígidas e leves. Em geral, as fibras representam cerca de 50% a 70% da porcentagem de volume de um PRF. Isso justifica a importância que têm as propriedades das fibras na determinação das propriedades mecânicas de um PRF.

Nas Figuras 13-a, 13-b e 13-c, estão apresentadas as fibras de carbono, de aramida e de vidro, respectivamente.

Figura 13 - Tipos de fibra do PRF



Fonte: www.sika.com (acessado em 2014).

2.5.1.1 Fibra de carbono

As fibras de carbono são produzidas por meio de decomposição térmica de fibras de polímeros como a poliacrilonitrila (PAN) e segundo Spagnolo Junior (2008), as suas características mecânicas são diretamente dependentes da estrutura molecular obtida.

De acordo com Garcez (2007), fibras de carbono com maiores módulos de elasticidade podem ser obtidas com a utilização de temperaturas mais elevadas durante o processo de fabricação. Esse processo, segundo o *Bulletin 40 FIB* (2007), consiste na oxidação a 200-300°C, nos diferentes estágios de carbonização a 1500-2000 °C e finalmente na grafitação a 2500-3000°C.

A resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras de carbono são estáveis a altas temperaturas e são muito resistentes às agressividades do ambiente.

Segundo o *Bulletin 40 FIB* (2007), as fibras de carbono tem comportamento elástico e rompem de modo frágil.

2.5.1.2 Fibra de aramida

As fibras de aramida, de acordo o *Bulletin 40 FIB* (2007), é um termo genérico para um grupo de fibras orgânicas com a menor densidade e maior resistência à tração em relação às demais fibras. As marcas comerciais mais conhecidas são o Kevlar e o Nomex, produzidas pela Du Pont, a Technora e o Conex produzidas pela Teijin e a Twaron, produzida pela Akzo.

As fibras de aramida geralmente são amarelas, não são condutivas, têm comportamento frágil na tração, mas dúctil na compressão.

As fibras Kevlar podem absorver água, são sensíveis aos raios ultravioletas, são resistentes a muitos produtos químicos, mas podem ser deterioradas por alguns ácidos e álcalis e sua resistência e módulo diminuem linearmente quando a temperatura aumenta, mas retém mais de 80% da sua resistência original a 180°C.

2.5.1.3 Fibra de vidro

Segundo o *Bulletin 40 FIB* (2007), as fibras de vidro são as mais comumente usadas como fibras de reforço em compósitos de matriz polimérica.

De acordo com o consórcio ISIS (2003), as fibras de vidro podem ser produzidas por um processo chamado fusão direta, no qual as fibras são formadas de forma rápida e contínua a partir de vidro fundido e as fibras de vidro contínuas são conformadas por um processo chamado estiramento.

Entre as fibras de vidro mais comuns, segundo Garcez (2007), pode-se citar as *E-glass*, originalmente utilizadas em instalações elétricas como material isolante por sua baixa condutividade e formadas por um aluminoborosilicato de cálcio; as *S-glass* formadas por um aluminosilicato de magnésio e mais rígidas que as do tipo E; as resistentes a álcalis (AR) que previne a corrosão por álcalis em matrizes cimentícias.

A resistência à tração das fibras de vidro, conforme o *Bulletin 40 FIB* (2007), é reduzida a altas temperaturas, mas pode ser considerada constante para o nível de temperatura que as matrizes podem ser expostas.

2.5.1.4 Propriedades na tração das fibras utilizadas no sistema PRF

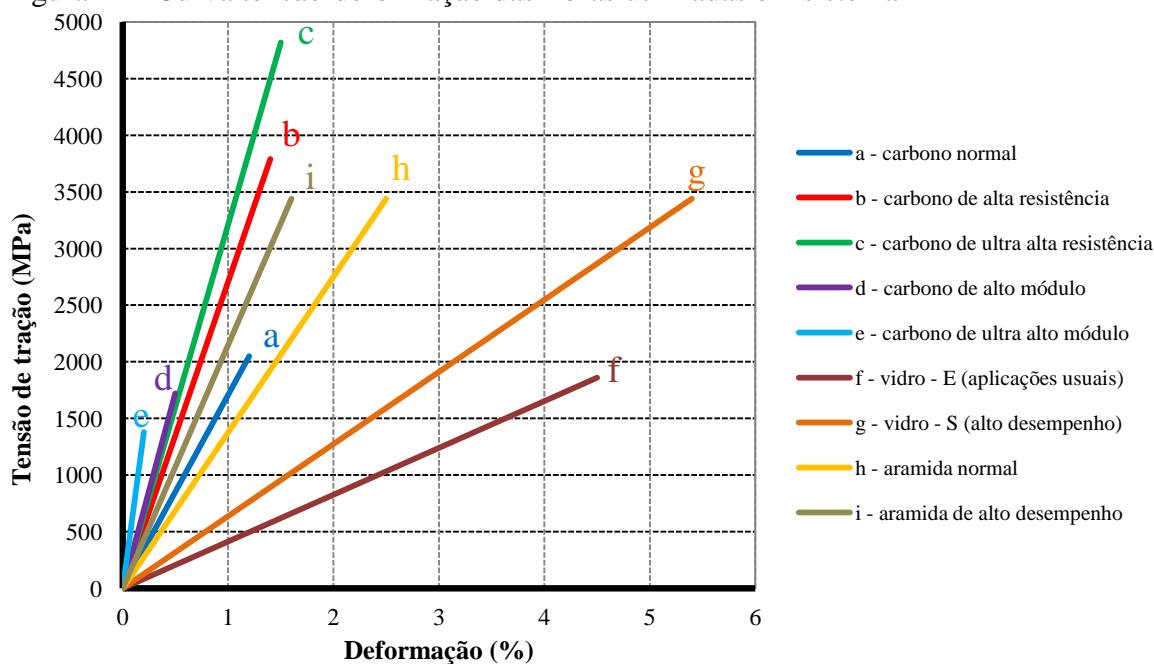
Na Tabela 3 estão apresentadas algumas das propriedades na tração das fibras utilizadas no sistema PRF, que têm suas curvas de tensão *versus* deformação apresentadas na Figura 14.

Tabela 3 - Propriedades na tração de fibras utilizadas em sistema de PRF

Tipo de fibra		Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência última (MPa)	Deformação mínima na ruptura (%)
Carbono	Normal	220 - 240	2050 - 3790	1,2
	Alta resistência	220 - 240	3790 - 4820	1,4
	Ultra-alta resistência	220 - 240	4820 - 6200	1,5
	Alto módulo	340 - 520	1720 - 3100	0,5
	Ultra alto módulo	520 - 690	1380 - 2400	0,2
Vidro	Vidro - E	69 - 72	1860 - 2680	4,5
	Vidro - S	86 - 90	3440 - 4140	5,4
Aramida	Normal	69 - 83	3440 - 4140	2,5
	Alto desempenho	110 - 124	3440 - 4140	1,6

Fonte: Adaptado de ACI 440.2R (2008).

Figura 14 - Curva tensão-deformação das fibras utilizadas em sistema PRF



Fonte: Adaptado de ACI 440.2R (2008).

2.5.2 Elementos constituintes do sistema PRF – matrizes (resina saturante)

Segundo o *Bulletin 40 FIB* (2007), a matriz em um compósito polimérico pode ser considerada um componente estrutural e de proteção. Resina é um termo genérico para designar o polímero. As propriedades e fabricação do compósito são fundamentalmente afetadas pela resina, sua composição química e suas características físicas.

Ainda segundo o *Bulletin 40 FIB* (2007), existem duas classes básicas de matrizes poliméricas usadas nos compósitos PRF: resinas termofixas e as resinas termoplásticas.

2.5.2.1 Resinas termofixas

De acordo com o ACI 440.2R (2008), as resinas termofixas englobam uma genérica família de produtos que incluem os poliésteres insaturados, éster vinílicas, epóxi e resinas poliuretanas.

Segundo Askeland e Phulé (2003), polímeros termofixos, ou termorrígidos, são um grupo especial de polímeros que assumem forma e rigidez permanentes após a polimerização, que se dá com a aplicação de calor, não amolecendo com subseqüentes aquecimentos.

Os polímeros termofixos, conforme o Consórcio ISIS (2003), são frequentemente aplicados em engenharia estrutural devido à sua estabilidade em temperaturas de serviço e à sua boa resistência química.

Ainda segundo Garcez (2007), as resinas a base de epóxi são as mais utilizadas para a fabricação de compósitos aplicados à construção civil. Entre suas características podem-se citar a excelente propriedade mecânica, a grande aderência, a possibilidade de cura a temperatura ambiente, a elevada rigidez e a resistência a ataques químicos.

Na Tabela 4 estão apresentadas algumas das propriedades de três tipos de matrizes termofixas (*Bulletin 40 FIB*, 2007).

Tabela 4 - Propriedades das matrizes termofixas (*Bulletin 40 FIB, 2007*)

Propriedade	Matriz		
	Poliéster	Epóxi	Éster vinil
Densidade (kg/m ³)	1200 - 1400	1200 - 1400	1150 - 1350
Resistência à tração (MPa)	34,5 - 104	55 - 130	73 - 81
Módulo de elasticidade (GPa)	2,1 - 3,45	2,75 - 4,10	3,0 - 3,5
Coefficiente de Poisson	0,35 - 0,39	0,38 - 0,40	0,36 - 0,39
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	55 - 100	45 - 65	50 - 75
Teor de umidade (%)	0,15 - 0,60	0,08 - 0,15	0,14 - 0,30

Fonte: *Bulletin 40 FIB (2007)*.

2.5.2.2 Resinas termoplásticas

Os polímeros termoplásticos, segundo Askeland e Phulé (2003), são um grupo especial de polímeros, com cadeias moleculares emaranhadas, mas não interconectadas. Esses polímeros podem romper de forma dúctil ou frágil, ou apresentar uma transição entre o comportamento dúctil e frágil.

Segundo Callister (2004), polímeros termoplásticos amolecem quando aquecidos e endurecem novamente quando resfriados, num processo totalmente reversível.

De acordo com o *Bulletin 40 FIB (2007)*, entre os polímeros termoplásticos mais comuns pode-se citar o poli(éter-éter-cetona) ou PEEK, o poli(sulfeto de fenileno) ou PPS e o polisulfona ou PSUL.

Os problemas de impregnação e a falta de adesão entre a matriz e as fibras, segundo Garcez (2007), foram fatores que restringiram o uso de polímeros termoplásticos para a fabricação de PRF.

Na Tabela 5 estão apresentadas algumas das propriedades dos três tipos de matrizes termoplásticas (*Bulletin 40 FIB, 2007*).

Tabela 5 - Propriedades das matrizes termoplásticas (*Bulletin 40 FIB, 2007*)

Propriedade	Matriz		
	PEEK	PPS	PSUL
Densidade (kg/m ³)	1320	1360	1240
Resistência à tração (MPa)	100	82,7	70,30
Módulo de elasticidade (GPa)	3,24	3,30	2,48
Coefficiente de Poisson	0,40	0,37	0,37
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	47	49	56

Fonte: *Bulletin 40 FIB (2007)*.

2.5.3 Elementos constituintes do sistema PRF – outras resinas

De acordo com Rodrigues (2009), para uma efetiva ação do reforço com compósitos estruturados no aumento da capacidade resistente de uma estrutura é necessário garantir a transferência de solicitações entre o concreto e o reforço. Para isso se faz necessário uma atenção especial na preparação da superfície do substrato, de modo a proporcionar a aderência.

Entre as características que as resinas utilizadas nos sistemas PRF devem possuir, segundo o ACI 440.2R (2002), pode-se citar a compatibilidade com a adesão ao substrato de concreto, a compatibilidade com a adesão ao compósito de PRF, a resistência aos efeitos do ambiente (umidade, água salgada, temperaturas extremas), capacidade de preenchimento, trabalhabilidade, tempo de utilização (*pot life*) consistente com a aplicação, desenvolvimento de propriedades mecânicas apropriadas para o compósito de PRF.

Outras resinas utilizadas no sistema PRF segundo o ACI 440.2R (2008) são:

- *primer*: resina utilizada para penetrar na superfície do concreto, melhorando a aderência da resina saturante ou adesivo.
- resina de regularização: são utilizadas para o preenchimento de vazios ou correção de imperfeições superficiais do substrato proporcionando uma superfície lisa para colagem do reforço;
- adesivos: são utilizados para colar laminados pré-fabricados de PRF ou sistemas de inserção de laminados (NSM - *near surface mounted*) no substrato do concreto, estabelecendo um meio de transferência de tensões entre o concreto e o compósito;
- revestimentos protetores: são utilizados para proteger a superfície do compósito de efeitos danosos produzidos pelo meio ambiente onde a estrutura se encontra.

2.5.4 Formas de comercialização do sistema PRF

De acordo com Juvandes (1999), as principais formas de comercialização para o PRF, admitindo com parâmetros de base a configuração geométrica espacial e a disposição das fibras no produto final, podem ser classificadas em três grandes grupos: unidirecionais (1D), bidirecionais (2D) e multidirecionais (3D).

Serão detalhadas nesse trabalho duas formas principais de PRF incluídas nesses três grupos: os sistemas pré-fabricados (laminados) e os sistemas curados *in situ*.

2.5.4.1 Sistemas pré-fabricados (laminados)

Segundo Juvandes (1999), os sistemas pré-fabricados resultam da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas de fibras contínuas por uma resina termorrígida, consolidadas por um processo de pultrusão com controle da espessura e largura do compósito.

A orientação unidirecional das fibras confere ao laminado a maximização da resistência e da rigidez na direção longitudinal (JUVANDES, 1999).

Os laminados já formam um compósito pronto que deve ser aderido à estrutura de concreto com um adesivo compatível com a matriz polimérica do compósito.

Ainda segundo Garcez (2007), os laminados pré-fabricados, por serem rígidos, são mais adequados para aplicação em superfícies planas.

Na Figura 15 está apresentada uma foto dos componentes do sistema pré-fabricado de PRFC.

Figura 15 - Componentes do sistema pré-fabricado de PRFC



Fonte: Juvandes (1999).

2.5.4.2 Sistemas curados *in situ*

Os sistemas do tipo curados *in situ* podem ser executados por meio de via seca, onde o tecido ou manta de fibra de carbono é intercalado com a camada de resina diretamente na superfície do concreto e por meio de via úmida onde o tecido ou manta é pré-impregnado

com uma camada de resina e posteriormente, sem a cura completa do compósito, é colado na superfície a ser reforçada.

Nos sistemas curados *in situ*, de acordo com Beber (2003), o agente adesivo é a própria resina de impregnação das fibras e de polimerização do compósito.

Especialmente no sistema curado *in situ* deve-se observar, de acordo com as condições da superfície a ser reforçada, a necessidade da utilização dos *primers* e das resinas de regularização, de modo a garantir a boa aderência do sistema de reforço ao substrato.

Na Figura 16 está apresentada uma foto dos componentes de um sistema curado *in situ* de PRFC, com a utilização de mantas de fibra de carbono.

Figura 16 - Componentes do sistema curado *in situ* de PRFC



Fonte: Juvandes (1999).

Na Tabela 6 estão apresentadas, de acordo com Juvandes (1999), os tecidos e as mantas de fibra utilizados no sistema PRF quanto ao critério de orientação e agrupamento das fibras no plano.

Tabela 6 - Descrição das mantas e tecidos empregados no sistema curado *in situ*

Designação		Descrição	Orientação das fibras	Estado
MANTAS (<i>sheets</i>)		Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de proteção (200 - 300 g/m ²)	unidirecionais	secas
				pré-impregnadas [i]
TECIDOS	<i>Woven roving</i> [ii]	Entrelaçamento direcionado de dois fios ou faixas de fibras (600 - 800 g/m ²)	bidirecionais	secos
	<i>Mat</i> [ii]	Espalhamento aleatório das fibras em uma esteira rolante que, depois são pulverizados com resina para adquirir consistência	multidirecional	
	<i>Cloth</i> [ii]	Fios contínuos tecidos por processo têxtil convencional (150 - 400 g/m ²)	uni, bi ou multidirecional	pré-impregnados [i]

[i] - aplicação de uma camada suave sem a cura total, de modo a criar alguma coesão entre as fibras (estado "prepreg")

[ii] - designação internacional para o arranjo das fibras no plano

Fonte: Juvandes (1999).

2.5.5 Execução do reforço com o sistema PRF

Segundo o ACI 440.2R (2002), os procedimentos para a instalação do sistema de PRF foram desenvolvidos pelos fabricantes do sistema e geralmente diferem entre eles. Além disso, os procedimentos de instalação podem variar em um mesmo sistema, dependendo do tipo de condições da estrutura.

2.5.5.1 Execução do sistema pré-fabricado

Entre os procedimentos básicos para a execução do sistema pré-fabricado de PRF, pode-se citar:

- recuperar o substrato de concreto (fissuras, deterioração por corrosão, etc.) devolvendo as condições originais do concreto para que o sistema possa ser aderido com segurança;
- aplicar a camada de adesivo para a aderência do laminado ao substrato;

- aplicar o laminado no substrato;
- aplicação (opcional) de película de acabamento e proteção do sistema de reforço.

Na Figura 17 está apresentada uma foto da aplicação de laminado em estrutura de concreto.

Figura 17 - Detalhe da aplicação de laminado em estrutura de concreto



Fonte: Matthys (2000).

2.5.5.2 Execução do sistema curado *in situ*

Entre os procedimentos básicos para a execução do sistema curado *in situ* de PRF, pode-se citar:

- recuperar o substrato de concreto (fissuras, deterioração por corrosão, etc) devolvendo as condições originais do concreto, para que o sistema possa ser aderido com segurança;
- aplicar a camada de imprimação, de modo a garantir e aumentar a aderência do sistema PRF;
- aplicar a camada de resina de regularização, para corrigir as imperfeições superficiais do substrato de concreto de modo a criar uma superfície plana e nivelada;
- aplicar as camadas da resina saturante intercalando com a aplicação das camadas de tecido ou manta de fibra;
- aplicação (opcional) de película de acabamento e proteção do sistema de reforço.

Na Figura 18 está apresentada uma foto da aplicação de manta de fibra de carbono em estrutura de concreto no sistema curado *in situ*.

Figura 18 - Detalhe da aplicação de manta de fibra de carbono



Fonte: Fonte: *Bulletin 14 FIB* (2001).

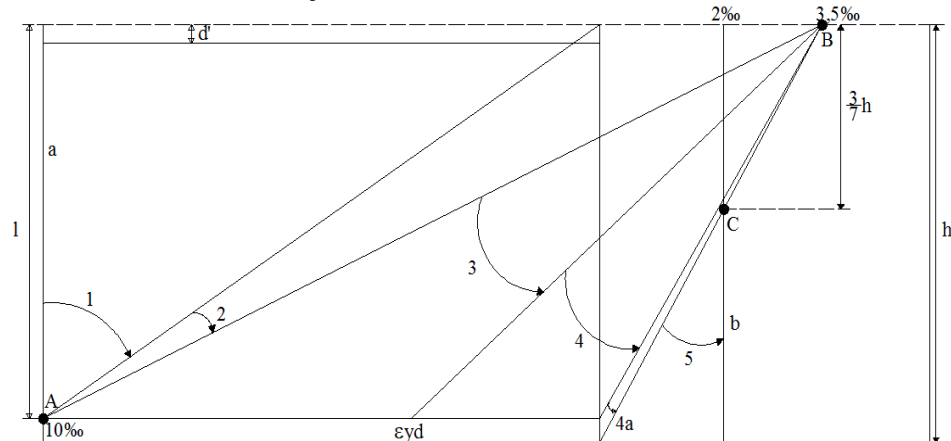
2.5.6 Dimensionamento do reforço à flexão com PRFC

De acordo com Machado (2004), os polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) ou *carbon fiber reinforced polymers* (CFRP) são apropriados para o reforço de estruturas de concreto armado devido ao elevado desempenho mecânico das fibras de carbono.

O uso do PRFC para reforço à flexão de vigas de concreto armado, segundo Al-Negheimish *et al.* (2012), tem sido eficiente tanto para incremento da capacidade resistente como da rigidez das vigas.

A NBR 6118 (ABNT, 2007) apresenta entre os critérios para o dimensionamento no estado limite último (ELU) de elementos lineares, submetidos a solicitações normais, decorrentes de momentos fletores e força normal, que o estado limite último é caracterizado quando a distribuição de deformações na seção transversal pertencer a um dos denominados domínios de deformação (Figura 19).

Figura 19 - Domínios de deformação



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2007).

Ainda de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2007), os domínios de deformação são definidos da seguinte maneira:

1. Ruptura convencional por deformação plástica excessiva:

reta a : tração uniforme;

- domínio 1: tração não uniforme, sem compressão;
- domínio 2: flexão simples ou composta sem ruptura à compressão do concreto ($\epsilon_c < 3,5\%$ e com máximo alongamento permitido para a armadura);

2. Ruptura convencional por encurtamento limite do concreto:

- domínio 3: flexão simples (seção subarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e com escoamento do aço ($\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$);
- domínio 4: flexão simples (seção superarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e aço tracionado sem escoamento ($\epsilon_s < \epsilon_{yd}$);
- domínio 4a: flexão composta com armaduras comprimidas;
- domínio 5: compressão não uniforme, sem tração;

reta b: compressão uniforme.

Para o dimensionamento à flexão simples são indicados os domínios 2, 3 e 4, onde temos para o concreto comprimido a deformação máxima de encurtamento variando de 0 a 3,5‰ e para o aço tracionado a deformação de alongamento variando de 0 a 10‰. No limite do domínio 3 com o domínio 4 a ruptura do concreto à compressão ocorre simultaneamente com o escoamento do aço, sendo considerado este domínio ideal para projeto pois os

materiais são aproveitados ao máximo nas suas potencialidades, sem que aja a possibilidade de ocorrer ruptura brusca.

Segundo Joaquim (2004), o PRF torna-se mais eficiente quando utilizado no reforço à flexão de peças de concreto armado predominantemente submetidas à tração. Para tanto deverá ser realizada a verificação inicial do estado de tensões que pode ocorrer na seção do concreto a ser reforçada.

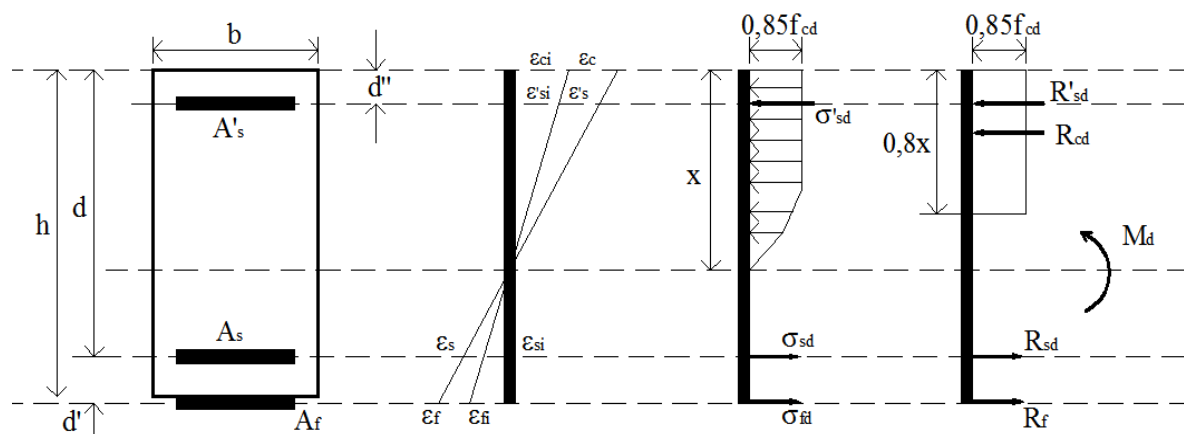
No modelo utilizado por Santos *et al.* (2013), para reforço à flexão de vigas de concreto armado com PRFC, admite-se o estado limite último das deformações das estruturas, que são aqueles que correspondem ao esgotamento da capacidade resistente da estrutura. Ainda segundo os autores, a análise no estado limite último (ELU) é feita determinando-se a capacidade resistente da seção transversal com o uso das equações de equilíbrio de forças e momento, das equações de compatibilidade das deformações e das leis constitutivas dos materiais até a ruptura.

De acordo com Machado (2012), para o cálculo da resistência à flexão de uma estrutura de concreto armado reforçado com fibra de carbono algumas considerações e conceitos básicos devem ser estabelecidos, tais como:

- prevalecem os critérios de Bernoulli, ou seja, as seções permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e as deformações são linearmente proporcionais à sua distância à linha neutra;
- despreza-se a resistência à tração do concreto;
- a deformação no concreto não pode ultrapassar 3,5‰ quando dimensionado segundo os critérios da ABNT e 3‰ segundo as recomendações do ACI;
- a aderência entre o sistema composto com fibra de carbono (CFC) e o substrato de concreto deve ser perfeita;
- a deformação será considerada linear até a ruptura no sistema composto CFC.

Na Figura 20 estão representadas as distribuições das tensões e deformações de uma seção retangular de uma viga de concreto armado reforçada com fibra de carbono.

Figura 20 - Seção transversal e distribuição das tensões e deformações



Fonte: Machado (2002).

No dimensionamento do reforço à flexão com PRFC, de acordo com Santos *et al.* (2013), a determinação das deformações iniciais das armaduras, da deformação máxima inicial do concreto e da posição inicial da linha neutra devido ao carregamento de serviço de uma viga de concreto armado segue o seguinte procedimento:

1. O equilíbrio de forças e momento é imposto na seção transversal assumindo que as armaduras inferior e superior não estão escoando.
2. São determinadas a posição inicial da linha neutra (x_i), a deformação inicial da armadura inferior (ϵ_{si}), a deformação inicial da armadura superior (ϵ'_{si}) e a deformação máxima inicial do concreto (ϵ_{ci}).
3. É verificada se a deformação inicial da armadura inferior (ϵ_{si}) é menor que a deformação de escoamento do aço (ϵ_{yd}). Em caso afirmativo segue-se para a etapa seguinte. Caso contrário executa-se as etapas 1, 2 e 4 assumindo que a armadura inferior está escoando.
4. É verificada se a deformação inicial da armadura superior (ϵ'_{si}) é menor que a deformação de escoamento do aço (ϵ'_{yd}). Em caso afirmativo segue-se para a etapa seguinte. Caso contrário executa-se as etapas 1, 2 e 5 assumindo que a armadura superior está escoando.
5. Fim do procedimento.

Ainda de acordo com os autores, a determinação da área ótima de fibra de carbono de uma viga de concreto armado reforçada à flexão segue o seguinte procedimento:

1. A posição da linha neutra (x) e a deformação na armadura superior (ϵ'_s) são determinadas assumindo que a deformação na fibra mais comprimida do concreto (ϵ_c) seja igual a 3,5‰ e que a deformação na armadura inferior (ϵ_s) seja igual a 10‰.
2. A deformação inicial na fibra de carbono (ϵ_{fi}) é adotada como sendo igual a deformação inicial da armadura inferior (ϵ_{si}).
3. As resultantes de forças nas armaduras inferior e superior são determinadas considerando suas respectivas deformações (ϵ_s e ϵ'_s). A resultante de forças no concreto é determinada considerando a posição da linha neutra (x).
4. A resultante de forças na fibra de carbono (R_f) é determinada impondo-se o equilíbrio de momento na seção transversal.
5. A deformação na fibra de carbono (ϵ_f) é determinada considerando sua deformação inicial e a compatibilidade de deformações na seção transversal.
6. A área de fibra de carbono é determinada dividindo-se a resultante de forças na fibra de carbono (R_f) pela deformação na fibra de carbono (ϵ_f).
7. A posição da linha neutra é modificada utilizando um incremento (dx). A deformação na fibra mais comprimida do concreto (ϵ_c) é mantida igual a 3,5‰. Uma nova área de fibra de carbono é determinada considerando esta nova configuração.
8. A nova área de fibra de carbono é comparada com a área anterior. Caso a nova área seja menor que a área anterior um novo incremento na posição da linha neutra é dado e é determinada outra área de fibra de carbono (processo iterativo). Caso a nova área seja maior que a área anterior o procedimento é encerrado e a área ótima é adotada como sendo a área de fibra de carbono encontrada na iteração anterior.

2.5.7 Modelos analíticos de ruínas prematuras

No dimensionamento de reforço à flexão com PRFC acima citado, considera-se que a ruína da viga pode se dar pelos modelos de ruínas clássicos (esmagamento do concreto, escoamento da armadura ou ruptura do reforço).

Nos modelos de ruína prematuros, de acordo com Ferrari (2007), considera-se que a ruína da viga reforçada está relacionada com a falência da ligação entre o concreto e o reforço.

Segundo o ACI 440.2R (2008), embora a maioria dos modos de falha por descolamento do reforço já tenham sido identificados por pesquisadores, outros métodos precisos de previsão do descolamento ainda são necessários.

São apresentados a seguir, três modelos analíticos em que o instante da ruína frágil e prematura pode ser previsto.

2.5.7.1 Modelo de Chen & Teng (2001)

O modelo proposto pelos autores combina os conceitos de mecânica da fratura e evidências experimentais. Os autores calculam a relação entre as larguras da viga e do reforço (β_p) através da equação (1) e o comprimento de ancoragem efetivo (L_e) do reforço através da equação (2), para obter na equação (3) a máxima tensão admissível no reforço (σ_{ru}):

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 \frac{b_r}{b}}{1 + \frac{b_r}{b}}} \quad (1)$$

Onde:

β_p = coeficiente de largura de reforço à flexão;

b_r = largura do reforço;

b = largura da viga.

$$L_e = 0,5623 \cdot \sqrt{\frac{E_r \cdot n \cdot t_r}{f_c^{\frac{1}{2}}}} \quad (cm) \quad (2)$$

$$\sigma_{ru} = 0,1956 \cdot \beta_p \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{E_r \cdot f_c^{\frac{1}{2}}}{n \cdot t_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (kN/cm^2) \quad (3)$$

Onde:

E_r = módulo de elasticidade do reforço;

n = número de camadas de reforço;

t_r = espessura de uma camada de manta;

f_c = resistência à compressão do concreto;

β_1 é um fator que relaciona os comprimentos de ancoragem do reforço (L_r) com o seu comprimento de ancoragem efetivo (L_e) e é determinado pelas equações (4) e (5):

$$\beta_1 = 1 \text{ se } L_r \geq L_e \quad (4)$$

$$\beta_1 = \text{sen} \left(\frac{\pi \cdot L_r}{2 \cdot L_e} \right) \text{ se } L_r < L_e \quad (5)$$

2.5.7.2 ACI 440.2R (2002)

Segundo o ACI 440.2R (2002), os dois modos de ruína, arrancamento da camada de concreto ou ruptura na interface concreto-reforço, podem ocorrer se os esforços que estiverem ocorrendo nas fibras não puderem ser absorvidos pelo substrato de concreto.

As equações (6) e (7), de acordo com as recomendações do ACI, permitem determinar um coeficiente de limitação (k_m) que aplicado à tensão de ruptura do reforço (σ_{ru}) minora seu valor para prevenir o descolamento prematuro.

$$k_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{ru}} \left(1 - \frac{n \cdot t_r \cdot E_r}{3600} \right) \leq 0,90 \rightarrow n \cdot t_r \cdot E_r \leq 1800 \text{ kN/cm} \quad (6)$$

$$k_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{ru}} \left(1 - \frac{900}{n \cdot t_r \cdot E_r} \right) \leq 0,90 \rightarrow n \cdot t_r \cdot E_r > 1800 \text{ kN/cm} \quad (7)$$

2.5.7.3 Beber (2003)

Beber (2003), propõe uma formulação (equação 8) para estimar a tensão máxima admissível no reforço (σ_{ru}) relacionando essa tensão com a rigidez do reforço, uma vez que, segundo o autor, se identificou que, quanto maior esse produto (principalmente devido à espessura do reforço), menor é a deformação e conseqüentemente e a tensão desenvolvida no reforço.

$$\sigma_{ru} = \frac{2667,3}{(E_r \cdot t_r)^{0,4205}} \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (8)$$

2.5.8 Modos de ruína

O considerável aumento da capacidade resistente de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC tem feito essa técnica apresentar largo uso para reforço estrutural. No entanto modos de falhas não convencionais a peças de concreto submetidas à flexão, relacionados à ligação do reforço com o substrato do concreto, limitam ou reduzem a eficiência do reforço e provocam em geral ruínas frágeis.

Segundo o *Bulletin* 14 FIB (2001), os modos de falha de um elemento de concreto reforçado à flexão por colagem externa com PRF podem ser divididos em dois grupos: modo clássico onde a ação composta completa do concreto com o PRF se mantém até que o

concreto atinja o esmagamento em compressão ou o PRF rompa em tração e o modo em que a ação composta é perdida antes do modo de ruína clássico.

Os modos de ruína clássicos são descritos a seguir:

- Esmagamento do concreto (Figura 21): segundo o *Bulletin 14 FIB* (2001), para altas taxas de armadura, a ruína das estruturas de concreto armado podem ser causadas pelo esmagamento do concreto comprimido antes do escoamento da armadura. É um modo frágil e certamente indesejável.

Figura 21 - Ruína por esmagamento do concreto



Fonte: Ahmed *et al.* (2011).

- Escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto (Figura 22): de acordo com o *Bulletin 14 FIB* (2001), esse tipo de ruína ocorre quando o escoamento da armadura é seguido do esmagamento do concreto na zona comprimida, mas o PRF se mantém intacto.

Figura 22 - Ruína por escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto



Fonte: Obaidat *et al.* (2011).

- Escoamento do aço seguido da ruptura do reforço (Figura 23): segundo o *Bulletin 14 FIB* (2001), para baixas taxas de aço e PRF, a ruína por flexão ocorre com o escoamento da armadura e é seguido pela ruptura do reforço por tração.

Figura 23 - Ruptura do reforço por tração



Fonte: Costa (2011).

- Ruína por cisalhamento (Figura 24): segundo Ferrari (2007), essa ruína também é do tipo clássica e ocorre quando a capacidade limite ao cisalhamento da viga reforçada é alcançada antes da falha por flexão. De acordo com Gao *et al.* (2007), as fissuras de cisalhamento se estendem a partir das proximidades do apoio até o ponto de aplicação da carga.

Figura 24 - Ruína por cisalhamento



Fonte: Dong *et al.* (2013).

De acordo com Beber (2003), as falhas prematuras de aderência na interface concreto /reforço podem ocorrer em diversas posições.

Segundo *Bulletin* 14 FIB (2001), a falha de aderência resulta na perda completa da ação conjunta entre o reforço e o concreto, comprometendo a estabilidade do elemento estrutural.

Algumas dessas falhas prematuras são descritas a seguir:

- Descolamento do reforço por fissura de flexão ou flexão-cisalhamento: segundo Yau e Teng (2007), o descolamento do reforço tem início em uma fissura de flexão (Figura 25) ou flexão-cisalhamento (Figura 26) na região de maior momento e se propaga até uma das extremidades do reforço. Essa ruína por descolamento tem origem em uma fissura intermediária que induz a uma falha na interface concreto/reforço.

De acordo com ACI 440.2R (2008), sob carregamento, essas fissuras abrem e induzem a uma alta tensão de cisalhamento interfacial que se propaga na direção do vão de menor momento.

Figura 25 - Ruína por descolamento ocasionado por fissura de flexão



Fonte: Sallaberry (2005).

Figura 26 - Ruína por descolamento ocasionado por fissura de flexão/cisalhamento



Fonte: Ferrari (2007).

- Ruína por descolamento do reforço ocasionado por fissura diagonal crítica (Figura 27): nesse tipo de ruína, segundo Yau e Teng (2007), o descolamento é induzido por uma fissura inclinada principal interceptando o reforço próximo à sua extremidade e se propaga do ponto de interseção até a interface reforço/ superfície da viga.

Figura 27 - Ruína por descolamento ocasionado por fissura diagonal crítica

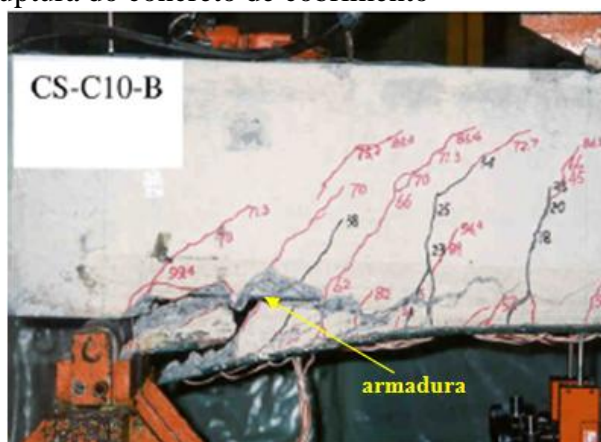


Fonte: Yao e Teng (2007).

Ainda de acordo com Yao e Teng (2007), esse tipo de fissura pode surgir por várias razões, entre elas: a baixa taxa de armadura transversal onde o descolamento em uma das extremidades do reforço pode se tornar crítico quando se varia a largura ou espessura do reforço; quando a distância entre a extremidade do reforço e um dos apoios é muito pequena e uma fissura diagonal crítica pode se formar provocando o descolamento do reforço.

- Ruína por ruptura do concreto de cobrimento (Figura 28): segundo Yao e Teng (2007) esse tipo de ruína ocorre quando uma fissura inclinada se inicia próximo a uma das extremidades do reforço e se estende até o nível da armadura de tração e rapidamente se propaga até o vão central.

Figura 28 - Ruína por ruptura do concreto de cobrimento



Fonte: Yao e Teng (2007).

Como observam Smith e Teng (2002), nas vigas reforçadas com PRF coladas externamente na zona de tração, as falhas prematuras são comuns na interface concreto/reforço. Essas falhas se iniciam com fissuras próximas a uma das extremidades do reforço, ocasionadas por altas tensões normais e de cisalhamento e se propagam ao longo da armadura longitudinal de tração provocando o arrancamento do cobrimento.

Segundo ACI 440.2R (2008), essa ruptura pode resultar das tensões normais desenvolvidas nas extremidades do PRF colado externamente, onde a armadura interna atua como um interruptor de ligação no plano horizontal e o concreto de cobrimento é separado do restante da viga.

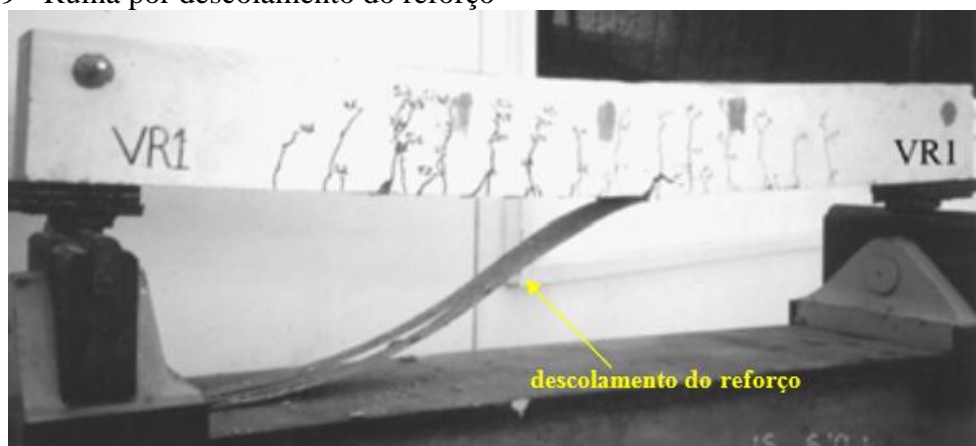
- Descolamento do reforço (Figura 29): é uma ruína do tipo frágil, que ocorre na interface concreto/reforço.

Segundo Juvandes (1999), resulta no destacamento localizado do reforço (efeito chamado de *peeling off*) que se inicia à partir da sua zona de ancoragem ou em regiões com grande ocorrência de fissurações.

De acordo com Smith e Teng (2002), essa ruína é ocasionada por altas tensões normais e de cisalhamento próximo às extremidades do reforço que ultrapassam a resistência do concreto.

Conforme Ibars (2005), o mecanismo do descolamento ocorre por concentrações de tensões na extremidade do laminado ou nas fissuras próximas existentes, e geralmente são iniciadas no substrato de concreto entre o laminado colado externamente e a armadura interna.

Figura 29 - Ruína por descolamento do reforço



Fonte: Ferrari *et al.* (2002).

- Ruína por descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento de concreto (Figura 30): esse tipo de ruína, de acordo com Yau e Teng (2007) ocorre quando o reforço é descolado do substrato e a fissura diagonal de ruína se torna mais vertical atingindo o nível da armadura de tração provocando também o arrancamento do concreto de cobrimento.

Figura 30 - Ruína por descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento

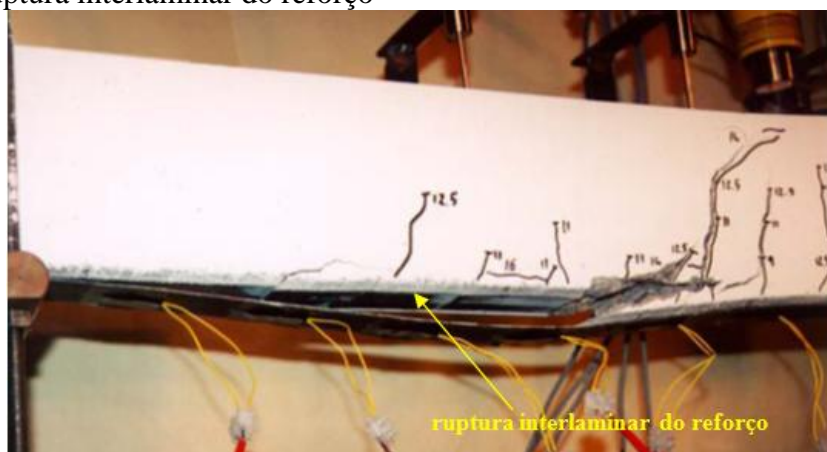


Fonte: Beber (1999).

- Ruptura interlaminar do reforço (Figura 31): de acordo com Beber (2007) nesse tipo de ruína ocorre a ruptura entre os planos do compósito, provocando um descolamento localizado do reforço.

Segundo o *Bulletin 14 FIB* (2001), uma vez que o PRF é um compósito, a ruína pode ocorrer entre a fibra e a resina. Essa ruína ocorre onde a propagação da fissura é maior no PRF do que no concreto e pode ocorrer em concretos de alta resistência (a partir de 60 MPa). Não obstante a ruína interlaminar do reforço é o modo de falha secundário uma vez que a falha de aderência inicia no concreto.

Figura 31 - Ruptura interlaminar do reforço

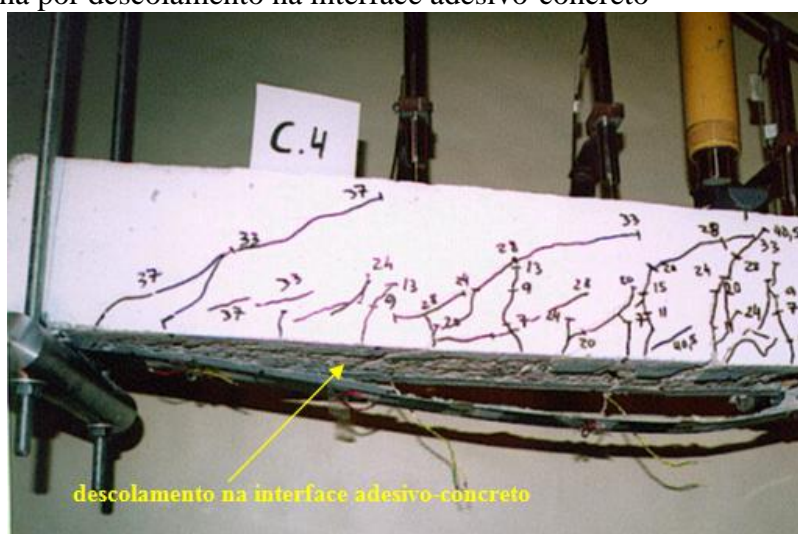


Fonte: Juvandes (1999).

- Descolamento na interface entre o adesivo e o concreto (Figura 32) ou entre o adesivo e o PRFC (Figura 33): de acordo com o *Bulletin 14 FIB* (2001) essa falha pode ocorrer quando a superfície de concreto não é convenientemente preparada durante o processo de aplicação do reforço porque a força de coesão da resina epóxi é menor que a força de aderência.

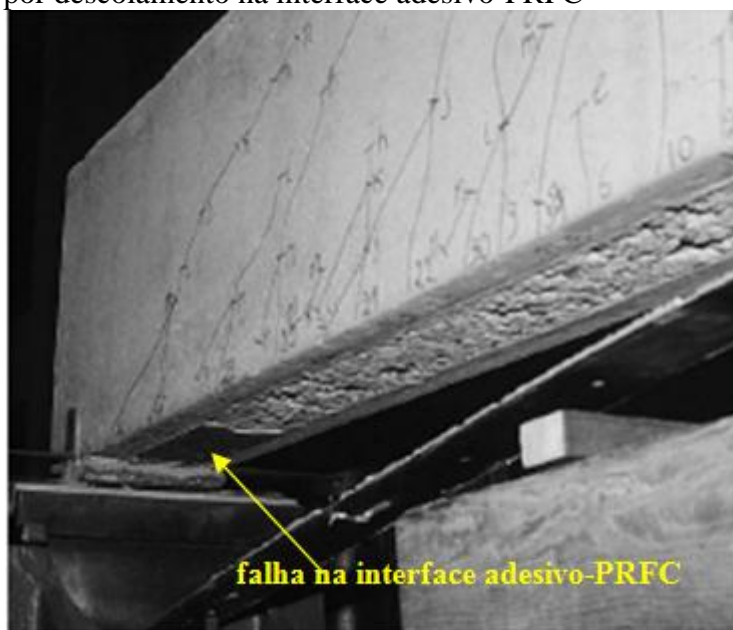
Segundo Ferrari (2007) outras ocorrências como uso de adesivo com prazo de validade vencido ou aplicado após o tempo de utilização do adesivo (pot life), dosagem incorreta da mistura, falta de preparação e regularização da superfície e presença de fissuras no substrato podem comprometer a aderência.

Figura 32 - Ruína por descolamento na interface adesivo-concreto



Fonte: Juvandes (1999).

Figura 33 - Ruína por descolamento na interface adesivo-PRFC



Fonte: Matthys (2000).

Pelo apresentado sobre os modos de ruínas das vigas reforçadas à flexão com sistemas PRF, observa-se que vários são os modos de falha prematuros e que interferem diretamente na eficiência esperada do reforço. Na maioria das vezes essas falhas são ocasionadas pelas concentrações de tensões nas extremidades do reforço que provocam o descolamento do reforço e/ou o arrancamento do cobrimento de concreto.

De acordo com o ACI 440.2R (2008), as falhas prematuras nas extremidades do reforço (*end peeling*) podem ser atenuadas com a utilização de estribos de PRF para minimizar as tensões próximas às regiões onde o momento é nulo.

A utilização de sistemas de ancoragens do reforço, como os estudados por autores como: Beber (1999), Spadea *et al.* (2000), Ferrari *et al.* (2002), Esfahani *et al.* (2007), Dong *et al.* (2013), Ahmed *et al.* (2011), Al-Tamini *et al.* (2011), Mostafa e Razaqpur (2013), mostram que ancoragens realizadas nas extremidades do reforço são opções para melhor aproveitamento do reforço, uma vez que dificulta ou evita a ocorrência falhas prematuras.

2.6 ESTUDOS EXPERIMENTAIS SOBRE REFORÇO COM PRFC

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos nacionais e internacionais que utilizaram a técnica de reforço de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC.

2.6.1 Estudos nacionais

Beber (2003)

O objetivo desse trabalho foi um amplo estudo experimental das principais implicações estruturais da aplicação de PRFC colados externamente a vigas de concreto armado, reforçadas à flexão e ao cisalhamento.

O programa experimental constou de um total de 44 vigas, divididas em dois grupos: o grupo F composto por 14 vigas reforçadas à flexão e o grupo C composto por 30 vigas reforçadas ao cisalhamento. As vigas tinham a mesma seção transversal retangular (150 mm de largura por 300 mm de altura) com vão livre de 2530 mm e comprimento total de 3000 mm.

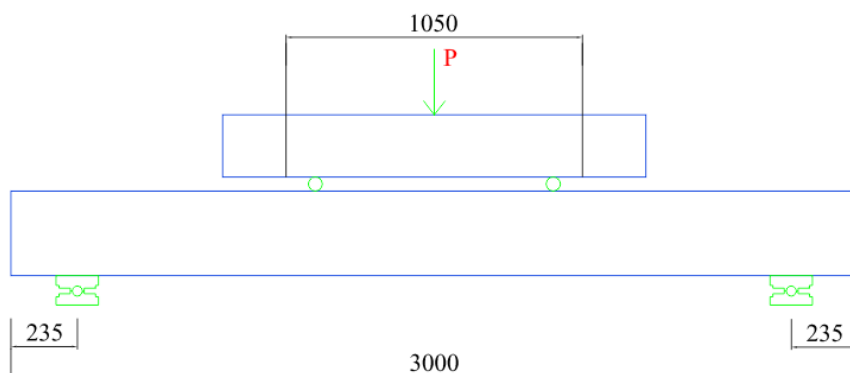
Nas vigas foram utilizados como sistema de reforço laminados pré-fabricados e mantas flexíveis pré-impregnadas.

Serão apresentadas em detalhes apenas as vigas do grupo F que foram reforçadas à flexão com o sistema de reforço do tipo curado *in situ*.

Na Figura 34 está apresentado o esquema do ensaio. O detalhamento das armaduras das vigas do grupo F está apresentado na Figura 35 e o esquema de reforço das vigas do grupo F está descrito na Tabela 7.

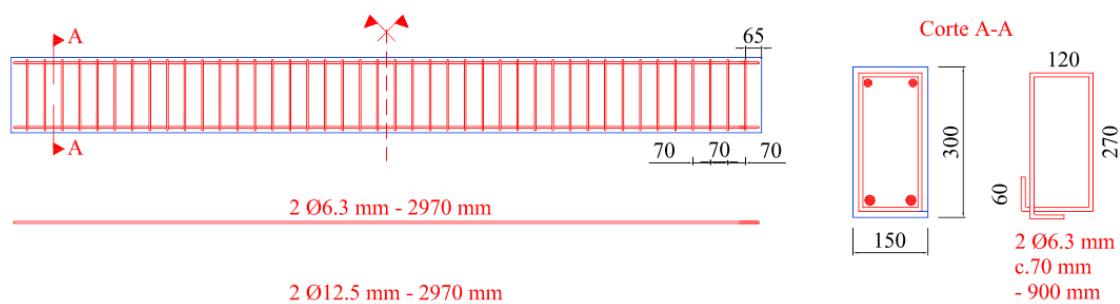
No estudo foram analisados modos e cargas de ruptura, deformações específicas, deslocamentos e distribuição das tensões. A pesquisa também abordou a análise dos resultados do comportamento experimental das vigas ensaiadas e modelos analíticos que simulassem esse comportamento.

Figura 34 - Detalhamento do esquema de ensaio das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003) (medidas em mm).



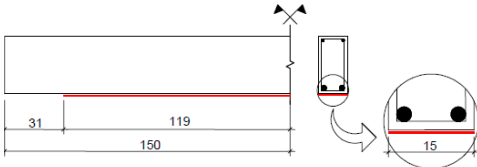
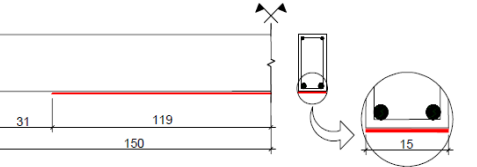
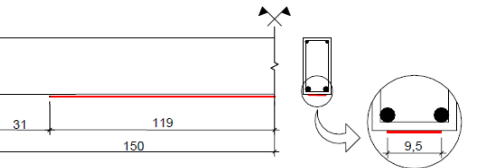
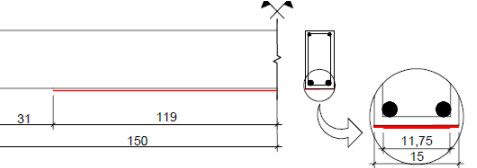
Fonte: Beber (2003).

Figura 35 - Detalhamento das armaduras das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003) (medidas em mm)



Fonte: Beber (2003).

Tabela 7 - Esquema do reforço das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003) (medidas em cm)

Viga	Esquema do reforço	
V4_A V4_B		<p><i>Replark 20</i> (1 camada) $bf = 15 \text{ cm}$ $A_f = 0,1665 \text{ cm}^2$ $L = 238 \text{ cm}$</p>
V5_A V5_B		<p><i>Replark 20</i> (6 camadas) $bf = 15 \text{ cm}$ $A_f = 0,999 \text{ cm}^2$ $L = 238 \text{ cm}$</p>
V6_A V6_B		<p><i>C-240 sheet</i> (1 camada) $bf = 9,5 \text{ cm}$ $A_f = 0,1672 \text{ cm}^2$ $L = 238 \text{ cm}$</p>
V7_A V7_B		<p><i>C-240 sheet</i> (4 camadas) $bf = 15 \text{ cm}$ (3 camadas) $bf = 11,75 \text{ cm}$ (1 camada) $A_f = 0,999 \text{ cm}^2$ $L = 238 \text{ cm}$</p>

Fonte: Beber (2003).

As cargas de colapso (P_u) e o modo de ruptura das vigas do grupo F reforçadas com sistema do tipo curado *in situ* e das vigas de referência (sem reforço) estão apresentadas na Tabela 8. Nas Figuras 36-a e 36-b estão representadas as configurações das vigas V4_B e V5_A na ruína, respectivamente. Vale salientar que as vigas foram ensaiadas de forma invertida.

Tabela 8 - Cargas e modos de ruptura das vigas do grupo F do trabalho de Beber (2003)

Viga	Sistema de reforço	Camadas	A_f (cm ²)	Modo de ruptura	P_u (kN)	Aumento (%)
V1_A V1_B	sem reforço	-	-	alongamento excessivo da armadura longitudinal	104,63 102,72	-
V4_A V4_B	Manta <i>Replark</i>	1	0,167	ruptura por fissuração excessiva de flexão	132,81 130,05	28,1 25,4
V5_A V5_B	Manta <i>Replark</i>	6	0,999	arrancamento do cobrimento	185,49 170,39	78,9 64,3
V6_A V6_B	Manta <i>C-Sheet</i>	1	0,167	ruptura por fissuração excessiva de flexão	118,56 118,50	14,4 14,3
V7_A V7_B	Manta <i>C-Sheet</i>	4	0,999	descolamento na interface concreto/reforço	167,07 154,79	61,1 49,3

A_f - área de fibra de carbono

P_u - carga última experimental

Obs.: a determinação do aumento na carga de ruptura das vigas reforçadas é realizada sobre a média aritmética das cargas de ruptura das vigas V1_A e V1_B.

Fonte: Beber (2003).

Figura 36 - Detalhe do modo de ruptura



a) viga V4_B

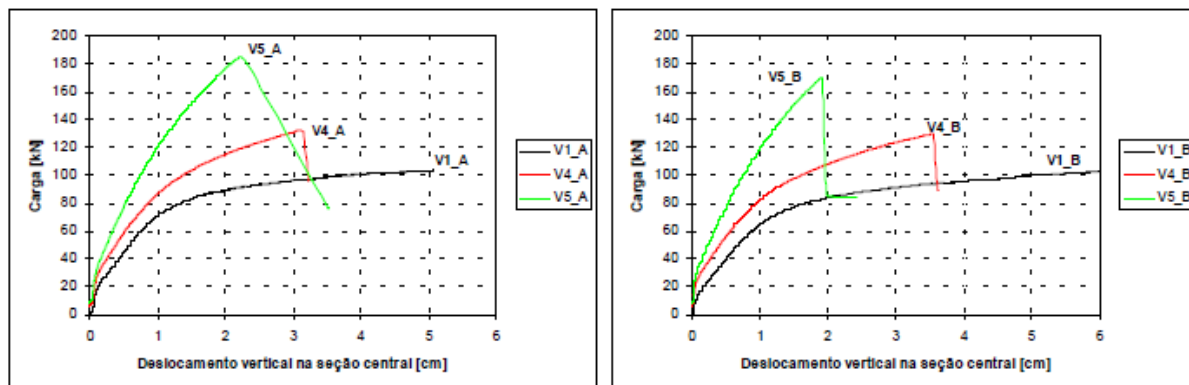


b) viga V5_A

Fonte: Beber (2003).

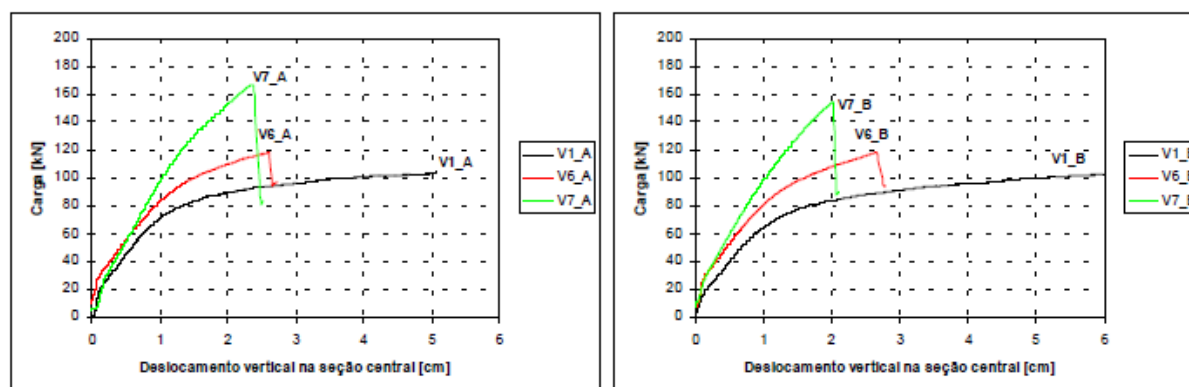
Nas Figuras 37-a e 37-b, 37-c e 37-d estão apresentadas as curvas carga-deslocamento vertical no vão central das vigas V4_A e V5_A em relação à viga V1_A, das vigas V4_B e V5_B em relação à viga V1-B, das vigas V6_A e V7_A em relação à viga V1_A e das vigas V6_B e V7_B em relação à viga V1_B, respectivamente.

Figura 37 - Curvas carga-deslocamento vertical das vigas do grupo F ensaiadas por Beber (2003)



a) vigas V4-A e V5-A

b) vigas V4-B e V5-B



c) vigas V6-A e V7-A

d) vigas V6-B e V7-B

Fonte: Beber (2003).

Algumas das conclusões apresentadas pelo autor são apresentadas a seguir:

- A elevação na resistência das vigas reforçadas é evidente, com ganhos de até 78,9% para a viga V5_A, reforçada com seis camadas de fibra de carbono, em relação às vigas de controle, contudo a incorporação de um material com comportamento puramente elástico-linear conduz, invariavelmente, a severas modificações no comportamento estrutural das vigas reforçadas.
- Observou-se que nas vigas reforçadas à flexão V4 e V6, reforçadas com uma camada de fibra, o modo de ruptura se caracterizou por fissuração excessiva de flexão que ocasionou uma falha localizada provocando a ruptura do reforço, nas vigas V5 e V7, reforçadas com seis e quatro camadas respectivamente, a falha na ancoragem do reforço caracterizou a ruína das vigas.
- Os deslocamentos verticais na seção transversal das vigas reforçadas foram significativamente menores que nas vigas de controle, mostrando que a incorporação

de compósitos de PRFC, no reforço à flexão, conduz a significativos aumentos de rigidez das vigas reforçadas.

Observa-se nesse trabalho que o aumento do número de camadas de fibra no reforço à flexão permitiu um aumento considerável na capacidade resistente das vigas, um ganho de rigidez, porém as ruínas foram do tipo prematura.

Ferrari (2007)

Este trabalho teve entre seus objetivos específicos, avaliar a eficiência da técnica de reforço com mantas de PRFC em vigas de concreto armado, com o banzo tracionado previamente reconstituído com um compósito de alto desempenho.

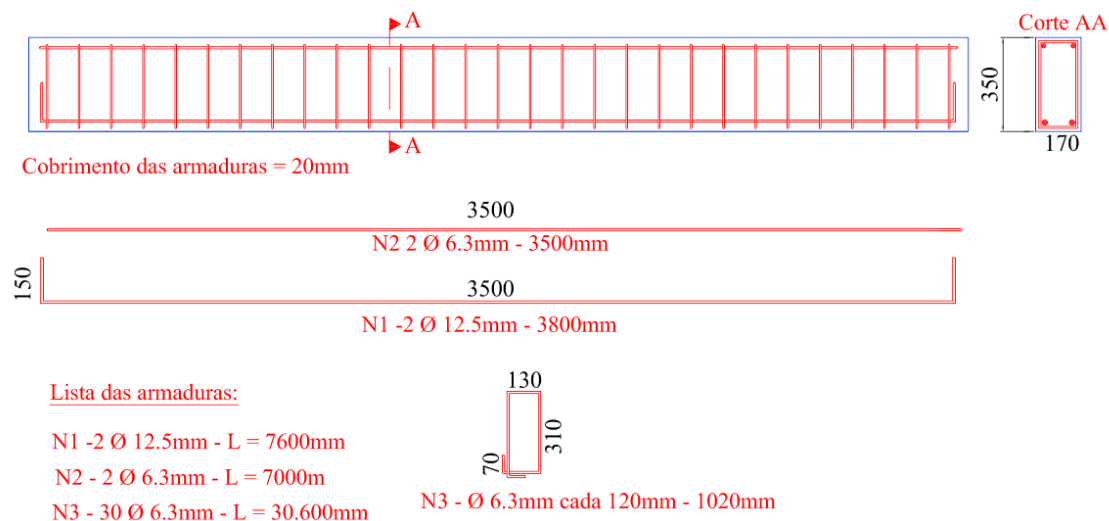
O programa experimental constou de seis vigas de concreto armado com seção transversal retangular (170 mm de largura por 350 mm de altura) com vão livre de 3200 mm e comprimento total de 3600 mm.

As vigas tinham a mesma taxa de armadura, foram reforçadas à flexão com mantas de PRFC e divididas em três grupos: grupo A constando de uma viga de referência, sem reforço (V1A); grupo B com três vigas, sendo uma viga reforçada com três camadas de fibra (V1B), uma viga com o banzo foi parcialmente demolido e reconstituído com o compósito de alto desempenho e reforçada com três camadas de fibra (V2B) e uma viga reforçada com uma camada de fibra (V3B) e grupo C que foi desenvolvido porque as vigas do grupo B apresentaram problema de aderência da resina e nesse grupo de utilizou o reforço de outro fabricante. O grupo C constou de duas vigas, sendo uma viga reforçada com três camadas de fibra (V1C) e uma viga que teve o banzo integralmente demolido e reconstituído com o compósito de alto desempenho e reforçada com três camadas de fibra (V2C).

Serão apresentadas em detalhes apenas as vigas reforçadas e que não utilizaram o compósito de alto desempenho.

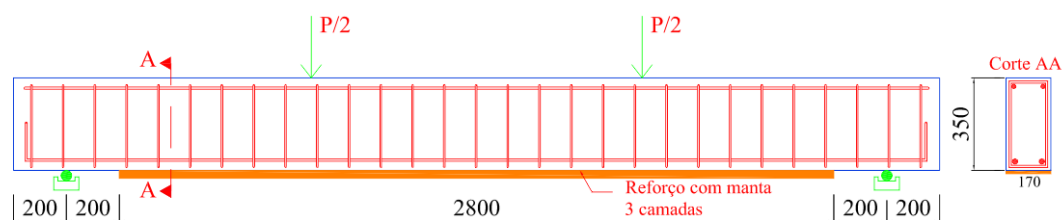
Na Figura 38 está apresentado o detalhamento das armaduras das vigas ensaiadas e na Figura 39 está apresentado o carregamento e o posicionamento do reforço.

Figura 38 - Detalhamento das armaduras das vigas de Ferrari (2007) (medidas em mm)



Fonte: Ferrari (2007).

Figura 39 - Detalhamento do carregamento e do reforço das vigas de Ferrari (2007) (medidas em mm)



Fonte: Ferrari (2007).

As cargas últimas experimentais (P_u) e o modo de ruptura das vigas reforçadas sem o banzo demolido e reconstituído com o compósito de alto desempenho e da viga de referência (sem reforço) estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Cargas e modos de ruptura das vigas do trabalho de Ferrari (2007)

Viga	Sistema de reforço	Camadas	A_f (cm ²)	Modo de ruptura	P_u (kN)	Incremento (%)
V1A	sem reforço	-	-	deformação excessiva da armadura	89,27	-
V1B	Sistema R1	3	0,867	ruptura do reforço	143,93	61,20
V3B	Sistema R1	1	0,289	ruptura do reforço	111,40	24,80
V1C	SikaWrap-300C	3	0,847	desprendimento do reforço	147,37	65,10

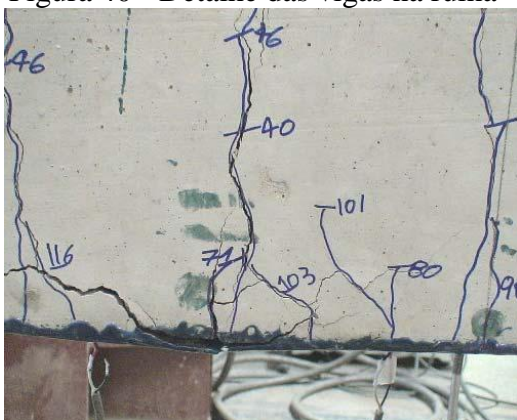
A_f - área de fibra de carbono

P_u - carga última experimental

Fonte: Ferrari (2007).

Nas Figuras 40-a e 40-b estão representadas as configurações das vigas V1B e V1C na ruína, respectivamente.

Figura 40 - Detalhe das vigas na ruína



a) viga V1B na ruína

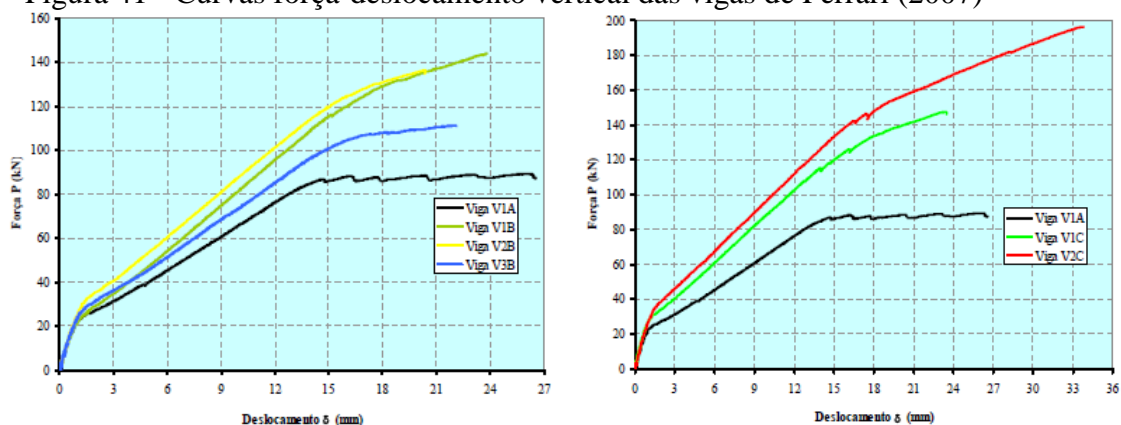


b) viga V1C na ruína

Fonte: Ferrari (2007).

Nas Figuras 41-a e 41-b estão apresentadas as curvas força-deslocamento vertical no meio do vão das vigas ensaiadas do grupo B e do grupo C, respectivamente, comparadas com a viga de referência V1A.

Figura 41 - Curvas força-deslocamento vertical das vigas de Ferrari (2007)



a) vigas do grupo B

b) vigas do grupo C

Fonte: Ferrari (2007).

Algumas das conclusões apresentadas pelo autor na pesquisa estão apresentadas a seguir:

- Nas vigas reforçadas do grupo B, apesar das características peculiares de cada viga, os modos de ruína foram idênticos e caracterizados pela ruptura inesperada do reforço. Isso ocorreu devido à baixa resistência à tração do reforço, enquanto que na viga V1C a ruína da viga iniciou com uma fissura na extremidade do reforço que se propagou na direção horizontal e culminou com o desprendimento do reforço.
- Todas as vigas reforçadas apresentaram maior rigidez que a viga de referência. Nas vigas V1B e V1C, reforçadas com a mesma área de fibra de reforço e mantas distintas, observou-se semelhança entre seus comportamentos, porém com maior rigidez para a viga V1C. Esse fato que está associado com as características de cada reforço como espessura final do compósito, quantidade de fibras e módulo de elasticidade.

Observa-se nesse trabalho que a presença do reforço aumenta significativamente a capacidade resistente das vigas e a rigidez, porém o modo de ruína prematuro também é verificado na viga V1C reforçada com três camadas.

Costa (2011)

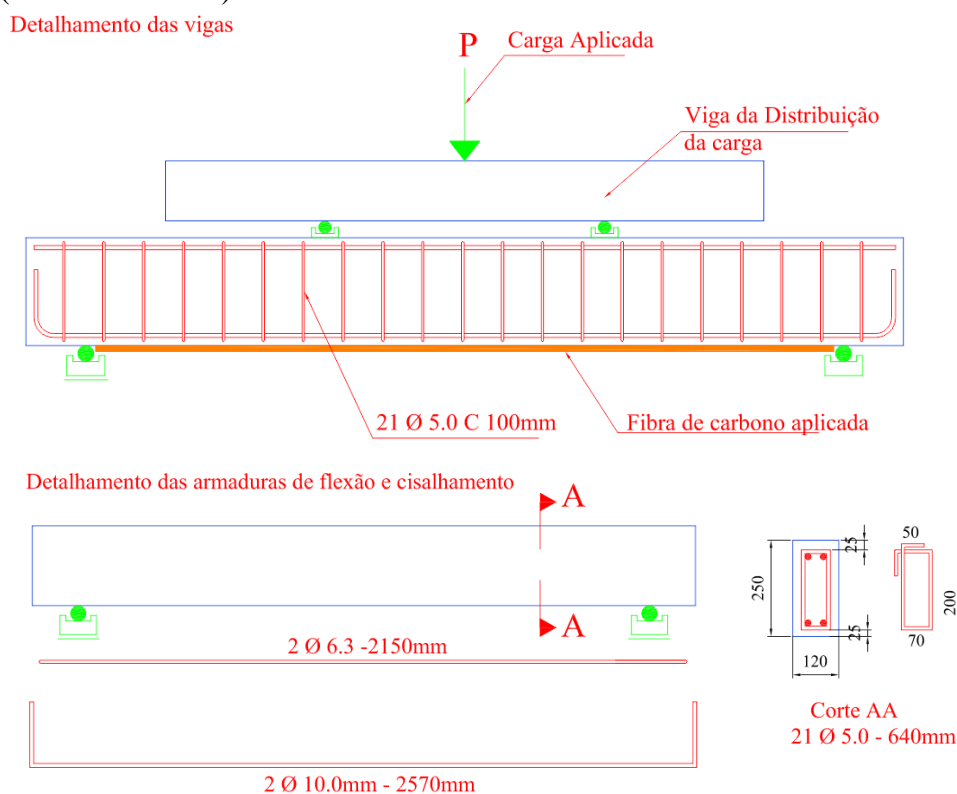
Esta pesquisa teve como objetivo avaliar através de um programa experimental o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com compósito reforçado com manta de fibra de carbono (CRFC) e parâmetros de otimização do reforço utilizando a redução do comprimento de ancoragem.

O programa experimental constou de seis vigas de concreto armado com seção transversal retangular (120 mm de largura por 250 mm de altura), com comprimento total de 2200 mm e vão livre de 1900 mm.

As vigas tinham mesma taxa de armadura, foram divididas em três grupos, sendo cada grupo com duas vigas onde, no reforço à flexão, uma viga foi reforçada com uma camada de fibra e a outra com duas camadas de fibra. O comprimento de ancoragem foi reduzido de modo diferente em cada grupo.

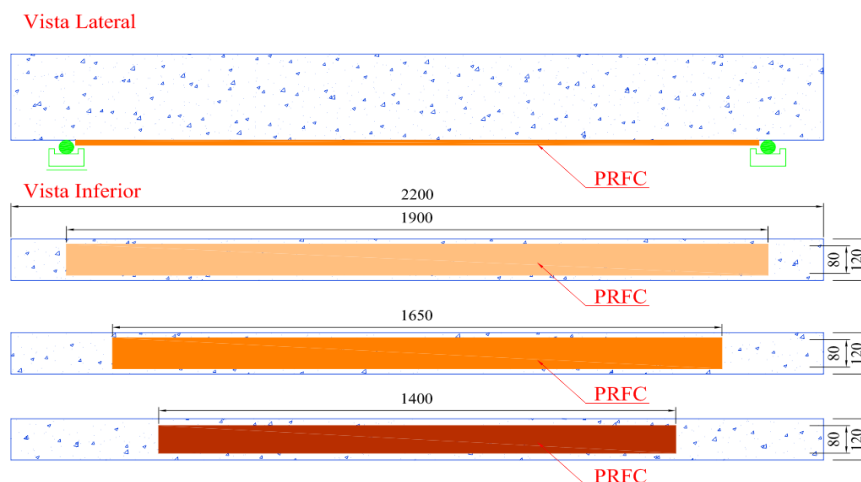
Na Figura 42 está apresentado o detalhamento da armadura e do carregamento das vigas e na Figura 43 está apresentado o sistema de reforço das vigas.

Figura 42 - Detalhamento das armaduras e do carregamento das vigas ensaiadas por Costa (2011) (medidas em mm)



Fonte: Costa (2011).

Figura 43 - Detalhamento do sistema de reforço das vigas ensaiadas por Costa (2011) (medidas em mm)



Fonte: Costa (2011).

Os resultados experimentais de carga de colapso e modo de ruína das vigas estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 44-a e 44-b estão apresentadas a configuração das vigas VR2C165 e VR2C190 na ruína, respectivamente.

Tabela 10 - Modos de ruína e cargas últimas das vigas

Viga	Camadas de reforço	l (mm)	l _b (mm)	Modo de ruptura	P _u (kN)
VR1C190	1	1900	600	ruptura do reforço no meio do vão	100,0
VR2C190	2	1900	600	ruptura do reforço no meio do vão e arrancamento de parte da camada de concreto	111,0
VR1C165	1	1650	475	ruptura do reforço no meio do vão e arrancamento de parte da camada de concreto	97,0
VR2C165	2	1650	475	descolamento do reforço na região da ancoragem	106,0
VR1C140	1	1400	350	rupturado reforço no meio do vão	82,0
VR2C140	2	1400	350	arrancamento do substrato do concreto na região da ancoragem	83,0

1- uma camada de fibra de carbono

2- duas camadas de fibra de carbono

l- comprimento aderido de fibra no vão

l_b- comprimento de ancoragem da fibra (entre o apoio e o primeiro ponto de aplicação da carga)

Fonte: Costa (2011).

Figura 44 - Configuração das vigas na ruína



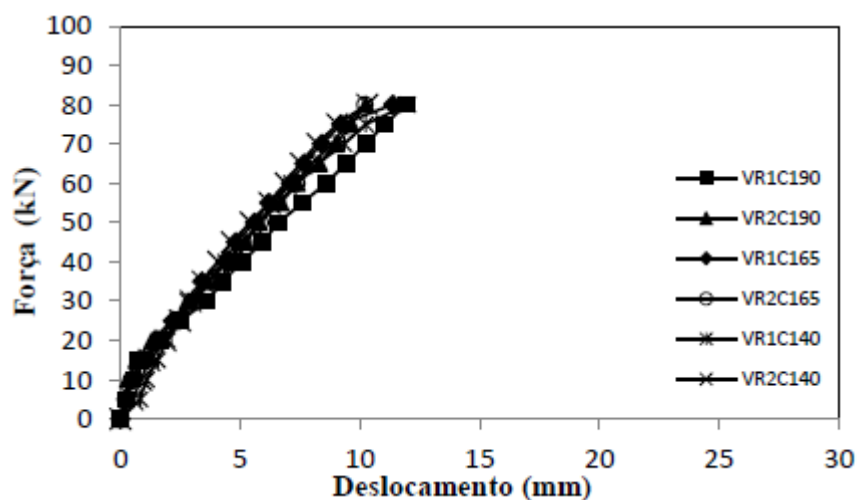
a) viga VR2C165

b) viga VR2C190

Fonte: Costa (2011).

Na Figura 45 estão apresentadas as curvas força-deslocamento vertical no meio do vão das vigas ensaiadas. Por questões de segurança dos equipamentos utilizados para medição dos deslocamentos verticais (deflectômetros), as medições dos deslocamentos foram feitas até a força de 80 kN.

Figura 45 - Curvas carga-deslocamento vertical das vigas ensaiadas por Costa (2011)



Fonte: Costa (2011).

Algumas das conclusões da autora na pesquisa estão apresentadas a seguir:

- Observou-se que em algumas das vigas a ruína se deu na interface concreto/compósito mostrando a ineficiência da aderência compósito/substrato.
- As vigas com maior comprimento de ancoragem (VR1C190 e VR2C190) apresentaram maior valor de capacidade resistente enquanto que as vigas com menor

comprimento de aderência (VR1C140 e VR2C140) apresentaram a menor capacidade resistente.

- Quanto aos deslocamentos verticais observou-se que não houve muita variação desses deslocamentos entre as vigas ensaiadas e a viga VR1C190 apresentou o maior deslocamento em relação às demais vigas.

Nesse trabalho observa-se que as vigas VR2C165 e VR2C140, reforçadas com duas camadas de fibra e com comprimentos de ancoragem menores que a viga V2RC190, apresentaram ruína prematura por descolamento do reforço e arrancamento do concreto de cobertura, respectivamente, mostrando que a diminuição do comprimento efetivo de aderência do reforço influencia nessa configuração de ruína.

Também se observa um pequeno ganho de rigidez nas vigas reforçadas com duas camadas em relação às vigas reforçadas com uma camada, em todos os grupos de vigas.

2.6.2 Estudos internacionais

Matthys (2000)

Nesta pesquisa foi estudado separadamente, através de um programa experimental, o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com lâminas e tecidos pré-impregnados de PRFC.

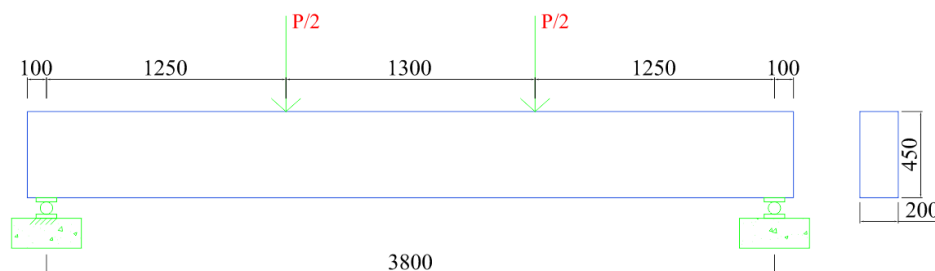
Dezesseis vigas foram ensaiadas, sendo divididas em dois grupos: nove vigas BF (reforçadas à flexão) e sete vigas BS (reforçadas ao cisalhamento).

As vigas BF1 (sem reforço), BF2, BF3, BF4, BF5 e BF6 possuíam uma taxa de armadura de 0,96% e as vigas BF7 (sem reforço), BF8 e BF9 possuíam uma taxa de armadura de 0,48%.

Para análise dos resultados, duas vigas sem reforço foram ensaiadas em cada grupo. Todas as vigas tinham seção retangular (200 mm de largura por 450 mm de altura), 4000 mm de comprimento total e vão livre de 3800 mm, foram biapoiadas e ensaiadas com duas cargas concentradas nos terços do vão aproximadamente.

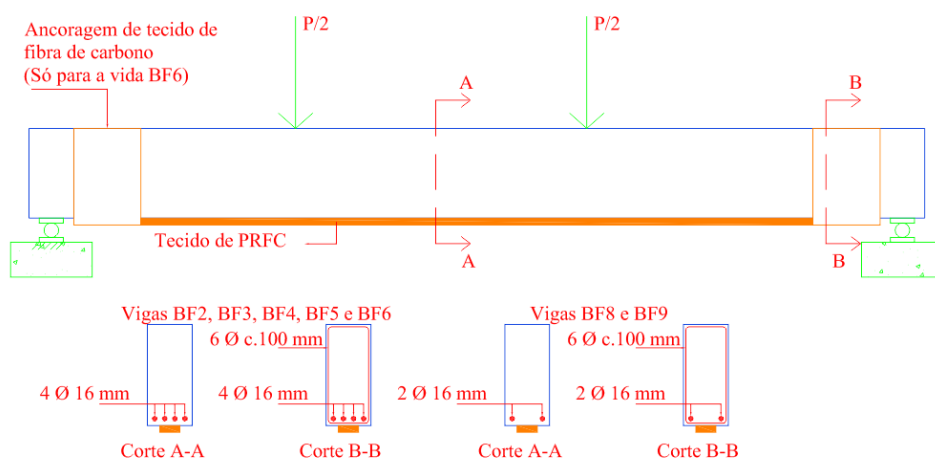
Serão apresentadas em detalhes apenas as vigas BF (reforçadas à flexão), objeto dessa pesquisa. Na Figura 46 está apresentado o detalhamento do carregamento e da geometria das vigas e na Figura 47 estão apresentados o detalhamento das armaduras, do carregamento e o posicionamento do reforço nas vigas.

Figura 46 - Detalhamento do carregamento e da geometria das vigas BF de Matthys (2000) (medidas em mm)



Fonte: Matthys (2000).

Figura 47 - Detalhamento da armadura e do reforço das vigas BF de Matthys (2000) (medidas em mm)



Fonte: Matthys (2000).

As vigas reforçadas à flexão permitiram investigar, entre outras coisas, o variação do efeito do reforço (BF2 e BF3), a influência da pré-fissuração (BF4), a aplicação de carga durante a execução do reforço (BF5). Na Tabela 11 estão apresentados os resultados experimentais das vigas BF e nas Figuras 48-a e 48-b estão apresentados os detalhes das falhas da ruína das vigas reforçadas e de uma fina camada de concreto aderida ao reforço, respectivamente. Essa foi a configuração comum da ruína de todas as vigas reforçadas.

Tabela 11 - Resultados experimentais das vigas BF de Matthys (2000)

Viga	f_{cm} (MPa)	Reforço	Pre-fissuração e pré- carregamento	Modo de ruptura	P_u (kN)
BF1	33,70	sem reforço		EA/EC	144,20
BF2	36,50	1		DC(EA)/EC	185,00
BF3	34,90	1		DC(EA)/EC	186,00
BF4	30,80	1	*	DC(EA)/EC	184,20
BF5	37,40	1	**	DC(EA)/EC	177,00
BF6	35,90	2		DC(EA)/EC	183,00
BF7	38,50	sem reforço		EA/EC	80,70
BF8	39,40	1		DC(EA)	111,30
BF9	33,70	3		DC(EA)/EC	95,80

1- 1 lâmina de PRFC

2- 1 lâmina de PRFC e ancoragem de tecido de PRFC

3- 2 camadas de tecido PRFC

* - pré-fissurada e depois reforçada

** - carregada enquanto realizada a execução do reforço

EA/EC - escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto

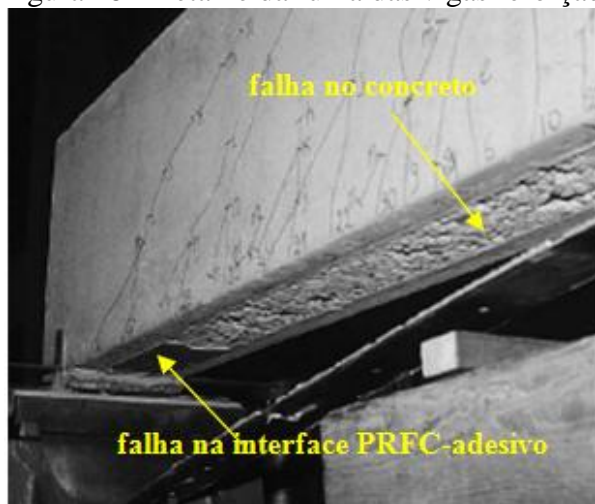
DC(EA) - descolamento do compósito depois do escoamento do aço

f_{cm} - resistência média à compressão do concreto

P_u - carga última experimental

Fonte: Matthys (2000).

Figura 48 - Detalhe da ruína das vigas reforçadas do grupo BF



a) descolamento do reforço

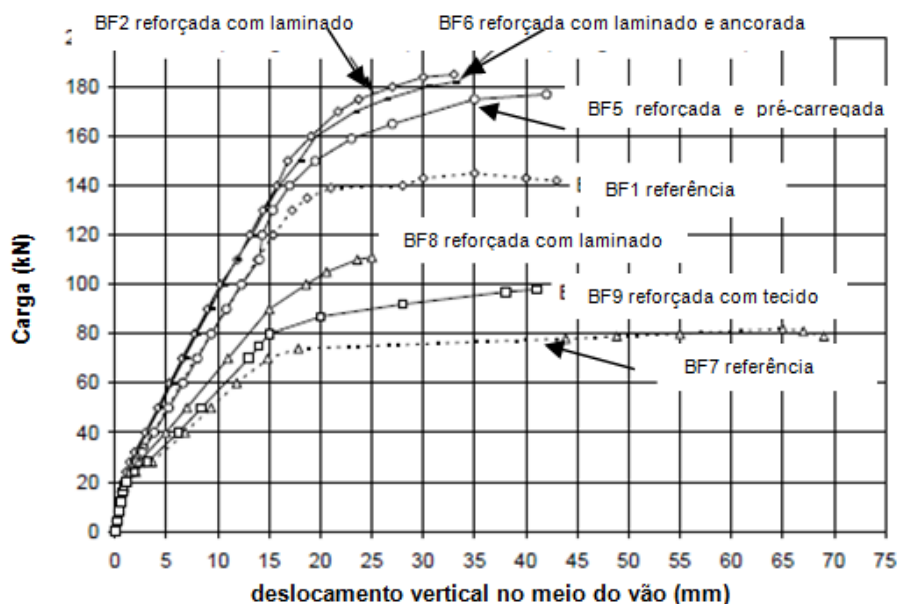


b) concreto aderido ao reforço

Fonte: Matthys (2000).

Na Figura 49 estão apresentadas as curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão de algumas das vigas ensaiadas.

Figura 49 - Curvas carga-deslocamento vertical das vigas do grupo BF de Matthys (2000)



Fonte: Matthys (2000).

Algumas das conclusões do autor na pesquisa estão apresentadas a seguir:

- Nas vigas reforçadas à flexão, o aumento da capacidade resistente, em relação às vigas de referência (BF1 e BF7) foi entre 20% a 40%. Todas as vigas reforçadas apresentaram ruína brusca por descolamento do reforço de PRFC.
- O pré-fissuração da viga BF4 não comprometeu significativamente o incremento de resistência da viga e apresentou uma diminuição capacidade resistente igual 0,97% em relação à viga BF3 (sem pré-fissuração).
- A viga BF5 que foi pré-fissurada e mantida com carregamento (110 kN) durante a execução do reforço, não apresentou diminuição expressiva de desempenho em relação à capacidade resistente quando comparada com a viga que foi descarregada para a execução do reforço. A diminuição de carga de colapso foi menor em 4% em relação à BF4.
- Todas as vigas reforçadas do grupo BF tiveram ruína por descolamento do reforço onde a falha no concreto ocorreu em quase toda a extensão do compósito descolado, e uma fina camada do substrato ficou aderida ao reforço. Nas extremidades do reforço a falha ocorreu na interface PRF e adesivo.

Observa-se nesse trabalho que o reforço proporcionou um ganho significativo na capacidade resistente das vigas e esse ganho foi maior na viga com menor taxa de armadura e reforçada com laminado (BF8).

Independente das condições de pré-carregamento, pré-fissuração, sistemas de reforço distintos (laminado e tecido) e ancoragem, as vigas tiveram a mesma condição de ruína.

O ganho de rigidez das vigas reforçadas em relação às vigas de referência foi considerável.

Ahmed *et al.* (2011)

Nesse estudo foi investigado o efeito do número de camadas de PRFC no desempenho à flexão das vigas reforçadas, bem como a eficácia das faixas nas bordas transversais para prevenir o descolamento prematuro do reforço.

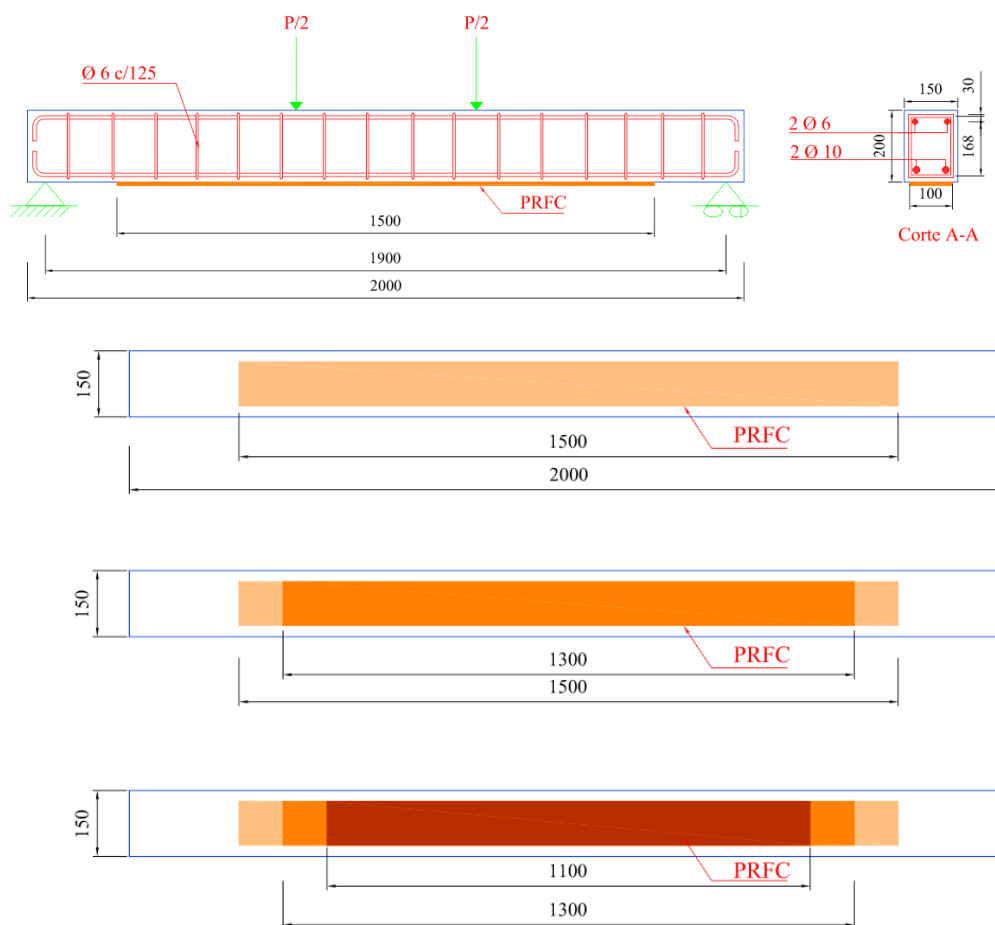
Foi realizado um trabalho experimental para analisar o comportamento de seis vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de PRFC colados externamente com diferentes camadas com e sem ancoragens de reforço.

As vigas tinham seção transversal retangular (150 mm de largura por 200 mm de altura) com 1900 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e com mesma taxa de armadura.

Serão apresentadas em detalhes as vigas reforçadas sem ancoragens nas extremidades do reforço que é o foco desse trabalho.

Na Figura 50 está apresentado o detalhamento das armaduras, do reforço à flexão e o carregamento das vigas.

Figura 50 - Detalhamento da armadura, do reforço e do carregamento das vigas de Ahmed *et al.* (2011)



Fonte: Ahmed *et al.* (2011).

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados experimentais das cargas últimas dos modos de ruína das vigas e o aumento percentual das cargas resistidas pelas vigas reforçadas em relação à viga de referência e na Figura 51 está apresentado o modo de ruína das vigas reforçadas.

Tabela 12 - Cargas últimas e modos de ruína das vigas do trabalho de Ahmed *et al.* (2011)

Viga	Camadas de reforço	Modo de ruína	P_u	$\frac{P_u}{P_{u(CB)}}$
CB	-	esmagamento do concreto	40,30	-
FB-1L	1	descolamento do reforço	62,00	54%
FB-2L	2	descolamento do reforço	69,75	73%
FB-3L	3	descolamento do reforço	74,40	85%

P_u - carga última experimental

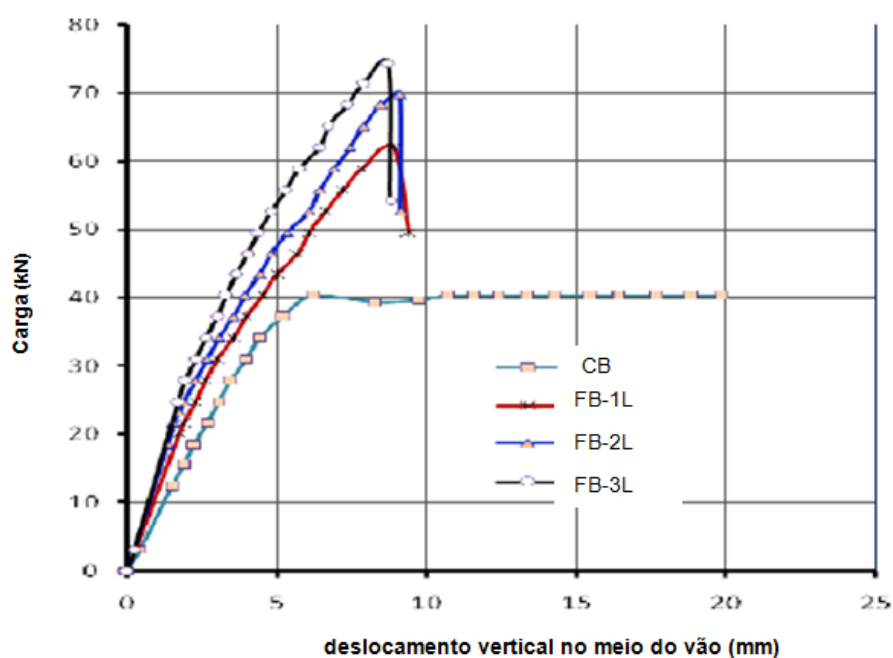
Fonte: Ahmed *et al.* (2011).

Figura 51 - Detalhe do modo de ruína típico das vigas reforçadas sem ancoragem



Fonte: Ahmed *et al.* (2011).

Na Figura 52 estão apresentadas as curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas reforçadas sem ancoragem e da viga de referência.

Figura 52 - Curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas de Ahmed *et al.* (2011)

Fonte: Ahmed *et al.* (2011).

Algumas das conclusões dos autores na pesquisa são:

- Os resultados do estudo experimental indicam que o reforço com laminados de PRFC colados externamente são um eficiente método para o reforço de vigas de concreto armado aumentando a capacidade resistente das vigas.
- As vigas reforçadas com diferentes camadas de fibra não alcançaram sua capacidade resistente última devido à ruína prematura por descolamento do reforço.
- Em relação ao efeito do número de camadas observou-se que as vigas apresentaram um aumento de rigidez com o aumento do número de camadas de fibra.

Observa-se nesse trabalho que o maior percentual de ganho de capacidade resistente ocorre na viga reforçada com uma camada, mostrando que com o aumento do número de camadas esse ganho vai diminuindo.

Os resultados experimentais também mostram que quanto maior o número de camadas no reforço, maior é aumento da rigidez das vigas.

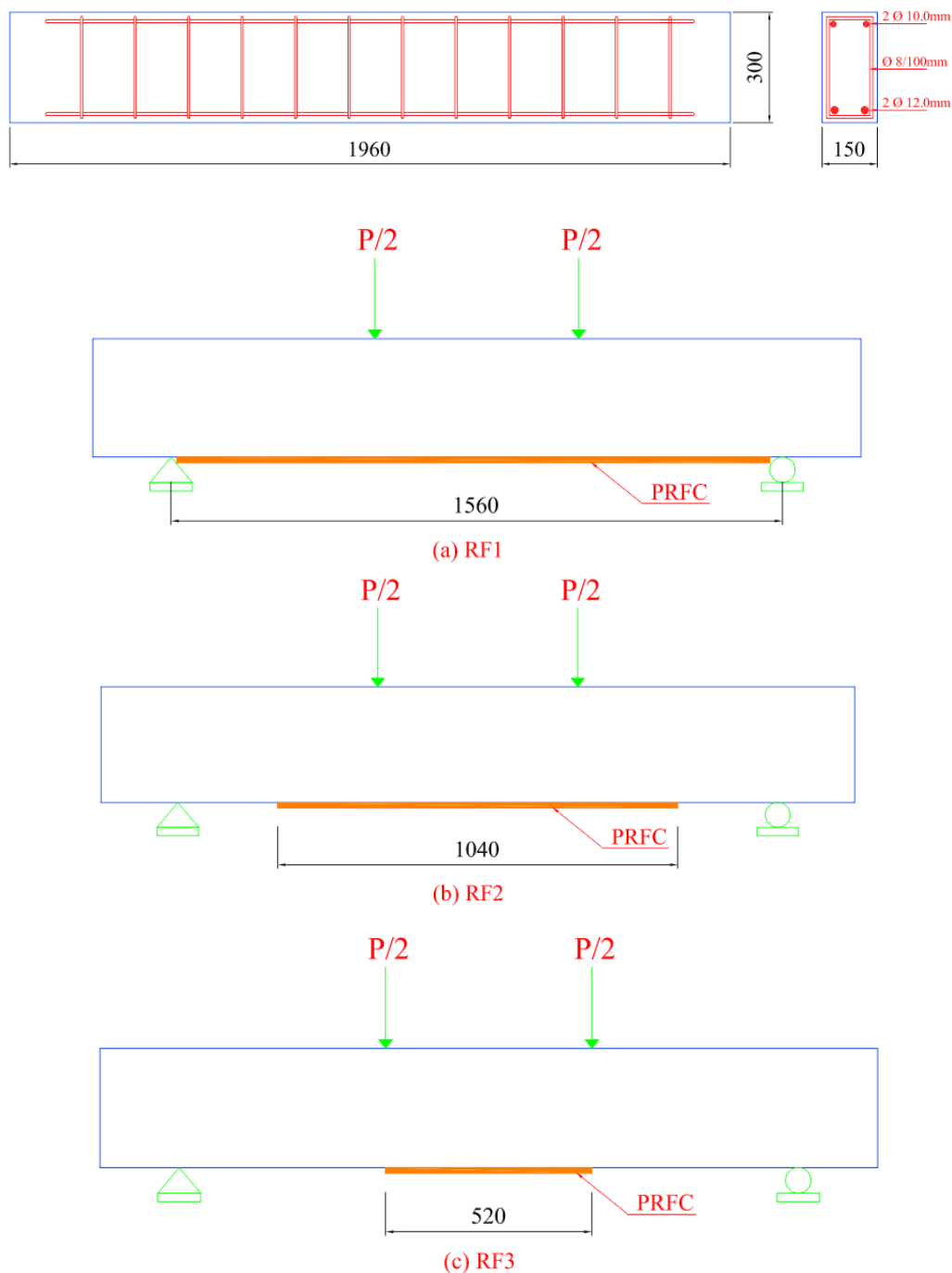
Obaidat (2011)

Esse trabalho investigou através de um programa experimental o comportamento estrutural de vigas de concreto armado estruturalmente danificadas e reforçadas à flexão e ao cisalhamento separadamente com laminados de PRFC. As variáveis consideradas foram a taxa de armadura interna, a posição e o comprimento do reforço.

O programa experimental constou de 16 vigas com seção transversal retangular (150 mm de largura por 300 mm de altura) com vão livre de 1560 mm e comprimento total de 1960 mm. Foram reforçadas 12 vigas divididas em dois grupos: o grupo das vigas RF (reforçadas à flexão) e o grupo das vigas RS (reforçadas ao cisalhamento). Para controle foram deixadas 4 vigas (2 para cada grupo).

Serão apresentadas em detalhes apenas as vigas reforçadas do grupo RF (reforçadas à flexão). O detalhamento da armadura, do esquema de reforço e do carregamento das vigas está apresentado na Figura 53.

Figura 53 - Detalhamento da armadura, do reforço e do carregamento das vigas RF de Obaidat *et al.* (2011)



Fonte: Obaidat *et al.* (2011).

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados experimentais das cargas últimas, dos modos de ruína das vigas do grupo RF e o aumento percentual das cargas resistidas pelas vigas reforçadas em relação às vigas de referência. Na Figura 54 está apresentado o modo de ruína comum a todas as vigas reforçadas.

Tabela 13 - Resultados experimentais das vigas do grupo RF do trabalho de Obaidat *et al.* (2011)

Vigas	f_{cm} (MPa)	l (mm)	Modo de ruptura	P_u (kN)	P_u/P_u (CB)
CB (a e b)	29,00	sem reforço	escoamento da armadura e esmagamento do concreto	118,00	-
RF1 (a e b)	29,00	1560	ruptura frágil por descolamento do reforço	166,00	33%
RF2 (a e b)	29,00	1040	ruptura frágil por descolamento do reforço	142,00	20%
RF3 (a e b)	29,00	520	ruptura frágil por descolamento do reforço	128,00	7%

P_u - maior valor da carga última experimental entre as vigas (a e b)

f_{cm} - resistência à compressão média do concreto

l - comprimento do reforço

Fonte: Obaidat *et al.* (2011).

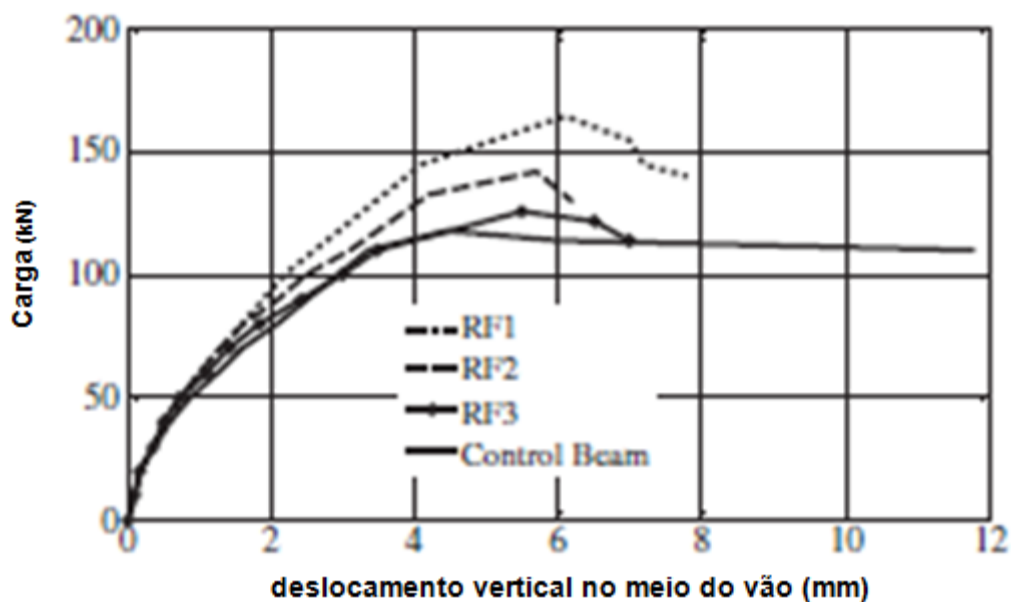
Figura 54 - Detalhe típico da ruína das vigas reforçadas RF



Fonte: Obaidat *et al.* (2011).

Na Figura 55 estão apresentadas as curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas do grupo RF e da viga de controle.

Figura 55 - Curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas de Obaidat *et al.* (2011)



Fonte: Obaidat *et al.* (2011).

Algumas das conclusões apresentadas pelos autores estão apresentadas a seguir:

- Entre as vigas reforçadas à flexão observou-se um aumento da capacidade resistente variando entre 7% e 33%.
- O aumento do comprimento do PRFC no reforço à flexão pode tornar o reforço mais eficaz para o aumento da capacidade resistente das vigas.
- Os resultados mostraram que o modo de ruptura comum a todas as vigas reforçadas foi o descolamento prematuro do PRFC que reduz a eficiência do reforço.
- A rigidez das vigas reforçadas com PRFC aumentou em relação à viga de controle.

Nesse trabalho observa-se que o comprimento do reforço aderido ao substrato de concreto influenciou no ganho de capacidade resistente e rigidez das vigas, porém, nesse caso, não alterou o modo de ruína prematuro por descolamento do reforço.

Dong *et al.* (2013)

Este trabalho investigou através de um programa experimental o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímeros reforçados com manta de fibra (PRF), utilizando fibra de carbono e fibra de vidro.

Quatorze vigas foram pesquisadas e divididas em dois grupos: vigas CR reforçadas à flexão com PRFC e vigas SR reforçadas à flexão e ao cisalhamento com reforço híbrido de PRFC e PRFV. Em cada grupo, uma viga foi ensaiada sem reforço para análise dos resultados.

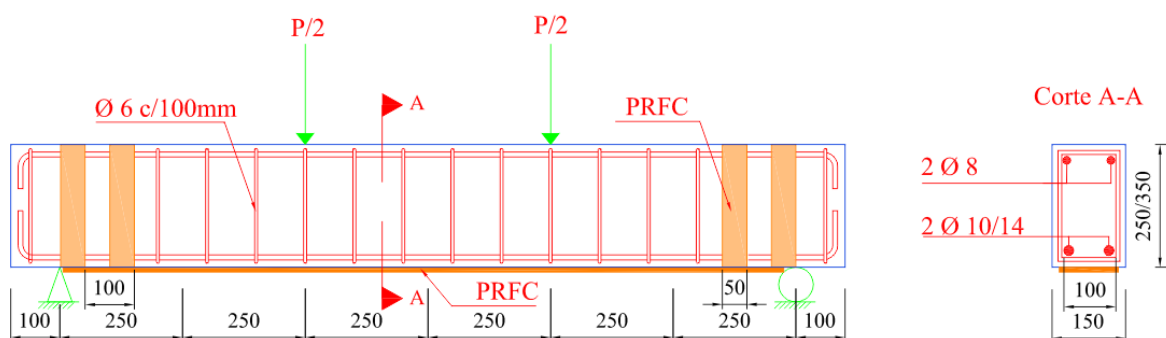
As vigas foram reforçadas à flexão receberam entre uma a duas camadas de PRFC e para análise da eficácia de uma camada extra de reforço em termos e carga de fissuração, carga de colapso, deformações e deslocamentos verticais das vigas. As vigas reforçadas também receberam duas ancoragens em “U” em cada extremidade do reforço para prevenir a ruína por descolamento das camadas de reforço.

Foram utilizadas taxa de armadura, número de camadas de fibra de carbono, cobrimento de concreto e espessuras de pré-fissuração distintos em algumas das vigas.

Todas as vigas tinham seção transversal retangular (150 mm de altura por 250 mm ou 300 mm de altura) com vão livre de 1500 mm e 1700 mm de comprimento total.

Serão apresentadas em detalhes apenas as vigas CR (reforçadas à flexão), objeto dessa pesquisa. O detalhamento das armaduras, do carregamento e do reforço das vigas CR está apresentado na Figura 56 e na Tabela 14 algumas das características das vigas CR.

Figura 56 - Detalhamento da armadura, do carregamento e do reforço das vigas CR do trabalho de Dong *et al.* (2013)



Fonte: Dong *et al.* (2013).

Tabela 14 - Características das vigas CR do trabalho de Dong *et al.* (2013)

Viga	h (mm)	Cobrimento de concreto (mm)	Armadura positiva	Camadas de reforço	pré-fissura (mm)
CR1	250	25	2 ϕ 10 mm	sem reforço	-
CR2	250	25	2 ϕ 10 mm	1	-
CR3	250	25	2 ϕ 10 mm	2	-
CR4	250	25	2 ϕ 10 mm	2	0,51
CR5	250	25	2 ϕ 14 mm	2	0,59
CR6	300	25	2 ϕ 10 mm	2	0,56
CR7	250	35	2 ϕ 10 mm	2	0,53

Todas as vigas reforçadas receberam 2 ancoragens de PRFC em "U" nas extremidades

Fonte: Dong *et al.* (2013).

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados experimentais das cargas últimas, dos modos de ruína das vigas do grupo CR e o aumento percentual das cargas resistidas pelas vigas reforçadas em relação à viga de referência e nas Figuras 57-a e 57-b estão apresentadas as configurações de uma das vigas que apresentaram ruína por ruptura do reforço e de uma das vigas que apresentaram ruína por descolamento do reforço, respectivamente.

Tabela 15 - Resultados experimentais das vigas CR de Dong *et al.* (2013)

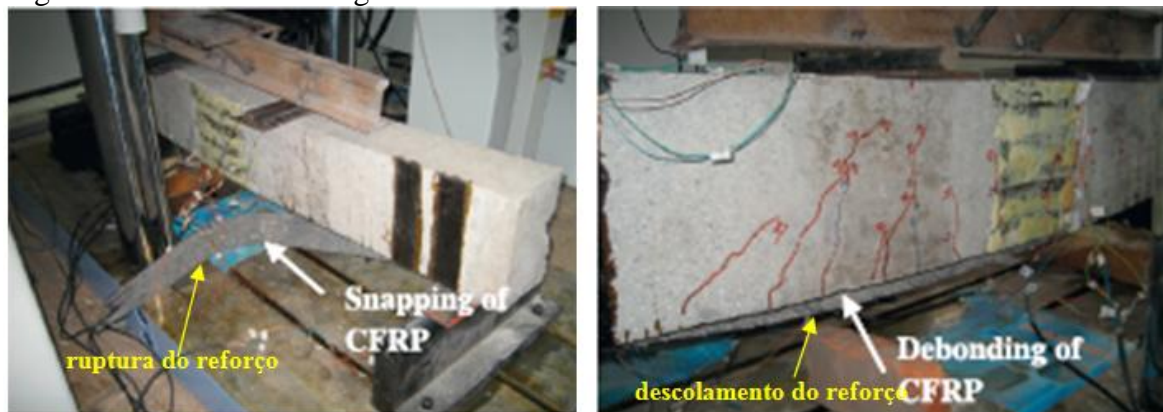
Viga	Camadas de reforço	Modo de ruptura	P _u (kN)	P _u /P _u (CB)
CR1	sem reforço	ruína por flexão	54,30	
CR2	1	ruptura do reforço e ruína por flexão	76,93	41,68%
CR3	2	ruptura do reforço e ruína por flexão	93,66	72,49%
CR4	2	descolamento do reforço e ruína por cisalhamento	84,39	55,41%
CR5	2	descolamento do reforço e ruína por flexão	121,70	124,13%
CR6	2	ruptura do reforço e ruína por flexão	95,89	76,59%
CR7	2	descolamento do reforço e ruína por flexão	80,45	48,16%

Todas as vigas reforçadas receberam 2 ancoragens de PRFC em "U" em cada extremidade

P_u - carga última experimental

Fonte: Dong *et al.* (2013).

Figura 57 - Detalhes das vigas na ruína



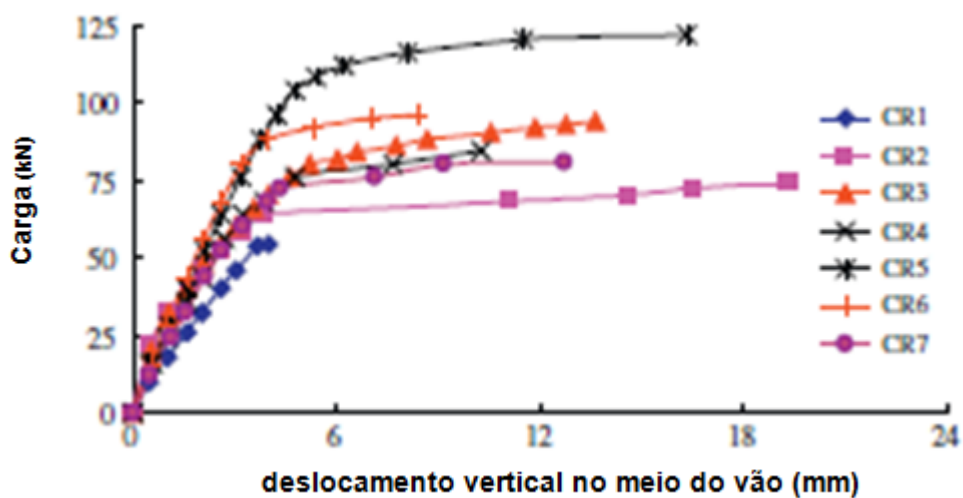
a) ruína por ruptura do reforço

b) ruína por descolamento do reforço

Fonte: Dong *et al.* (2013).

Na Figura 58 estão apresentadas as curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas do grupo CR e da viga de controle.

Figura 58 - Curvas carga-deslocamento vertical no meio do vão das vigas CR de Dong *et al.* (2013)



Fonte: Dong *et al.* (2013).

Algumas das conclusões dos autores são:

- O reforço à flexão com PRFC colados externamente aumenta a capacidade resistente das vigas. Esse aumento variou entre 41,68% (CR2) a 124,13% (CR5) em relação à viga de controle.

- Com a investigação observou-se que as camadas de reforço incrementam a rigidez das vigas.
- Nas vigas pré-fissuradas e reforçadas externamente com PRFC, o esquema de reforço utilizado na pesquisa foi efetivo para o aumento da capacidade resistente.

Nesse trabalho observa-se que o maior percentual de ganho entre as vigas reforçadas e com mesma taxa de armadura ocorreu na viga reforçada com uma camada (CR2) igual a 41,68%. O aumento para duas camadas não aumenta a capacidade resistente na proporção do aumento da área de fibra.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para o estudo experimental das vigas de concreto armado reforçadas à flexão com elementos de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) colados externamente. As características das vigas, do reforço e dos materiais utilizados são apresentadas, bem como a instrumentação e os procedimentos para a realização dos ensaios.

Os ensaios de caracterização realizados no concreto e no aço juntamente com os resultados obtidos estão também apresentados neste capítulo.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

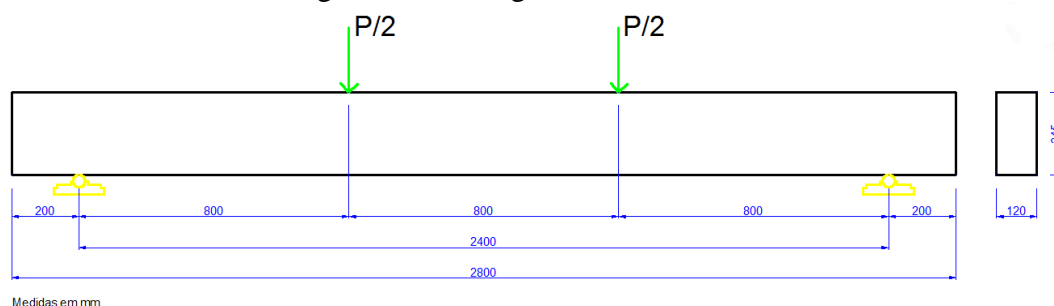
Nesta seção apresentam-se as características e geometria das vigas, o carregamento das vigas, o detalhamento das armaduras e do reforço.

As vigas foram definidas pelo projeto global do qual esse trabalho faz parte, e o cálculo da resistência à flexão das vigas de referência foi feito de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2007). Os dados de cálculo das vigas de referência estão apresentados no APÊNDICE A.

Foram confeccionadas quinze vigas de concreto armado de mesma seção transversal retangular (120 mm de largura por 245 mm de altura) com vão livre de 2400 mm e comprimento total de 2800 mm.

Para o ensaio as vigas foram bi-apoiadas e carregadas com cargas concentradas ($P/2$) atuantes em dois pontos conforme mostrado na Figura 59. Foram ensaiadas divididas em três grupos de vigas com distintas taxas de armaduras.

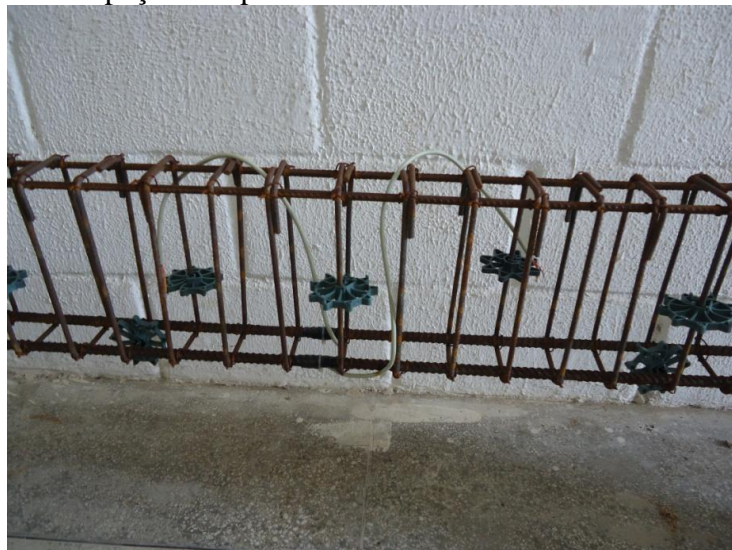
Figura 59 - Dimensões e carregamento das vigas



Fonte: Elaborada pela autora.

Para garantir o cobrimento das armaduras no valor de 25 mm para todas as vigas, foram utilizados espaçadores plásticos de 25 mm em quantidade e posicionamento definidos de modo aleatório e padronizados em todas as vigas (Figura 60).

Figura 60 - Detalhe dos espaçadores plásticos

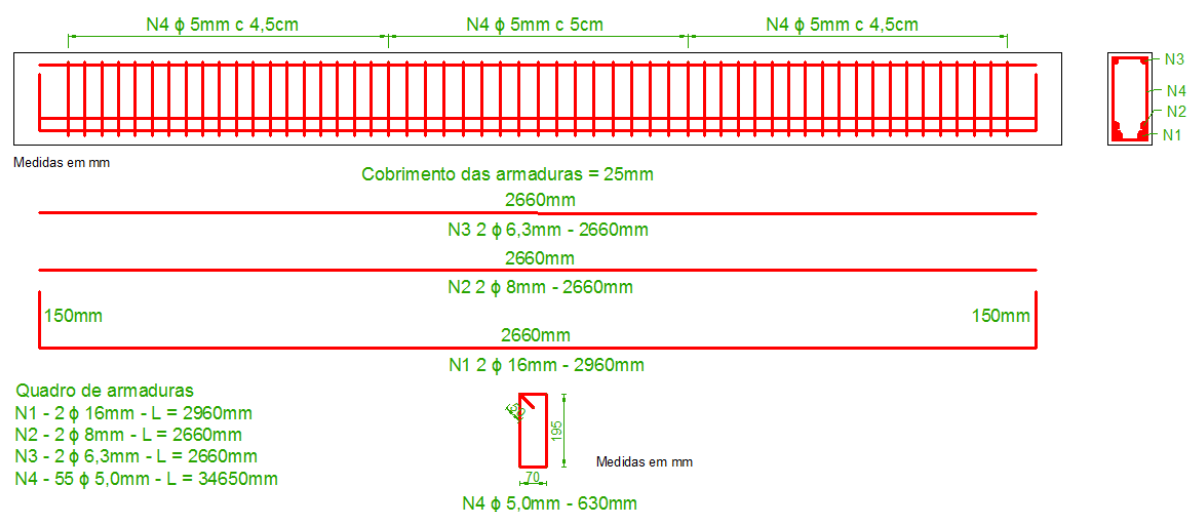


Fonte: A autora.

3.2.1 Vigas normalmente armadas (VA)

Foram denominadas VA as vigas dimensionadas com seção normalmente armada. A armadura longitudinal negativa utilizada foi duas barras de aço CA-50 com diâmetro 6,3 mm, a armadura longitudinal positiva foi formada por duas barras de aço CA-50 com diâmetro de 8,0 mm e duas barras de aço CA-50 com diâmetro de 16,0 mm. A armadura transversal utilizada foi estribos com barras de aço CA-60 com diâmetro de 5,0 mm. Foram produzidas cinco vigas deste tipo. Na Figura 61 é apresentado o detalhamento das armaduras.

Figura 61 - Detalhamento das armaduras das vigas VA

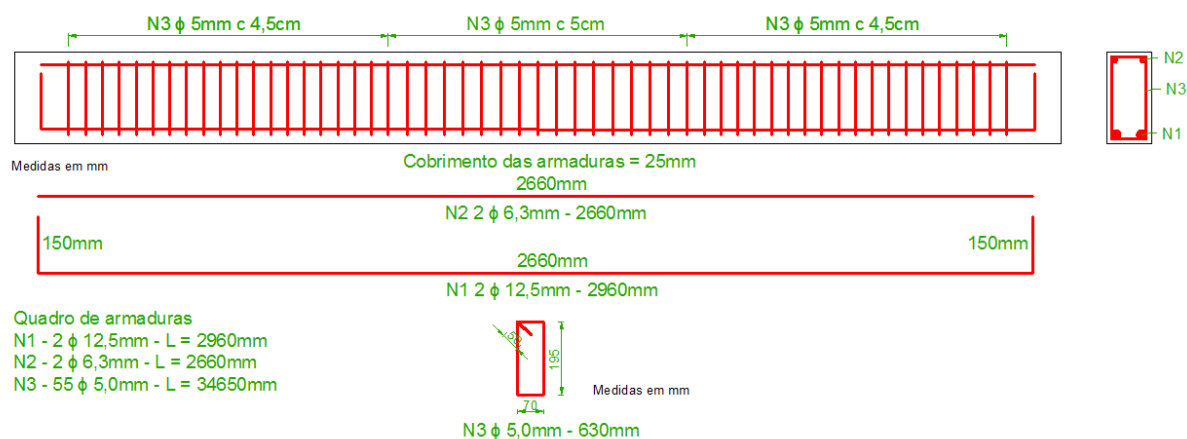


Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.2 Vigas subarmadas (VB)

Foram denominadas VB as vigas com seção subarmada. A armadura longitudinal negativa utilizada foi duas barras de aço CA-50 com diâmetro de 6,3 mm, a armadura longitudinal positiva utilizada foi duas barras de aço CA-50 com diâmetro de 12,5 mm a armadura transversal utilizada foi estribos com barras de aço CA-60 com diâmetro de 5,0 mm. Foram produzidas cinco vigas deste tipo. O detalhamento das armaduras das vigas VB é apresentado na Figura 62.

Figura 62 - Detalhamento das armaduras das vigas VB

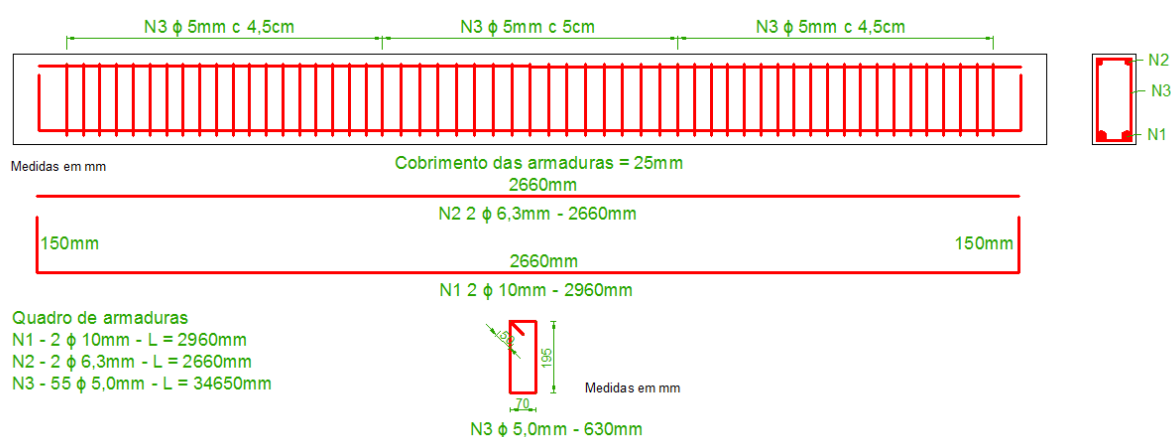


Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.3 Vigas subarmadas (VC)

Foram denominadas VC as vigas dimensionadas com seção subarmada. A armadura longitudinal negativa utilizada foi duas barras de aço CA-50 com diâmetro de 6,3 mm, a armadura longitudinal positiva utilizada foi duas barras de aço CA-50 com 10,0 mm de diâmetro e a armadura transversal utilizada foi estribos de barras com aço CA-50 com diâmetro de 5,0 mm. Foram produzidas cinco vigas deste tipo. Na Figura 63 é apresentado o detalhamento das armaduras das vigas VC.

Figura 63 - Detalhamento das armaduras das vigas VC



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.4 Reforço

Nesse trabalho, para denominação do tipo de fibra de carbono utilizada em relação à orientação das fibras, será aplicada a denominação definida por Juvandes (1999), já apresentada anteriormente na Tabela 6.

O reforço à flexão com PRFC nas vigas de concreto com as três taxas de armaduras distintas foi definido variando-se o número de camadas de fibra, sendo que para cada grupo de vigas foram produzidas uma viga de referência (sem reforço) e quatro vigas reforçadas manta de fibra de carbono (fibras com orientação unidirecional), que foram posicionadas no sentido longitudinal nas vigas, com o número de camadas de fibra variando de dois até cinco.

A quantidade de camadas de PRFC, suas dimensões e a nomenclatura, que foram definidas pelo projeto global do qual esse trabalho faz parte, são apresentadas na Tabela 16

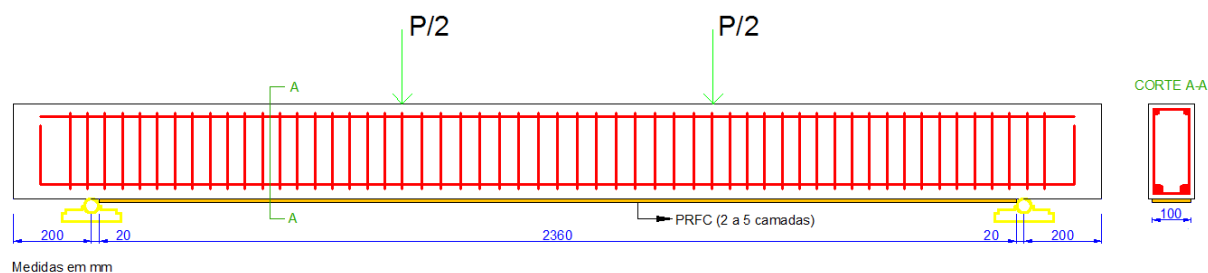
enquanto que na Figura 64 apresenta-se esquematicamente o posicionamento do reforço nas vigas.

Tabela 16 - Reforço das vigas

Vigas	Área de fibra (cm ²)	Reforço com PRFC (nº de camadas e dimensões da fibra)
VA -R	0,00	sem reforço
VA-2	0,332	2 camadas (2360 x 100) mm
VA-3	0,498	3 camadas (2360 x 100) mm
VA-4	0,664	4 camadas (2360 x 100) mm
VA-5	0,830	5 camadas (2360 x 100) mm
VB-R	0,000	sem reforço
VB-2	0,332	2 camadas (2360 x 100) mm
VB-3	0,498	3 camadas (2360 x 100) mm
VB-4	0,664	4 camadas (2360 x 100) mm
VB-5	0,830	5 camadas (2360 x 100) mm
VC-R	0,000	sem reforço
VC-2	0,332	2 camadas (2360 x 100) mm
VC-3	0,498	3 camadas (2360 x 100) mm
VC-4	0,664	4 camadas (2360 x 100) mm
VC-5	0,830	5 camadas (2360 x 100) mm

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 64 - Posicionamento do reforço nas vigas



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3 MATERIAIS

3.3.1 Concreto

Devido ao grande volume de concreto necessário para a moldagem das quinze vigas e dos cinquenta corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm), foi utilizado concreto

dosado em central dosadora e mistura em caminhão betoneira com especificação de resistência característica de 30 MPa e abatimento do tronco de cone de 12 ± 2 cm. Apesar de necessitar apenas de 1,3 m³ foram utilizados 3 m³ de concreto para proporcionar uma boa mistura no caminhão betoneira.

Na Tabela 17 são apresentadas algumas especificações dos materiais utilizados na fabricação do concreto bem como os seus consumos. O traço foi fornecido pela empresa fornecedora do concreto.

Tabela 17 - Material do concreto usinado

Material	Consumo (Kg/m³)
Cimento CP II E 32	368
Areia natural de leito de rio (M.F. = 2,7)	762
Brita granítica (D _{máx} = 19,0 mm)	1042
Água	221
Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega	22

Fonte: Tecmix.

Para a obtenção das características mecânicas do concreto foram realizados os seguintes ensaios em corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm: resistência à compressão, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007), módulo de elasticidade à compressão segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008) e resistência à tração por compressão diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Os ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do NUMAT/NUTEC utilizando uma máquina universal de ensaios Emic modelo DL 100T (capacidade de 100.000 kgf) e os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da empresa Contec, fazendo-se uso de uma prensa hidráulica manual digital 100T da marca Contenco e um aparelho analógico para medição do módulo de elasticidade do concreto.

Na Figura 65 é apresentado o detalhe do ensaio de módulo de elasticidade. Os resultados dos ensaios nos três corpos de prova e a média dos valores são mostrados na Tabela 18.

Figura 65 - Detalhes do ensaio de módulo de elasticidade no concreto



Fonte: A autora.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios no concreto

Corpo de prova	Idade (dias)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_{ci} (MPa)
1	28	32,54	3,21	-
2	28	34,37	4,20	-
3	28	33,52	3,35	-
Média	28	33,48	3,59	-
Desvio padrão	28	0,92	0,54	-
C.V. (%)	28	2,74	14,94	-
1	135	44,65	4,22	30.971,00
2	135	43,12	4,02	37.165,00
3	135	44,39	3,37	23.228,00
Média	135	44,05	3,87	30.455,00
Desvio padrão	135	0,82	0,44	6.982,83
C.V. (%)	135	1,86	11,48	22,93

Fonte: Elaborada pela autora.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão em dois corpos de prova na data da realização do ensaio de cada viga e os valores médios dos resultados dos ensaios estão descritos na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de compressão

Viga	Idade (dias)	f_{cm} (MPa)
VA-R	40	36,05
VC-R	53	38,50
VB-R	55	40,50
VA-2	58	41,50
VA-3	59	39,50
VA-4	60	38,54
VA-5	65	40,88
VB-2	66	38,50
VB-3	67	40,27
VB-4	68	38,08
VB-5	69	39,02
VC-2	70	41,56
VC-3	70	41,56
VC-4	72	37,46
VC-5	72	37,46

Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.2 Aço

Foram utilizadas barras de aço CA-60 com diâmetro de 5,0 mm para as armaduras transversais, barras de aço CA-50 com diâmetro de 6,3 mm para as armaduras longitudinais negativas e barras de aço CA-50 com diâmetros de 8,0 mm, 10,0 mm, 12,5 mm e 16,0 mm para as armaduras longitudinais positivas.

As barras de aço foram ensaiadas à tração segundo a NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2013) para a obtenção da sua tensão de escoamento (σ_y), da deformação específica de escoamento (ϵ_y), deformação específica de escoamento para o diagrama tensão-deformação bilinear (ϵ_y^*), do módulo de elasticidade (E_s) e da resistência à tração (f_{st}). Os resultados das três amostras ensaiadas para cada diâmetro, a média dos valores, o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de tração em amostras das barras de aço

Aço		σ_y (MPa)	ε_y^* (‰)	ε_y (‰)	E_s (GPa)	f_{st} (MPa)
Amostra	ϕ (mm)					
1	5,0	686,00	3,22	5,05	225	779,18
2		696,00	3,36	5,36	207	774,50
3		692,20	3,40	5,52	198	769,30
Média		691,40	3,33	5,31	210	774,33
Desvio padrão		5,05	0,09	0,24	13,42	4,94
C.V.		0,73	2,84	4,50	6,39	0,64
1	6,3	650,40	3,17	3,17	210	745,23
2		621,90	2,91	2,91	214	750,31
3		636,80	3,15	3,15	272	740,93
Média		636,37	3,08	3,08	212	745,49
Desvio padrão		14,25	0,14	0,14	2,55	4,70
C.V.		2,24	4,70	4,70	1,20	0,63
1	8,0	518,10	2,75	4,68	195	633,71
2		486,90	3,07	5,11	159	632,5
3		517,30	2,51	4,48	209	620,90
Média		507,43	2,78	4,76	202	629,04
Desvio padrão		17,79	0,28	0,32	9,93	7,07
C.V.		3,51	10,12	6,77	4,91	1,12
1	10,0	542,80	2,87	2,87	193	654,82
2		544,10	2,86	2,86	186	652,87
3		501,00	2,19	4,19	233	657,16
Média		529,30	2,64	3,31	190	654,95
Desvio padrão		24,52	0,39	0,77	4,88	2,15
C.V.		4,63	14,76	23,14	2,57	0,33
1	12,5	543,70	2,49	2,49	230	663,12
2		544,10	2,65	2,65	210	650,43
3		544,20	2,50	2,50	209	655,39
Média		544,00	2,55	2,55	217	656,31
Desvio padrão		0,26	0,09	0,09	12,00	6,40
C.V.		0,05	3,52	3,52	5,54	0,97
1	16,0	524,20	2,37	2,37	242	658,57
2		528,10	2,56	2,56	204	651,34
3		537,23	2,81	2,81	208	661,89
Média		529,84	2,58	2,58	206	657,27
Desvio padrão		6,69	0,22	0,22	2,78	5,39
C.V.		1,26	8,55	8,55	1,35	0,82

Os valores tachados foram desconsiderados para o cálculo da média por estarem fora do trecho entre $\pm 10\%$ da média segundo observado em Ferrari (2007)

Fonte: Elaborada pela autora.

Os ensaios de caracterização das barras de aço foram conduzidos no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM) da UFC, fazendo-se uso da máquina universal de ensaios Emic

modelo DL 30000 (capacidade 30000 Kgf) e de um extensômetro removível para o registro das deformações, posicionado na parte central de cada amostra (Figura 66). Por limitações no curso do extensômetro removível as leituras das deformações foram registradas até 15% e o valor da força foi adquirido até a ruptura da barra de aço. Os diagramas de tensão-deformação obtidos de todas as amostras de cada uma das bitolas são apresentados no APÊNDICE B.

Figura 66 - Detalhe do ensaio de tração das barras de aço



Fonte: A autora.

3.3.3 Reforço

O sistema utilizado para o reforço à flexão das vigas com PRFC foi executado pelo modo curado *in situ* via seca, com os seguintes materiais componentes do compósito: manta de fibra de carbono CARBON CFW300 e resina epóxi CARBON SATURANTE. As propriedades da manta de fibra de carbono foram fornecidas pelo fabricante (VIAPOL, 2014) e estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Propriedades da manta de fibra de carbono

Propriedades	Especificação/unidade
Gramatura	300 g/m ²
Espessura da manta	0,166 mm
Resistência máxima à tração	4900 MPa
Módulo de elasticidade	230 GPa
Alongamento na ruptura	2,1%

Fonte: www.viapol.com.br (acessado em 2014).

As características da resina epóxi utilizada na impregnação e colagem da manta foram também fornecidas pelo fabricante (VIAPOL, 2014) e estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Características da resina epóxi

Características	Especificação/unidade
Tempo de uso (<i>pot life</i>) - 20°C	aproximadamente 40 minutos
Tempo de secagem ao toque	< 11H
Cura total	7 dias
Relação de mistura (A:B)	2:1 em peso
Viscosidade	5000 Cps
Resistência à tração	29 MPa
Resistência à compressão	68 MPa
Módulo de compressão	1470 MPa
Resistência ao cisalhamento	9,8 MPa

Fonte: www.viapol.com.br (acessado em 2014).

Para o sistema de reforço utilizado no programa experimental o fabricante indica a imprimação prévia da superfície de concreto por meio do *primer* VIAPOL CARBON PRIMER e a regularização da superfície com o VIAPOL CARBON STUC. As características do *primer* e da resina de regularização foram fornecidas pelo fabricante (VIAPOL, 2014) estão apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 - Características do *primer* e da resina de regularização

Material	Características	Especificação/unidade
<i>CARBON PRIMER</i>	Cura final	7 dias
	Secagem ao toque	De 8 a 12 Horas
	Resistência à aderência	> 2 MPa
	Temperatura de aplicação	10 a 30 °C
	<i>Pot life</i>	20 a 50 minutos
<i>CARBON STUC</i>	Densidade (A+ B)	1,45 g/cm ²
	Resistência à aderência	> 2 MPa
	Secagem ao toque	2 Horas
	<i>Pot life</i>	40 a 50 minutos

Fonte: www.viapol.com.br (acessado em 2014).

3.4 CONFECÇÃO DAS VIGAS

Para o programa experimental foram confeccionadas 15 vigas de concreto armado e o detalhamento das formas, concretagem, desforma, cura úmida, reforço e instrumentação estão explanados nesse item.

3.4.1 Formas

Para a confecção das formas foram utilizadas chapas de madeira em compensado plastificado de 15 mm de espessura e sarrafo de virola de 20 mm x 65 mm para a estrutura e gravatas de amarração. Uma fina camada de desmoldante foi aplicada na superfície interna das formas com o objetivo de torná-las mais estanque e facilitar a desforma.

Nas Figuras 67-a e 67-b, são apresentadas as formas confeccionadas para a concretagem das vigas e o detalhe das armaduras nas formas, respectivamente.

Figura 67 - Formas utilizadas na concretagem das vigas



a) formas

b) detalhe das armaduras nas formas

Fonte: A autora.

3.4.2 Concretagem

As quinze vigas foram moldadas em um único dia com a utilização de concreto usinado. Cinquenta corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm foram moldados com vistas à obtenção das propriedades mecânicas do concreto das vigas nos dias dos ensaios e para a determinação de outras propriedades do concreto. A determinação da consistência do concreto foi realizada através do ensaio de abatimento de tronco de cone (Figura 68) no momento da chegada do concreto onde se obteve o resultado de 14 cm de abatimento e uma hora após o início da concretagem, onde se obteve o resultado de 12 cm sendo que este seguiu as recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Figura 68 - Ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: A autora.

O lançamento do concreto foi feito de forma manual nas formas de madeira das vigas (Figura 69-a) e nas formas metálicas dos corpos de prova. O adensamento do concreto foi feito com vibrador de imersão tipo agulha com diâmetro de 25 mm (Figura 69-b) sendo realizado durante e imediatamente seu lançamento. O acabamento superficial na face superior das vigas (Figura 69-c) foi feito logo após a concretagem de cada peça e na Figura 69-d está apresentado o detalhe dos corpos de prova cilíndricos moldados.

Figura 69 - Detalhes da concretagem



a) lançamento do concreto



b) adensamento



c) vigas concretadas



d) corpos de prova moldados

Fonte: A autora.

3.4.3 Retirada das formas e cura

Com o objetivo de amenizar a evaporação de água e troca de calor com o meio ambiente e visando reduzir a retração no concreto, as vigas e corpos de prova foram mantidos em cura úmida na face superior até a desforma que ocorreu três dias após a concretagem. Após a desforma as vigas foram mantidas em cura úmida sendo revestidas com manta geotêxtil umidificadas diariamente no período da manhã e da tarde durante sete dias (Figura

70-a) e os corpos de prova foram imersos em tanque com solução de água e cal durante sete dias (Figura 70-b). Após esse período, as vigas e corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório até a data da realização dos ensaios.

Figura 70 - Detalhes cura úmida



a) vigas em cura úmida



b) corpos de prova no tanque

Fonte: A autora.

3.4.4 Aplicação do reforço com PRFC

As vigas foram todas reforçadas aos 14 dias após a concretagem. O procedimento para a aplicação do reforço nas vigas é de simples execução, mas deve ser bastante criterioso em todas as etapas. Portanto decidiu-se realizar o reforço com uso de mão de obra especializada. Desta maneira, o reforço foi executado pela empresa Módulo Engenharia com o auxílio da mestranda juntamente com o grupo de bolsistas da pesquisa e seguiu as orientações do fabricante.

A manta de fibra de carbono foi previamente cortada em uma bancada (Figura 71-a) obedecendo às medidas definidas no projeto estrutural conforme já apresentado anteriormente na Tabela 16 e organizado por grupos de vigas (Figura 71-b).

Figura 71 - Preparo da fibra de carbono



a) corte da manta de fibra de carbono



b) fibra de carbono para grupo de vigas

Fonte: A autora.

A execução do reforço com PRFC seguiu as seguintes etapas de serviços:

- Foi feito o preparo da superfície do concreto por meio de lixa acoplada a uma lixadeira elétrica de modo a retirar o restante de desmoldante e obter uma superfície íntegra e rugosa (Figura 72-a). As partículas soltas foram removidas com a utilização de um aspirador acoplado à lixadeira permitindo a limpeza completa da superfície. Na Figura 72-b é apresentado o aspecto da superfície lixada.

Figura 72 - Preparo da superfície



a) lixamento da superfície



b) aspecto da superfície lixada

Fonte: A autora.

- O preparo do *primer* foi realizado com a pesagem dos componentes A e B na proporção 2:1 em massa e pré mistura com agitador elétrico durante três minutos em separado de cada componente. Em seguida misturaram-se os componentes A e B que

foram agitados mecanicamente com agitador elétrico por três minutos (Figura 73-a) e aplicados na superfície das vigas com um rolo de espuma (Figura 73-b).

Figura 73 - Aplicação do *primer*



a) mistura dos componentes A e B



b) aplicação do *primer* com rolo

Fonte: A autora.

- Com o objetivo de corrigir as falhas de concretagem com o preenchimento de vazios, foi executado a regularização da superfície 15 horas após a aplicação do *primer*. Foi feita a pesagem e pré mistura em separados dos componentes A e B da resina de regularização na proporção 3,75:1 em massa e em seguida os componentes foram misturados por três minutos com agitador elétrico (Figura 74-a). A aplicação da resina de regularização foi realizada com o uso de espátula plástica formando uma camada uniforme (Figura 74-b).

Figura 74 - Aplicação da resina de regularização (*stuc*)



a) mistura dos componentes A e B



b) aplicação da resina com espátula

Fonte: A autora.

- Após meia hora de aplicação da resina de regularização iniciou-se o preparo e aplicação da resina epóxi saturante bicomponente. A resina foi preparada fazendo-se a pesagem e pré mistura dos componentes A e B na proporção de 2:1 em massa, que em seguida foram misturados e agitados mecanicamente com agitador elétrico por três minutos (Figura 75-a) e aplicados na superfície das vigas com rolo de espuma antes de cada camada de fibra (Figura 75-b).

Figura 75 - Aplicação da resina saturante



a) mistura dos componentes A e B



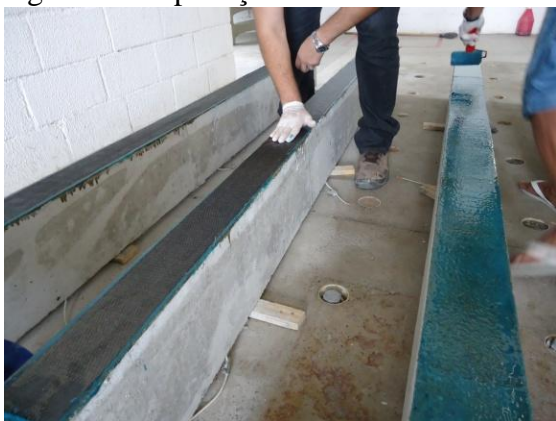
b) aplicação com rolo de espuma

Fonte: A autora.

- Para a execução do reforço, as tiras de manta de fibra de carbono foram posicionadas sobre as camadas de resina saturante, levemente pressionadas com as mãos (Figura 76-a) e em seguida com roletes metálicos (Figura 76-b). A colocação das camadas de fibra nas vigas foi feita na seguinte ordem: colocou-se uma camada de fibra por vez

em todas as vigas a serem reforçadas, seguida de uma camada de resina saturante. Esse procedimento foi repetido tantas vezes quanto o número de camadas.

Figura 76 - Aplicação das camadas de fibra



a) posicionamento da fibra



b) pressionamento com roletes

Fonte: A autora.

- Após a aplicação da última camada de fibra foi aplicada uma camada final de resina saturante (Figura 77-a) concluindo assim a execução do reforço (Figura 77-b).

Figura 77 - Conclusão do reforço



a) última camada de resina



b) vigas reforçadas

Fonte: A autora.

3.4.5 Instrumentação

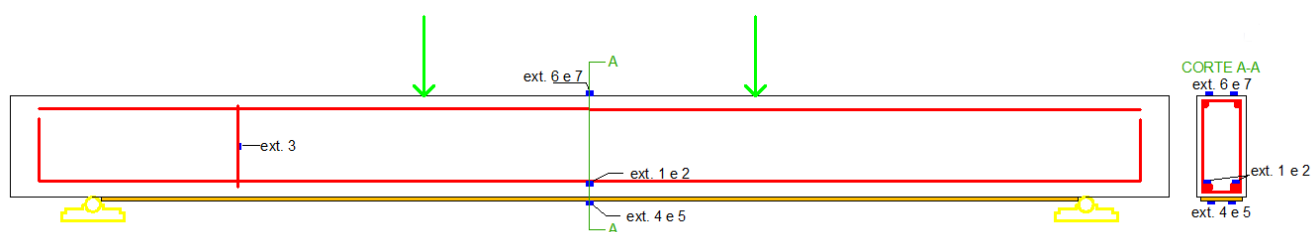
O comportamento estrutural das vigas foi acompanhado durante os ensaios por medições das deformações das armaduras longitudinais e transversal, das deformações do concreto e das deformações do reforço. Os deslocamentos verticais das vigas foram medidos no meio do vão, em um dos pontos de aplicação da carga e nos dois apoios.

3.4.5.1 Extensômetros elétricos de resistência

Foram empregados extensômetros elétricos de resistência *Kyowa* com base de medição de 5 mm, resistência de 120 OHMS modelo KGF- 5 – 120-C1-11, para medir as deformações da armadura longitudinal positiva, da armadura transversal e do reforço (nas vigas reforçadas com PRFC).

As deformações do concreto na zona comprimida foram medidas com extensômetros elétricos de resistência HBM com base de medição de 11 mm e resistência de 120 OHMS, modelo 1-LY11-6/12. Os extensômetros nas armaduras longitudinais positivas, no concreto e no reforço foram posicionados no meio do vão. A nomenclatura e o posicionamento dos extensômetros nas vigas podem ser visto na Figura 78.

Figura 78 - Nomenclatura e posicionamento dos extensômetros (viga em perfil)



Fonte: Elaborada pela autora.

A colagem dos extensômetros nas armaduras obedeceu o seguinte procedimento:

- marcação do local de colagem do extensômetro na barra de aço;
- desbaste da superfície marcada da barra de aço com o objetivo de retirar as nervuras (saliências) no local de colagem do extensômetro, com a utilização de uma lixadeira elétrica e um disco de desbaste, tendo o cuidado de não diminuir a seção transversal da barra (Figura 79-a);
- lixamento da superfície marcada barra de aço utilizando as lixas para metais de número 80, 100 e 120 nessa ordem para deixar a superfície plana e lisa (Figura 79-b);
- limpeza da superfície com algodão embebido em álcool isopropílico;
- marcação do posicionamento do extensômetro na superfície da barra de aço;
- colagem do extensômetro com cola do tipo cianoacrilática (Figura 79-c) e aplicação da pressão do dedo sobre o extensômetro durante 30 segundos para garantir a fixação. Na Figura 79-d são apresentados dois extensômetros colados na barra de aço;
- soldagem dos fios do extensômetro ao cabo tipo manga 4 x 36 AWG blindado (Figura 79-e);
- conferência da ligação dos fios através da medição da resistência elétrica do extensômetro com a utilização de um multímetro digital;
- proteção do extensômetro com a utilização do uso de fita isolante de alto-fusão, em seguida de fita isolante comum e de uma abraçadeira plástica (Figura 79-f);

Figura 79 - Instrumentação da armadura



a) desbaste das nervuras



b) lixamento da superfície



c) colagem do extensômetro



d) extensômetros colados na armadura



e) soldagem da ligação dos fios



f) proteção dos extensômetros

Fonte: A autora.

Para a colagem dos extensômetros no concreto foi feita a marcação do posicionamento dos extensômetros, a regularização da superfície com uma fina camada de massa plástica, o lixamento da superfície, a limpeza com algodão embebido em álcool isopropílico, a colagem do extensômetro, a aplicação de pressão com o dedo sobre o extensômetro durante 30 segundos, a soldagem dos fios (Figura 80-a), a conferência da

ligação dos fios, a proteção da soldagem com uma camada de cola adesiva epóxi e a proteção dos extensômetro com fita isolante comum (Figura 80-b).

Figura 80 - Instrumentação do concreto



a) soldagem dos fios

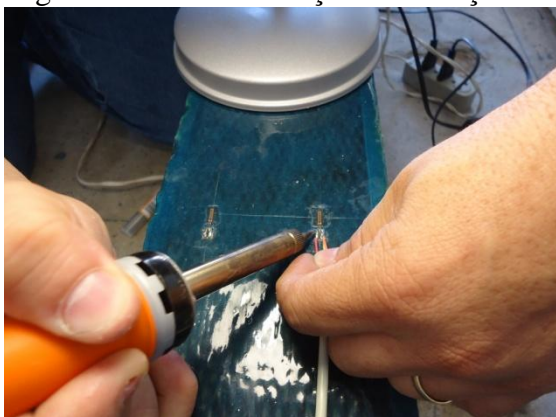


b) proteção com fita isolante

Fonte: A autora.

Para a colagem dos extensômetros no reforço foi feita a marcação do posicionamento dos extensômetros, a limpeza da superfície com algodão embebido em álcool isopropílico, a colagem do extensômetro, a aplicação de pressão com o dedo sobre o extensômetro durante 30 segundos, a soldagem dos fios (Figura 81-a), a conferência da ligação dos fios, a proteção da soldagem com uma camada de cola adesiva epóxi e a proteção dos extensômetro com fita isolante comum (Figura 81-b).

Figura 81 - Instrumentação do reforço



a) soldagem dos fios



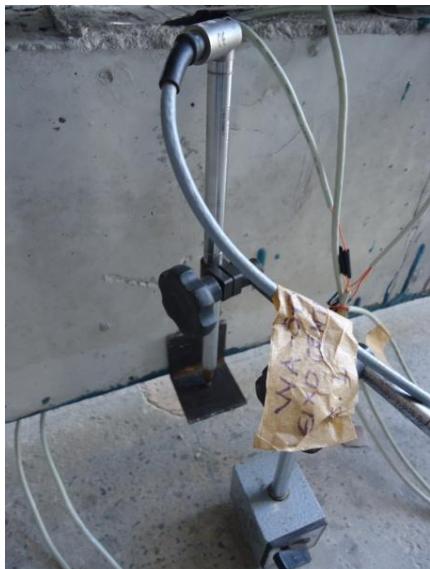
b) proteção com fita isolante

Fonte: A autora.

3.4.5.2 Transdutores de deslocamento (LVDT's).

Os deslocamentos verticais das vigas foram medidos no meio do vão (Figura 82-a) e em um dos pontos de aplicação da carga (Figura 82-b) com a utilização de transdutores de deslocamento HBM modelo WA-50, com curso de 50 mm e resolução de 0,02 mm.

Figura 82 - Transdutores no meio do vão e no ponto de aplicação da carga



a) no meio do vão



b) no ponto de aplicação da carga

Fonte: A autora.

Para a medição dos deslocamentos verticais nos apoios foram utilizados transdutores de deslocamento da marca *Kyowa* com curso de 10 mm e resolução de 0,01 mm (Figura 83).

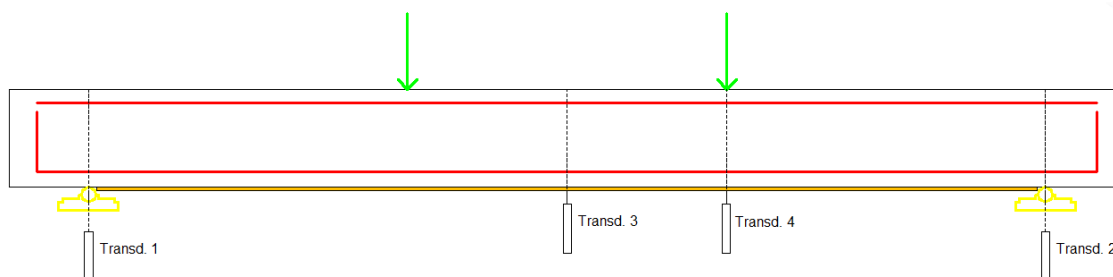
Figura 83 - Transdutor no apoio



Fonte: A autora.

O detalhe esquemático com a nomenclatura e com o posicionamento dos transdutores de deslocamento está apresentado na Figura 84-a e os transdutores posicionados para o ensaio nas vigas estão apresentados na Figura 84-b.

Figura 84 - Nomenclatura e posicionamento dos transdutores



a) nomenclatura e posicionamento dos transdutores



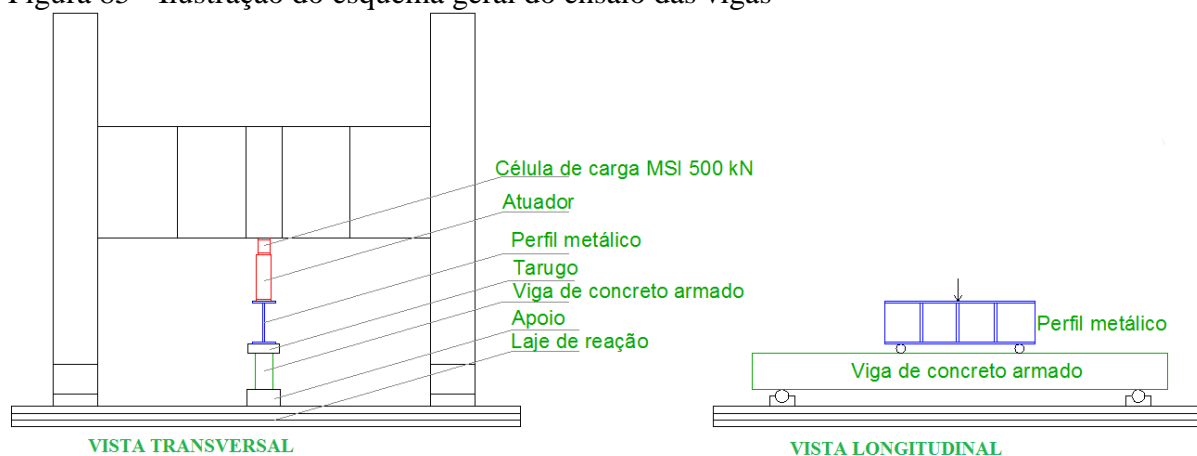
b) transdutores posicionados para o ensaio

Fonte: Elaborada pela autora.

3.4.6 Descrição dos ensaios

O esquema geral de ensaio das vigas está ilustrado na Figura 85 e foi montado na DIMAT do NUTEC. As vigas de concreto armado foram colocadas sob um pórtico fixado a uma laje de reação e posicionadas sobre dois aparelhos de apoio. As cargas foram aplicadas por meio de conjunto composto por um atuador hidráulico e acionado por meio de um macaco hidráulico manual Enerpac modelo P801. A medição das cargas foi feita por meio de uma célula de carga da marca MSI modelo MCC-2-50TD com capacidade de 500 kN que foi acoplada a viga metálica do pórtico. No ensaio procurou-se manter sempre a mesma velocidade de aplicação da carga e padronização em todos os ensaios.

Figura 85 - Ilustração do esquema geral do ensaio das vigas



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 86 estão apresentados os principais componentes do ensaio do ensaio à flexão para cada viga e na Figura 87-a estão apresentados os dispositivos auxiliares de apoio na Figura 87-b o dispositivo de aplicação da carga.

Figura 86 - Componentes do ensaio das vigas



Fonte: A autora.

Figura 87 - Dispositivos auxiliares



a) de apoio

b) de aplicação da carga

Fonte: A autora.

As vigas foram solicitadas à flexão simples para ensaio a quatro pontos. No início de cada ensaio as vigas foram submetidas a uma carga para acomodação da estrutura, descarregadas e em seguida levadas a carregamento crescente até à ruína, com intervalos de carga a cada 20 kN aproximadamente, para monitoramento da propagação das fissuras nas vigas ao longo dos ensaios (Figura 88).

Figura 88 - Monitoramento das fissuras



Fonte: A autora.

O monitoramento das fissuras foi feito mediante o auxílio de dois refletores focados em uma das faces laterais das vigas, para melhor visualização das fissuras, e por questão de segurança, apenas nos intervalos de aplicação da carga, as fissuras que surgiam eram reproduzidas por meio de uma linha que acompanhava a linha de abertura da fissura, até o ponto que a fissura parava e em seguida anotava-se a carga correspondente à fissura nesse ponto, ao lado da linha desenhada.

Para cada ensaio, a viga a ser ensaiada foi posicionada no pórtico sobre os apoios, o sistema de aplicação de carga foi posicionado sobre a viga e os instrumentos de medição foram interligados ao aquisitor de dados.

O comportamento estrutural das vigas foi monitorado e observado durante todo o ensaio, sendo a força aplicada, os deslocamentos verticais e as deformações no aço, concreto e reforço registrados a cada segundo através de um sistema automático de aquisição de dados da marca HBM constituído por duas unidades de leitura eletrônica denominadas *Spider8* e um programa de gerenciamento dessas unidades designado como *Catman Easy*. O sistema de aquisição de dados foi interligado a um computador (Figura 89). Nos módulos *Spider8* foram ligados os extensômetros em $\frac{1}{4}$ de ponte, a célula de carga e os transdutores de deslocamento.

Figura 89 - Sistema de aquisição de dados



Fonte: A autora.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os principais resultados obtidos nos ensaios realizados nas vigas de concreto armado. O desempenho do reforço das vigas é avaliado por meio de comparações entre as vigas reforçadas e a de referência de cada grupo. Na Tabela 24 estão apresentadas as características e nomenclaturas das vigas ensaiadas.

Tabela 24 - Características e nomenclatura das vigas ensaiadas

Grupo de vigas	Vigas	A_f (cm ²)	Reforço (n ^o . de camadas)	A_s (cm ²)
VA (normalmente armadas)	VA -R	0,00	sem reforço	5,03
	VA-2	0,332	2	
	VA-3	0,498	3	
	VA-4	0,664	4	
	VA-5	0,830	5	
VB (subarmadas)	VB-R	0,00	sem reforço	2,45
	VB-2	0,332	2	
	VB-3	0,498	3	
	VB-4	0,664	4	
	VB-5	0,830	5	
VC (subarmadas)	VC-R	0,00	sem reforço	1,57
	VC-2	0,332	2	
	VC-3	0,498	3	
	VC-4	0,664	4	
	VC-5	0,830	5	

A_f - área de fibra de carbono

A_s - área da armadura longitudinal de tração

Fonte: Elaborada pela autora.

4.1 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

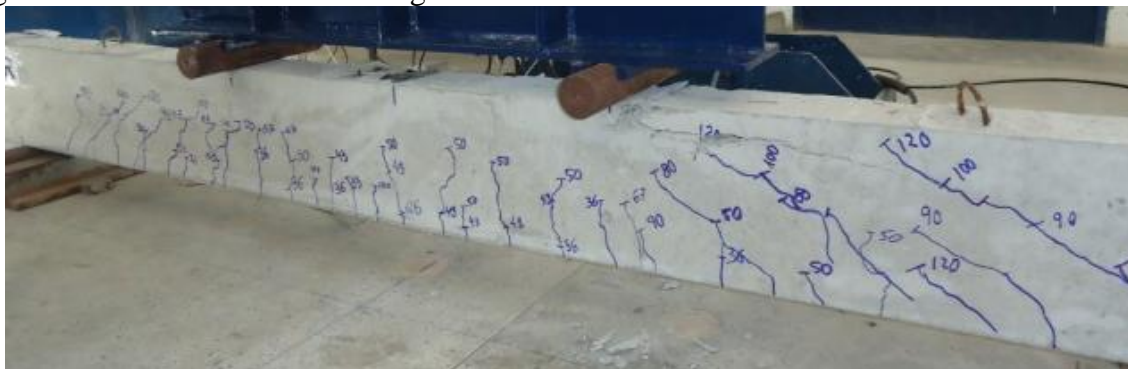
4.1.1 Modos de ruína

Todas as vigas ensaiadas foram levadas até a ruína, sendo nesse item, apresentados os modos de ruína de cada grupo de vigas.

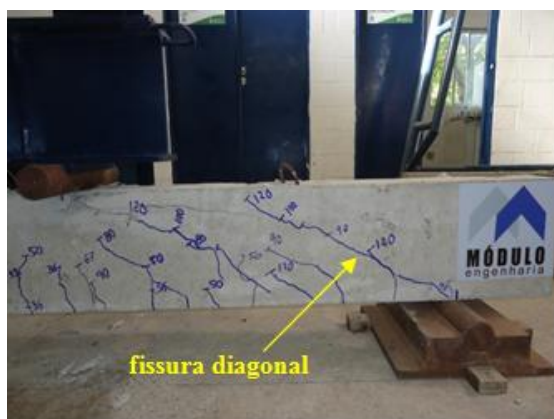
4.1.1.1 Vigas normalmente armadas (VA)

Nas Figuras 90-a a 90-c são apresentados os detalhes da ruína da viga de referência (VA-R).

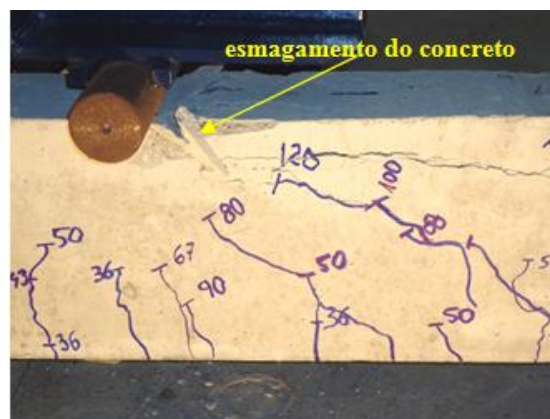
Figura 90 - Detalhes da ruína da viga VA-R



a) configuração da viga VA-R na ruína



b) fissura diagonal



c) esmagamento do concreto

Fonte: A autora.

A viga de referência VA-R apresentou modo de ruína por tração perpendicular à biela comprimida de concreto (Figura 90-a). As fissuras diagonais de tração iniciaram com carga igual a 90 kN (Figura 90-b), situando-se nos trechos entre os pontos de aplicação das cargas concentradas e os apoios estendendo-se até o banzo superior da viga em um dos pontos de aplicação das cargas, onde foi observado também esmagamento do concreto na região comprimida (Figura 90-c).

Nas Figuras 91-a a 91-c são apresentados os detalhes da ruína da viga reforçada com duas camadas de fibra (VA-2).

Figura 92 - Configuração da ruína das vigas VA-3, VA-4 e VA-5



a) configuração da viga VA-3 na ruína



b) configuração da viga VA-4 na ruína



c) configuração da viga VA-5 na ruína

Fonte: A autora.

Figura 93 - Detalhes da ruína das vigas VA-4 e VA-5



a) fissura na extremidade do reforço (VA-4)



b) arrancamento do cobrimento (VA-5)

Fonte: A autora.

As vigas VA-3, VA-4 e VA-5 tiveram o modo de ruína brusco por arrancamento do cobrimento de concreto. A ruína teve origem com uma fissura na extremidade do reforço das vigas que iniciou com carga igual a 90 kN em todas as vigas (Figura 93-a). Essas fissuras propagaram-se horizontalmente e desencadearam um processo de ruptura da camada de concreto ao longo da armadura longitudinal em todo o vão de uma das laterais das vigas (Figura 93-b).

O início dessa falha, de acordo com Teng *et al.* (2001), deve-se à presença de elevadas tensões na interface concreto/reforço junto à extremidade do reforço.

4.1.1.2 Vigas subarmadas (VB)

Nas Figuras 94-a a 94-c são apresentados os detalhes da ruína da viga de referência do grupo VB (VB-R).

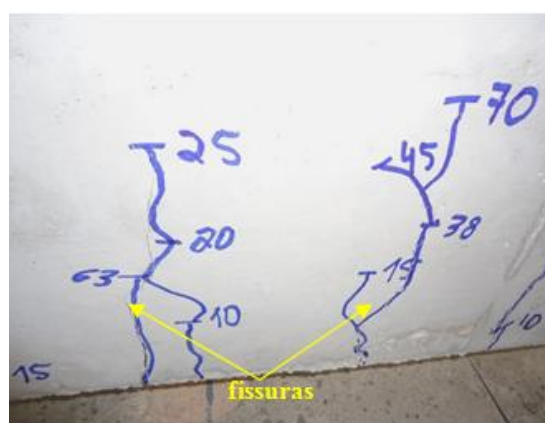
Figura 94 - Detalhes da ruína da viga VB-R



a) configuração da viga VB-R na ruína



b) fissuras de flexão no meio do vão



c) fissuras com aberturas maiores

Fonte: A autora.

A viga de referência VB-R (Figura 94-a) apresentou ruína por flexão com deformação excessiva da armadura longitudinal de tração, percebidas pelas fissuras de flexão

no meio do vão (Figura 94-b), seguido por grandes deformações no concreto, apesar de não ter sido observado esmagamento do concreto no banzo superior da viga.

A configuração da ruína está de acordo com o domínio 3 de deformações, conforme NBR 6118 (ABNT, 2007) para a qual a viga foi dimensionada. Foram observados elevados deslocamentos verticais e fissuras de grande abertura no meio do vão na ruína (Figura 94-c).

A configuração da ruína das vigas VB-2 e VB-3 são apresentadas nas Figuras 95-a e 95-b, respectivamente, enquanto que nas Figuras 96-a e 96-b são apresentadas as vigas VB-4 e VB-5 na ruína, respectivamente. Os detalhes da ruína das vigas VB-2 e VB-4 estão apresentados na Figura 97-a e 97-b, respectivamente.

Figura 95 - Configuração da ruína das vigas VB-2 e VB-3



a) configuração da viga VB-2 na ruína



b) configuração da viga VB-3 na ruína

Fonte: A autora.

Figura 96 - Configuração da ruína das vigas VB-4 e VB-5



a) configuração da viga VB-4 na ruína



b) configuração da viga VB-5 na ruína

Fonte: A autora.

Figura 97 - Detalhes da ruína das vigas VB-2 e VB-4



a) fissura na extremidade do reforço (VB-2)



b) arrancamento do cobrimento (VB-4)

Fonte: A autora.

As vigas reforçadas VB-2, VB-3, VB-4 e VB-5 apresentaram ruína prematura por arrancamento do cobrimento de concreto.

O início das falhas ocorreu com uma fissura na extremidade do reforço para forças iguais a 60 kN (Figura 97-a), 70 kN, 90 kN e 80 kN nas vigas VB-2, VB-3, VB-4 e VB-5, respectivamente, propagando-se na direção horizontal, desencadeando um processo de ruptura

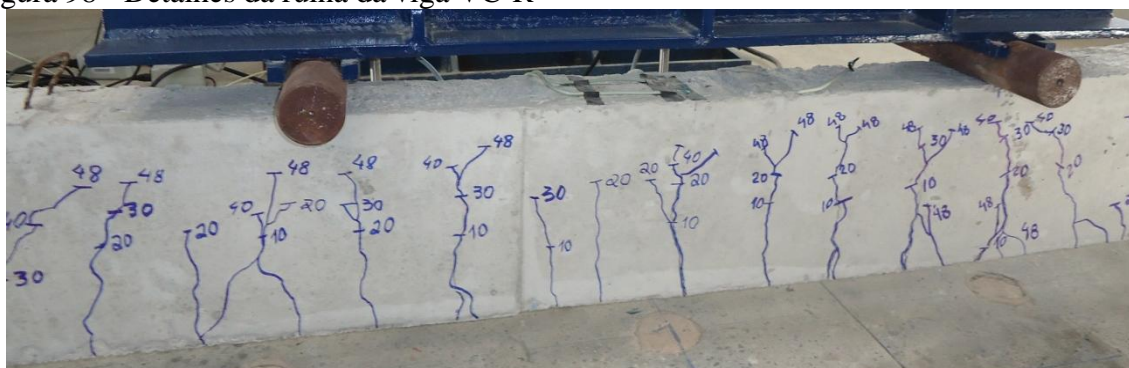
da camada de concreto junto à armadura longitudinal positiva ao longo do trecho entre um dos apoios e um dos pontos de aplicação da carga. A ruptura da camada de concreto estendeu-se até o vão central das vigas (Figura 97-b). A ruína ocorreu de forma brusca, rápida e sempre precedida de estalos.

Segundo Beber (2003), esse modo de ruptura é bastante comum e está associado ao mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço, com ruptura associada à combinação de tensões tangenciais e de tração nessa região a partir da extremidade do reforço.

4.1.1.3 Vigas subarmadas (VC)

Nas Figuras 98-a a 98-c são apresentados os detalhes da ruína da viga de referência do grupo VC (VC-R).

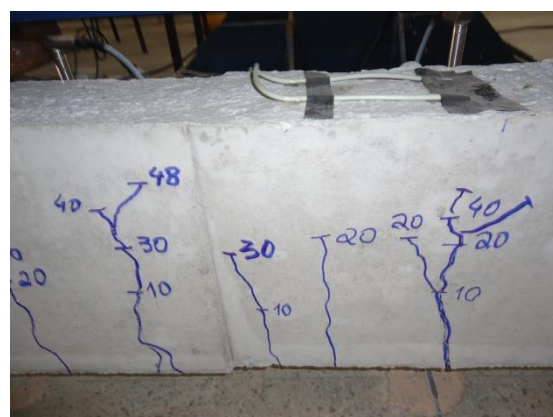
Figura 98 - Detalhes da ruína da viga VC-R



a) configuração da viga VC-R na ruína



b) fissuras de maiores aberturas



c) fissuras de flexão no meio do vão

Fonte: A autora.

A viga de referência VC-R apresentou ruína por flexão com deformação excessiva da armadura longitudinal de tração (Figura 98-a), percebidas pelas fissuras de flexão no meio do vão (Figura 98-b e 98-c). As fissuras de flexão foram seguidas por grandes deformações no concreto. Não foi observado esmagamento do concreto no banzo superior da viga.

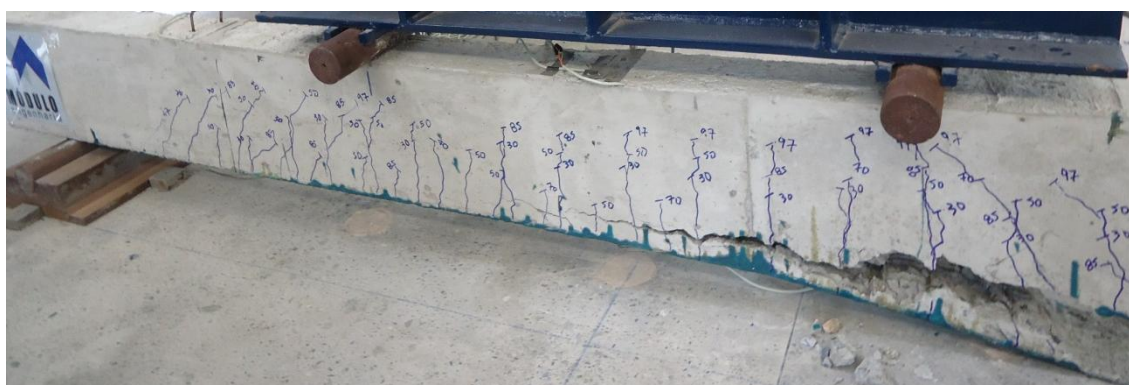
A configuração da ruína está de acordo com o domínio 3 de deformações, conforme NBR 6118 (ABNT, 2007) para a qual a viga foi dimensionada.

A configuração da ruína das vigas VC-2 e VC-3 são apresentadas nas Figuras 99-a e 99-b, respectivamente, e nas Figuras 100-a e 100-b são apresentadas as vigas VC-4 e VC-5 na ruína, respectivamente. Os detalhes da ruína das vigas VC-3 e VC-4 estão apresentados nas Figuras 101-a e 101-b, respectivamente.

Figura 99 - Configuração da ruína das vigas VC-2 e VC-3



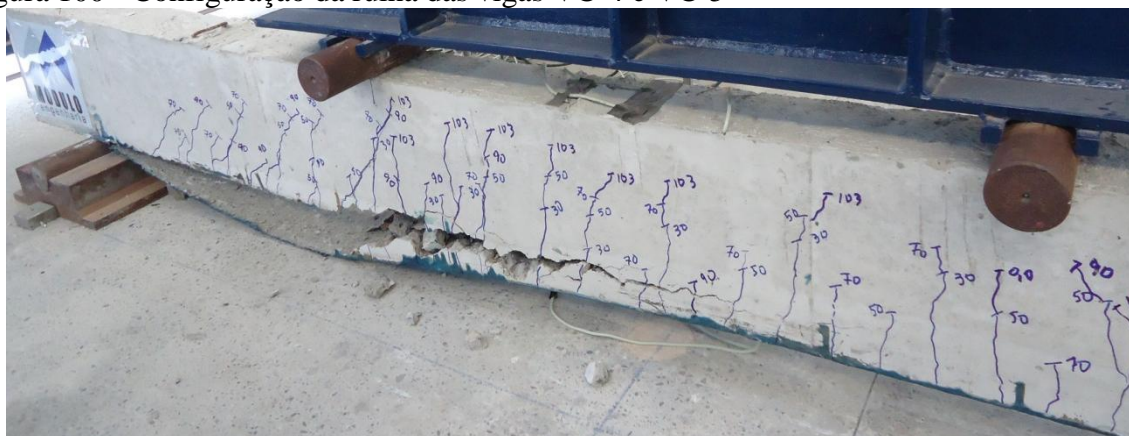
a) configuração da viga VC-2 na ruína



b) configuração da viga VC-3 na ruína

Fonte: A autora.

Figura 100 - Configuração da ruína das vigas VC-4 e VC-5



a) configuração da viga VC-4 na ruína



b) configuração da viga VC-5 na ruína

Fonte: A autora.

Figura 101 - Detalhes da ruína das vigas VC-3 e VC-4



a) fissuras na extremidade do reforço (VC-3)



b) arrancamento do cobrimento (VC-4)

Fonte: A autora.

Apesar das vigas VC-2, VC-3, VC-4 e VC-5 terem sido reforçadas com um número diferente de camadas de fibra, todas apresentaram ruína prematura por arrancamento da camada de cobrimento de concreto. As falhas iniciaram a partir da formação de uma fissura na extremidade do reforço (Figura 101-a) que ocorreu sob a aplicação de uma carga igual a 70 kN nas vigas VC-2, VC-3 e VC-4; e 65 kN na viga VC-5. Essas fissuras se propagaram na direção horizontal, desencadeando um processo de ruptura da camada de concreto junto à armadura longitudinal positiva, ao longo do vão entre um dos apoios e um dos pontos de aplicação da carga. Essa ruptura do cobrimento de concreto (Figura 101-b) estendeu-se até o trecho do vão entre os pontos de aplicação das cargas concentradas. As ruínas ocorreram de forma muito rápida, precedida apenas de alguns estalos.

De acordo com Beber (2003) esse modo de ruína pode ser identificado com falha na ancoragem do reforço com conseqüente arrancamento do concreto junto à armadura longitudinal.

A partir de alguns programas experimentais, tais como os de Pinto (2000), Smith e Teng (2002), Beber (2003), Fortes (2004), Machado (2004), Ferrari (2007), Yau e Teng (2007), Rocha (2007), Garcez (2007), Costa (2011) e Al-Tamini *et al.* (2011), observou-se que esse tipo de ruína prematura do reforço, ocorre com frequência nas vigas de concreto armado reforçadas à flexão sem sistemas de ancoragens nas extremidades do reforço, como as ensaiadas no programa experimental dessa dissertação.

4.1.2 Cargas últimas experimentais

Na Tabela 25 são apresentados os valores da carga última experimental (P_e) das vigas ensaiadas e as diferenças percentuais dessas cargas em relação às vigas de referência de cada grupo.

Tabela 25 - Cargas últimas experimentais das vigas

Grupo	Viga	A _r (cm ²)	A _s (cm ²)	P _e (kN)	Diferença percentual (%) em relação à viga de referência	Diferença percentual (%) em relação à viga com duas camadas de fibra	Modo de ruína
VA	VA-R	0,00		139,07	-	-	1
	VA-2	0,332		154,54	11,13	-	1
	VA-3	0,498	5,03	151,74	9,11	-1,81	2
	VA-4	0,664		161,43	16,08	4,45	2
	VA-5	0,830		162,28	16,69	5,00	2
VB	VB-R	0,00		72,63	-	-	3
	VB-2	0,332		112,67	55,14	-	2
	VB-3	0,498	2,45	121,23	66,92	7,60	2
	VB-4	0,664		129,86	78,81	15,26	2
	VB-5	0,830		135,69	86,83	20,43	2
VC	VC-R	0,00		49,12	-	-	3
	VC-2	0,332		93,06	89,46	-	2
	VC-3	0,498	1,57	97,42	98,34	4,69	2
	VC-4	0,664		103,95	111,65	11,70	2
	VC-5	0,830		111,09	126,18	19,37	2

P_e - carga última experimental

A_r - área de fibra de carbono

A_s - área de armadura longitudinal positiva

1 - ruína por tração perpendicular à biela comprimida de concreto

2 - ruína por arrancamento do cobrimento de concreto

3 - ruína por flexão

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a Tabela 25, nas vigas do grupo VA, o acréscimo de resistência nas vigas reforçadas enquadra-se no intervalo entre 9,11% e 16,69%, sendo o menor acréscimo observado para todos os grupos. Isso já era esperado uma vez que essas vigas possuem a maior taxa de armadura longitudinal positiva.

Nesse grupo observa-se que a viga VA-3 reforçada com três camadas de fibra, apresentou aumentos de forças inferiores à viga VA-2 que tem menor número de camadas de fibra no reforço e acredita-se que esse resultado ocorreu devido a algum problema durante o ensaio.

Nas vigas do grupo VB, observa-se um aumento considerável da capacidade resistente com acréscimos entre 55,14% e 86,83% em relação à viga de referência VB-R.

Como esperado, as vigas do grupo VC, que possuem a menor taxa de armadura entre as vigas ensaiadas, tiveram uma atuação mais efetiva do reforço e apresentaram o

melhor resultado no aumento da carga última resistida, variando entre 89,46% e 126,18%, em relação à viga de referência VC-R.

Avaliando-se o aumento da capacidade de carga quando se passa de duas para três, quatro e cinco camadas de fibras, observa-se que, para o grupo de vigas VA, os aumentos apresentados são bem pequenos, da ordem de 5%. Para os grupos de vigas subarmadas (VB e VC) há acréscimos maiores, chegando a em torno de 6%, 13% e 20% de aumento para 3, 4 e 5 camadas de fibras, respectivamente.

4.1.3 Fissuração

Faz-se nesse item algumas observações da propagação da fissuração nas vigas de referência e nas vigas reforçadas com cinco camadas de fibra de cada grupo.

4.1.3.1 Fissuração nas vigas normalmente armadas (VA)

Nas Figuras 102 e 103 estão apresentados os detalhes da fissuração das VA-R e VA-5 na ruína e com as fissuras mapeadas.

Figura 102 - Detalhe da fissuração da viga VA-R



Fonte: A autora.

Figura 103 - Detalhe da fissuração da viga VA-5



Fonte: A autora.

Conforme as figuras acima apresentadas observa-se que a viga de referência do grupo VA (Figura 102), apresentou uma quantidade bem maior de fissuras para menos da metade da carga da viga reforçada com cinco camadas (Figura 103).

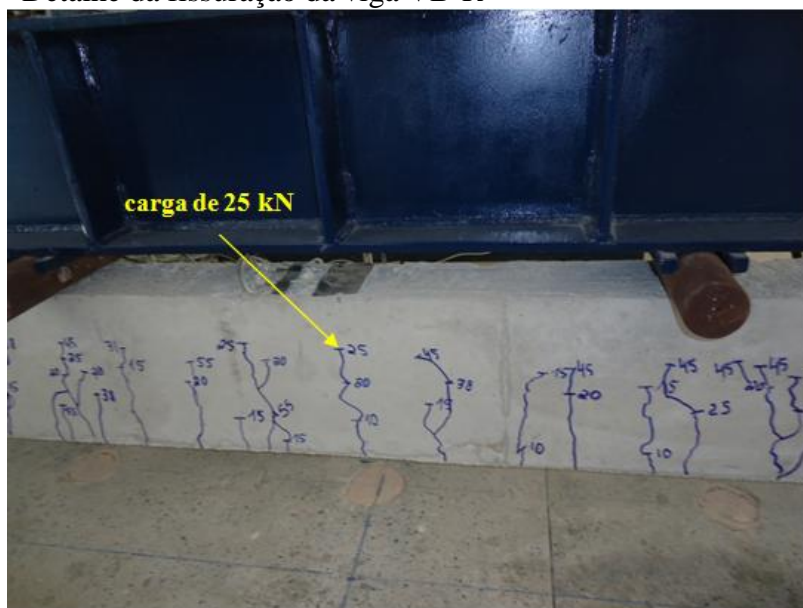
As fissuras iniciaram no meio do vão e com a continuação da aplicação da carga, se propagaram inclinadas nos trechos entre os apoios e os pontos de aplicação das cargas concentradas.

Observa-se que as fissuras na viga VA-5 são bem menos extensas que as da viga VA-R e ocorrem sob cargas bem maiores. Esse comportamento também foi percebido nas demais vigas reforçadas desse grupo, o que demonstra a atuação do reforço no controle da fissuração das vigas reforçadas.

4.1.3.2 Fissuração nas vigas subarmadas (VB)

A fissuração na ruína das vigas VB-R e VB-5 são apresentados nas Figuras 104 e 105, respectivamente.

Figura 104 - Detalhe da fissuração da viga VB-R



Fonte: A autora.

Figura 105 - Detalhe da fissuração da viga VB-5



Fonte: A autora.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, observa-se que a viga de referência do grupo VB, apresentou fissuras de flexão no meio do vão com maior extensão sob cargas bem menores e de maior abertura na ruína (Figura 104), que as fissuras da viga reforçada com cinco camadas (Figura 105). Esse mesmo comportamento foi percebido em todas as vigas reforçadas desse grupo, quando comparadas com a VB-R.

Observa-se com isso a atuação do reforço no controle da fissuração das vigas subarmadas VB reforçadas.

4.1.3.3 Fissuração nas vigas subarmadas (VC)

Nas Figuras 106 e 107 são apresentados a fissuração na ruína das vigas VC-R e VC-5, respectivamente.

Figura 106 - Detalhe da fissuração da viga VC-R



Fonte: A autora.

Figura 107 - Detalhe da fissuração da viga VC-5



Fonte: A autora.

Nesse grupo de vigas, o de menor taxa de armadura longitudinal positiva, observa-se que as fissuras de flexão foram bem extensas no meio do vão.

A viga VC-R também apresentou fissuras no meio do vão bem mais extensas sob cargas menores (Figura 107) e com aberturas maiores (Figura 106), à medida que a carga aplicada era aumentada, que a viga reforçada com cinco camadas de fibra (Figura 107).

Observa-se com isso que o reforço, no trecho de maior propagação das fissuras (meio do vão), atua no sentido de controlar a propagação da fissuração no concreto.

4.1.4 Deslocamentos verticais

Nesse item são apresentados e analisados os resultados dos deslocamentos verticais das vigas ensaiadas utilizando-se as curvas carga-deslocamento ($P-\delta$). Os deslocamentos verticais foram medidos nos dois apoios, no meio de vão da viga (LVDT 3) e em um dos pontos de aplicação da carga concentrada (LVDT 4).

Os valores dos deslocamentos obtidos no ponto de aplicação da carga (LVDT 4) apresentaram valores muito próximos dos valores registrados no meio do vão das vigas (LVDT 3).

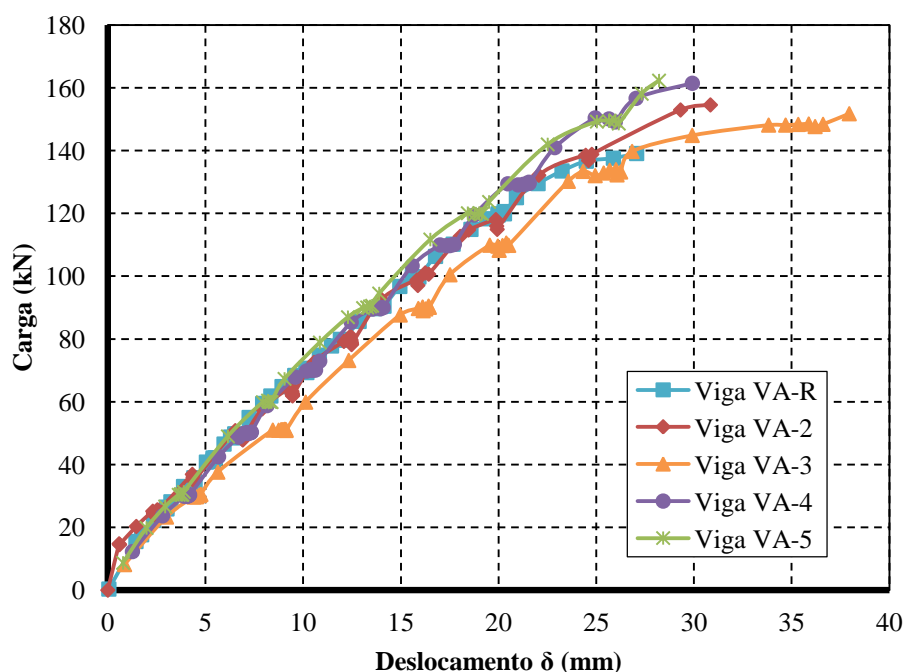
Por apresentarem os maiores valores de deslocamentos verticais, optou-se por analisar os valores obtidos no meio do vão. Os valores dos deslocamentos no meio do vão

foram corrigidos subtraindo-se o valor da média dos deslocamentos verticais registrados nos apoios (LVDT 1 e LVDT 2). Essas médias apresentaram valores de no máximo 3% do valor do deslocamento registrado no LVDT 3.

4.1.4.1 Deslocamentos verticais das vigas normalmente armadas (VA)

Na Figura 108 são comparados por meio da curva carga-deslocamento ($P-\delta$) os deslocamentos no meio do vão das vigas do grupo VA.

Figura 108 - Curvas $P-\delta$ no meio do vão das vigas VA



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 26 são apresentados os deslocamentos medidos para dois valores fixos de carga e os deslocamentos máximos registrados nas vigas do grupo VA. A primeira carga fixa foi definida no valor da carga última da viga de referência (139,04 kN) e a segunda no valor de 150 kN.

Tabela 26 - Deslocamentos verticais das vigas VA

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_e (kN)	Desloc. na carga de 139,04 kN (mm)	Desloc. na carga de 150 kN (mm)	Desloc. na carga última (mm)
VA	VA-R	-	139,07	27,06	-	27,06
	VA-2	2	154,54	24,85	27,07	30,83
	VA-3	3	151,74	26,74	36,89	37,97
	VA-4	4	161,43	22,61	26,21	29,91
	VA-5	5	162,28	22,01	25,24	28,20

Área da armadura positiva das vigas VA: $A_s = 5,03 \text{ cm}^2$

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 108 e Tabela 26, nas vigas do grupo VA observou-se uma semelhança entre seus comportamentos, não apresentando uma variação significativa em relação à rigidez entre elas, a exceção da viga VA-3, que por algum problema durante o ensaio, apresentou resultados diferentes do esperado, portanto seus valores de deslocamentos registrados não serão considerados nesta análise.

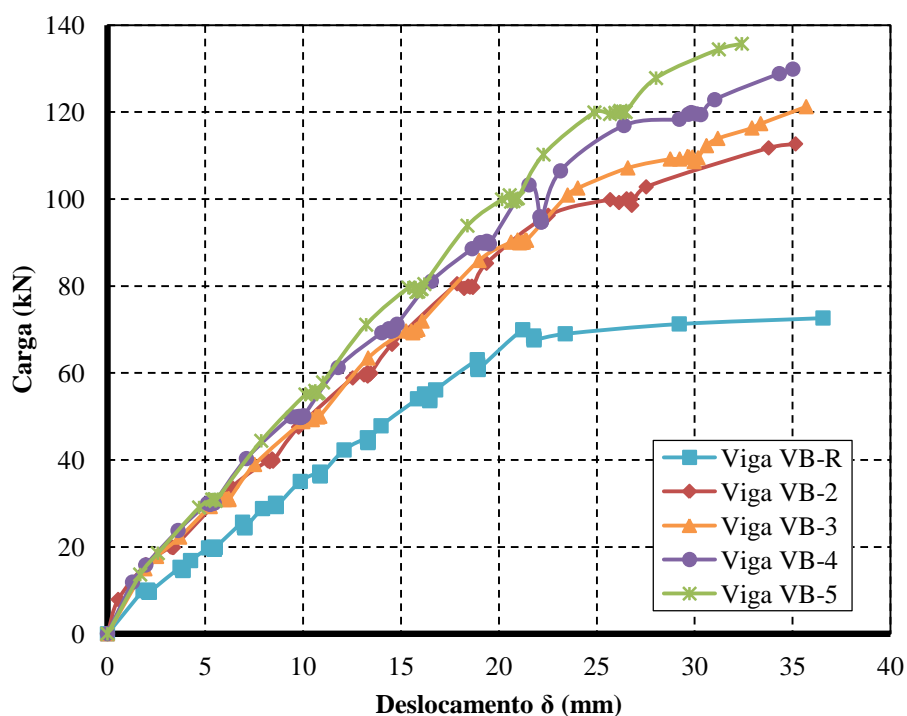
Na carga última da viga de referência (139,04 kN), a redução dos deslocamentos foi de 8,17%, 16,44% e 18,66% das vigas reforçadas com duas, quatro e cinco camadas, respectivamente, em relação à viga VA-R. Já para a carga de 150 kN, portanto excluindo a viga de referência e realizando uma análise entre as vigas reforçadas, observa-se que em relação à viga VA-2, as vigas VA-4 e VA-5 tiveram os deslocamentos reduzidos em 3,18% e 6,76%, respectivamente, apresentando um pequeno aumento em relação à rigidez.

Nas cargas últimas das vigas, observa-se que a viga VA-5 apresentou o melhor resultado do grupo, uma vez que para um aumento de capacidade resistente igual a 16,69% o deslocamento registrado foi aumentado em apenas 4,21%.

Nesse grupo, não se consegue observar um ganho significativo de rigidez nas vigas com a presença do reforço, devido a uma taxa de armadura alta que limita a contribuição do reforço no controle das fissuras e consequentemente dos deslocamentos.

4.1.4.2 Deslocamentos verticais das vigas subarmadas (VB)

Para o estabelecimento de comparações entre as vigas do grupo VB, a resposta carga-deslocamento ($P-\delta$) é apresentada na Figura 109.

Figura 109 - Curvas P- δ no meio do vão das vigas VB

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 27 são apresentados os deslocamentos medidos para dois valores fixos de carga e os deslocamentos máximos registrados nas vigas do grupo VB. A primeira carga fixa foi definida no valor da carga última da viga de referência igual a 72,63 kN e a segunda no valor de 110 kN.

Tabela 27 - Deslocamentos verticais das vigas VB

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_e (kN)	Desloc. na carga de 72,63 kN (mm)	Desloc. na carga de 110 kN (mm)	Desloc. na carga última (mm)
VB	VB-R	-	72,63	36,55	-	36,55
	VB-2	2	112,67	15,90	32,30	35,15
	VB-3	3	121,23	16,17	30,34	35,69
	VB-4	4	129,86	14,90	23,88	35,01
	VB-5	5	135,69	13,47	22,21	32,40

Área da armadura positiva das vigas VB: $A_s = 2,45\text{cm}^2$

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo os resultados apresentados na Figura 109 e na Tabela 27, para as vigas do grupo VB, observa-se que a viga de referência (VB-R) apresenta deslocamentos maiores que as demais vigas reforçadas em todo seu comportamento.

Quando comparadas com a viga VB-R na sua carga última (72,63 kN), as vigas reforçadas apresentam um comportamento bem mais rígido, com uma redução dos deslocamentos variando entre 55,76% e 63,15%, para as vigas VB-3 e VB-5, respectivamente.

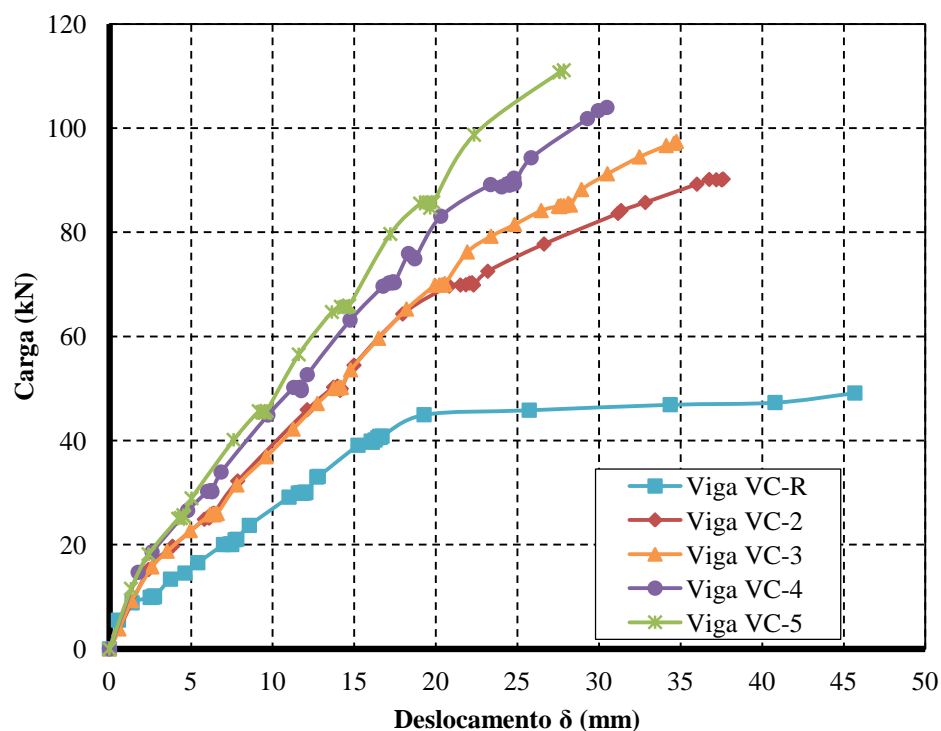
Para a carga de 110 kN, observa-se que em relação à viga VB-2, as vigas VB-3, VB-4 e VB-5 tiveram os valores dos deslocamentos reduzidos em 6,07%, 26,07% e 31,34%.

Nas cargas últimas, as vigas com reforço, mesmo com o aumento da capacidade resistente, tiveram deslocamentos menores que a viga de referência. A viga VB-5 foi a que teve o melhor desempenho em relação à rigidez, entre as vigas do grupo VB, com um deslocamento 11,35% menor que o da viga VB-R, na sua carga última.

Observa-se que nesse grupo de vigas, as vigas reforçadas comparadas com a viga de referência, apresentaram um menor número de fissuras e com menor extensão, fato esse que pode ser atribuído à atuação do reforço no aumento da rigidez dessas vigas.

4.1.4.3 Deslocamentos verticais das vigas subarmadas (VC)

Na Figura 110 são comparados por meio da curva carga-deslocamento (P- δ) os deslocamentos no meio do vão das vigas do grupo VC.

Figura 110 - Curvas P- δ no meio do vão das vigas VC

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 28 são apresentados os deslocamentos medidos para dois valores fixos de carga e os deslocamentos máximos registrados nas vigas do grupo VC. A primeira carga fixa foi definida no valor da carga última da viga de referência igual a 49,12 kN e a segunda no valor de 85 kN.

Tabela 28 - Deslocamentos verticais das vigas VC

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_e (kN)	Desloc. na carga de 49,12 kN (mm)	Desloc. na carga de 85 kN (mm)	Desloc. na carga última (mm)
VC	VC-R	-	49,12	45,68	-	45,68
	VC-2	2	93,06	13,22	32,64	37,62
	VC-3	3	97,42	13,36	26,96	34,75
	VC-4	4	103,95	10,85	21,64	30,49
	VC-5	5	111,09	10,03	18,69	27,84

Área da armadura positiva das vigas VC: $A_s = 1,57 \text{ cm}^2$

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Pelos resultados apresentados na Figura 110 e na Tabela 28, nas vigas do grupo VC observa-se que a viga de referência (VC-R) apresenta deslocamentos bem mais pronunciados que as demais vigas reforçadas em seu comportamento.

Quando comparadas com a viga VC-R na sua carga última, as vigas VC-2, VC-3, VC-4 e VC-5 (Tabela 5), apresentam um comportamento bem mais rígido, com uma redução dos deslocamentos de 71,06%, 70,75%, 76,25% e 78,04%, respectivamente.

Considerando uma análise entre as vigas reforçadas com a carga igual a 85 kN, observa-se que em relação à viga VC-2, as vigas VC-3, VC-4 e VC-5 tiveram os valores dos deslocamentos reduzidos em 17,40%, 33,70% e 42,74%.

Na comparação dos deslocamentos nas cargas últimas, as vigas reforçadas, sob cargas maiores, tiveram deslocamentos bem menores que a viga de referência. A viga VC-5, reforçada com cinco camadas de fibra, foi a que teve o melhor desempenho em relação à rigidez, entre as vigas do grupo VC, com um deslocamento 39,05% menor que o da viga VC-R.

Nesse grupo de vigas, observa-se que a contribuição do reforço fica bem evidente para o aumento da rigidez das vigas reforçadas, quando comparadas com a viga de referência.

4.1.5 Cargas de escoamento e deformações na armadura

As cargas de escoamento foram medidas a partir dos valores das deformações específicas de escoamento das armaduras positivas obtidos nos ensaios experimentais das barras de aço.

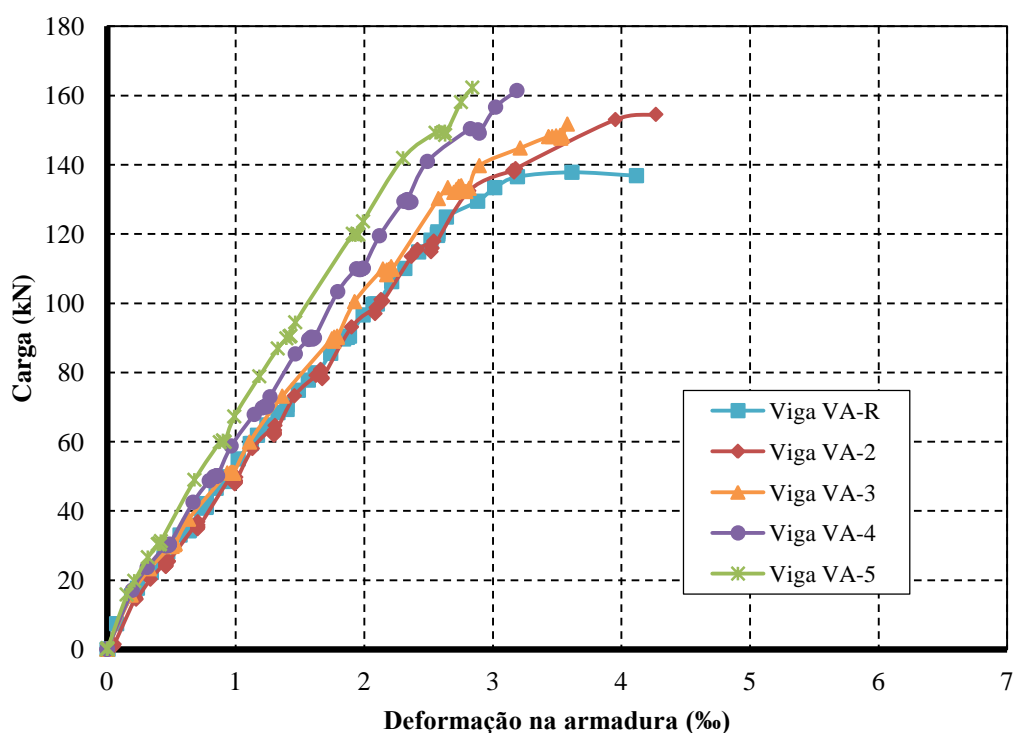
As deformações na armadura positiva foram registradas por meio dos extensômetros 1 e 2, colados na face inferior da armadura positiva e posicionados no meio do vão da viga. Essas deformações se referem à média das leituras obtidas nas duas barras, a exceção de algum problema durante o ensaio, onde um dos extensômetros não registrou os valores, ou apresentou valores incoerentes, que foram descartados sendo nesse caso considerada a leitura de apenas um dos extensômetros.

Uma vez que as vigas foram levadas até a ruína, os valores das deformações obtidas por meio dos extensômetros na carga última, em alguns casos, não foram registrados.

4.1.5.1 Cargas de escoamento e deformações na armadura das vigas normalmente armadas (VA)

Na Figura 111 são apresentadas as curvas carga-deformação específica de escoamento da armadura positiva, das vigas do grupo VA. Essas curvas referem-se à média da leitura efetuada por meio dos extensômetros 1 e 2.

Figura 111 - Curvas carga-deformação na armadura no meio do vão das vigas VA



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 29 são apresentados os valores das deformações últimas registradas na armadura positiva das vigas, das deformações obtidas na armadura positiva das vigas reforçadas na carga de escoamento da armadura da viga de referência, das cargas de escoamento da armadura positiva (P_y) e das cargas últimas experimentais (P_e). As diferenças percentuais das cargas de escoamento das armaduras das vigas reforçadas em relação à viga de referência também são apresentadas.

Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação na armadura (Figura 111).

Tabela 29 - Cargas e deformações na armadura positiva das vigas VA

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_y (kN)	P_e (kN)	Deformação na carga de 121,90 kN (%)	Deformação última no aço (%)	Diferença percentual ($\Delta P_y / P_{yR}$)
VA	VA-R	-	121,90	139,07	2,58	4,12*	-
	VA-2	2	121,33	154,54	2,57	4,26	-0,47
	VA-3	3	130,57	151,74	2,37	3,58	7,11
	VA-4	4	145,17	161,43	2,16	3,19	19,09
	VA-5	5	149,88	162,28	1,97	2,84	22,95

* - registro antes da carga última experimental (136,84 kN)

Área da armadura positiva das vigas VA: $A_s = 5,03 \text{ cm}^2$

Deformação de escoamento da barra de aço de $\phi 16 \text{ mm}$ é de 2,58‰

P_y - carga de escoamento da armadura positiva

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com Beber (2003), a aplicação de um reforço na zona tracionada de uma viga, faz com que esse passe a dividir, com as barras de armadura, a resultante de tensões de tração atuantes na seção transversal desta viga. Com isso, a carga de início de escoamento em uma viga reforçada é maior que a de uma viga sem reforço.

Observa-se que as cargas de início de escoamento das vigas reforçadas apresentam um aumento, quando comparadas com a viga de referência. Este aumento foi de 7,11%, 19,09% e 22,95% para as vigas VA-3, VA-4 e VA-5, respectivamente. A viga VA-2 apresentou um decréscimo de 0,47%, provavelmente devido a algum problema na medição das deformações.

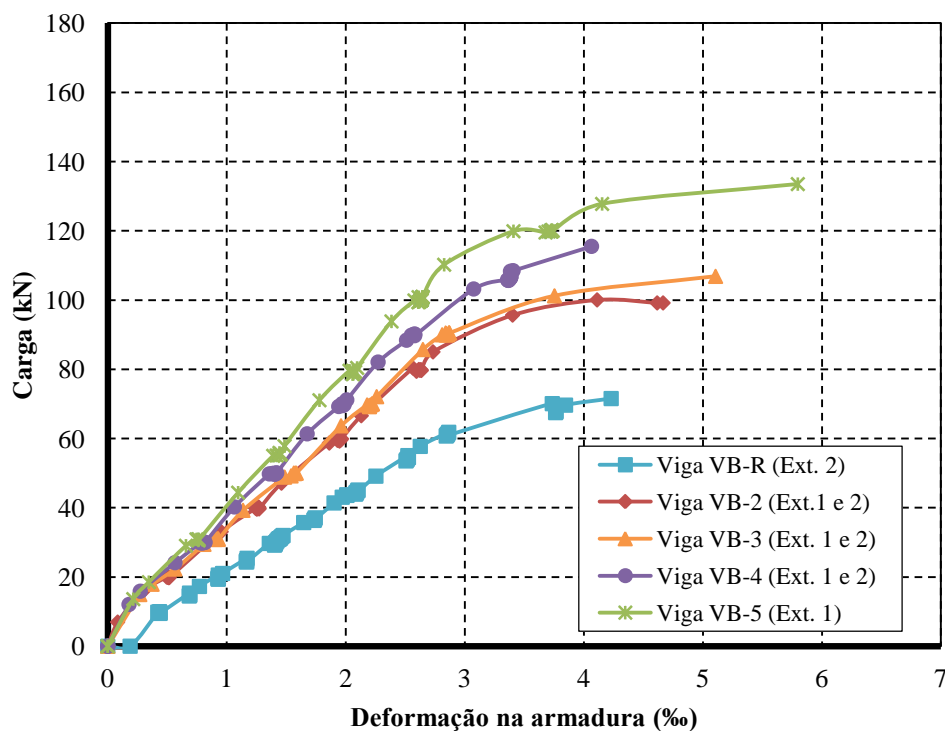
Quando comparadas entre si, excluindo a viga de referência, as vigas reforçadas com três, quatro e cinco camadas apresentaram uma carga de escoamento da armadura 7,62%, 19,65% e 23,53%, respectivamente, maior que a da viga reforçada com duas camadas de fibra.

Observa-se um decréscimo nas deformações específicas das armaduras das vigas reforçadas ao se comparar com a deformação específica na carga de 121,90 kN. Esse decréscimo situou-se entre 0,39% a 23,64%, para duas a cinco camadas de fibra, respectivamente, o que demonstra a contribuição do reforço antes do escoamento da armadura.

4.1.5.2 Cargas de escoamento e deformações na armadura das vigas subarmadas (VB)

As curvas carga-deformação específica de escoamento da armadura positiva das vigas do grupo VB são apresentadas na Figura 112.

Figura 112 - Curvas carga-deformação na armadura no meio do vão das vigas VB



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 30 são apresentados os valores das deformações na armadura positiva das vigas reforçadas na carga de escoamento da viga de referência, das deformações últimas obtidas na armadura positiva, das cargas de escoamento da armadura positiva (P_y) e das cargas últimas experimentais (P_e).

Os aumentos das cargas de escoamento das armaduras das vigas reforçadas em relação à viga de referência também são mostrados. Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação na armadura (Figura 112).

Tabela 30 - Cargas e deformações na armadura positiva das vigas VB

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_y (kN)	P_e (kN)	Deformação na carga de 56,09 kN (%)	Deformação última no aço (%)	Diferença percentual ($\Delta P_y / P_{yR}$)
VB	VB-R	-	56,09	72,63	2,55	4,23*	-
	VB-2	2	79,88	112,67	1,73	4,67*	42,41
	VB-3	3	82,27	121,23	1,76	5,11*	46,67
	VB-4	4	89,95	129,86	1,52	3,38*	60,37
	VB-5	5	94,96	135,69	1,46	5,80*	69,30

* - registro antes da carga última experimental

Área da armadura positiva das vigas VB: $A_s = 2,45 \text{ cm}^2$

Deformação de escoamento da barra de aço de $\phi 12,5 \text{ mm}$ é de 2,55%

P_y - carga de escoamento da armadura positiva

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos resultados apresentados na Figura 112 e na Tabela 30, pode-se verificar que o início do escoamento das armaduras das vigas reforçadas ocorreu sob cargas superiores à carga da viga de referência. O aumento dessas cargas foi de 42,41%, 46,67%, 60,37% e 69,30% para as vigas VB-2, VB-3, VB-4 e VB-5, respectivamente.

Conforme observado por Ferrari (2007), o reforço retarda o início do escoamento da armadura e quanto menor a área da seção transversal do reforço, menor é a carga de escoamento da armadura.

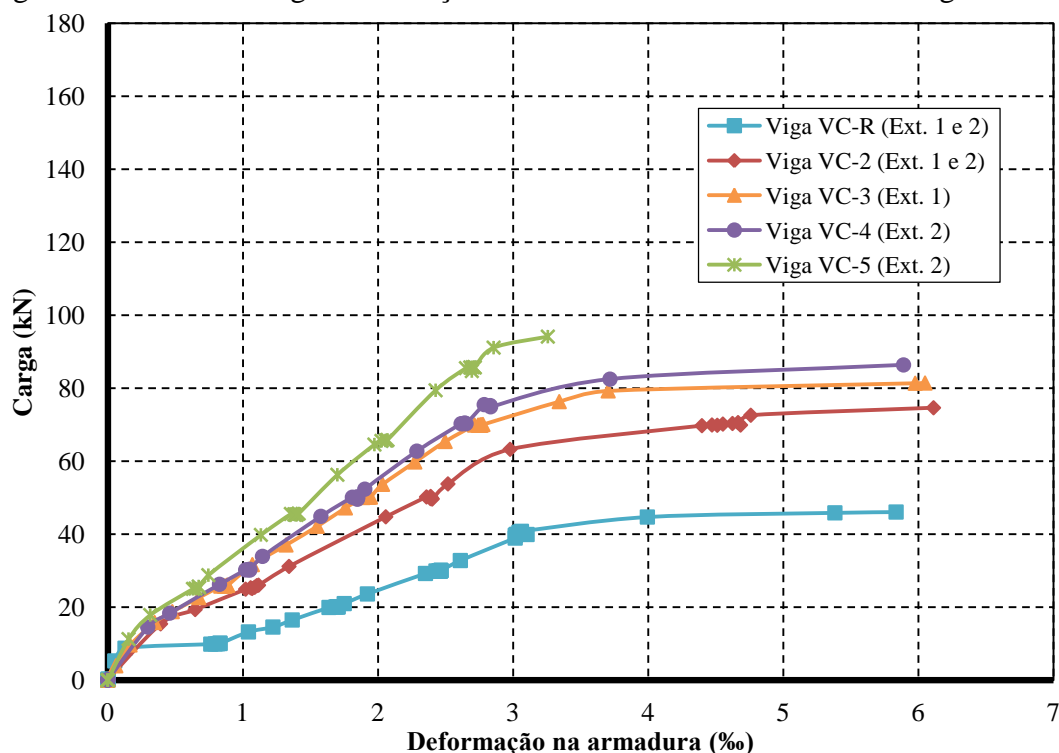
A viga reforçada com duas camadas de fibra (VB-2) apresenta carga de início de escoamento da armadura 2,91%, 11,20% e 15,88% menor que a das vigas reforçadas com três, quatro e cinco camadas, respectivamente.

Ainda, quando comparados com o valor da deformação específica de escoamento da armadura da viga de referência, na carga de 56,09 kN, observa-se também uma sensível diminuição desses números nas vigas com reforço. O decréscimo nas deformações específicas foi de 32,16%, 30,98%, 40,39% e 42,75%, nas vigas VB-2, VB-3, VB-4 e VB-5, respectivamente.

4.1.5.3 Cargas de escoamento e deformações na armadura das vigas subarmadas (VC)

As curvas carga-deformação específica de escoamento da armadura positiva das vigas do grupo VC são apresentadas na Figura 113.

Figura 113 - Curvas carga-deformação na armadura no meio do vão das vigas VC



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 31 são apresentados os valores das deformações últimas obtidas na armadura positiva, das deformações na armadura positiva das vigas reforçadas na carga de escoamento da viga de referência, das cargas de escoamento da armadura positiva (P_y) e das cargas últimas experimentais (P_e).

Os aumentos das cargas de escoamento das armaduras das vigas reforçadas em relação à viga de referência também são mostrados. Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação na armadura (Figura 113).

Tabela 31 - Cargas e deformações na armadura positiva das vigas VC

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_y (kN)	P_e (kN)	Deformação na carga de 29,91 kN (%)	Deformação última no aço (%)	Diferença percentual ($\Delta P_y / P_{yR}$)
VC	VC-R	-	29,91	49,12	2,43	5,84*	-
	VC-2	2	51,30	93,06	1,26	6,11*	71,51
	VC-3	3	63,72	97,42	1,00	6,05*	113,04
	VC-4	4	67,10	103,95	0,99	5,89*	124,34
	VC-5	5	79,65	111,09	0,78	3,25*	166,30

* - registro antes da carga última experimental

Área da armadura positiva das vigas VC: $A_s = 1,57 \text{ cm}^2$

Deformação de escoamento da barra de aço de $\phi 10,0 \text{ mm}$ é de 2,43%

P_y - carga de escoamento da armadura positiva

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dos resultados experimentais apresentados na Figura 113 e na Tabela 31, observa-se que o início do escoamento das armaduras das vigas reforçadas apresenta um aumento considerável em relação à viga de referência. Nesse grupo de vigas, o aumento variou entre 71,51% e 166,30%, para duas a cinco camadas de fibra, respectivamente.

Em relação às vigas reforçadas, quando comparadas entre si, observa-se que a viga reforçada com duas camadas de fibra (VC-2) apresentou uma carga de escoamento 19,49%, 23,55% e 35,59% menor que a das vigas VC-3, VC-4 e VC-5, respectivamente, o que mostra a atuação efetiva do reforço antes do escoamento da armadura positiva.

Conforme observado por Beber (2003), a presença do reforço conduz, naturalmente, a uma redução na deformação específica das armaduras e, conseqüentemente, na tensão que atua sobre elas.

Quando comparados com a deformação específica da armadura da viga de referência, sob carga de 29,91 kN, os valores das deformações específicas das armaduras positivas das vigas reforçadas apresentam expressiva redução. Esse decréscimo foi de 48,15%, 58,85%, 59,26% e 67,90% nas vigas VC-2, VC-3, VC-4 e VC-5, respectivamente.

4.1.6 Deformações na armadura de cisalhamento

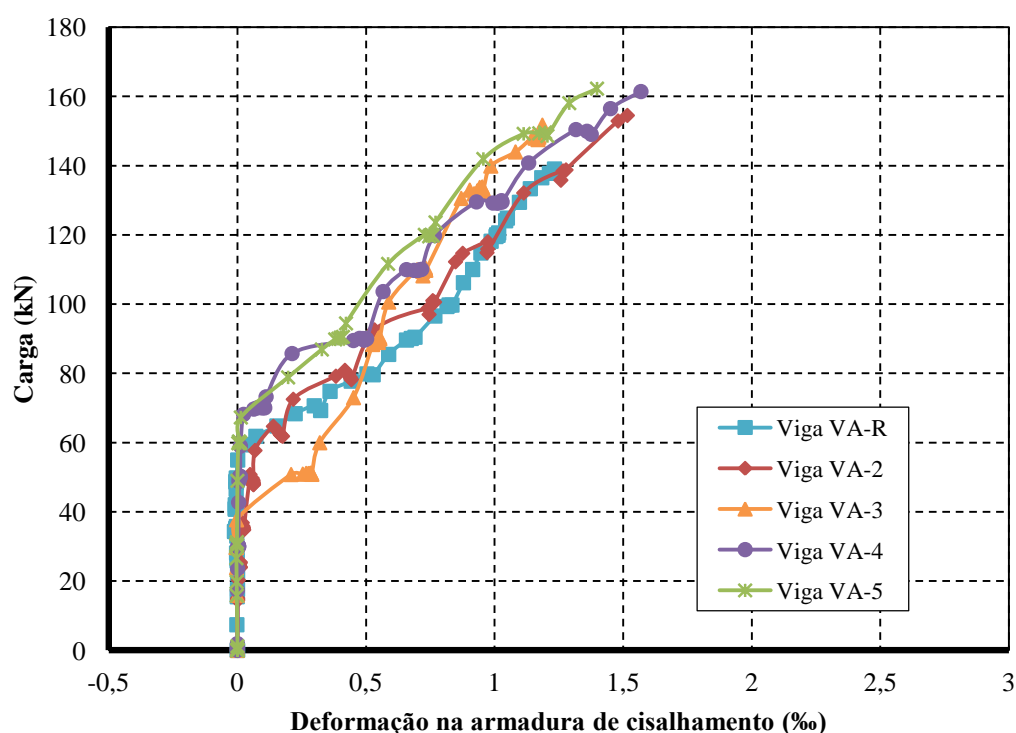
As deformações na armadura de cisalhamento das vigas ensaiadas, foram registradas por meio do extensômetro 3, colado em um estribo posicionado em um dos vãos

entre o apoio e um dos pontos de aplicação das cargas concentradas. Todos os valores das deformações foram registrados até a carga última experimental das vigas.

4.1.6.1 Deformações na armadura de cisalhamento das vigas normalmente armadas (VA)

Na Figura 114 são apresentadas as curvas carga-deformação específica de escoamento na armadura de cisalhamento das vigas do grupo VA.

Figura 114 - Curvas carga-deformação na armadura de cisalhamento das vigas VA



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 32 são apresentados os valores das deformações últimas obtidas da armadura de cisalhamento e das cargas últimas experimentais (P_e). Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação na armadura (Figura 114).

Tabela 32 - Deformações últimas na armadura de cisalhamento das vigas VA

Grupo	Viga	Nº. de camadas de fibra	P _e (kN)	Deformação última do aço (‰)
VA	VA-R	sem reforço	139,07	1,23
	VA-2	2	154,54	1,52
	VA-3	3	151,74	1,19
	VA-4	4	161,43	1,57
	VA-5	5	162,28	1,40

Área da armadura positiva das vigas VA: $A_s = 5,03 \text{ cm}^2$

Deformação específica de escoamento da barra de aço de $\phi 5,0 \text{ mm}$ é de 3,33‰

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

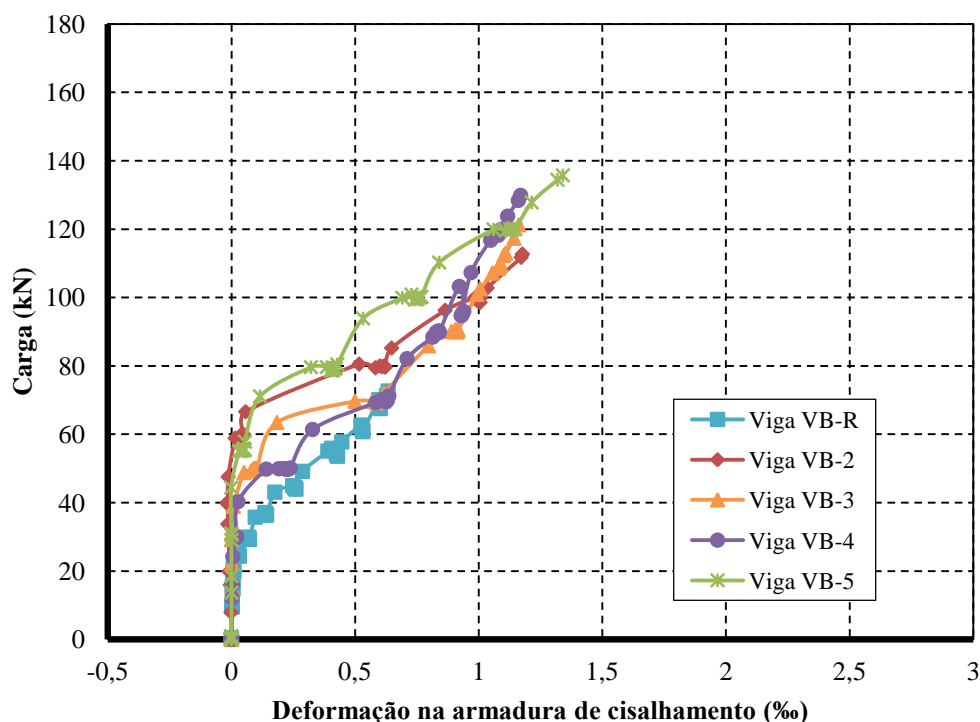
A partir dos resultados experimentais apresentados na Figura 114 e na Tabela 32, observa-se que nenhuma das vigas, no ponto instrumentado, registrou deformação específica maior que a deformação específica de escoamento da barra de aço de diâmetro de 5,0 mm que é de 3,33‰.

As deformações nas armaduras de cisalhamento, no ponto instrumentado, das vigas reforçadas, quando comparadas com a da viga de referência, apresentaram um aumento de 23,58%, 27,64% e 13,82%, para as vigas VA-2, VA-4 e VA-5, respectivamente. Esse aumento é coerente uma vez que essas vigas suportaram maiores carregamentos. A deformação registrada na armadura da viga VA-3 apresentou um valor 3,25% menor que a da viga de referência, atribuído a algum problema no ensaio.

4.1.6.2 Deformações na armadura de cisalhamento das vigas subarmadas VB

Na Figura 115 são apresentadas as curvas carga-deformação específica de escoamento na armadura de cisalhamento das vigas do grupo VB.

Figura 115 - Curvas carga-deformação na armadura de cisalhamento das vigas VB



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 33 são apresentados os valores das deformações últimas obtidas da armadura de cisalhamento e das cargas últimas experimentais (P_e). Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação na armadura (Figura 115).

Tabela 33 - Deformações últimas na armadura de cisalhamento das vigas VB

Grupo	Viga	Nº. de camadas de fibra	P_e (kN)	Deformação última do aço (%)
VB	VB-R	sem reforço	72,63	0,63
	VB-2	2	112,67	1,18
	VB-3	3	121,23	1,16
	VB-4	4	129,86	1,17
	VB-5	5	135,69	1,34

Área da armadura positiva das vigas VB: $A_s = 2,45 \text{ cm}^2$

Deformação específica de escoamento da barra de aço de $\phi 5,0 \text{ mm}$ é de 3,33%

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

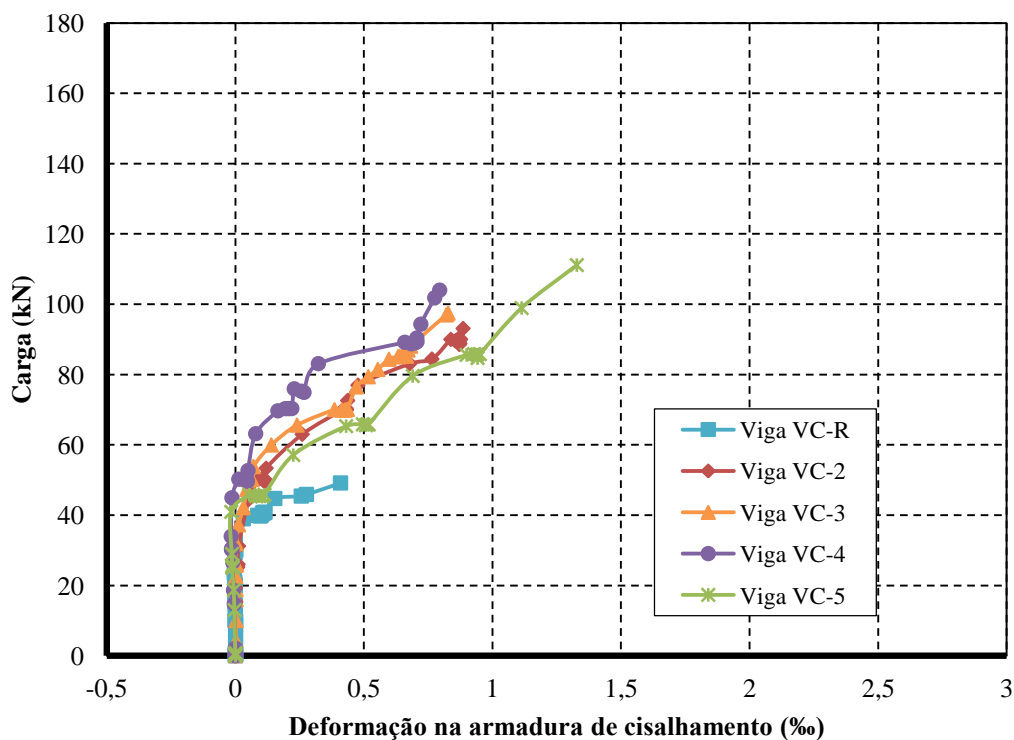
Segundo os resultados apresentados na Figura 115 e na tabela 33, em todas as vigas desse grupo, as deformações específicas últimas na armadura de cisalhamento, no ponto instrumentado, apresentaram valores menores que a deformação específica de escoamento da barra de aço de diâmetro de 5,0 mm que é de 3,33‰.

As deformações nas armaduras de cisalhamento (no ponto instrumentado) das vigas reforçadas, quando comparadas com a da viga de referência, apresentaram aumento de 87,30%, 84,13%, 85,71% e 112,70%, para as vigas VB-2, VB-3, VB-4 e VB-5, respectivamente.

4.1.6.3. Deformações na armadura de cisalhamento das vigas subarmadas (VC)

Na Figura 116 são apresentadas as curvas carga-deformação específica de escoamento na armadura de cisalhamento das vigas do grupo VC.

Figura 116 - Curvas carga-deformação na armadura de cisalhamento das vigas VC



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 34 são apresentados os valores das deformações últimas obtidas da armadura de cisalhamento e das cargas últimas experimentais (P_e). Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação na armadura (Figura 116).

Tabela 34 - Deformações últimas na armadura de cisalhamento das vigas VC

Grupo	Viga	Nº. de camadas de fibra	P _e (kN)	Deformação última do aço (%)
VC	VC-R	sem reforço	49,12	0,41
	VC-2	2	93,06	0,89
	VC-3	3	97,42	0,83
	VC-4	4	103,95	0,79
	VC-5	5	111,09	1,33

Área da armadura positiva das vigas VC: $A_s = 1,57 \text{ cm}^2$

Deformação de escoamento da barra de aço de $\phi 5,0 \text{ mm}$ é de 3,33‰

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Em todas as vigas desse grupo, de acordo com os resultados apresentados na Figura 116 e na Tabela 34, as deformações específicas últimas na armadura de cisalhamento, no ponto instrumentado, apresentaram valores menores que a deformação específica de escoamento da barra de aço de diâmetro de 5,0 mm que é de 3,33‰.

As deformações nas armaduras de cisalhamento (no ponto instrumentado) das vigas reforçadas, quando comparadas com a da viga de referência, apresentaram aumento de 117,07%, 102,44%, 92,68% e 224,39%, para as vigas VC-2, VC-3, VC-4 e VC-5, respectivamente.

4.1.7 Deformações no reforço

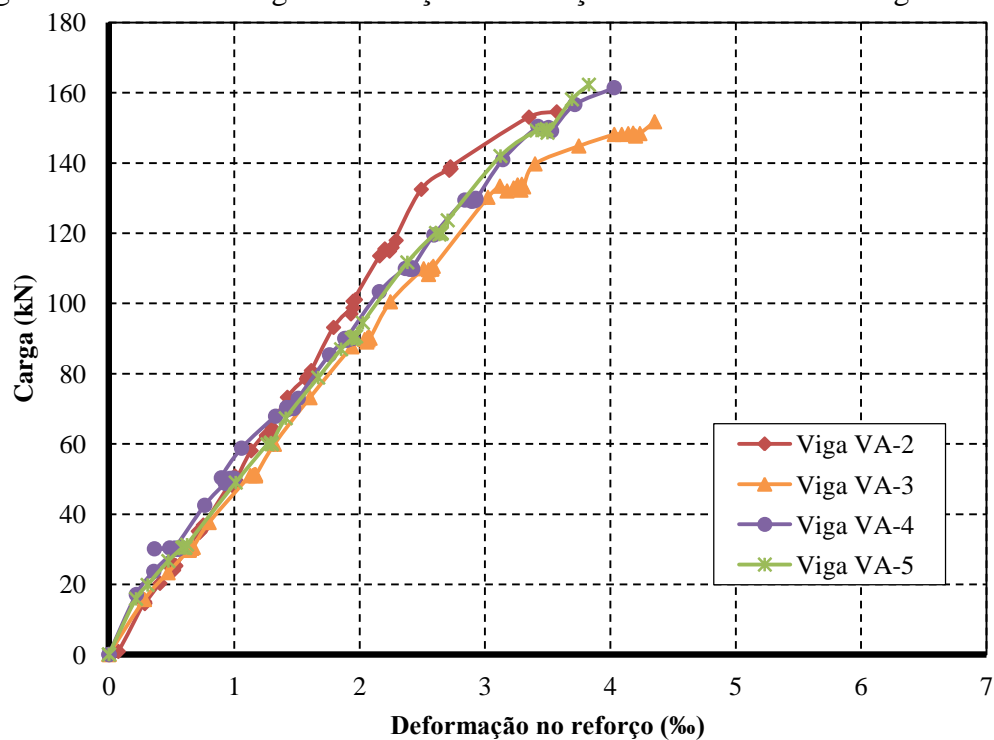
As deformações no reforço das vigas ensaiadas foram registradas por meio dos extensômetros 4 e 5, posicionados no meio do vão da viga. Essas deformações se referem à média das leituras obtidas por meio desses dois extensômetros.

Uma vez que as vigas foram levadas até a ruína, o valor das deformações registradas pelos extensômetros na carga última, em alguns casos, não foram registrados.

4.1.7.1 Deformações no reforço das vigas normalmente armadas (VA)

Na Figura 117 são apresentadas as curvas carga-deformação específica no reforço das vigas do grupo VA.

Figura 117 - Curvas carga-deformação no reforço no meio do vão das vigas VA



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 35 são apresentados os valores das deformações no reforço na carga de escoamento das armaduras positivas das vigas, os valores das deformações últimas obtidas no reforço das vigas do grupo VA e as cargas últimas experimentais (P_e).

Todos os valores das deformações últimas no reforço nesse grupo de vigas foram registrados na carga última e foram obtidos por meio das curvas carga-deformação no reforço (Figura 117).

Tabela 35 - Deformações últimas no reforço das vigas VA

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_y (kN)	Deformação na carga de escoamento (%)	P_e (kN)	Deformação última no reforço (%)
VA	VA-R	-	121,90	-	139,07	-
	VA-2	2	121,33	2,30	154,54	3,57
	VA-3	3	130,57	3,03	151,74	4,35
	VA-4	4	145,17	3,26	161,43	4,03
	VA-5	5	149,88	3,42	162,28	3,83

Área da armadura positiva das vigas VA: $A_s = 5,03 \text{ cm}^2$

Deformação do reforço na ruptura segundo o fabricante é de 21‰

P_y - carga de escoamento da armadura positiva

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Da análise da Figura 117 e da Tabela 35, observa-se que as deformações no reforço foram bem semelhantes e próximas em todas as vigas reforçadas.

De acordo com Beber (2003), após o escoamento da armadura o reforço passa a ser plenamente solicitado.

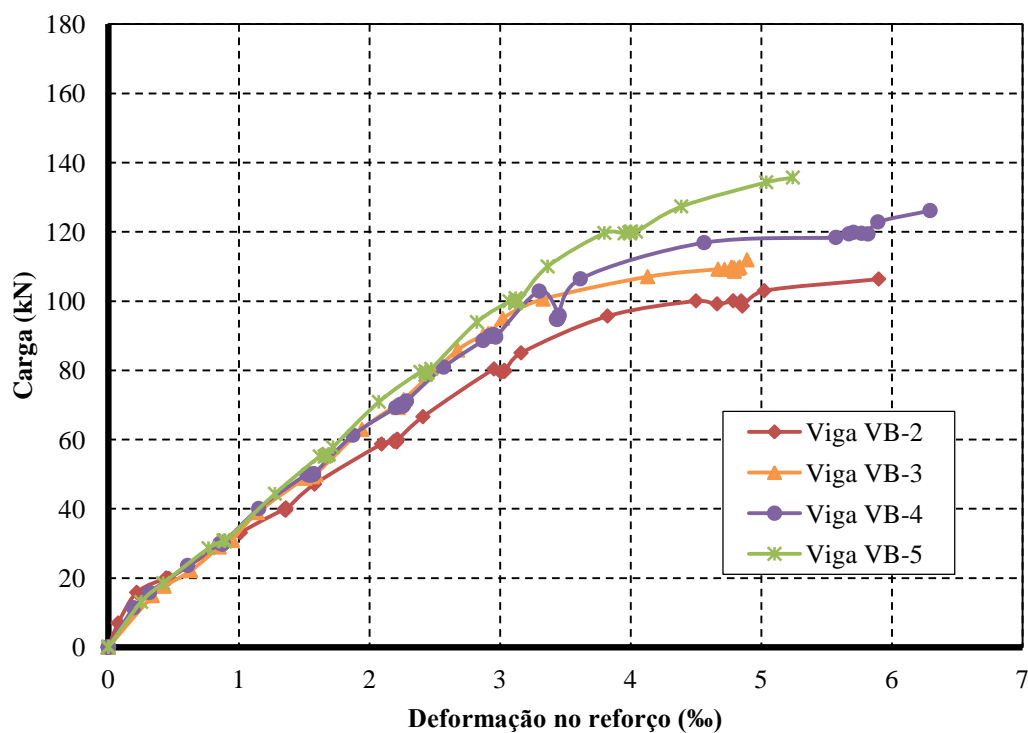
Quando comparadas com as deformações no reforço na carga de escoamento da armadura, as deformações últimas obtidas no reforço das vigas VA-2, VA-3, VA-4 e VA-5, apresentaram um aumento de 55,22%, 43,56%, 23,62% e 11,99%.

Pode-se observar com esses resultados que a taxa de armadura alta das vigas do grupo VA limitam a solicitação do reforço e conseqüentemente sua deformação. Também o modo de ruína prematuro das vigas com três, quatro e cinco camadas de fibra, pode ter contribuído para uma menor deformação última do reforço.

4.1.7.2 Deformações no reforço das vigas subarmadas (VB)

Na Figura 118 são apresentadas as curvas carga-deformação específica no reforço das vigas do grupo VB.

Figura 118 - Curvas carga-deformação no reforço no meio do vão das vigas VB



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 36 são apresentados os valores das deformações no reforço na carga de escoamento das armaduras positivas das vigas, os valores das deformações últimas obtidas no reforço das vigas do grupo VB e as cargas últimas experimentais (P_e). Nas leituras dos extensômetros efetuadas antes da carga última, foi registrada a carga medida.

Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação no reforço (Figura 118).

Tabela 36 - Deformações últimas no reforço das vigas VB

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_y (kN)	Deformação na carga de escoamento (%)	P_e (kN)	Carga medida (kN)	Deformação última no reforço (%)
VB	VB-R	-	56,09	-	72,63	-	-
	VB-2	2	79,88	3,04	112,67	106,38	5,90
	VB-3	3	82,27	2,56	121,23	111,91	4,89
	VB-4	4	89,95	2,96	129,86	126,15	6,29
	VB-5	5	94,96	2,86	135,69	135,69	5,24

Área da armadura positiva das vigas VB: $A_s = 2,45 \text{ cm}^2$

Deformação do reforço na ruptura segundo o fabricante é de 21%

P_y - carga de escoamento da armadura positiva

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dos resultados obtidos e apresentados na Figura 118 e na Tabela 36, observa-se que as deformações no reforço foram expressivas em todas as vigas reforçadas.

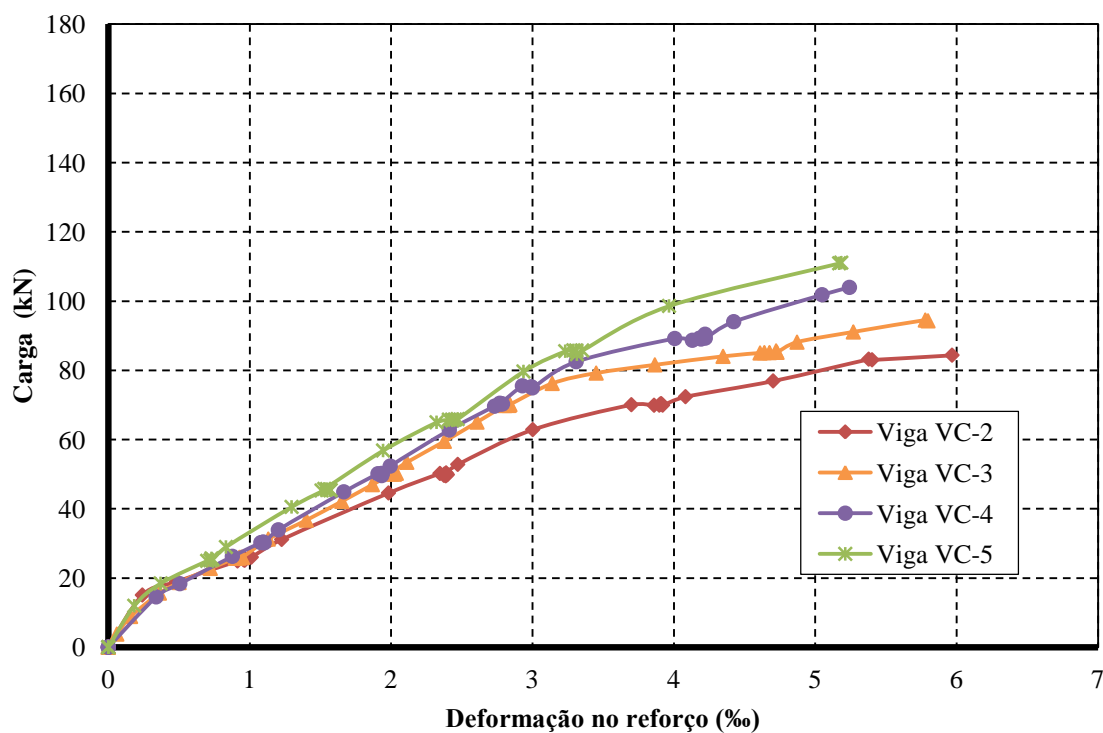
Quando comparadas com as deformações no reforço na carga de escoamento da armadura, as deformações últimas medidas no reforço das vigas VB-2, VB-3, VB-4 e VB-5 (Tabela 13), apresentaram um aumento de 94,08%, 91,02%, 112,50% e 83,22%, respectivamente, mostrando que o reforço foi bem solicitado após o escoamento do aço.

O modo de ruína prematuro das vigas com duas, três, quatro e cinco camadas de fibra, também pode ter contribuído para uma menor deformação última do reforço.

4.1.7.3 Deformações no reforço das vigas subarmadas (VC)

Na Figura 119 são apresentadas as curvas carga-deformação específica no reforço das vigas do grupo VC.

Figura 119 - Curvas carga-deformação no reforço no meio do vão das vigas VC



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 37 são apresentados os valores das deformações no reforço na carga de escoamento das armaduras positivas das vigas, os valores das deformações últimas obtidas no reforço das vigas do grupo VC e as cargas últimas experimentais (P_e). Nas leituras dos extensômetros efetuadas antes da carga última, foi registrada a carga medida.

Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação no reforço (Figura 119).

Tabela 37 - Deformações últimas no reforço das vigas VC

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_y (kN)	Deformação na carga de escoamento (%)	P_e (kN)	Carga medida (kN)	Deformação última no reforço (%)
VC	VC-R	-	29,91	-	49,12	-	-
	VC-2	2	51,30	2,43	93,06	84,36	5,97
	VC-3	3	63,72	2,55	97,42	94,28	5,80
	VC-4	4	67,10	2,58	103,95	103,95	5,24
	VC-5	5	79,65	2,93	111,09	111,09	5,19

Área da armadura positiva das vigas VC: $A_s = 1,57 \text{ cm}^2$

Deformação do reforço na ruptura segundo o fabricante é de 21%

P_y - carga de escoamento da armadura positiva

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Da análise da Figura 119 e da Tabela 37, observa-se que as deformações no reforço foram bem solicitadas em todas as vigas reforçadas.

Quando comparadas com as deformações no reforço na carga de escoamento da armadura, as deformações últimas medidas no reforço das vigas VC-2, VC-3, VC-4 e VC-5, apresentaram um aumento de 145,68%, 127,45%, 103,10% e 77,13%, respectivamente, mostrando que o reforço teve uma atuação efetiva após o escoamento da armadura.

Nesse grupo de vigas, é possível observar que as vigas com quatro e cinco camadas de fibra, que tiveram suas deformações no reforço registradas na carga última, apresentam deformações últimas menores que as das vigas com duas e três camadas de fibra, onde as deformações foram registradas antes da carga última.

Esses resultados levam a observar que uma maior quantidade de camadas de fibra no reforço, nesse grupo de vigas, proporciona um menor aproveitamento do reforço.

O modo de ruína prematuro das vigas com duas, três, quatro e cinco camadas de fibra, também pode ter contribuído para não se observar deformações últimas ainda maiores no reforço.

4.1.8 Deformações no concreto comprimido

As deformações no concreto comprimido das vigas ensaiadas foram medidas por meio dos extensômetros 6 e 7, colados na face superior das vigas e posicionados no meio do vão da viga.

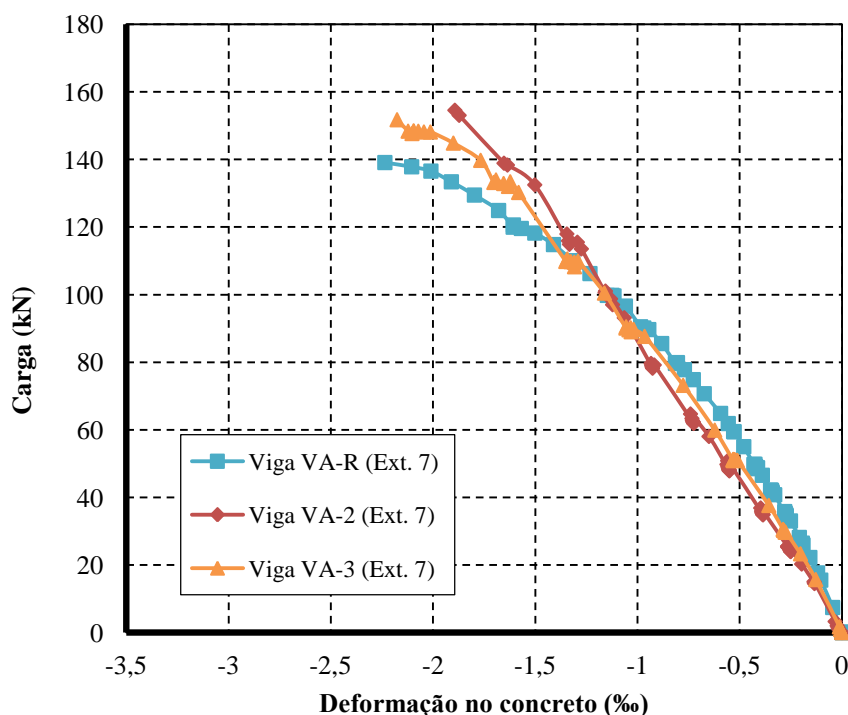
Essas deformações se referem, na sua grande maioria, à leitura obtida por meio de um dos extensômetros, onde devido a algum problema durante o ensaio, o outro extensômetro não registrou os valores, ou apresentou valores incoerentes, que foram descartados. Para valores coerentes e próximos, obtidos nos dois extensômetros, foi considerado o valor médio das duas leituras.

Todos os valores das deformações no concreto das vigas foram registrados até a carga última.

4.1.8.1 Deformações no concreto comprimido das vigas normalmente armadas (VA)

Na Figura 120 são apresentadas as curvas carga-deformação específica no concreto comprimido das vigas do grupo VA. Os valores das deformações obtidos nos dois extensômetros para as vigas VA-4 e VA-5 não foram coerentes e, portanto foram desconsiderados nos resultados.

Figura 120 - Curvas carga-deformação no concreto no meio do vão das vigas VA



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 38 são apresentados os valores das deformações últimas obtidas no concreto comprimido das vigas do grupo VA, das deformações obtidas nas vigas reforçadas

na carga última da viga de referência (139,07 kN) e as cargas últimas experimentais (P_e). Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação do concreto (Figura 120).

Tabela 38 - Deformações no concreto comprimido das vigas VA

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_e (kN)	Deformação no concreto na carga de 139,07 kN (%)	Deformação última no concreto (%)
VA	VA-R	sem reforço	139,07	2,24	2,24
	VA-2	2	154,54	1,65	1,89
	VA-3	3	151,74	1,75	2,17
	VA-4	4	161,43	*	*
	VA-5	5	162,28	*	*

Área da armadura positiva das vigas VA: $A_s = 5,03 \text{ cm}^2$

* - os valores registrados nos dois extensômetros não foram coerentes

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que todas as vigas desse grupo apresentaram deformações últimas no concreto com valores menores à máxima admitida para os domínios 3 e 4, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2007), que é igual a 3,5%. Nenhum esmagamento do concreto na região comprimida no meio do vão das vigas foi observado.

A deformação última no concreto na viga de referência apresentou um valor 18,52% e 3,23% maior que os das vigas com duas e três camadas de fibra, respectivamente.

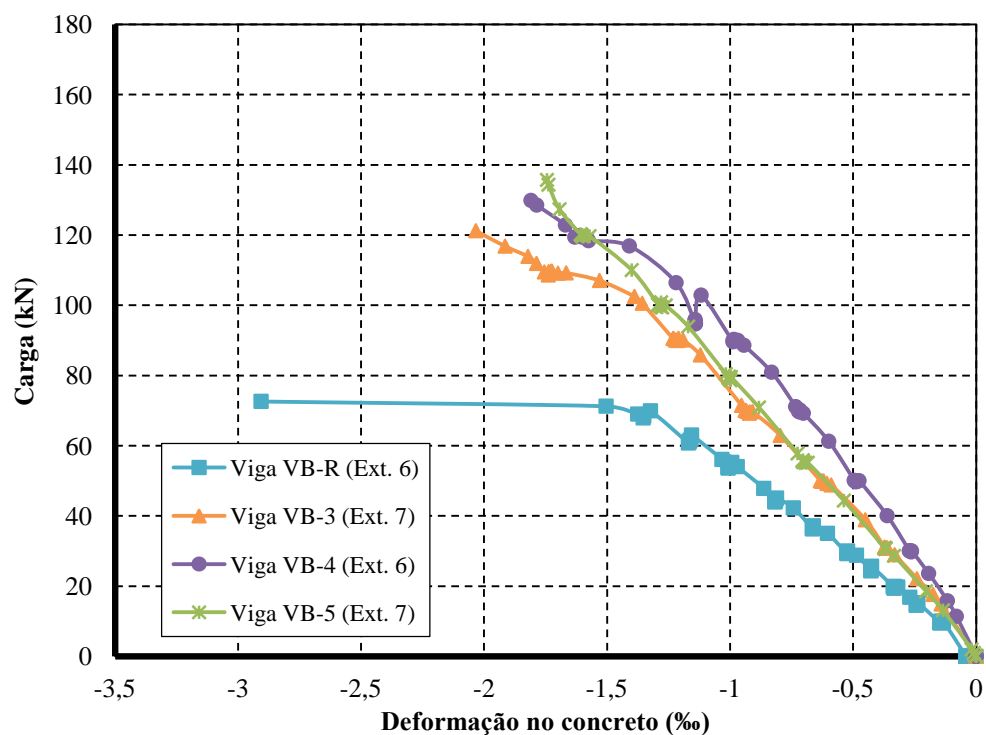
Esse resultado é coerente, uma vez que segundo Ferrari (2007), o reforço colabora no sentido de reduzir tensões e conseqüentemente deformações específicas no concreto comprimido.

Para uma carga de 139,07 kN, as vigas reforçadas apresentaram também maior rigidez que a viga de referência.

4.1.8.2 Deformações no concreto comprimido das vigas subarmadas (VB)

Na Figura 121 são apresentadas as curvas carga-deformação específica no concreto comprimido das vigas do grupo VB. Os valores das deformações obtidos nos extensômetros para a viga VB-2 não foram coerentes e, portanto foram desconsiderados nos resultados.

Figura 121 - Curvas carga-deformação no concreto no meio do vão das vigas VB



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 39 são apresentados os valores das deformações últimas obtidas no concreto comprimido das vigas do grupo VB, das deformações obtidas nas vigas reforçadas na carga última da viga de referência (72,63 kN) e as cargas últimas experimentais (P_e). Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação no reforço (Figura 121).

Tabela 39 - Deformações no concreto comprimido das vigas VB

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_e (kN)	Deformação no concreto na carga de 72,63 kN (%)	Deformação última no concreto (%)
VB	VB-R	sem reforço	72,63	2,91	2,91
	VB-2	2	112,67	*	*
	VB-3	3	121,23	0,96	2,03
	VB-4	4	129,86	0,74	1,81
	VB-5	5	135,69	0,90	1,74

Área da armadura positiva das vigas VB: $A_s = 2,45 \text{ cm}^2$

* - os valores registrados nos dois extensômetros não foram coerentes

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que todas as vigas desse grupo apresentaram deformações últimas no concreto com valores menores à máxima admitida para os domínios 3 e 4, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2007), que é igual a 3,5%.

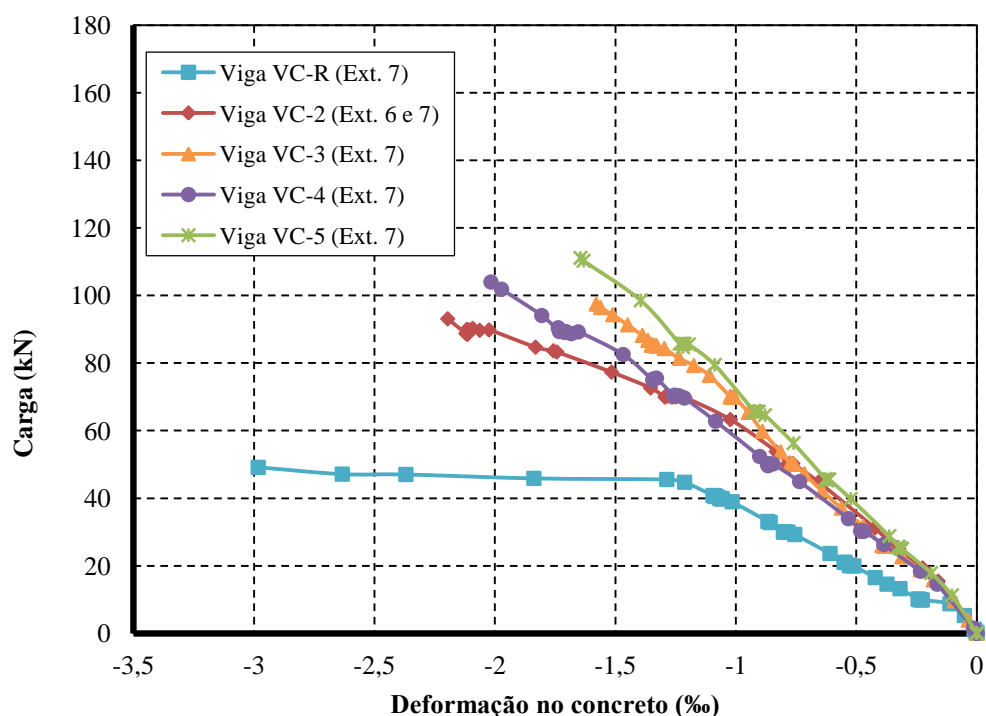
Observa-se que a deformação última no concreto na viga de referência apresentou um valor 43,35%, 60,77% e 67,24% maior que nas vigas com três, quatro e cinco camadas de fibra, respectivamente. A viga com duas camadas de fibra não apresentou um valor esperado de deformação no concreto, com uma deformação maior que a da viga VB-R. De acordo com Beber (1999) isso se deve à limitação das deformações impostas pela ação do reforço.

Fazendo uma comparação entre as vigas reforçadas na carga de 72,63 kN, observa-se que as vigas, até essa carga, tiveram comportamento semelhante quanto às deformações no concreto, a exceção da viga com quatro camadas de fibra que apresentou deformações menores.

4.1.8.3 Deformações no concreto comprimido das vigas subarmadas (VC)

Na Figura 122 são apresentadas as curvas carga-deformação específica no concreto comprimido das vigas do grupo VC.

Figura 122 - Curvas carga-deformação no concreto no meio do vão das vigas VC



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 40 são apresentados os valores das deformações últimas obtidas no concreto comprimido das vigas do grupo VC, das deformações obtidas nas vigas reforçadas na carga última da viga de referência (49,12 kN) e as cargas últimas experimentais (P_e). Os valores foram obtidos por meio das curvas carga-deformação no reforço (Figura 122).

Tabela 40 - Deformações no concreto comprimido das vigas VC

Grupo	Viga	Camadas de fibra	P_e (kN)	Deformação no concreto na carga de 49,12 kN (‰)	Deformação última no concreto (‰)
VC	VC-R	sem reforço	49,12	2,98	2,98
	VC-2	2	93,06	0,74	2,19
	VC-3	3	97,42	0,74	1,58
	VC-4	4	103,95	0,82	2,02
	VC-5	5	111,09	0,67	1,65

Área da armadura positiva das vigas VC: $A_s = 1,57 \text{ cm}^2$

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

O comportamento das deformações específicas no concreto nas vigas do grupo VC, apresentado na Figura 122, mostra que todas as vigas desse grupo apresentaram deformações últimas no concreto com valores menores à máxima admitida para os domínios 3 e 4, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2007), que é igual a 3,5‰.

Fazendo uma comparação entre as deformações específicas no concreto das vigas reforçadas, também se observa para este grupo de vigas uma contribuição da presença do reforço no ganho de rigidez dessas vigas, o que, segundo Beber (2003), conduz, também, a significativas reduções nas deformações e, conseqüentemente, tensões impostas ao concreto.

Na Tabela 40 observa-se que a deformação última no concreto na viga de referência apresentou um valor 36,07%, 88,61%, 47,52% e 80,61% maior que nas vigas com duas, três, quatro e cinco camadas de fibra, respectivamente.

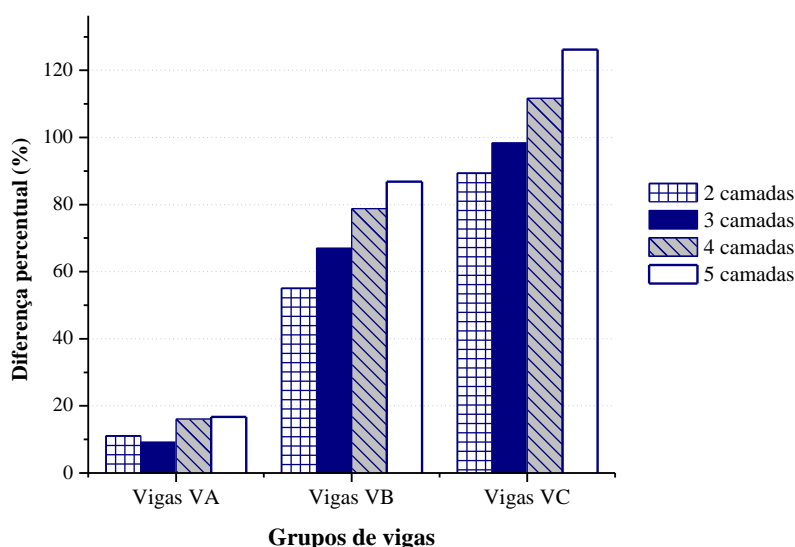
Também, na carga de 49,12 kN, as vigas reforçadas apresentam um redução significativa nas deformações específicas no concreto, em relação à viga de referência e um comportamento semelhante quando comparadas entre si.

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.2.1 Comparativo das cargas últimas entre os grupos de vigas

Na Figura 123 são apresentadas as diferenças percentuais entre as cargas últimas experimentais de todas as vigas reforçadas em relação à carga última da viga de referência de cada grupo.

Figura 123 - Diferença percentual das cargas últimas de todas as vigas reforçadas



Fonte: Elaborada pela autora.

Pela Figura 123, observa-se que as vigas do grupo VA apresentaram o menor desempenho em relação à presença do reforço para um ganho de capacidade resistente entre todos os grupos de vigas ensaiados. Esse resultado pode ser explicado devido à maior taxa de armadura positiva desse grupo (VA - normalmente armada) o que limita uma maior contribuição do reforço para o aumento da capacidade resistente.

As vigas do grupo VB apresentaram um aumento de capacidade de carga com o reforço maior que as vigas do grupo VA, porém, menor que as vigas do grupo VC. Isso se explica porque nesse grupo de vigas, que são vigas subarmadas e com duas barras de diâmetro de 12,5 mm na armadura positiva, a taxa de armadura é menor que a das vigas do grupo VA, porém, maior que a das vigas do grupo VC. Assim observa-se que o aproveitamento do reforço no ganho de capacidade resistente, também aqui fica um pouco limitado pela taxa de armadura.

As vigas do grupo VC, que são vigas subarmadas, mas com duas barras de diâmetro de 10 mm na armadura positiva, apresentaram o melhor desempenho entre todos os grupos de vigas em relação ao aumento da capacidade resistente com a presença do reforço. Uma vez que a força de tração na armadura é pequena, a fibra de carbono pode absorver uma parcela maior da força resultante de tração. A partir dos resultados desse grupo de vigas, pode-se observar que, uma vez que essas vigas possuem uma taxa de armadura baixa, o reforço pode ter uma atuação mais efetiva, proporcionando um ganho significativo de capacidade de carga.

Vale salientar que, em todos os grupos de vigas ensaiados, esse aumento poderia ser ainda maior se as vigas reforçadas, a exceção da viga normalmente armada e reforçada com duas camadas de fibra (VA-2), não tivessem apresentado o modo de ruína prematuro.

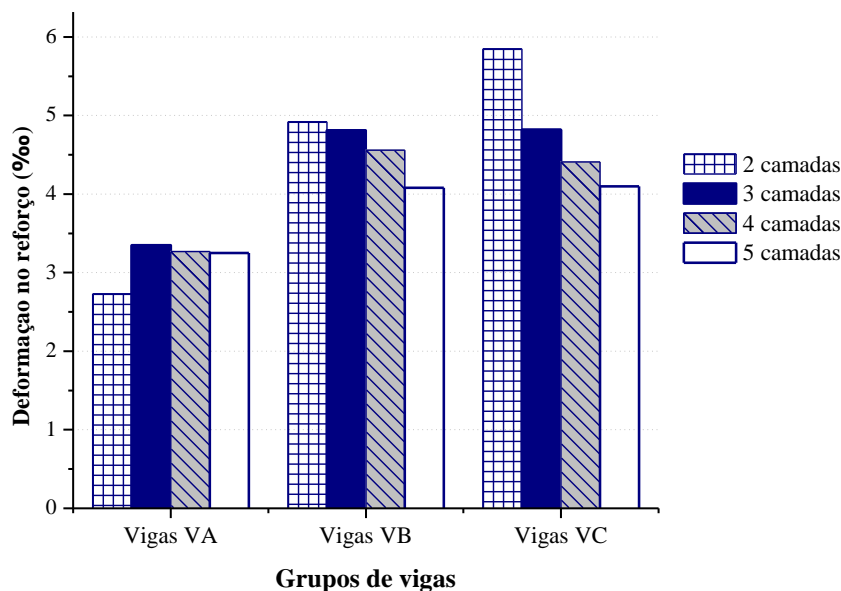
Os resultados obtidos nos ensaios também mostram que para todos os grupos de vigas ensaiadas, o ganho maior de capacidade resistente das vigas em relação ao número de camadas de fibra, foi das vigas reforçadas com duas camadas de fibra. Acima de duas camadas de fibra, o aumento do número de camadas de fibra não proporciona um aumento expressivo na capacidade de carga.

4.2.2 Comparativo das deformações no reforço entre grupos de vigas

Para uma análise do comportamento do reforço, na Figura 124 são apresentados os valores das deformações no reforço, nos três grupos de vigas. Os valores são referentes às

deformações no reforço para 90% da carga última, uma vez que alguns extensômetros não funcionaram até a carga última registrada.

Figura 124 - Deformações no reforço até 90% da carga última de cada viga



Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a Figura 124, observa-se que, a semelhança do que ocorreu com o ganho de capacidade resistente com a presença do reforço, as vigas do grupo VA tiveram o menor aproveitamento do reforço entre os demais grupos de vigas. Nas vigas dos grupos VB e VC, pode-se observar um melhor aproveitamento do reforço que nas vigas do grupo VA.

A viga reforçada com duas camadas de fibra do grupo VB foi a que apresentou o melhor desempenho com uma maior deformação do reforço e por isso também, um maior ganho de capacidade de carga que as demais vigas desse grupo. As vigas do grupo VC apresentaram o melhor aproveitamento do reforço entre todas as vigas ensaiadas, especialmente na viga reforçada com duas camadas de fibra. Observa-se mais uma vez com os resultados das vigas ensaiadas, que o aproveitamento do reforço está diretamente relacionado com a taxa de armadura das vigas, com as quais o reforço divide as tensões de tração e, portanto quanto maior a taxa de armadura, menor a contribuição do reforço.

Excluindo as vigas do grupo VA em função da maior área de aço e fazendo uma comparação entre as deformações no reforço das vigas dos grupos VB e VC, onde é possível perceber uma maior atuação do reforço após o escoamento da armadura, vale ressaltar que a partir de duas camadas de fibra no reforço à flexão, o aproveitamento do reforço vai diminuindo à medida que o número de camadas de fibra vai aumentando. Esse fato também

foi observado no trabalho de Beber (2003), onde o valor da deformação última decresce com o aumento do número de camadas de fibra utilizadas no reforço à flexão das vigas ensaiadas.

Vale salientar que o modo de ruína prematuro de todas as vigas, à exceção da viga VA-2, não permitiu obter um maior aproveitamento do PRFC como reforço das vigas e, portanto maiores deformações.

4.2.3 Comparativo entre os resultados experimentais e analíticos

4.2.3.1 Cargas últimas

Na Tabela 41 são apresentadas as comparações entre as cargas últimas experimentais (P_e) e as cargas de projeto últimas características (P_a) obtidas por rotina computacional desenvolvida no programa MAPLE (projeto global), com base nas recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2007).

Para a estimativa realizada pela norma, foram utilizados os resultados experimentais do concreto e do aço, bem como as propriedades do PRFC especificadas pelo fabricante.

Tabela 41 - Valores analíticos e experimentais das cargas últimas

Grupo	Viga	A_s (cm ²)	A_f (cm ²)	Cargas últimas (kN)		Diferença
				Analítica	Experimental	percentual
				P_a	P_e	P_e / P_a
VA	VA-R	5,03	0,00	112,18	139,07	23,97
	VA-2		0,332	142,93	154,54	8,12
	VA-3		0,498	150,18	151,74	1,04
	VA-4		0,664	156,65	161,43	3,05
	VA-5		0,830	167,90	162,28	-3,35
VB	VB-R	2,45	0,00	64,98	72,63	11,77
	VB-2		0,332	111,55	112,67	1,01
	VB-3		0,498	127,90	121,23	-5,22
	VB-4		0,664	135,33	129,86	-4,04
	VB-5		0,830	146,20	135,69	-7,19
VC	VC-R	1,57	0,00	41,97	49,12	17,03
	VC-2		0,332	92,18	93,06	0,95
	VC-3		0,498	116,80	97,42	-16,60
	VC-4		0,664	124,75	103,95	-16,67
	VC-5		0,830	134,80	111,09	-17,59

A_s - área de armadura longitudinal positiva

A_f - área de fibra de carbono

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos resultados apresentados na Tabela 41, observa-se que as cargas últimas experimentais das vigas do grupo VA, a exceção da viga VA-5, foram maiores que as cargas últimas analíticas. A maior distorção foi observada para a viga de referência, com 23,97% de diferença, enquanto que para as vigas reforçadas a diferença percentual teve o menor valor na viga VA-3 igual a 1,04%.

Nas vigas do grupo VB, as cargas últimas experimentais foram maiores que as cargas últimas analíticas nas vigas VB-R e VB-2 com diferenças percentuais de 11,77% e 1,01% para as vigas VB-R e VB-2, respectivamente. Em relação às vigas VB-3, VB-4 e VB-5, os valores experimentais foram menores que os valores obtidos analiticamente, o que compromete a segurança. A diferença percentual variou entre 4,04% e 7,19%. Esse fato provavelmente pode ser explicado pelo tipo de ruína prematuro nessas vigas reforçadas.

Já nas vigas do grupo VC, as vigas VC-R e VC-2 apresentaram valores de cargas últimas experimentais maiores que os valores analíticos. A diferença percentual entre esses valores foi de 17,03% e 0,95% para as vigas VC-R e VC-2, respectivamente. Nas vigas VC-3, VC-4 e VC-5, os valores experimentais foram menores que os valores analíticos, apresentando uma diferença percentual variando entre 16,60% e 17,59%.

4.2.3.2 Deformações últimas no reforço

Tendo em vista que as vigas reforçadas, a exceção da viga VA-2, tiveram ruína prematura, faz-se nesse item um comparativo entre os valores das deformações últimas experimentais no reforço e alguns valores de deformações últimas no reforço, estimados por meio de três modelos analíticos, que visam prever o instante da ruína prematura.

Na Tabela 42 são comparados os valores das deformações últimas no reforço (ϵ_{r-exp}), obtidos por meio dos ensaios das vigas reforçadas, comparados com valores analíticos obtidos por meio dos modelos de Chen e Teng (2001), do ACI 440.2R (2002) e de Beber (2003), aqui denominados $\epsilon_{r-anal1}$, $\epsilon_{r-anal2}$ e $\epsilon_{r-anal3}$, respectivamente, e apresentados nos itens 2.5.7.1, 2.5.7.2 e 2.5.7.3. do capítulo 2, respectivamente.

Tabela 42 - Valores analíticos e experimentais das deformações últimas no reforço

Grupos de vigas	Vigas	P _e (kN)	Valores das deformações últimas no reforço			
			Experimental	Analíticos		
			ϵ_r -exp	ϵ_r -anal1	ϵ_r -anal2	ϵ_r -anal3
VA	VA-2	154,54	3,57	8,06	13,13	7,11
	VA-3	151,74	4,35	6,50	11,36	5,99
	VA-4	161,43	4,03	5,59	9,60	5,32
	VA-5	162,28	3,83	5,08	7,86	4,84
VB	VB-2	112,67	5,90*	7,91	13,13	7,11
	VB-3	121,23	4,89*	6,53	11,36	5,99
	VB-4	129,86	6,29*	5,58	9,60	5,32
	VB-5	135,69	5,24	5,02	7,86	4,84
VC	VC-2	93,06	5,97*	8,06	13,13	7,11
	VC-3	97,42	5,80*	6,58	11,36	5,99
	VC-4	103,95	5,24	5,55	9,60	5,32
	VC-5	111,09	5,19	4,97	7,86	4,84

* - registro antes da carga última experimental

P_e - carga última experimental

Fonte: Elaborada pela autora.

Os modelos analíticos propostos, na sua maioria apresentaram pouca proximidade com os valores das deformações últimas obtidas nos ensaios. O modelo proposto pelo ACI 440.2R (2002), apresentou valores muito superiores aos valores verificados experimentalmente e pelos outros modelos analíticos. De acordo com Ferrari (2007), a formulação do ACI 440.2R (2002), não penaliza adequadamente a deformação máxima a ser admitida para o reforço quando da aplicação de mais de uma camada de manta.

As deformações experimentais no reforço das vigas do grupo VA que tiveram o modo de ruína prematura (VA-3, VA-4 e VA-5), apresentaram a maior divergência em relação aos valores estimados pelos três modelos analíticos.

No grupo de vigas VB, a viga reforçada com cinco camadas de fibra (VB-5), teve o valor da deformação última experimental no reforço mais aproximado dos modelos analíticos 1 e 3, apesar desses modelos se mostrarem contra a segurança. Em relação ao modelo proposto por Chen e Teng (2001), o valor analítico é apenas 4,38% maior que o experimental, ao passo que pelo modelo de Beber (2003), o valor analítico é 8,26% maior que o experimental.

No grupo de vigas VC, o valor experimental do reforço na viga VC-4 apresentou boa proximidade com os valores propostos pelos modelos analíticos 1 e 3, sendo esses valores

a favor da segurança. O valor experimental é 5,59% menor que o valor analítico estimado por Chen e Teng (2001) e apenas 1,50% menor que o valor proposto por Beber (2003).

Ainda no grupo VC, a viga VC-5 também apresentou o valor experimental aproximado dos valores analíticos propostos pelos modelos 1 e 3. Apesar também de serem valores contra a segurança, o valor experimental é 4,43% maior que o valor proposto pelo modelo 1 e 7,23% maior que o estimado pelo modelo 3.

A título de comparação, a Tabela 43 apresenta a comparação de duas vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e a viga VC-4 deste trabalho, que apresentaram na ruína prematura, valores semelhantes das deformações últimas no reforço. As duas vigas referidas são a viga V7_B, ensaiada por Beber (2003) e a viga V1C ensaiada por Ferrari (2007). Também são mostrados os valores das respectivas deformações estimadas pelos modelos analíticos 1 e 3 e algumas das características dos sistemas de reforço utilizados.

Tabela 43 - Comparativo entre as deformações no reforço

Referência	Viga	Reforço	t_f (cm)	E_f (kN/cm ²)	ϵ_r -exp (‰)	ϵ_r -anal1 (‰)	ϵ_r -anal3 (‰)
Beber (2003)	V7_B	4 camadas	0,0704	24.000	5,26	4,53	4,88
Ferrari (2007)	V1C	3 camadas	0,0498	23.400	5,30	5,50	5,85
Atual (2014)	VC-4	4 camadas	0,0664	23.000	5,24	5,55	5,32

t_f - espessura do reforço

E_f - módulo de elasticidade do reforço

Fonte: Elaborada pela autora.

Esses resultados mostram que as deformações últimas registradas nos três trabalhos tiveram valores bem aproximados pelos modelos analíticos de Chen e Teng (2001) e de Beber (2003) e que a presença da ruína prematura nas vigas reforçadas limita um maior aproveitamento das propriedades do reforço.

4.2.4 Comparação com outras vigas reforçadas

Nesse item analisam-se alguns dos resultados experimentais de vigas dos grupos VB e VC desse trabalho, fazendo uma comparação com os resultados experimentais de vigas reforçadas por outros dois autores, que utilizaram a mesma técnica de reforço em algumas das suas vigas ensaiadas, sendo eles: Beber (2003) e Ferrari (2007). Os detalhes dos trabalhos realizados pelos dois autores estão apresentados no item 2.6.1 do capítulo 2.

As características geométricas das vigas e as propriedades mecânicas dos materiais das vigas reforçadas que serão utilizadas para a comparação são apresentadas na Tabela 44.

Tabela 44 - Características das vigas de Beber (2003) e de Ferrari (2007)

Referência	Viga	Geometria			Armadura				Concreto			Reforço						
		b (cm)	h (cm)	vão (cm)	A _s (cm ²)	A _s ' (cm ²)	f _y (MPa)	f _y ' (MPa)	f _c (MPa)	f _{ct} (MPa)	E _c (GPa)	camadas	A _f (cm ²)	E _f (GPa)	ε _f (%)	b _f (cm)	L _f (cm)	tipo de reforço
Beber (2003)	V1*	15	30	253	2,45	0,62	706,50	587,05	32,8	2,90	-	-	-	-	-	-	-	sem reforço
	V4_B											1	0,1665	230	14,80	15,00	238	Replark 20
	V5_B											6	0,9990	230	14,80	15,00		Replark 20
	V6_B											1	0,1672	240	15,80	9,50		C-240 sheet
	V7_B											4	0,9990	240	15,80	14,19		C-240 sheet
Ferrari (2007)	V1A	17	35	320	2,45	0,62	547,99	540,94	37,8	3,17	30,03	-	-	-	-	-		-
V1B	3											0,8670	372	4,08	17,00	280	Sistema R1	
V3B	1						0,2890	372	4,08	Sistema R1								
V1C	3						0,8466	234	13,13	SikaWrap- 300C								
							532,44	571,94	34,0	2,54	26,55							

* - referente aos valores das duas vigas de referência V1_A e V1_B

b- largura da viga

h-altura da viga

A_s - área da armadura positiva

A_s' - área da armadura negativa

f_y - tensão de escoamento da armadura positiva

f_y' - tensão de escoamento da armadura negativa

f_c - resistência à compressão do concreto

f_{ct} - resistência à tração do concreto

E_c - módulo de elasticidade do concreto

A_f - área de fibra de carbono

E_f - módulo de elasticidade da fibra de carbono

ε_f - deformação específica na ruptura da fibra de carbono

b_f - largura da fibra de carbono

L_f - comprimento da fibra de carbono

Fonte: Beber (2003) e Ferrari (2007).

A ruína das vigas V4_B e V6_B, reforçadas com uma camada de fibra de carbono cada uma, segundo Beber (2003), apresentaram modo de ruína por fissuração excessiva de flexão. De acordo com o autor, esse quadro está associado, principalmente, a maior ductibilidade que essas vigas apresentaram, em função da pequena espessura da manta de carbono.

A viga V5_B, de acordo com Beber (2003), apresentou ruína por arrancamento do concreto junto à armadura longitudinal, ou seja, o concreto de cobrimento. Ainda segundo o autor, como os adesivos utilizados nos sistemas de reforço apresentam uma resistência à tração muito maior que a do concreto, este acaba tornando-se o elemento frágil nesta ligação e, conseqüentemente aquele que desencadeará o processo de ruptura.

A viga V7_B, reforçada com quatro camadas de fibra de carbono, segundo Beber (2003), apresentou ruína por descolamento na interface concreto/reforço e teve sua origem a partir do meio do vão. De acordo com o autor, esse modo de ruptura está associado ao processo de transferência de tensões junto às fissuras.

As vigas V1B e V3B, reforçadas com três e com uma camada de fibra respectivamente, segundo Ferrari (2007), apresentaram ruína por ruptura do reforço. Esse modo de ruptura, de acordo com o autor, foi inesperado e ocorreu devido à baixa resistência do reforço.

A viga V1C, reforçada com três camadas de fibra que possuíam características mais resistentes que as fibras de carbono das vigas do grupo B, de acordo com Ferrari (2007), apresentou ruína por desprendimento do reforço juntamente com toda a camada de concreto do cobrimento da armadura. Ainda segundo o autor, a fissura que deu origem ao desprendimento uniu-se a outras fissuras e desencadeou um processo de ruptura da camada de concreto junto à armadura longitudinal.

As vigas V2-B, V5-B, V2-C e V5-C, ensaiadas nesse trabalho, apresentaram ruína prematura por arrancamento do concreto de cobrimento. Esse modo de ruína nas vigas também iniciou com o surgimento de fissuras nas extremidades do reforço e com o aumento da aplicação da carga, culminou no arrancamento do concreto de cobrimento.

Apesar da peculiaridade de cada uma dessas vigas, observa-se que o modo de ruína por arrancamento do cobrimento de concreto é comum nas vigas reforçadas com essa técnica.

Para ser possível uma comparação entre vigas que possuem geometria e taxa de reforço diferentes, optou-se por utilizar a Equação 9, sugerida por Fortes (2004) para o cálculo da taxa equivalente (aço + fibra de carbono). De acordo com o autor, foi observado

em seu trabalho que quanto maior a taxa equivalente definida, a partir do conceito da seção homogeneizada, maior é a carga de ruptura da viga reforçada.

$$\rho_{eq} = \left(\frac{A_s}{b \cdot d_s} \right) + \left(A_f \cdot \frac{\frac{E_f}{E_s}}{b \cdot d_f} \right) \quad (9)$$

Onde:

A_s = área de aço;

b = largura da viga;

d_s = altura útil da viga a partir do centro de gravidade da barra de aço;

A_f = área de fibra de carbono;

d_f = altura útil da viga a partir do centro de gravidade do reforço;

E_f = módulo de elasticidade do reforço;

E_s = módulo de elasticidade do aço.

Na Tabela 45 são apresentados os valores das cargas últimas e taxas equivalentes das vigas reforçadas comparadas.

Tabela 45 - Cargas últimas e taxas equivalentes das vigas

Referência	Viga	Reforço (camadas)	Carga última (kN)	Aumento de carga (%)	Taxa equivalente
Beber (2003)	V1*	sem reforço	103,68	-	-
	V4_B	1	130,05	25,40	0,64
	V5_B	6	170,39	64,30	0,84
	V6_B	1	118,50	14,30	0,84
	V7_B	4	154,79	49,30	0,85
Ferrari (2007)	V1A	sem reforço	89,27	-	-
	V1B	3	143,93	61,20	0,71
	V3B	1	111,40	24,80	0,54
Atual (2014)	VB-R	sem reforço	72,63	-	-
	VB-2	2	112,67	55,14	1,10
	VB-5	5	135,69	86,83	1,29
	VC-R	sem reforço	49,12	-	-
	VC-2	2	93,06	89,46	0,76
	VC-5	5	111,09	126,18	0,97

* - valor médio entre as duas vigas de referência V1_A e V1_B

Fonte: Elaborada pela autora.

Em comparação com a viga de referência, Beber (2003) obteve um aumento de carga de 64,30% para a viga V5_B e de 49,30% para a viga V7_B. Ferrari (2007) obteve um aumento de carga igual a 61,20% para a viga V1B em relação à viga V1.

O trabalho atual apresentou aumento de carga de 55,14% e 86,83% para as vigas VB-2 e VB-5, respectivamente, e para as vigas VC-2 e VC-5 esse aumento de carga foi de 89,46% e 126,18%, respectivamente, em relação às vigas de referência de cada grupo.

Entre os trabalhos comparados, observa-se que a viga VC-5, reforçada com cinco camadas de fibra, apresentou um bom desempenho do reforço com aumento da capacidade resistente de quase o dobro do valor em termos percentuais em relação ao aumento dessa capacidade na viga V5_B, reforçada com seis camadas de fibra e com uma taxa equivalente 13,4% menor do que a da viga VC-5.

Para a análise da rigidez entre as vigas comparadas, os deslocamentos verticais últimos obtidos no meio do vão das vigas são apresentados na Tabela 46. Como as vigas possuem vãos diferentes, optou-se por utilizar o fator l/δ para servir de parâmetro de comparação.

Tabela 46 - Deslocamento vertical das vigas comparadas

Referência	Viga	Reforço (camadas)	Deslocamento vertical último (mm)	l/δ (cm)	Aumento de carga (%)	Taxa equivalente
Beber * (2003)	V4_B	1	36,00	1/70	25,40	0,64
	V5_B	6	19,00	1/133	64,30	0,84
	V6_B	1	27,00	1/94	14,30	0,64
	V7_B	4	20,50	1/123	49,30	0,85
Ferrari * (2007)	V1B	3	25,00	1/128	61,20	0,71
	V3B	1	22,50	1/142	24,80	0,54
Atual (2014)	VB-2	2	35,15	1/68	55,14	1,11
	VB-5	5	32,40	1/74	86,83	1,29
	VC-2	2	37,62	1/64	89,46	0,76
	VC-5	5	27,84	1/86	126,18	0,97

* valores aproximados retirados dos gráficos do trabalho

l/δ - comprimento do vão / deslocamento vertical no meio do vão

Fonte: Elaborada pela autora.

Da análise dos resultados da Tabela 46, observa-se que no trabalho de Beber (2003), comparando-se as vigas V4_B e V5_B, que utilizaram o mesmo sistema de reforço (manta pré-impregnada de fibra de carbono *Replark 20*), com o aumento da taxa equivalente,

a viga V5-B, apresentou uma redução de 47,22% dos deslocamentos verticais na carga última em relação à viga V4_B, enquanto que na comparação das vigas V6_B e V7_B, reforçadas com o mesmo sistema (tecido de fibra de carbono C-240 *sheet*), com aumento da taxa equivalente bem semelhante às vigas anteriores, a viga V7-B apresentou uma redução dos deslocamentos verticais na carga última de 24,07% em relação à viga V6_B.

No trabalho de Ferrari (2007), observa-se que o aumento da taxa equivalente aumentou consideravelmente a carga resistida na viga V1B quase sem variação nos deslocamentos verticais em relação à viga V3B.

No trabalho atual as vigas VC apresentaram, com o aumento da taxa equivalente, além de uma maior capacidade resistente, uma maior rigidez, com uma redução de 26% dos deslocamentos verticais na carga última da viga reforçada com cinco camadas de fibra (VC-5) em relação à viga com duas camadas de fibra (VC-2).

Em todos os trabalhos observa-se que a presença do reforço contribui consideravelmente para um ganho de rigidez das vigas.

Para uma análise das deformações últimas no reforço entre as vigas ensaiadas, a Tabela 47 apresenta os seguintes valores:

Tabela 47 - Deformação no reforço das vigas ensaiadas

Referência	Viga	Reforço (camadas)	Deformação última no reforço (%)
Beber (2003)	V4_B	1	10,33
	V5_B	6	4,52
	V6_B	1	10,06
	V7_B	4	5,25
Ferrari (2007)	V1B	3	2,68
	V3B	1	5,35
Atual (2014)	VB-2	2	5,90*
	VB-5	5	5,24
	VC-2	2	5,97*
	VC-5	5	5,19

* - valor registrado antes da carga última

Fonte: Elaborada pela autora.

Da análise dos resultados (Tabela 47) observa-se que nas vigas ensaiadas por Beber (2003), o aumento do número de camadas de fibra ocasionou uma diminuição nas

deformações últimas do reforço de 56,24% na viga V5_B em relação às da viga V4_B e de 47,81% da viga V7_B em relação às da viga V6_B.

Nas vigas ensaiadas por Ferrari (2007), a viga reforçada com três camadas de fibra (V1B) de carbono obteve uma deformação última no reforço 49,91% menor que na viga reforçada com uma camada de fibra (V3B).

No trabalho atual também houve uma redução das deformações últimas no reforço com o aumento do número de camadas de fibra. Na viga VB-5 essa redução foi de 11,19% em relação à da viga VB-2, enquanto que na viga VC-5 a redução foi de 13,07% em relação à da viga VC-2.

O que se pode observar em todos os trabalhos comparados é que, com o aumento do número de camadas de fibra de carbono nos sistemas de reforço, as deformações últimas no reforço são menores, mostrando uma redução no aproveitamento do sistema. De acordo com Arquez (2010), ao se utilizar camadas de manta, o aproveitamento do reforço não é total, diminuindo conforme se aumenta a quantidade de camadas.

4.2.5 Análise de custo dos sistemas PRFC

Na Tabela 48 estão apresentados os custos dos materiais utilizados nos sistemas de reforço das vigas dos grupos VA, VB e VC, que receberam de duas a cinco camadas de PRFC. A esses custos ainda devem ser somados os custos de preparação do substrato de concreto, da aplicação dos sistemas de reforço, dos impostos e das perdas.

Tabela 48 - Custos unitários e totais dos sistemas de reforço das vigas

Sistema de PRFC	Componentes do sistema	Quantidade utilizada*	Custo unitário por componente	Custo total por componente
2 camadas	<i>Primer</i>	0,07 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 3,50
	Resina de regularização	0,12 kg	R\$ 35,00/kg	R\$ 4,20
	Resina saturante	0,69 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 34,50
	Fibra de carbono	0,47 m ²	R\$ 100,00/m ²	R\$ 47,00
	Custo total do sistema			R\$ 89,20
3 camadas	<i>Primer</i>	0,07 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 3,50
	Resina de regularização	0,12 kg	R\$ 35,00/kg	R\$ 4,20
	Resina saturante	0,92 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 46,00
	Fibra de carbono	0,71 m ²	R\$ 100,00/m ²	R\$ 71,00
	Custo total do sistema			R\$ 124,70
4 camadas	<i>Primer</i>	0,07 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 3,50
	Resina de regularização	0,12 kg	R\$ 35,00/kg	R\$ 4,20
	Resina saturante	1,15 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 57,50
	Fibra de carbono	0,94 m ²	R\$ 100,00/m ²	R\$ 94,00
	Custo total do sistema			R\$ 159,20
5 camadas	<i>Primer</i>	0,07 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 3,50
	Resina de regularização	0,12 kg	R\$ 35,00/kg	R\$ 4,20
	Resina saturante	1,38 kg	R\$ 50,00/kg	R\$ 69,00
	Fibra de carbono	1,18 m ²	R\$ 100,00/m ²	R\$ 118,00
	Custo total do sistema			R\$ 194,70

* consumos estimados pelo fabricante

Fonte: Elaborada pela autora.

Da análise do custo dos materiais do sistema de reforço com PRFC (Tabela 48), observa-se que o maior custo é o da fibra de carbono. Em seguida vem o custo da resina saturante que é bem relevante. No sistema com duas camadas de fibra, o custo da resina saturante equivale a 73,4% do custo da fibra de carbono. Nos sistemas com três, quatro e cinco camadas de fibra, esses custos equivalem a 64,8%, 61,2% e 58,5% do custo da fibra de carbono, respectivamente.

O custo dos materiais do sistema de reforço com cinco camadas é maior que o dobro (218,3%) do custo do sistema com duas camadas de fibra. Ainda em relação ao custo dos materiais do sistema com duas camadas de fibra, o aumento do número de camadas para três e quatro camadas, aumenta esse custo em 39,8% e 78,5%, respectivamente. Vale lembrar que o custo do preparo do substrato de concreto é o mesmo para qualquer um dos sistemas

utilizados neste trabalho e que os materiais comprados em maior quantidade podem acarretar em custos menores.

Na Tabela 49 são apresentadas as relações custo-capacidade de carga e custo-aumento da capacidade de carga para as vigas reforçadas.

Tabela 49 - Relações custo-capacidade de carga e custo-aumento da capacidade de carga para as vigas

Grupo	Viga	Custo do reforço (R\$)	Capacidade de carga (kN)	Aumento na capacidade de carga	Relação custo/capacidade de carga (R\$/kN)	Relação custo/aumento da capacidade de carga (R\$/kN)
VA	VA-2	89,20	154,54	1,11	0,58	0,80
	VA-3	124,70	151,74	1,09	0,82	1,14
	VA-4	159,20	161,43	1,16	0,99	1,37
	VA-5	194,70	162,28	1,17	1,20	1,66
VB	VB-2	89,20	112,67	1,55	0,79	0,58
	VB-3	124,70	121,23	1,67	1,03	0,75
	VB-4	159,20	129,86	1,79	1,23	0,89
	VB-5	194,70	135,69	1,87	1,43	1,04
VC	VC-2	89,20	93,06	1,89	0,96	0,47
	VC-3	124,70	97,42	1,98	1,28	0,63
	VC-4	159,20	103,95	2,12	1,53	0,75
	VC-5	194,70	111,09	2,26	1,75	0,86

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com os resultados da Tabela 49, há coerência nos resultados, pois se observa que o aumento do número de camadas de fibra utilizadas no compósito de reforço, aumenta a relação custo *versus* capacidade de carga. Ainda da análise desses resultados, observa-se que o aumento do número de camadas de fibras de carbono utilizadas no compósito de reforço, aumenta a relação custo *versus* aumento da capacidade de carga das vigas.

Em todas as vigas reforçadas têm-se a menor relação custo *versus* aumento da capacidade de carga nas vigas com duas camadas de fibra, ou seja, economicamente o ideal é que o acréscimo de carga pretendido seja até com duas camadas de fibra.

Nas vigas do grupo VA, em relação à viga reforçada com duas camadas de fibra, o aumento do número de camadas para três, quatro e cinco, aumenta a relação custo *versus* aumento da capacidade de carga em 42,50%, 71,25% e 107,50%, respectivamente. Já nas vigas do grupo VB, em relação à viga reforçada com duas camadas de fibra, o aumento do

número de camadas para três, quatro e cinco, aumenta a relação custo *versus* aumento da capacidade de carga em 29,31%, 53,45% e 79,31%, respectivamente. Por fim, nas vigas do grupo VC, em relação à viga reforçada com duas camadas de fibra, o aumento do número de camadas para três, quatro e cinco, aumenta a relação custo *versus* aumento da capacidade de carga em 34,04%, 59,57% e 82,98%, respectivamente. Assim, do ponto de vista econômico, as vigas do grupo VC (subarmadas com menor taxa de armadura) são as mais vantajosas, apresentando a menor relação custo *versus* aumento da capacidade de carga e a viga VC-2 (reforçada com duas camadas de fibra) é a que apresenta a menor relação custo-aumento da capacidade resistente entre todas as vigas reforçadas. Este resultado é coerente com Garcez (2007), que afirma que sob o ponto de vista econômico, o uso de várias camadas de reforço não é aconselhável, enquanto sob o ponto de vista técnico, tal uso parece ser benéfico.

Observa-se que o reforço com o maior custo não necessariamente é o que trará maiores benefícios em termos de capacidade de carga para a estrutura reforçada. Cada necessidade de reforço estrutural apresenta características próprias e os resultados aqui apresentados deixam evidente que o estudo dos sistemas de reforço é útil para que se tenham soluções adequadas para situações distintas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse item são apresentadas algumas das conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Ao longo desse trabalho, verificou-se o excelente desempenho diferenciado das vigas reforçadas com PRFC para os três grupos avaliados. Abaixo se encontram as principais conclusões do trabalho em relação aos itens avaliados.

- Quanto aos modos de ruína

Em relação ao modo de ruptura, observou-se que as vigas de referência (sem reforço), de cada grupo de viga, apresentaram ruína do modo clássico, predominantemente por flexão, à exceção da viga de seção normalmente armada, que teve ruína por tração perpendicular à biela comprimida de concreto.

Nas vigas reforçadas, o modo de ruína foi prematuro por arrancamento do cobrimento de concreto, em praticamente todas as vigas, à exceção da viga normalmente armada e reforçada com duas camadas de fibra (VA-2), que teve ruína por tração perpendicular à biela comprimida de concreto. Esse modo de ruína prematuro está associado ao mecanismo de transferência de esforço entre o concreto e o reforço, com ruptura associada a tensões tangenciais e de tração e a falha se origina a partir de uma fissura inclinada próxima a uma das extremidades do reforço que se propaga horizontalmente e provoca, a medida da aplicação da carga, o arrancamento do cobrimento de concreto ao longo da armadura longitudinal interna.

- Quanto às cargas últimas experimentais

Constatou-se o excelente desempenho do PRFC para o reforço à flexão em vigas de concreto armado. A capacidade resistente das vigas reforçadas foi aumentada em todos os casos, em relação às vigas de referência de cada grupo, tendo atingido o valor máximo em todos os grupos para as vigas reforçadas com cinco camadas. Os valores dos acréscimos

foram 16,69%, 86,83% e 126,18% para as vigas do grupo VA, do grupo VB e do grupo VC, respectivamente.

O grupo VC, que tinha a menor taxa de armadura, apresentou o melhor desempenho do reforço para o aumento da capacidade resistente levando a concluir que o reforço possui melhor desempenho em vigas com taxas de armadura menores.

O aumento da área de fibra por meio da utilização de várias camadas de reforço nas vigas da pesquisa não significou um aumento da capacidade resistente das vigas na mesma proporção. Com os resultados experimentais foi constatado que a maior parcela de aumento da capacidade resistente, em todos os grupos de vigas ensaiados, acontece no reforço com duas camadas de fibra.

Em relação aos valores das cargas últimas experimentais, quando comparadas com os valores analíticos estimados, observou-se entre as vigas de referência uma maior distorção na viga do grupo VA (normalmente armada), já quando comparados para as vigas reforçadas, os valores de cargas apresentam diferenças percentuais, uma vez que o modelo analítico utilizado não considera os modos de falha prematuros.

– Quanto à fissuração

Em todos os grupos de vigas ensaiados ficou evidente que a presença do reforço à flexão com PRFC nas vigas contribuiu para o controle e limitação da propagação da fissuração no concreto. Em relação à extensão das fissuras, essas ocorreram nas vigas reforçadas sob cargas maiores que nas vigas de referência.

– Quanto aos deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais de uma viga dependem do carregamento, do vão, da geometria, da seção e das propriedades dos materiais, mas a partir dos resultados experimentais comprovou-se que a presença do reforço de PRFC, muito embora o aumento da área da seção transversal seja mínimo, contribuiu para o aumento da rigidez das vigas reforçadas, o que foi evidenciado em todos os grupos de vigas, especialmente no grupo VC, onde a viga reforçada com cinco camadas de fibra apresentou, na carga última, uma redução no deslocamento vertical de 39,05% em relação à viga e referência, também na sua carga última.

- Quanto às cargas de escoamento e deformações nas armaduras positivas

As evidências experimentais da pesquisa confirmaram a contribuição do reforço com PRFC à flexão para o aumento da rigidez das vigas reforçadas. A ação do reforço retardando o escoamento da armadura longitudinal positiva e limitando grandes deformações plásticas na armadura das vigas, aumentou a carga de escoamento das vigas reforçadas com cinco camadas de fibra do grupo VA, do grupo VB e do grupo VC em 22,95%, 69,30% e 166,30% respectivamente, em relação à viga de referência de cada grupo.

- Quanto às deformações nas armaduras de cisalhamento

Em todos os grupos de vigas da pesquisa observou-se que as deformações na armadura de cisalhamento, no ponto instrumentado, foram menores que as deformações específicas de escoamento da armadura transversal. As deformações específicas na armadura transversal das vigas reforçadas foram maiores que as das vigas de referência de cada grupo, uma vez que estavam sob cargas maiores.

- Quanto às deformações no reforço

Em todos os grupos de vigas foi constatada uma maior deformação no reforço após o escoamento da armadura positiva. Para as vigas com duas e cinco camadas, no grupo de vigas VA o aumento da deformação do reforço após o escoamento do aço variou entre 55,22% e 11,99%, respectivamente; no grupo VB esse aumento foi de 94,08% e 83,22%, respectivamente e no grupo VC esse aumento foi de 145,68% e 77,13%, respectivamente.

Observou-se entre os grupos de vigas que as vigas dos grupos VB e VC, que têm seção subarmada, apresentaram um maior aproveitamento da fibra, sendo que as maiores deformações foram registradas nas vigas com duas camadas de fibra, e esses valores vão diminuindo à medida que o número de camadas vai aumentando.

Com a comparação dos valores das deformações últimas no reforço, estimados por meio de modelos analíticos, constatou-se que os valores experimentais das deformações últimas no reforço apresentaram uma proximidade especialmente com os modelos propostos por Chen e Teng (2001) e Beber (2003).

– Quanto às deformações no concreto comprimido

Em todos os grupos de vigas da pesquisa, observou-se que as deformações no concreto comprimido foram maiores nas vigas de referência do que nas vigas reforçadas, o que comprova a atuação do reforço na redução das tensões e conseqüentemente nas deformações do concreto comprimido. Nos grupos de vigas VB e VC, que têm seção subarmada e apresentaram um maior ganho de rigidez com a presença do reforço, as deformações no concreto comprimido nas vigas de referência desses grupos, foram 67,24% e 80,61% maior, quando comparadas com as das vigas VB-5 e VC-5 (com cinco camadas de fibra), respectivamente.

– Quanto à comparação com outras vigas reforçadas

Em relação aos modos de ruína, as vigas reforçadas dos grupos VB e VC, apresentaram ruínas semelhantes às vigas reforçadas ensaiadas por Beber (2003) e Ferrari (2007), com a predominância do modo de ruína prematuro, ocasionado pelo descolamento do reforço e/ou arrancamento do concreto de cobertura. Essas ruínas têm sua origem na concentração de tensões na interface concreto/reforço.

Quanto ao aumento da capacidade resistente das vigas com a presença do reforço, observou-se que entre as vigas comparadas, o aumento foi significativo, sendo os maiores aumentos alcançados com seis camadas de fibra (V5_B) por Beber (2003) igual a 64,3%, com três camadas de fibra (V1B) por Ferrari (2007) igual a 61,20% e com cinco camadas de fibra (VC-5) pelo trabalho Atual (2014) igual a 126,18%.

Em todos os trabalhos comparados, o ganho de rigidez das vigas aumenta consideravelmente com a presença do reforço à flexão com PRFC e quanto maior o número de camadas de fibra, maior a redução dos deslocamentos verticais medidos no meio do vão das vigas.

Observou-se entre as vigas comparadas que com o aumento do número de camadas de fibra nos sistemas de reforço, as deformações últimas no reforço são menores, o que demonstra um menor aproveitamento do reforço.

- Quanto à análise de custo

No custo dos materiais do sistema de reforço com PRFC, observou-se que o maior custo é o da fibra de carbono, seguido pelo custo da resina saturante. O custo dos materiais do sistema de reforço com cinco camadas é maior que o dobro do custo com duas camadas de fibra.

Entre os grupos de vigas ensaiados, do ponto de vista econômico, as vigas do grupo VC, com seção subarmada e com a menor taxa de armadura positiva, são as mais vantajosas, apresentando a menor relação custo *versus* aumento de capacidade resistente entre todos os grupos de vigas, sendo a viga VC-2 (com duas camadas de fibra) a que apresenta a menor relação custo-aumento da capacidade resistente entre todas as vigas reforçadas.

A proposta desse trabalho foi analisar por meio de um programa experimental o comportamento estrutural de vigas de concreto armado com taxas de armaduras distintas e reforçadas à flexão com PRFC colados externamente, sendo a área do reforço também distinta entre as vigas de cada grupo. Os resultados demonstraram que o objetivo proposto foi cumprido.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Realizar ensaios experimentais com vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC, com a utilização de mecanismos de ancoragem nas extremidades do reforço, para evitar os modos de ruína prematuros;
- Realizar uma modelagem numérica através do método dos elementos finitos para análise do comportamento do reforço das vigas ensaiadas;
- Desenvolver estudos em vigas semelhantes para avaliar o desempenho das mesmas frente a carregamentos cíclicos, comuns em estruturas de pontes e viadutos;
- Realizar ensaios em vigas semelhantes reforçadas com PRFC ao cisalhamento;

REFERÊNCIAS

AHMED, E.; SOBUZ, H. R.; SUTAN, N. M. Flexural performance of CFRP strengthened RC beams with different degrees of strengthening schemes. **International Journal of the Physical Sciences**. 2011, v. 6, n. 9, p. 2229-2238.

ALMEIDA, Tatiana Gesteira Martins de. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos**. 2001. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

AL-NEGHEIMISH, A. I.; EL-SAYED, A. K.; AL-ZAID, R. A.; SHURAIM, A. B.; ALHOZAIMY, A. M. Behavior of wide shallow RC beams strengthened with CFRP reinforcement. **Journal of Composites for Construction**, 2012, n. 16, p. 418- 429.

AL-TAMINI, A. K.; HAWILEH, R.; ABDALLA, J.; RASHEED, H. A.; F.ASCE. Effects of ratio of CFRP plate length to shear span and end anchorage on flexural behavior of SCC RC beams. **Journal of Composites for Construction**, 2011, n. 15, p. 908- 919.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 440.2R-02**: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, USA, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 440.2R-08**: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, USA, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 546R-96**: Concrete Repair Guide, USA, 1996.

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

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **The Science and Engineering of Materials**. United States of America: Thompson, 2003, 1003 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575 -1 2013**: Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 1: Requisitos gerais, Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118 2007**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522 2008:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1 2013:** Materiais metálicos – Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente, Rio de Janeiro, 2013.

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

AZEVEDO, Minos Trocoli De. **Patologia das estruturas de concreto.** IN: Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v.2, cap. 31, p. 1095-1128.

BAKER, R. D.; CHRISTER, A. H. Review of delay-time OR modeling of engineering aspects of maintenance. **European Journal of Operational Research**, 1994, n. 73, p. 407-422.

BARNES, R. A.; MAYS, G. C. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 1 – Experimental programme. **Construction and Building Materials**, 2006, n. 20, p. 396- 402.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.** 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BEBER, Andriei José. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com laminas de fibra de carbono.** 1999. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção:** patologia, reabilitação, prevenção. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering – An Introduction.** United States of America: WILEY, 2004. 820 p.

CELEDÓN, M. L. H.; VELÁSQUEZ, C. A. **Concreto arquitectónico: como realizar um buen acabado.** 1.ed. Santa Fé de Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO), 1999.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. **Journal of Structural Engineering**, 2001, v.127, n. 7, p. 784 -791.

COSTA, Natascha Cristina da Silva. **Análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com compósito de fibra de carbono – otimização de ancoragem.** 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

DONG, J.; WANG, Q.; GUAN, Z. Structural behavior of RC beams with external flexural and flexural-shear strengthening by FRP sheets. **Composites: Part B.** 2013, n. 44, p. 604-612.

ESFAHANI, M. R.; KIANOUSH, M. R.; TAJARI, A. R. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. **Engineering Structures**, 2007, n. 29, p. 2428-2444.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho.** 2007. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. **Acta Scientiarum**, 2002, v. 24, n. 6, p. 1783-1791.

FOLIC', R.; ZENUNOVIC', D. Durability problem of RC structures in Tuzla industrial zone – Two case studies. **Engineering Structures**, 2010, n. 32, p.1846-1860.

FORTES, A. S. **Estruturas de concreto submetidas à flexão reforçadas com laminados de CFRP colados em entalhes.** 2004. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

GAO, B.; LEUNG, C. K. Y.; KIM, J-K. Failure diagrams of FRP strengthened RC beams. **Composite Structures**, 2007, n. 77, p. 493 - 508.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras.** 241 f. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HELENE, Paulo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.** 2. Ed. São Paulo: PINI, 1992.

IBARS, E. O. **Peelling failure in beams strengthened by plate bonding. A design proposal.** 2005. 285 f. Tesis (Doctorado em Enginyeria de la Construcció) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2005.

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

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **CEB-FIP Model Code 2010**: Design Code, Lausanne, 2010 (*Bulletin 55*).

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **FIB 2001**: Externally Bonded FRP Reinforcement for Concrete Structures, Lausanne, 2001(*Bulletin 14*).

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **FIB 2007**: FRP Reinforcement in RC Structures, Lausanne, 2007(*Bulletin 40*).

ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.1.1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

JOAQUIM, Melissa Costa. **Modelo analítico para dimensionamento de reforço à flexão de vigas em concreto armado utilizando compósitos de fibra de carbono**. 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”**. 396 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1999.

KARBHARI, V. M.; ZHAO, L. Use of composites for 21st century civil infrastructure. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, 2000, n.185, p. 433-454.

LEONI, Renato. SOUZA, João. Reforço com tela de fibra de carbono sob proteção de concreto ou argamassas minerais. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 194, p. 78-80, 2013.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 1 ed. VIAPOL. São Paulo, 2012, 213 p.

MACHADO, Ari de Paula. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**: características, dimensionamento e aplicação. 1 ed. PINI. São Paulo, 2002, 282 p.

MACHADO, Marcélia Gomes. **Estudo experimental da ductibilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono**. 2004. 301 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MAILVAGANAM, N. P.; WISEMAN, A. Axioms for building and repairing durable concrete structures. **Journal of performance of constructed facilities**, 2003, n. 17, p. 163-166.

MATTHYS, S. **Structural behavior and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement**. 2000. 345 f. Thesis. (Doctor of Applied Sciences, option Structural Engineering) - Faculty of Engineering, Ghent University, Ghent, 2000.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias De; ANDRADE, Jairo José de O.; HELENE, Paulo. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. IN: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v.1, cap. 22, p. 773-808.

MEIER, U. Composite materials in bridge repair. **Applied Composite Materials**, 2000, n. 7, p. 75-94.

MOSTAFA, A.; RAZAQPUR, A. G.; CFRP anchor for preventing premature debonding of externally bonded FRP laminates from concrete. **Journal of Composites for Construction**, 2013, n. 17, p. 641- 650.

NAAMAN, A.E.; BREEN, J. E. Editor's **External prestressing in bridges**.SP-120, 1990: American Concrete Institute, Detroit, 458 p.

NAKAMURA, Juliana. Acidentes anunciados. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 98, 2005.

NAKAMURA, Juliana. Reparo, reforço e recuperação de concreto. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 146, 2009.

OBAIDAT, Y. T.; HEYDEN, S.; DAHLBLOM, O.; ABU-FARSAKH, G.; ABDEL-JAWAD, Y. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. **Construction and Building Materials**, 2011, n. 25, p. 591-597.

PENDHARY, S. S; KANT, T; DESAI, Y. M. Application of polymer composites in civil construction: A general review. **Composite Structures**, 2008, n. 84, p. 114-124.

PIANCASTELLI, Élvio Mosci. **Comportamento e desempenho do reforço à flexão de vigas de concreto armado, solicitado a baixa idade e executado inclusive sob carga**. 1997. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

PINTO, Cristina Travessa Martins Pereira. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com fibras de carbono**. 2000. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

PITA, Marina. Viaduto recebe reforço de fibra de carbono para elevação de TB. **Revista Infraestrutura Urbana**, São Paulo, n. 16, 2011.

REIS, Andréa Prado Abreu. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. 1998. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

REYES, J. H. S. V. **Estudio experimental sobre la reparación y refuerzo de puentes utilizando fibras sintéticas y pretensado exterior**. 2003. 316 f. Tesis (Doctorado en Ingeniería de la Construcción) – Escola Tècnica Superior D' Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2003.

ROBERY, P.; INNES, C. Carbon fibre strengthening of concrete structures. In: International Conference on Structural Faults and Repair, 1997, Edinburgh. **Proceedings...** Edinburgh Engineering Technics Press, 1997, 3 v. v. 1, p. 197-208.

ROCHA, Mário Daniel Caldas da. **Análise experimental de sistemas de ancoragem para vigas reforçadas à flexão com material compósito de fibra de carbono.** 2006. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

RODRIGUES, Suelen. **Influência da taxa de carregamento sobre a resistência de aderência entre CFC e concreto.** 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS, A. R. S.; VIEIRA, M. M.; MONT'ALVERNE, A. M.; CABRAL, A. E. B.; BEZERRA, L. M.; MONTENEGRO, L. C. S. Determinação da área ótima de fibra de carbono utilizada no reforço à flexão de vigas de concreto armado. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado, Brasil. **Anais...CD-ROM.**

SEVUK, F.; ARSLAN, G. Retrofit of damaged reinforced concrete beams by using steel plates. In: Structures Congress, 2005, New York. **Proceedings...** 2005, p. 1-8.

SMITH, S. T.; TENG, J. G. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. **Engineering Structures**, 2002, n. 24, p. 385-395.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** 1. ed. São Paulo: PINI, 1998.

SPADEA, G.; BENCARDINO, F.; SWAMY, R. N. Optimizing the performance characteristics of beams strengthened with bonded CFRP laminates. **Materials and Structures**, 2000, n. 33, p. 119-126.

SPAGNOLO JUNIOR, Luís Alberto. **Estudo experimental do reforço à força cortante de vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono.** 2008. 290 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SUSSEKIND, José Carlos. Curso de análise estrutural: deformações em estruturas, método das forças. 8. ed. Rio de Janeiro: Globo S.A, 1987, v. 2.

TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. **FRP strengthened RC structures.** 1. Ed. Chischester: Jonh Wiley & Sons LTDA. 2001, 245 p.

TIRPUDE, N. P.; JAIN, K. K.; BHATTACHARJEE, B. Decision model for repair prioritization of reinforced-concrete structures. **Journal of performance of constructed facilities**, 2014, n. 28, p. 250-256.

VAZ, A. P. R. **Comportamento de vigas reforçadas submetidas a carregamento cíclico.** 2013. 215 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

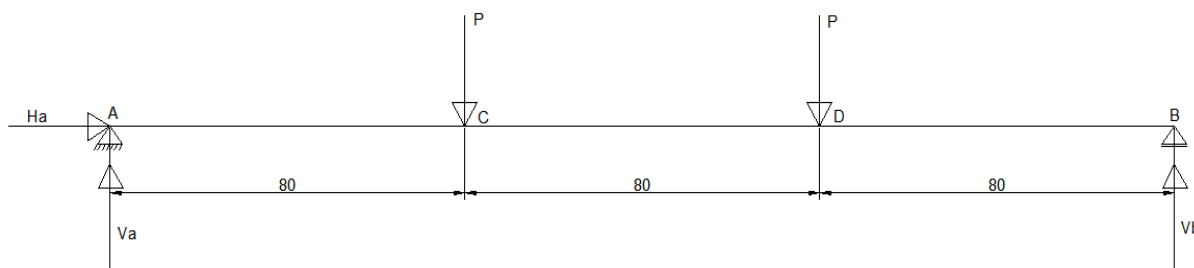
VIAPOL. Disponível em: <http://www.viapol.com.br/produtos_desc.php?menu=recuperaçãoreforçoestrutural&codigo_item=40>. Acesso em: 10 mar. 2014.

YAU. J.; TENG. J. G. Plate end debonding in FRP-plated RC beams – I: Experiments. **Engineering Structures**, 2007, n. 29, p. 2457-2471.

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DAS VIGAS DE REFERÊNCIA

A.1 Detalhamento do carregamento e das reações de apoio das vigas (Figura 125):

Figura 125 - Detalhamento do carregamento e das reações de apoio



Fonte: Elaborada pela autora.

A.2 Diagrama de esforço normal (DEN) das vigas (Figura 126):

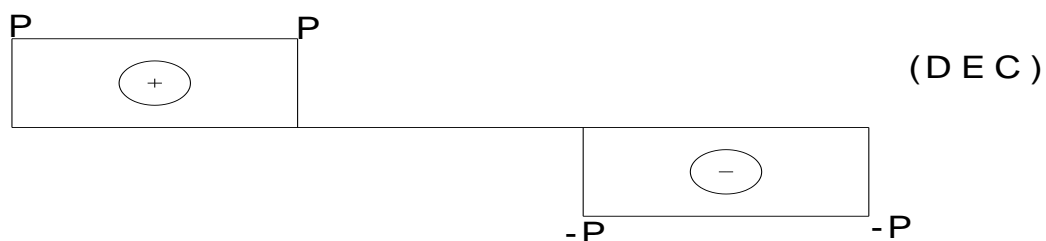
Figura 126 - Diagrama de esforço normal



Fonte: Elaborada pela autora.

A.3 Diagrama de esforço cortante (DEC) das vigas (Figura 127):

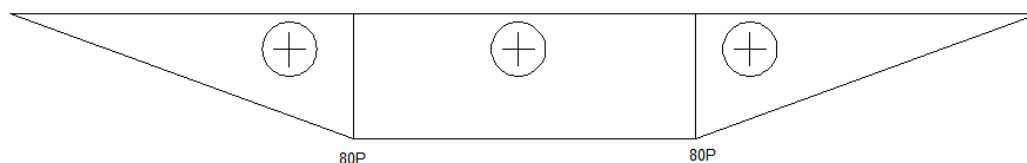
Figura 127 - Diagrama de esforço cortante



Fonte: Elaborada pela autora.

A.4 Diagrama de momento fletor (DMF) das vigas (Figura 128):

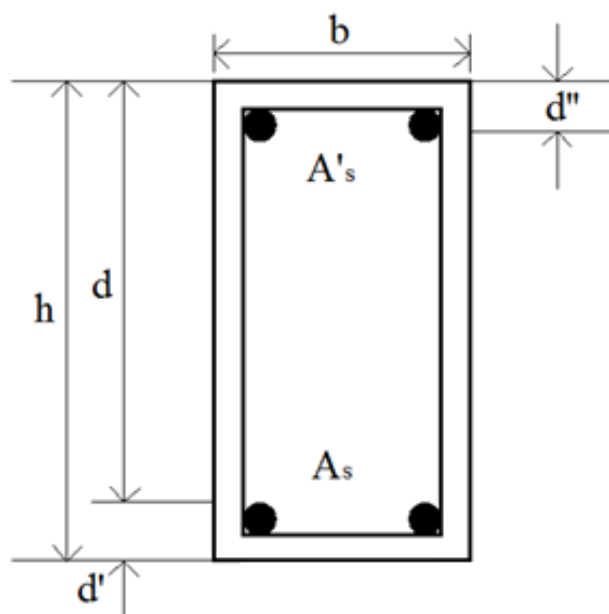
Figura 128 - Diagrama de momento fletor



Fonte: Elaborada pela autora.

A.5 Seção transversal das vigas (Figura 129):

Figura 129 - Seção transversal das vigas



Fonte: Elaborada pela autora.

Onde:

h – altura total da seção transversal

d – distância entre o bordo mais comprimido e o centroide da armadura tracionada

d' – distância entre o bordo mais tracionado e o centroide da armadura tracionada

d'' – distância entre o bordo mais comprimido e a armadura comprimida

b – largura da base da viga

A_s – área da seção transversal da armadura tracionada

A'_s – área da seção transversal da armadura comprimida

A.6 Dados do dimensionamento das vigas de referência (Tabela 50):

Tabela 50 - Dados do dimensionamento das vigas de referência

Viga	dados de dimensionamento						
	b (cm)	h (cm)	d (cm)	d' (cm)	d'' (cm)	f _{ck} (kN/cm ²)	f _{yk} (kN/cm ²)
VA-R	12	24,5	20	4,60	3,315	3	50
VB-R	12	24,5	20	3,625	3,315	3	50
VC-R	12	24,5	20	3,50	3,315	3	50
Viga	dados de dimensionamento						
	f' _{yk} (kN/cm ²)	E _s (kN/cm ²)	P (kN)	M (kN.cm)	x (cm)	A _s (cm ²)	A' _s (cm ²)
VA-R	50	210	40	3200	12,56	5,03	0,62
VB-R	50	210	40	3200	12,56	2,45	0,62
VC-R	50	210	40	3200	12,56	1,57	0,62

b - largura da base da viga

h - altura total da seção transversal da viga

d- distância entre o bordo mais comprimido e o centroide da armadura tracionada

d'- distância entre o bordo mais tracionado e o centroide da armadura tracionada

d''- distância entre o bordo mais comprimido e o centroide da armadura comprimida

f_{ck} - resistência à compressão característica do concreto

f_{yk} - resistência à compressão do aço da armadura tracionada

f'_{yk} - resistência à compressão do aço da armadura comprimida

E_s - módulo de elasticidade do aço

P - carga aplicada

M - momento fletor

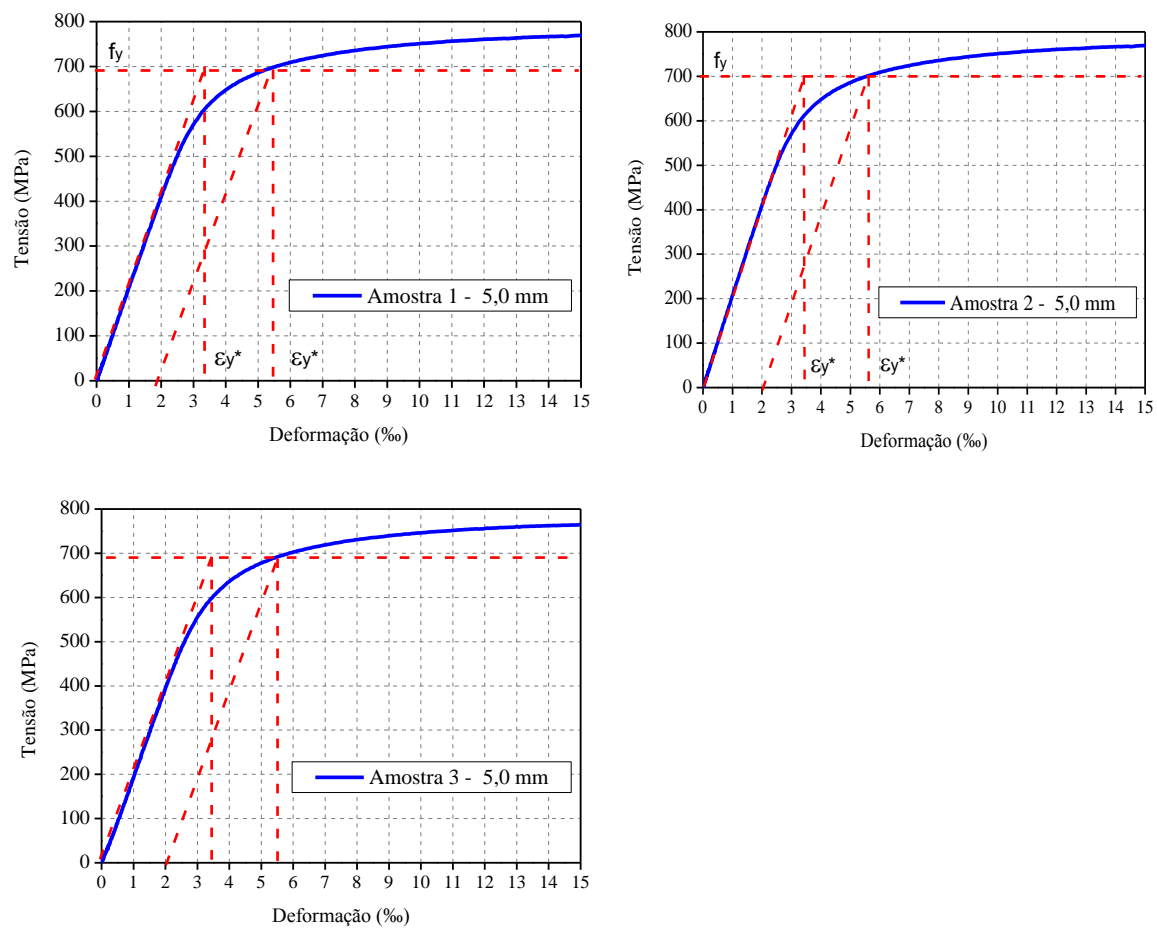
x- altura da linha neutra

A_s - área da seção transversal da armadura tracionada

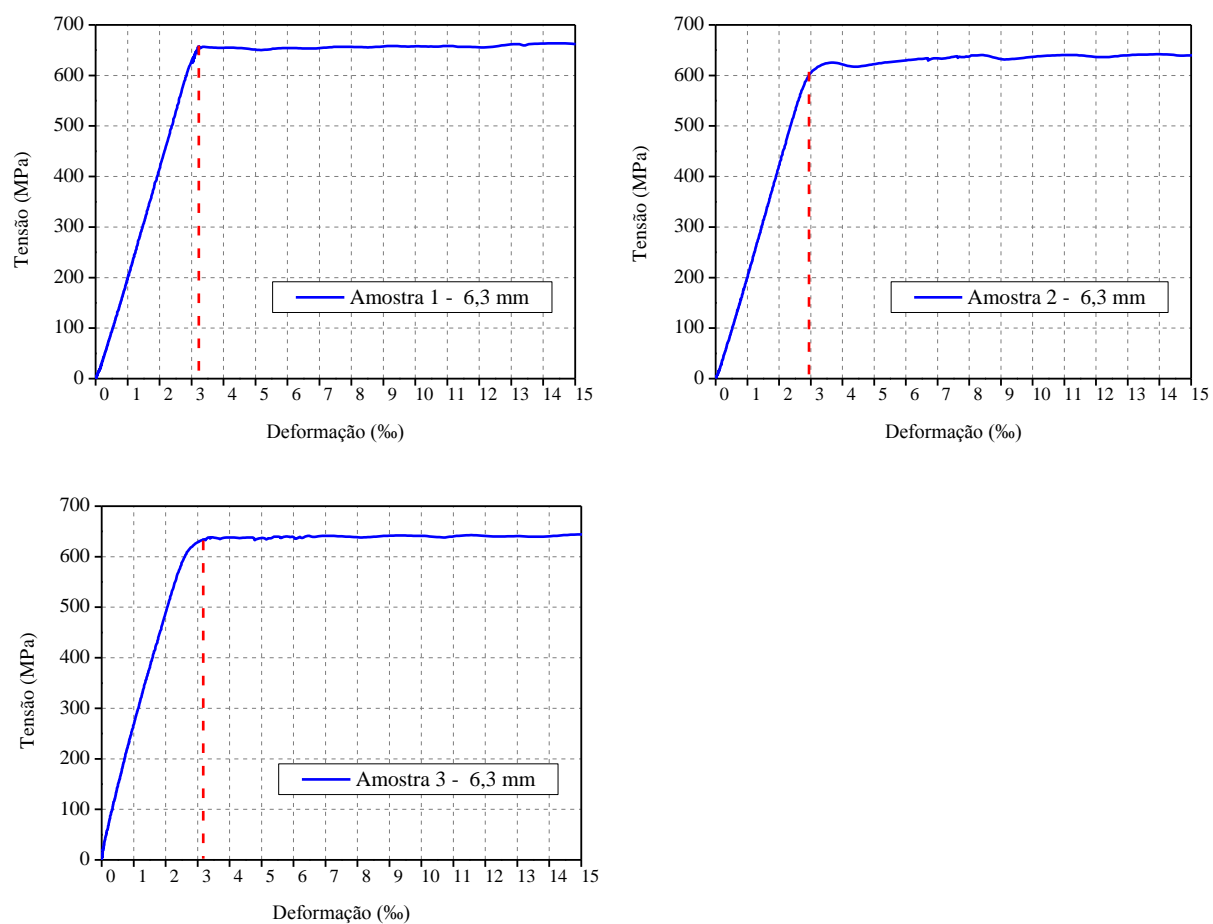
A'_s - área da seção transversal da armadura comprimida

Fonte: Elaborada pela autora.

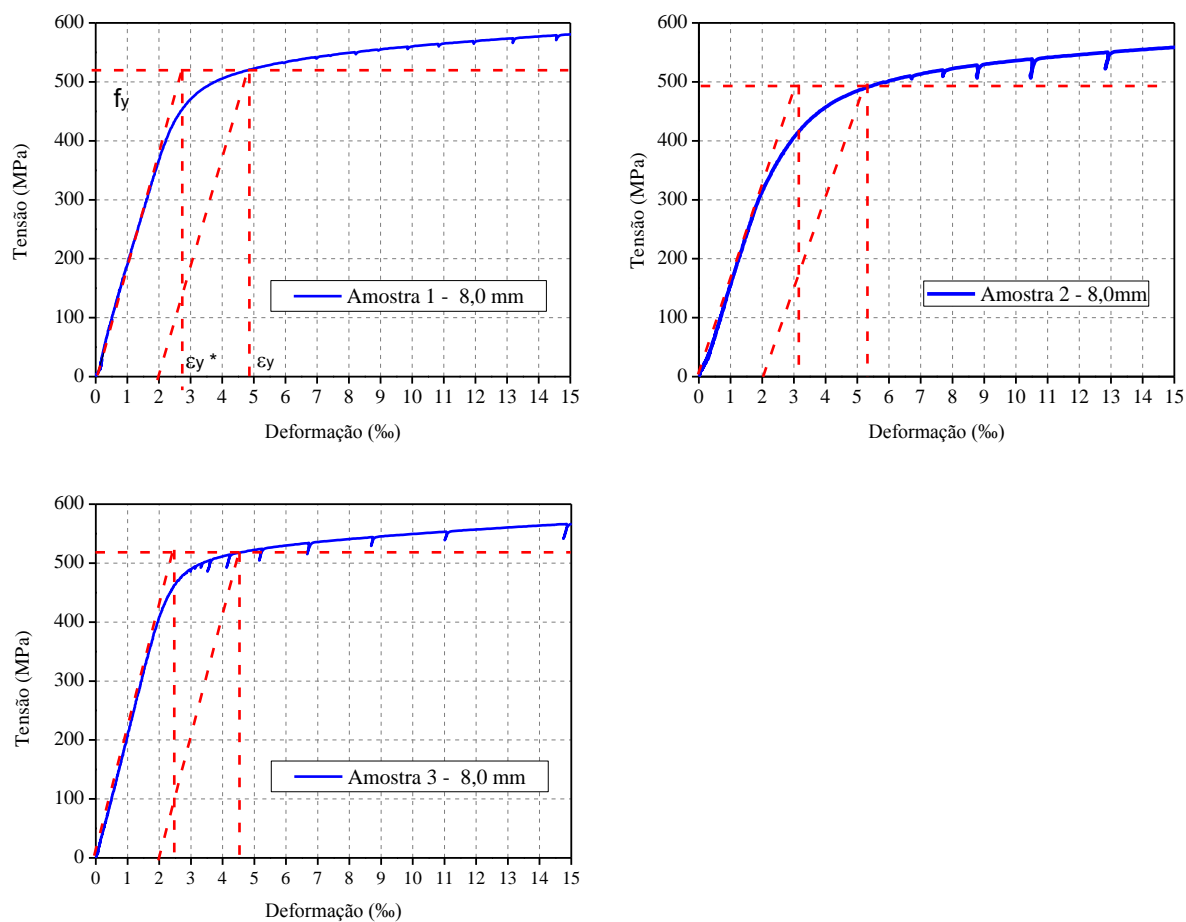
APÊNDICE B – DIAGRAMAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO

Figura 130 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 5,0 mm

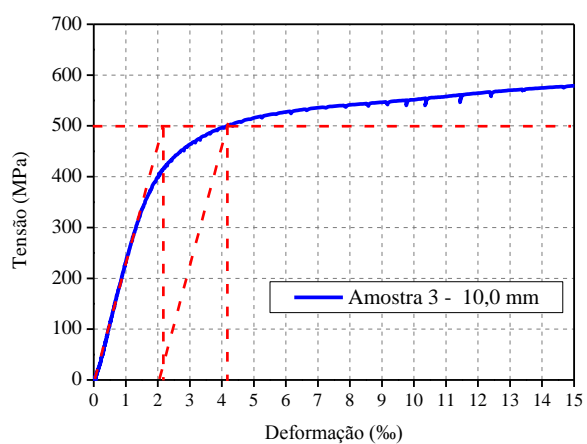
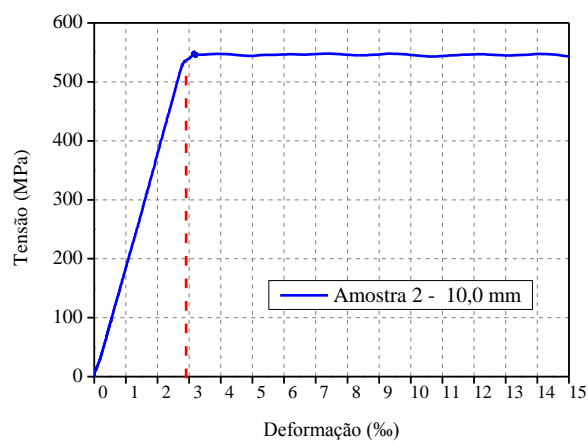
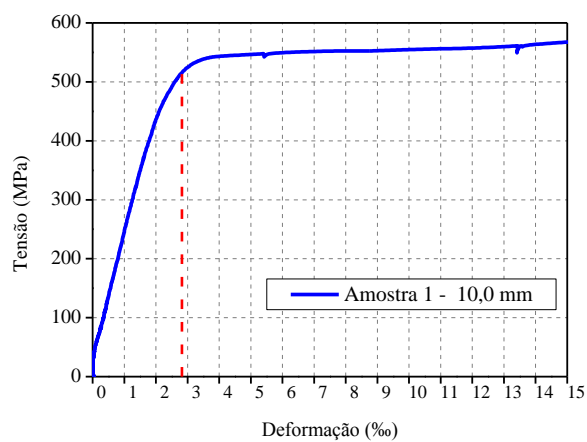
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 131 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 6,3 mm

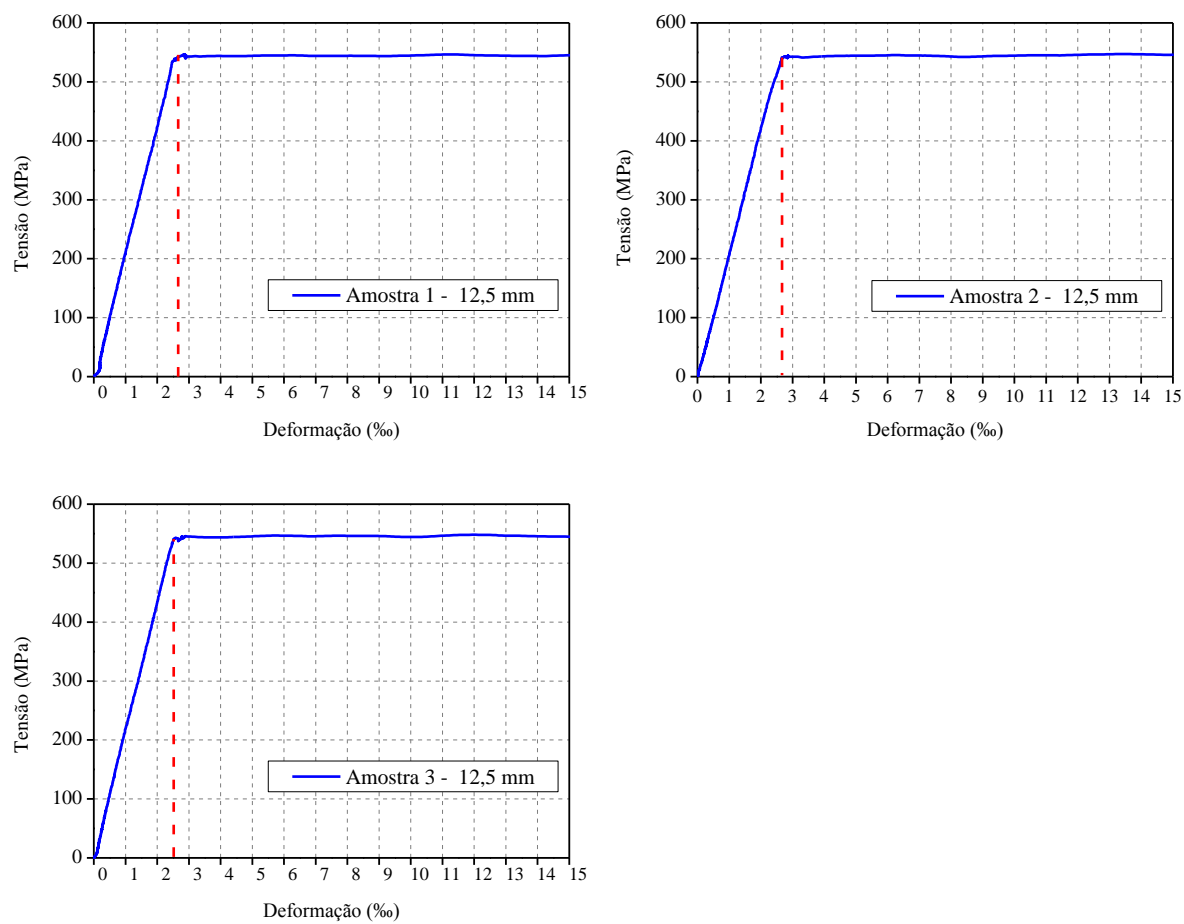
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 132 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 8,0 mm

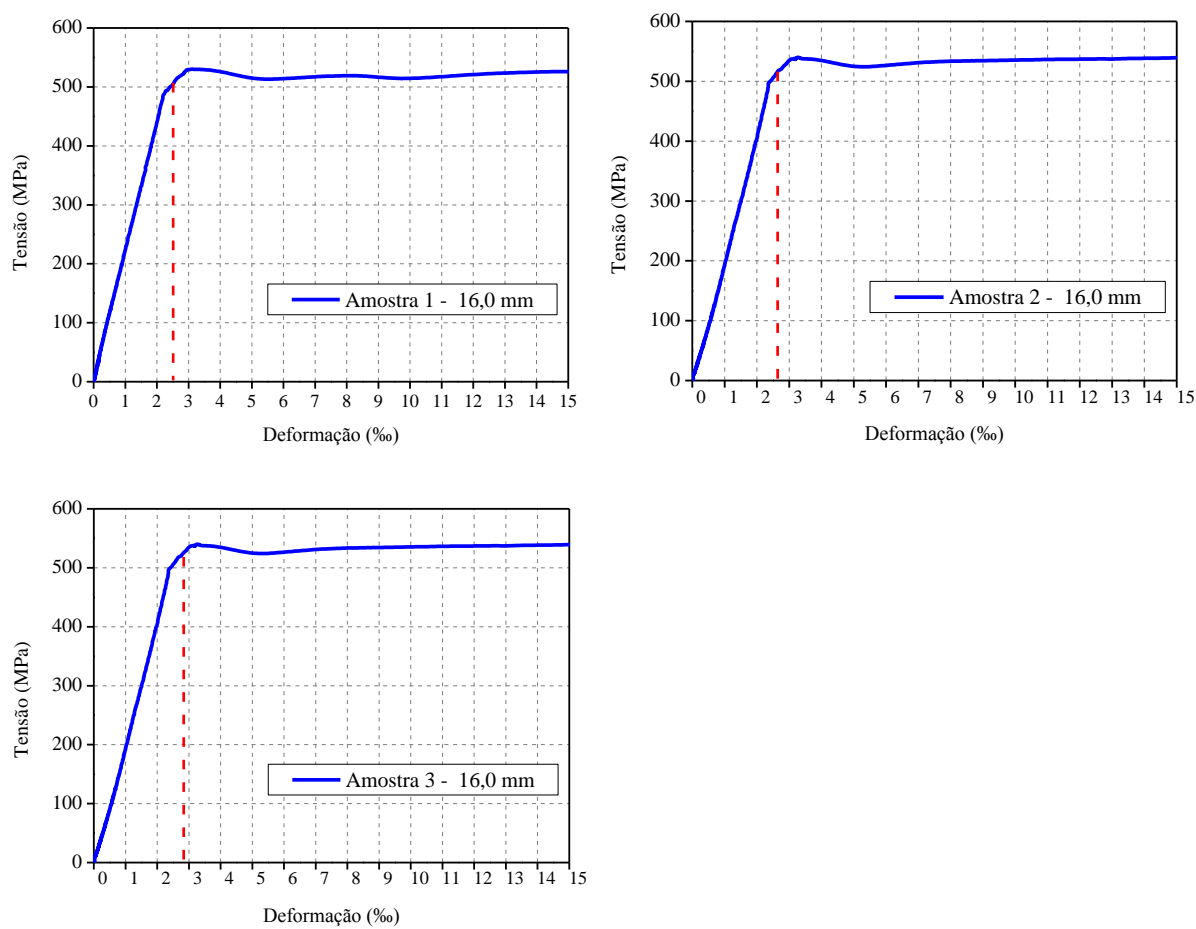
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 133 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 10,0 mm

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 134 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 12,5 mm

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 135 - Diagramas tensão-deformação das barras de aço ϕ 16,0 mm

Fonte: Elaborada pela autora.

APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS ENSAIADAS

Tabela 51 - Resultados experimentais da viga VA-R

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 (µm/m)	Ext. 2 (µm/m)	Ext. 3 (µm/m)	Ext. 4 (µm/m)	Ext. 5 (µm/m)	Ext. 6 (µm/m)	Ext. 7 (µm/m)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00
5,39	0,00	-0,05	-0,47	-0,40	56,04	55,35	-0,46			-56,90	-33,01
10,30	0,00	-0,06	-0,85	-0,71	102,43	100,82	0,23			-109,11	-64,86
15,50	0,00	-0,12	-1,50	-1,26	194,30	188,33	-1,15			-181,23	-103,49
20,05	0,00	-0,17	-2,12	-1,79	288,23	284,33	-0,69			-255,69	-138,15
25,28	0,00	-0,22	-2,87	-2,42	400,54	406,28	-1,61			-346,54	-182,63
30,07	0,00	-0,27	-3,61	-3,07	508,48	509,63	-3,44			-435,98	-225,25
35,03	0,00	-0,32	-4,33	-3,70	610,22	607,23	-4,82			-522,15	-270,20
40,10	0,00	-0,38	-5,15	-4,43	718,16	711,04	-5,51			-619,79	-322,42
45,25	0,00	-0,43	-5,99	-5,16	827,94	818,30	-6,66			-718,60	-376,51
50,26	0,00	-0,49	-6,98	-6,04	951,73	939,56	-0,46			-830,28	-435,04
55,00	0,00	-0,52	-7,49	-6,49	1026,83	1011,90	1,15			-896,55	-480,00
60,37	-0,01	-0,57	-8,47	-7,37	1155,67	1136,38	60,17			-1004,25	-541,58
65,03	-0,03	-0,60	-9,27	-8,08	1260,86	1237,21	160,54			-1092,53	-595,90
70,01	-0,04	-0,64	-10,21	-8,91	1383,96	1355,02	259,06			-1195,55	-659,12
75,19	-0,05	-0,68	-11,23	-9,81	1510,05	1476,52	363,79			-1308,64	-730,54
80,04	-0,07	-0,72	-12,39	-10,85	1648,31	1609,49	518,35			-1438,60	-811,32
85,08	-0,08	-0,74	-13,15	-11,51	1747,06	1705,26	577,38			-1531,08	-874,54
90,01	-0,09	-0,76	-14,18	-12,43	1873,38	1827,90	664,19			-1654,24	-952,98
95,10	-0,10	-0,79	-15,13	-13,28	1985,45	1935,85	740,21			-1771,55	-1037,97
100,00	-0,12	-0,82	-16,18	-14,24	2111,54	2058,03	825,88			-1901,27	-1127,88
105,15	-0,13	-0,83	-17,05	-15,02	2218,79	2161,84	870,43			-2017,64	-1215,92
110,03	-0,14	-0,85	-18,15	-16,00	2345,80	2284,71	914,76			-2154,15	-1316,37
115,01	-0,15	-0,86	-19,11	-16,88	2460,63	2395,41	947,37			-2278,48	-1415,18
120,14	-0,19	-0,90	-20,87	-18,48	2646,89	2494,62	1017,88			-2494,13	-1612,10
125,01	-0,19	-0,91	-21,46	-19,01	2700,40	2602,11	1050,49			-2577,25	-1681,87
130,16	-0,21	-0,93	-22,86	-20,27	2931,67	2878,16	1104,23				-1825,17
131,93	-0,22	-0,93	-23,40	-20,78	3010,45	2933,74	1126,28				-1877,85
135,01	-0,24	-0,95	-24,51	-21,79	3156,06	3080,50	1163,71				-1967,77
136,35	-0,25	-0,95	-25,21	-22,43	3209,80	3193,95	1186,22				-2019,75
136,45	-0,26	-0,97	-26,93	-23,86	3213,47	3669,59	1208,50				-2162,11
139,07	-0,26	-0,97	-27,68	-24,49	3258,49	2661,13	1233,07				-2235,40

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 52 - Resultados experimentais da viga VA-2

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,88	0,70	0,29	-0,02	-0,10	90,49	107,48	0,00	133,67	137,80	-139,55	-53,62
11,33	0,69	0,31	-0,51	-0,51	144,92	167,89	0,00	201,88	213,36	-226,19	-98,81
15,06	0,67	0,32	-0,95	-0,90	194,99	222,78	0,69	266,64	279,96	-302,28	-133,70
20,13	0,61	0,31	-1,74	-1,60	290,53	322,22	2,76	375,50	382,62	-432,23	-188,72
25,12	0,55	0,31	-2,54	-2,29	400,54	449,45	6,66	486,89	508,02	-548,84	-249,37
30,13	0,49	0,29	-3,45	-3,09	499,98	569,34	10,56	573,24	627,90	-678,56	-308,84
35,28	0,44	0,29	-4,18	-3,71	596,44	679,58	13,55	662,81	738,83	-777,83	-368,55
40,24	0,35	0,29	-5,21	-4,63	719,54	807,96	26,41	753,76	835,98	-908,02	-434,81
45,19	0,31	0,28	-5,87	-5,20	804,98	901,21	31,69	839,43	935,20	-993,25	-491,00
50,59	0,24	0,28	-6,72	-5,95	911,77	1015,81	47,77	941,40	1045,67	-1090,42	-553,52
55,30	0,13	0,28	-7,78	-6,89	1022,93	1134,32	65,45	1034,87	1133,17	-1215,92	-619,08
60,31	0,07	0,28	-8,52	-7,54	1126,05	1238,12	76,02	1138,91	1233,30	-1300,45	-678,32
65,63	-0,01	0,28	-9,42	-8,34	1236,75	1353,19	115,52	1246,85	1338,95	-1396,45	-742,24
70,01	-0,11	0,27	-10,37	-9,17	1335,27	1454,93	192,00	1322,18	1403,94	-1502,75	-801,72
75,35	-0,16	0,27	-11,14	-9,84	1432,42	1559,66	242,53	1418,41	1505,91	-1584,70	-861,19
80,01	-0,23	0,26	-11,99	-10,57	1527,27	1662,78	325,21	1517,17	1605,59	-1667,82	-914,11
85,02	-0,33	0,26	-13,32	-11,75	1659,33	1842,60	458,87	1632,23	1678,85	-1812,76	-983,65
90,80	-0,34	0,26	-14,03	-12,37	1750,74	1953,07	505,72	1723,64	1773,01	-1886,99	-1040,31
95,02	-0,36	0,25	-14,77	-13,04	1837,55	2055,04	580,59	1808,61	1854,78	-1956,06	-1083,63
100,69	-0,38	0,25	-15,90	-14,03	1958,35	2195,14	713,80	1926,66	1963,64	-2057,91	-1139,82
105,83	-0,40	0,24	-17,20	-15,18	2085,13	2328,80	787,29	2022,89	2009,11	-2194,65	-1200,94
110,47	-0,40	0,24	-17,82	-15,72	2165,51	2419,06	819,22	2103,27	2083,29	-2256,00	-1243,79
115,51	-0,41	0,23	-18,87	-16,67	2281,03	2545,38	881,22	2219,25	2181,59	-2352,70	-1293,89
120,25	-0,42	0,22	-20,00	-17,66	2399,77	2675,60	947,14	2336,84	2269,78	-2457,37	-1349,39
125,31	-0,43	0,20	-21,18	-18,72	2516,21	2787,67	1028,90	2436,29	2274,37	-2583,57	-1418,69
130,00	-0,44	0,20	-21,89	-19,35	2606,01	2886,89	1076,90	2524,94	2352,00	-2654,52	-1469,74
135,15	-0,44	0,19	-22,99	-20,35	2735,77	3018,72	1162,79	2643,90	2438,58		-1538,34
140,30	-0,44	0,19	-24,25	-21,48	2933,51	3264,23	1249,61	2799,62	2564,67		-1619,59
145,55	-0,45	0,17	-25,89	-22,94	3169,15	3444,98	1333,67	2984,73	2690,30		-1717,70
150,21	-0,45	0,16	-27,37	-24,25	3512,50	3716,21	1406,47	3199,23	2877,93		-1791,92
152,94	-0,46	0,13	-29,61	-26,14	3981,70	3890,30	1480,42	3516,86	3141,82		-1868,02
153,94	-0,47	0,12	-30,43	-26,85	4313,11	3905,23	1501,32	3662,70	3295,00		-1890,50
154,54	-0,47	0,12	-31,13	-27,46	4612,59	3922,45	1516,48	3748,36	3395,14		-1893,07

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 53 - Resultados experimentais da viga VA-3

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,75	-0,02	-0,10	-0,66	-0,61	64,08	60,86	0,46	81,99	107,94	-56,90	-43,32
10,08	-0,05	-0,21	-1,21	-1,12	115,52	109,32	0,00	149,05	195,44	-104,20	-77,50
15,06	-0,06	-0,30	-1,81	-1,68	180,52	169,26	-0,46	232,19	300,17	-164,37	-121,52
20,32	-0,09	-0,42	-2,71	-2,50	280,88	256,77	-2,07	347,94	438,66	-233,21	-172,10
25,17	-0,11	-0,56	-3,69	-3,38	386,07	353,00	-3,90	465,07	573,70	-308,60	-222,20
30,16	-0,12	-0,72	-4,92	-4,49	519,27	485,05	-4,82	597,13	692,44	-447,45	-280,74
35,20	-0,13	-0,80	-5,74	-5,22	609,07	574,39	-2,99	705,99	796,02	-535,26	-332,49
40,40	-0,10	-0,86	-6,62	-6,02	710,35	670,16	-3,44	816,23	908,56	-603,86	-387,75
45,63	-0,04	-0,99	-7,80	-7,09	836,67	789,59	103,35	953,57	1030,05	-708,29	-448,62
50,34	0,03	-1,09	-8,79	-7,97	937,95	886,05	190,85	1066,79	1138,22	-803,59	-502,01
55,52	0,14	-1,29	-10,24	-9,27	1063,81	1001,34	297,19	1219,06	1247,54	-968,43	-573,42
60,07	0,16	-1,34	-10,83	-9,79	1137,07	1068,40	314,87	1303,58	1327,69	-1015,96	-621,42
65,24	0,24	-1,42	-11,76	-10,60	1242,03	1164,40	358,74	1424,15	1430,58	-1079,41	-681,83
70,15	0,31	-1,51	-12,65	-11,39	1338,03	1252,13	409,26	1531,41	1527,04	-1137,72	-738,03
75,27	0,42	-1,63	-13,67	-12,31	1447,35	1351,35	466,91	1657,26	1634,30	-1207,49	-800,78
80,96	0,54	-1,79	-14,82	-13,35	1568,61	1460,21	494,93	1796,44	1753,49	-1291,79	-872,90
85,38	0,61	-1,88	-15,72	-14,16	1664,15	1544,96	512,61	1906,91	1847,89	-1359,69	-931,20
90,91	0,73	-2,01	-17,06	-15,36	1808,38	1671,04	543,39	2073,19	1988,67	-1467,16	-1014,56
95,70	0,84	-2,16	-18,43	-16,59	1928,27	1770,26	565,67	2212,82	2092,02	-1615,61	-1107,98
100,09	0,86	-2,20	-18,99	-17,10	2001,07	1835,25	585,19	2302,16	2171,94	-1662,20	-1157,39
105,04	0,91	-2,27	-19,91	-17,93	2108,10	1930,34	622,85	2432,15	2283,33	-1727,53	-1219,90
110,25	1,00	-2,34	-20,99	-18,90	2224,54	2031,85	683,02	2572,48	2406,89	-1797,54	-1285,93
115,29	1,20	-2,47	-22,76	-20,49	2382,09	2160,23	745,03	2741,51	2543,08	-1932,41	-1398,32
120,38	1,21	-2,48	-23,36	-21,02	2465,45	2235,10	769,61	2846,47	2637,70	-1983,45	-1454,52
125,07	1,23	-2,49	-24,17	-21,77	2568,57	2326,05	805,67	2974,85	2749,32	-2041,29	-1513,29
130,13	1,29	-2,50	-25,27	-22,75	2689,61	2429,86	857,57	3126,89	2874,49	-2132,60	-1575,10
135,99	1,50	-2,51	-28,51	-25,67	3031,58	2659,75	965,51	3523,98	3156,06	-3015,34	-1729,87
140,70	1,51	-2,52	-29,02	-26,13	3124,13	2730,26	990,55	3623,20	3241,03	-3059,12	-1782,32
145,31	1,53	-2,52	-30,00	-27,03	3254,81	2846,24	1039,00	3808,77	3385,03	-3117,19	-1854,44
150,40	1,62	-2,56	-35,01	-31,28	3485,63	3256,42	1143,96	4207,46	3722,64	-1900,33	-1998,91
150,67	1,73	-2,58	-39,19	-35,07	3548,33	3580,48	1181,40	4572,86	3991,81	-1677,89	-2150,17
151,74	1,74	-2,58	-40,11	-35,81	3550,39	3608,50	1185,99	4639,46	4064,84	-1683,51	-2175,69

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 54 - Resultados experimentais da viga VA-4

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,49	-0,05	0,00	-0,47	-0,39	46,16	45,47	0,00	51,67	50,99	-43,32	-68,84
10,24	-0,10	0,00	-1,09	-0,92	109,09	107,25	-0,23	121,49	119,89	-99,04	-158,05
15,17	-0,15	0,00	-1,67	-1,40	168,80	166,97	-0,23	188,10	187,18	-149,85	-238,36
20,13	-0,18	-0,01	-2,39	-2,01	248,04	248,04	0,46	274,22	285,93	-208,16	-329,91
25,33	-0,20	-0,02	-3,14	-2,66	338,76	342,20	1,38	379,18	412,25	-273,72	-427,79
30,13	-0,22	-0,03	-3,89	-3,31	431,08	438,66	2,07	482,76	549,82	-340,68	-522,61
35,41	-0,26	-0,05	-4,81	-4,11	534,89	543,39	3,90	587,71	606,09	-422,17	-637,81
40,18	-0,26	-0,05	-5,44	-4,65	615,04	623,08	4,82	678,89	718,62	-485,62	-722,81
45,06	-0,27	-0,06	-6,22	-5,31	713,34	721,84	4,82	792,34	862,85	-561,01	-818,81
50,02	-0,27	-0,06	-7,10	-6,05	820,13	828,17	6,66	912,46	1022,01	-646,24	-927,92
55,06	-0,29	-0,07	-7,91	-6,75	908,33	915,45	11,25	961,84	986,64	-727,73	-1038,44
60,10	-0,30	-0,07	-8,52	-7,26	987,10	993,30	12,17	1061,28	1132,71	-792,12	-1124,14
65,14	-0,30	-0,07	-9,34	-7,94	1088,61	1092,98	17,68	1186,91	1313,91	-872,43	-1227,63
70,07	-0,30	-0,07	-10,24	-8,72	1196,10	1198,16	48,00	1318,05	1496,73	-968,90	-1348,92
75,43	-0,31	-0,08	-11,24	-9,58	1293,70	1291,41	112,54	1435,87	1648,54	-1083,63	-1503,22
80,17	-0,31	-0,08	-11,78	-10,03	1363,75	1360,54	131,37	1516,02	1744,54	-1142,87	-1582,13
85,05	-0,31	-0,08	-12,51	-10,64	1450,79	1446,66	186,03	1615,46	1864,42	-1220,14	-1678,83
90,12	-0,30	-0,07	-13,61	-11,60	1562,64	1557,13	429,47	1748,67	2021,51	-1332,06	-1812,29
95,02	-0,30	-0,10	-14,66	-12,50	1657,95	1658,18	513,07	1839,16	2095,69	-1471,61	-1981,81
100,44	-0,30	-0,10	-15,30	-13,05	1738,79	1739,71	541,32	1941,13	2219,02	-1543,96	-2074,77
105,34	-0,29	-0,10	-16,16	-13,76	1835,02	1836,40	585,88	2068,13	2365,55	-1642,54	-2190,67
110,00	-0,28	-0,09	-17,21	-14,66	1939,52	1943,20	657,53	2207,31	2525,63	-1790,99	-2352,70
115,61	-0,27	-0,09	-18,35	-15,65	2041,26	2052,52	731,25	2331,33	2662,28	-2001,72	-2555,47
120,95	-0,26	-0,09	-19,21	-16,40	2143,92	2159,31	783,62	2459,25	2811,33	-2132,84	-2675,36
125,15	-0,25	-0,09	-19,91	-17,01	2218,34	2236,71	837,36	2553,19	2917,67	-2256,70	-2771,82
130,13	-0,22	-0,09	-21,80	-18,66	2267,25	2409,65	1032,34	2749,09	3133,55	-2698,07	-3042,26
135,12	-0,22	-0,09	-22,16	-18,98	2312,96	2459,02	1056,92	2804,44	3201,76	-2750,05	-3100,80
140,40	-0,22	-0,09	-22,91	-19,61	2398,85	2555,71	1119,62	2914,68	3331,98	-2863,14	-3199,61
145,17	-0,21	-0,09	-23,91	-20,46	2492,10	2669,17	1213,55	3042,60	3483,56	-3060,06	-3319,49
150,07	-0,20	-0,09	-25,04	-21,41	2590,62	3008,61	1308,40	3179,25	3646,62	-3315,51	-3459,28
155,03	-0,18	-0,09	-26,77	-22,88	2846,93	3245,63	1420,48	3383,89	3878,35	-3816,12	-3600,47
156,53	-0,18	-0,09	-27,12	-23,18	2782,62	3254,58	1445,51	3452,56	3961,49	-3887,53	-3622,71
157,92	-0,18	-0,09	-27,52	-23,51	2797,32	3307,64	1470,78	3519,85	4032,69	-3969,95	-3631,38
158,19	-0,17	-0,09	-28,27	-24,10	2826,72	3354,72	1502,70	3594,49	4120,42		-3579,63
159,26	-0,17	-0,09	-28,90	-24,59	2850,14	3392,61	1523,83	3638,81	4170,72		-3538,89
160,32	-0,16	-0,08	-29,30	-24,91	2868,52	3429,13	1541,28	3681,76	4218,72		-3525,78
161,43	-0,16	-0,08	-30,04	-25,51	2891,25	3482,87	1569,30	3759,39	4300,25		-3489,01

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 55 - Resultados experimentais da viga VA-5

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,23	-0,02	0,00	-0,48	-0,42	49,15	44,33	-0,46	65,45	63,16	-74,22	-45,66
10,08	-0,04	-0,01	-0,93	-0,81	97,84	87,04	-1,15	131,37	126,09	-144,94	-89,68
15,17	-0,06	-0,01	-1,43	-1,24	153,42	134,81	-2,07	208,54	198,43	-223,38	-138,85
20,10	-0,08	-0,01	-2,08	-1,82	233,34	202,33	-2,99	322,22	314,64	-317,97	-194,58
25,14	-0,10	-0,01	-2,76	-2,41	312,80	270,78	-3,67	435,90	434,07	-414,67	-254,05
30,10	-0,11	-0,01	-3,54	-3,07	405,82	349,78	-4,36	561,30	564,75	-520,98	-320,55
35,25	-0,13	-0,03	-4,31	-3,74	491,48	423,50	-2,07	676,36	686,93	-629,15	-392,43
40,43	-0,14	-0,03	-4,97	-4,32	573,24	493,09	-2,30	789,82	814,39	-731,71	-458,93
50,12	-0,16	-0,05	-6,45	-5,60	755,37	647,43	0,46	1009,15	1067,25	-952,74	-599,65
55,36	-0,17	-0,06	-7,26	-6,29	850,91	728,27	1,15	1123,29	1182,55	-1076,60	-678,09
60,01	-0,19	-0,08	-8,27	-7,17	964,13	824,27	5,51	1257,88	1309,32	-1233,95	-775,02
65,05	-0,20	-0,08	-8,95	-7,77	1037,17	885,82	12,17	1347,67	1395,45	-1351,96	-853,23
70,39	-0,20	-0,08	-9,60	-8,34	1117,78	954,03	47,77	1451,02	1497,19	-1459,43	-923,71
75,13	-0,21	-0,09	-10,34	-9,01	1204,13	1026,83	134,58	1558,97	1601,22	-1573,23	-997,46
80,28	-0,22	-0,10	-11,20	-9,77	1299,90	1107,45	212,44	1675,64	1713,30	-1706,93	-1084,80
85,24	-0,23	-0,11	-12,13	-10,59	1401,88	1191,04	290,76	1796,44	1828,36	-1858,65	-1184,08
90,33	-0,24	-0,11	-12,99	-11,36	1490,53	1264,08	361,03	1904,61	1930,11	-1999,84	-1278,20
95,51	-0,25	-0,12	-14,16	-12,38	1596,40	1348,13	423,50	2030,93	2044,02	-2194,42	-1414,24
100,11	-0,25	-0,12	-14,80	-12,94	1671,50	1410,83	457,03	2123,48	2133,36	-2286,44	-1480,74
105,32	-0,26	-0,13	-15,65	-13,69	1766,35	1488,92	509,63	2238,32	2242,91	-2401,87	-1571,12
110,03	-0,26	-0,13	-16,47	-14,43	1857,76	1562,87	570,72	2348,10	2348,56	-2524,80	-1667,12
115,51	-0,26	-0,14	-17,41	-15,27	1960,42	1645,78	642,14	2471,43	2467,29	-2666,69	-1782,32
120,03	-0,26	-0,14	-18,26	-16,03	2052,06	1719,04	703,23	2582,12	2571,56	-2786,34	-1894,01
125,20	-0,27	-0,16	-19,85	-17,42	2193,99	1817,57	774,89	2744,96	2701,78	-3019,79	-2138,69
130,68	-0,27	-0,17	-20,60	-18,10	2286,55	1893,36	817,38	2863,46	2816,15	-3123,51	-2229,07
135,01	-0,27	-0,17	-21,32	-18,74	2370,37	1961,57	864,46	2967,27	2915,37	-3213,19	-2317,81
140,16	-0,28	-0,17	-22,35	-19,67	2483,37	2049,53	935,43	3107,14	3043,29	-3333,31	-2456,43
145,42	-0,28	-0,18	-23,54	-20,75	2605,09	2140,25	1002,49	3258,95	3176,96	-3457,64	-2629,70
150,07	-0,28	-0,20	-25,48	-22,54	2913,76	2263,81	1128,11	3497,57	3372,63	-3589,93	-2945,80
155,90	-0,29	-0,21	-27,18	-24,09	3058,91	2375,89	1258,33	3713,68	3546,26	-3541,70	-3239,65
156,48	-0,29	-0,21	-27,24	-24,14	3062,12	2383,23	1262,47	3725,63	3556,82	-3548,49	-3248,08
157,43	-0,29	-0,21	-27,34	-24,24	3070,85	2394,72	1269,59	3743,31	3573,59	-3560,20	-3260,96
158,03	-0,29	-0,21	-27,44	-24,32	3078,89	2405,28	1277,40	3759,62	3588,98	-3569,33	-3272,43
159,50	-0,29	-0,21	-27,75	-24,60	3107,37	2434,91	1306,33	3807,62	3632,15	-3591,57	-3310,83
160,64	-0,29	-0,21	-27,98	-24,81	3152,15	2456,96	1333,21	3844,13	3665,23	-3607,49	-3340,80
162,28	-0,29	-0,22	-28,46	-25,27	3217,38	2463,39	1398,43	3918,78	3737,57	-3628,57	-3401,91

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 56 - Resultados experimentais da viga VB-R

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,59	-0,01	-0,01	-0,81	-0,69	241,84	230,58	0,92			-61,11	-22,48
5,75	-0,02	-0,02	-1,21	-1,03	312,11	298,56	1,84			-88,27	-41,44
8,80	-0,03	-0,03	-1,64	-1,39	389,51	375,50	2,76			-118,24	-65,33
10,11	-0,04	-0,03	-1,97	-1,68	441,65	425,80	2,76			-139,08	-78,44
12,59	-0,05	-0,04	-2,67	-2,30	537,88	520,88	3,44			-179,82	-106,07
15,01	-0,07	-0,06	-3,68	-3,18		664,42	3,67			-231,10	-136,74
17,19	-0,08	-0,08	-4,39	-3,81		763,41	6,43			-273,95	-164,37
20,19	-0,09	-0,10	-5,32	-4,61		908,33	7,35			-323,36	-204,64
22,50	-0,11	-0,11	-6,08	-5,29		1017,88	9,42			-369,95	-240,47
25,23	-0,12	-0,13	-7,24	-6,31		1181,17	32,38			-435,98	-281,44
27,43	-0,13	-0,13	-7,65	-6,66		1253,97	34,68			-463,38	-308,60
30,35	-0,14	-0,14	-8,52	-7,42		1389,47	55,35			-513,01	-352,16
32,74	-0,16	-0,16	-9,38	-8,17		1506,37	77,17			-567,10	-392,90
35,03	-0,16	-0,17	-10,02	-8,71		1608,11	87,96			-604,10	-427,08
37,68	-0,18	-0,18	-11,01	-9,60		1750,51	128,15			-661,00	-473,68
40,02	-0,19	-0,20	-11,69	-10,20		1842,14	150,89			-708,53	-510,20
42,72	-0,20	-0,21	-12,43	-10,84		1958,12	173,86			-751,84	-549,07
45,09	-0,20	-0,22	-13,17	-11,48		2068,59	210,60			-794,22	-585,83
47,32	-0,22	-0,24	-14,02	-12,23		2165,74	268,48			-853,46	-625,64
50,21	-0,23	-0,25	-14,76	-12,87		2287,23	293,97			-896,31	-665,91
55,03	-0,24	-0,27	-16,30	-14,24		2509,09	381,93			-984,59	-738,73
57,75	-0,26	-0,29	-17,39	-15,21		2619,33	444,40			-1055,06	-785,33
60,29	-0,26	-0,30	-18,06	-15,80		2735,77	468,29			-1095,57	-823,73
62,19	-0,27	-0,30	-18,64	-16,30		2820,98	492,40			-1129,29	-850,89
65,41	-0,29	-0,32	-19,93	-17,47		2970,26	548,44			-1219,43	-899,36
67,70	-0,29	-0,34	-20,74	-18,15		3456,23	574,62			-1270,71	-944,08
70,04	-0,30	-0,35	-21,61	-18,89		3677,40	590,70			-1328,31	-985,99
71,56	-0,38	-0,49	-32,94	-27,21	2671,69	4229,51	629,05			-2204,25	-1369,76
72,63	-0,41	-0,56	-37,03	-30,38	2442,72	5527,35	634,11			-2906,22	-1175,41

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 57 - Resultados experimentais da viga VB-2

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,48	0,00	0,01	-0,31	-0,24	66,37	60,63	-1,15	65,22	50,76	-53,15	-42,38
10,35	-0,02	0,01	-0,85	-0,72	135,73	125,63	-2,53	131,14	97,38	-108,18	-82,89
15,45	-0,03	0,01	-1,83	-1,62	288,00	264,11	-4,13	241,84	166,74	-182,17	-132,29
20,08	-0,04	0,01	-2,97	-2,63	473,57	436,36	-6,89	412,02	352,54	-268,10	-181,23
25,42	-0,06	0,01	-4,30	-3,78	675,22	626,30	-10,11	621,70	592,31	-363,86	-242,34
30,07	-0,06	0,01	-5,50	-4,83	864,92	808,88	-14,01	885,36	842,18	-456,12	-303,22
35,44	-0,07	0,01	-6,82	-5,97	1064,50	1005,01	-14,47	1124,21	1090,91	-560,55	-372,06
40,07	-0,08	0,01	-8,03	-7,04	1245,24	1188,52	-15,16	1327,46	1300,82	-651,86	-435,75
45,19	-0,10	0,01	-9,33	-8,18	1425,76	1368,80	-14,47	1526,58	1486,62	-753,01	-517,46
50,15	-0,10	0,00	-10,41	-9,11	1590,43	1530,26	-10,11	1720,19	1674,26	-841,29	-586,77
55,30	-0,10	-0,01	-11,62	-10,15	1767,27	1701,59	0,23	1927,81	1937,00	-942,91	-672,70
60,10	-0,10	-0,02	-12,93	-11,30	1946,87	1874,76	21,59	2135,66	2174,93	-1051,55	-770,34
65,38	-0,11	-0,04	-14,32	-12,52	2126,47	2051,83	52,36	2343,27	2377,49	-1175,88	-889,99
70,04	-0,11	-0,04	-15,35	-13,39	2274,14	2191,92	176,61	2517,59	2555,48	-1259,24	-961,40
75,24	-0,11	-0,05	-16,63	-14,51	2445,24	2355,67	353,45	2727,50	2765,40	-1371,40	-1070,28
80,39	-0,12	-0,06	-17,88	-15,58	2613,59	2515,75	508,02	2936,50	2969,80	-1502,28	-1205,15
85,05	-0,12	-0,07	-19,41	-16,90	2784,46	2680,65	644,44	3159,04	3161,57	-1675,32	-1427,82
90,36	-0,12	-0,08	-20,58	-17,91	3186,60	2860,48	717,47	3384,80	3385,72	-1783,26	-1534,13
95,18	-0,13	-0,09	-22,15	-19,30	3420,63	3345,30	791,66	3749,74	3741,47	-1960,98	-1727,30
100,30	-0,13	-0,10	-25,20	-21,97	3472,08	4001,91	970,56	4345,49	4368,00	-2241,72	-2046,44
105,64	-0,13	-0,12	-29,17	-25,34	3493,67		1073,00	5734,05	5771,48	-2682,85	-2537,91
106,38	-0,13	-0,12	-29,80	-25,89	3491,37		1088,61	5898,49		-2750,99	-2600,43
107,41	-0,13	-0,13	-30,66	-26,66	3491,83		1107,90			-2841,83	-2684,96
108,37	-0,13	-0,13	-31,18	-27,12	3498,26		1121,00			-2895,92	-2736,94
109,10	-0,13	-0,14	-31,83	-27,70	3502,16		1135,92			-2960,55	-2798,75
110,11	-0,13	-0,15	-32,44	-28,25	3508,82		1148,56			-3024,94	-2860,80
111,15	-0,13	-0,15	-33,49	-29,15	3509,97		1166,24			-3123,28	-2955,63
112,67	-0,11	-0,16	-35,28	-30,81	3508,82		1176,80			-3266,34	-3097,76

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 58 - Resultados experimentais da viga VB-3

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,88	-0,02	-0,02	-0,68	-0,59	88,42	85,21	2,07	107,94	124,25	-153,60	-50,81
10,95	-0,03	-0,04	-1,33	-1,15	175,92	169,26	2,99	214,05	247,12	-279,10	-99,98
15,04	-0,04	-0,04	-2,01	-1,74	281,34	272,84	2,99	316,48	384,23	-395,47	-145,40
20,05	-0,04	-0,06	-3,15	-2,73	464,15	468,75	2,53	490,33	583,81	-553,76	-209,33
25,04	-0,05	-0,08	-4,32	-3,75	641,45	660,75	2,07	661,44	770,53	-694,24	-276,53
30,07	-0,04	-0,09	-5,60	-4,91	822,43	863,77	1,38	830,24	956,10	-829,35	-347,00
35,22	-0,04	-0,11	-6,83	-6,00	986,87	1041,99	6,20	964,82	1099,87	-948,53	-414,67
40,32	-0,03	-0,12	-7,84	-6,89	1132,48	1196,78	8,73	1092,29	1272,34	-1053,19	-466,65
45,09	0,01	-0,13	-9,04	-7,95	1298,76	1377,30	23,20	1220,90	1490,53	-1165,58	-534,79
50,15	0,07	-0,14	-10,34	-9,08	1471,00	1564,94	56,96	1361,00	1724,33	-1291,32	-604,10
55,38	0,09	-0,15	-11,67	-10,27	1638,20	1747,75	108,40	1492,59	1921,84	-1424,55	-690,50
60,31	0,11	-0,16	-12,68	-11,16	1786,11	1900,71	134,81	1612,71	2092,94	-1530,61	-757,93
65,05	0,11	-0,16	-13,89	-12,24	1949,63	2055,50	224,84	1742,24	2282,64	-1648,62	-826,07
70,20	0,11	-0,17	-15,25	-13,48	2126,70	2211,90	391,81	1885,78	2488,88	-1784,20	-908,72
75,13	0,11	-0,19	-16,68	-14,77	2292,98	2361,19	638,47	2017,61	2671,46	-1931,47	-988,57
80,01	0,11	-0,19	-17,65	-15,63	2435,14	2496,00	696,11	2133,59	2842,11	-2027,94	-1049,44
85,43	0,11	-0,19	-18,98	-16,80	2611,29	2639,77	787,29	2274,83	3046,51	-2158,36	-1115,47
90,36	0,11	-0,19	-20,27	-17,94	2779,18	2781,70	855,27	2415,85	3241,72	-2287,14	-1179,63
95,02	0,11	-0,19	-22,06	-19,52	2976,92	2920,65	937,49	2577,99	3462,89	-2462,75	-1275,40
100,09	0,11	-0,19	-23,34	-20,65	3822,32	3505,84	984,34	2795,71	3769,72	-2588,49	-1344,47
105,32	0,10	-0,19	-25,33	-22,41	4997,05	3914,41	1033,26	3163,41	4219,18	-2759,18	-1444,68
110,11	0,09	-0,19	-28,42	-25,18	4997,05	3914,41	1083,79	3985,84	5213,17	-3045,54	-1646,28
115,01	0,07	-0,19	-32,03	-28,37	5652,29	4645,44	1125,36	4535,20		-3307,55	-1848,82
116,10	0,07	-0,20	-33,12	-29,35	5556,52	4399,00	1136,38	4743,27		-3363,28	-1891,90
117,33	0,07	-0,20	-33,50	-29,70	5540,44	4363,41	1142,81	4812,40		-3388,10	-1920,23
118,01	0,07	-0,20	-33,80	-29,96	5538,14	4337,00	1147,41	4865,91		-3405,66	-1935,92
119,21	0,07	-0,21	-34,56	-30,67	5532,63	4150,97	1155,90			-3445,23	-1975,02
120,16	0,07	-0,21	-35,31	-31,38	5516,33	3998,24	1159,81			-3478,48	-2009,68
121,23	0,07	-0,21	-35,83	-31,89	5519,54	4023,73	1161,88			-3504,00	-2033,33

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 59 - Resultados experimentais da viga VB-4

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,69	0,00	0,01	-0,58	-0,53	79,46	76,25	1,61	105,19	79,69	-38,40	-320,78
10,60	0,00	0,01	-1,12	-1,01	149,97	147,67	2,76	201,42	153,19	-73,99	-536,20
15,34	0,01	-0,01	-1,85	-1,68	250,56	253,78	3,90	336,23	261,36	-112,39	-781,81
20,21	0,02	-0,03	-2,84	-2,57	397,09	419,14	4,36	520,88	430,39	-156,64	-1054,36
25,20	0,02	-0,07	-3,94	-3,56	588,40	605,63	5,97	700,71	618,72	-208,62	-1292,25
30,02	0,04	-0,15	-5,18	-4,67	770,53	777,88	18,14	888,57	816,00	-261,54	-1523,12
35,47	0,04	-0,22	-6,24	-5,63	914,30	916,13	21,36	1029,13	966,43	-315,63	-1712,55
40,07	0,04	-0,28	-7,20	-6,49	1046,12	1047,73	24,80	1178,41	1124,90	-361,52	-1886,52
45,09	0,04	-0,33	-8,35	-7,51	1200,46	1197,24	45,47	1354,56	1309,09	-416,55	-2088,59
50,10	0,04	-0,39	-9,56	-8,61	1360,77	1343,77	114,60	1535,77	1492,13	-474,61	-2303,77
55,36	0,04	-0,45	-10,84	-9,76	1518,78	1489,38	247,58	1700,21	1658,87	-537,60	-2530,89
60,18	0,03	-0,46	-11,74	-10,56	1649,91	1612,25	287,77	1852,94	1809,30	-586,77	-2700,88
65,30	0,04	-0,48	-12,97	-11,65	1813,67	1764,52	427,18	2041,72	1999,92	-644,84	-2938,77
70,09	0,04	-0,50	-14,06	-12,62	1955,83	1894,51	552,34	2202,49	2162,76	-699,63	-3171,51
75,16	0,04	-0,52	-15,54	-13,98	2116,59	2039,89	649,03	2384,15	2349,93	-766,60	-3532,33
80,17	0,04	-0,53	-16,52	-14,85	2258,30	2171,02	692,90	2541,01	2509,09	-818,81	-3740,96
85,51	0,03	-0,53	-17,72	-15,92	2422,28	2320,54	751,23	2719,46	2694,20	-881,80	-4064,08
90,14	0,04	-0,54	-19,28	-17,30	2611,98	2479,23	825,42	2916,98	2910,09	-966,32	-4605,66
95,16	0,04	-0,56	-20,30	-18,22	2737,38	2571,10	854,35	3058,22	3051,33	-1028,60	-4922,69
100,49	0,04	-0,57	-21,26	-19,09	2888,04	2706,14	898,91	3219,67	3215,77	-1087,38	-5149,81
105,04	0,04	-0,57	-22,38	-20,08	3554,99	3089,91	935,20	3432,80	3438,09	-1159,73	-5520,47
110,08	0,03	-0,60	-24,20	-21,76	3865,49	3052,25	992,15	3732,06	3834,95	-1265,80	
115,80	0,04	-0,63	-26,34	-23,68		3201,53	1041,99	4454,35	4441,95	-1388,96	
120,60	0,03	-0,67	-29,35	-26,41		1701,82	1087,92	5555,37	5462,12	-1569,48	
125,26	0,03	-0,74	-32,33	-29,15		1529,57	1129,72		6150,89	-1714,19	
126,16	0,03	-0,74	-32,78	-29,58		1531,41	1137,30		6255,39	-1731,98	
127,08	0,03	-0,76	-33,83	-30,57		1445,51	1147,18			-1763,12	
128,83	0,03	-0,78	-34,73	-31,41		1377,99	1160,04			-1790,05	
129,86	0,03	-0,80	-35,43	-32,07		1390,39	1169,91			-1809,25	

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 60 - Resultados experimentais da viga VB-5

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,04	-0,06	-0,05	-0,64	-0,57	72,34	74,18	0,23	87,50	89,11	-147,51	-47,53
10,27	-0,14	-0,08	-1,32	-1,18	153,88	157,09	0,23	185,11	189,47	-297,37	-101,85
15,12	-0,23	-0,12	-2,05	-1,83	245,05	255,85	0,46	297,65	300,17	-442,77	-157,58
20,16	-0,33	-0,19	-3,10	-2,82	388,13	412,48	0,23	469,89	475,41	-640,39	-223,38
25,25	-0,43	-0,24	-4,21	-3,84	541,09	571,18	-0,23	635,71	655,69	-829,11	-289,40
30,46	-0,53	-0,31	-5,38	-4,91	699,79	742,51	0,23	814,85	840,34	-1023,69	-356,60
35,17	-0,64	-0,37	-6,55	-5,96	838,97	901,89	0,69	979,52	992,61	-1231,14	-416,55
40,07	-0,70	-0,40	-7,43	-6,77	959,77	1028,90	0,23	1121,45	1133,17	-1382,87	-477,66
45,33	-0,77	-0,45	-8,61	-7,86	1116,17	1198,39	0,23	1295,31	1311,62	-1584,94	-549,54
50,02	-0,84	-0,46	-9,61	-8,77	1241,80	1335,73	7,35	1438,85	1453,78	-1764,29	-611,59
55,03	-0,93	-0,49	-10,74	-9,84	1380,52	1492,13	28,25	1603,52	1612,02	-1989,31	-680,43
60,07	-1,05	-0,52	-12,04	-11,03	1520,84	1663,69	56,27	1770,03	1759,69	-2316,88	-748,57
65,03	-1,08	-0,53	-12,83	-11,75	1626,49	1780,82	63,16	1899,10	1887,62	-2466,97	-809,44
70,99	-1,15	-0,54	-14,11	-12,92	1784,27	1963,18	121,49	2095,00	2076,86	-2732,49	-886,24
75,24	-1,19	-0,54	-15,09	-13,82	1897,03	2094,78	197,05	2235,56	2213,74	-2954,46	-938,22
80,04	-1,23	-0,55	-16,11	-14,76	2018,99	2236,71	288,92	2387,60	2360,04	-3208,04	-995,82
85,32	-1,32	-0,55	-17,60	-16,15	2163,45	2414,01	439,81	2575,23	2535,04	-3704,43	-1062,56
90,03	-1,34	-0,56	-18,44	-16,89	2276,21	2540,78	474,49	2709,59	2669,17	-3853,58	-1119,69
95,16	-1,41	-0,57	-19,64	-18,00	2414,93	2707,75	552,34	2889,65	2840,04	-4113,95	-1186,89
100,30	-1,47	-0,58	-20,83	-19,08	2551,58	2869,67	646,74	3063,96	3007,23	-4413,66	-1253,85
105,51	-1,53	-0,60	-22,48	-20,63	2702,93	3059,37	785,91	3269,05	3187,06	-5061,78	-1340,25
110,00	-1,54	-0,60	-23,28	-21,37	2818,22	3212,56	836,44	3406,16	3321,19	-5206,71	-1399,73
115,04	-1,56	-0,62	-24,58	-22,60	2986,56	3874,68	945,07	3634,45	3520,77	-5477,62	-1484,49
120,05	-1,59	-0,66	-26,20	-24,16	3577,03	5364,52	1074,60	3930,03	3773,63	-5910,09	-1586,11
125,15	-1,61	-0,73	-28,33	-26,20	3869,17		1179,79	4320,00	4070,58		-1658,22
130,08	-1,62	-0,75	-30,10	-27,88	4408,19		1247,31	4705,38	4444,25		-1713,01
131,06	-1,62	-0,76	-30,56	-28,31	4572,17		1262,70	4792,42	4537,95		-1717,46
132,01	-1,62	-0,78	-31,17	-28,90	4816,77		1281,53	4913,45	4669,55		-1718,63
133,38	-1,62	-0,80	-31,98	-29,68	5674,11		1305,19	5077,21	4852,13		-1728,94
134,27	-1,62	-0,82	-32,52	-30,19			1320,34	5176,65	4966,28		-1739,24
135,01	-1,63	-0,82	-32,84	-30,50			1328,15	5229,47	5026,68		-1746,73
135,69	-1,63	-0,85	-33,64	-31,25			1340,56	5336,73	5146,11		-1744,16

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 61 - Resultados experimentais da viga VC-R

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,21	-0,03	0,00	-0,23	-0,18	20,21	21,36	0,23			-43,79	-21,31
5,04	-0,06	0,00	-0,53	-0,45	48,00	51,22	0,46			-103,73	-49,64
7,14	-0,10	0,00	-0,88	-0,73	74,87	81,99	0,46			-178,42	-79,14
10,02	-0,19	0,00	-2,27	-1,86	355,52	483,90	0,00			-388,68	-159,69
12,56	-0,26	0,01	-3,50	-2,85	970,56	991,92	-0,69			-616,98	-299,00
15,50	-0,36	0,00	-5,10	-4,27	1261,55	1303,35	-1,84			-787,43	-394,77
17,54	-0,42	0,00	-6,00	-5,06	1419,33	1457,22	-2,53			-883,43	-447,45
20,05	-0,50	0,00	-7,27	-6,17	1633,38	1670,12	-2,07			-1007,77	-514,65
22,58	-0,59	-0,01	-8,51	-7,23	1834,11	1870,16	-4,36			-1126,71	-584,43
25,04	-0,63	-0,02	-9,42	-8,02	2005,21	2041,49	-3,67			-1231,38	-644,14
27,54	-0,71	-0,02	-10,59	-9,05	2205,47	2236,25	-1,38			-1351,02	-709,23
30,02	-0,81	-0,05	-11,82	-10,10	2396,56	2437,21	-1,61			-1477,93	-779,47
32,55	-0,90	-0,07	-13,07	-11,20	2552,50	2638,85	-0,69			-1603,20	-852,76
35,09	-0,95	-0,08	-14,00	-11,99	2648,04	2830,85	0,23			-1715,82	-915,51
37,54	-1,03	-0,08	-15,20	-13,07	2807,43	3037,09	22,51			-1845,78	-981,07
40,02	-1,10	-0,11	-16,24	-13,97	2963,60	3218,07	49,38			-1973,15	-1044,76
41,11	-1,20	-0,13	-17,42	-15,02	3049,26	3097,72	115,98			-2089,05	-1100,96
42,55	-1,21	-0,13	-17,73	-15,29	3326,24	3177,88	117,82			-2136,12	-1129,76
43,42	-1,22	-0,13	-17,99	-15,51	3562,79	3239,20	120,11			-2172,41	-1150,83
44,32	-1,24	-0,13	-18,44	-15,89	3744,23	3614,01	127,92			-2230,24	-1180,80
45,09	-1,26	-0,13	-18,89	-16,28	3960,11	3872,38	138,72			-2288,31	-1209,37
46,07	-1,41	-0,19	-27,52	-22,67	5835,79	2695,12	285,93			-4432,62	-1974,09

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 62 - Resultados experimentais da viga VC-2

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,78	-0,07	0,00	-0,73	-0,64	88,19	94,39	0,69	58,56	77,63	-54,56	-47,06
10,62	-0,11	0,01	-1,37	-1,21	177,99	188,33	1,38	110,70	148,59	-104,43	-90,61
15,09	-0,15	0,04	-2,24	-1,98	347,48	355,29	1,38	223,69	257,91	-162,97	-142,83
20,10	-0,16	0,08	-4,12	-3,63	690,60	695,66	0,46	512,84	569,11	-251,94	-224,31
25,09	-0,17	0,11	-5,90	-5,19	1005,93	1018,79	3,44	945,76	863,31	-345,60	-300,88
30,10	-0,18	0,13	-7,41	-6,52	1265,45	1286,81	10,56	1225,26	1112,27	-436,21	-373,93
35,20	-0,18	0,14	-8,99	-7,91	1538,76	1569,53	21,59	1544,96	1372,48	-527,77	-449,80
40,05	-0,18	0,16	-10,46	-9,21	1781,97	1825,15	44,10	1825,84	1620,06	-616,51	-525,66
45,30	-0,17	0,20	-12,09	-10,68	2048,61	2104,88	53,97	2142,55	1900,02	-716,02	-612,53
47,51	-0,16	0,21	-12,86	-11,36	2169,19	2231,43	63,85	2287,46	2036,21	-761,21	-652,10
50,37	-0,16	0,22	-13,79	-12,19	2310,43	2378,64	87,04	2456,27	2198,58	-820,21	-700,57
52,47	-0,15	0,23	-14,75	-13,06	2436,06	2511,62	118,51	2573,86	2348,33	-880,86	-751,61
55,22	-0,14	0,23	-15,33	-13,57	2543,31	2622,09	124,94	2689,15	2455,12	-922,07	-789,78
60,01	-0,11	0,24	-16,70	-14,82	2768,38	2849,68	189,93	2942,47	2696,04	-1010,58	-884,84
62,52	-0,10	0,25	-17,60	-15,63	2900,44	2971,87	239,31	3084,17	2848,77	-1074,03	-937,29
65,16	-0,09	0,26	-18,47	-16,43	3046,51	3105,30	298,33	3233,00	2998,74	-1127,88	-990,91
67,51	-0,07	0,27	-19,40	-17,29	3767,20	3382,28	365,86	3426,83	3191,20	-1187,12	-1048,04
70,07	-0,04	0,29	-20,80	-18,55	5314,45	3415,35	396,40	3808,77	3551,77	-1272,35	-1140,76
72,57	-0,02	0,33	-23,14	-20,67	5522,99	4577,68	436,36	4164,29	4061,17	-1405,81	-1293,42
75,30	0,05	0,33	-24,94	-22,38	3519,39		452,67	4356,52	4464,46	-1496,43	-1386,85
77,64	0,08	0,34	-26,68	-24,03	2885,05		478,85	4770,83	4748,56	-1574,87	-1470,44
80,17	0,10	0,37	-28,48	-25,76	2083,29		518,35		4815,39	-1664,31	-1562,93
82,57	0,10	0,42	-30,67	-27,87	1200,23	6739,75	655,69		5278,85	-1770,85	-1669,23
85,35	0,10	0,47	-32,92	-30,05	1442,76	5560,65	767,54			-1888,62	-1792,62
87,85	0,10	0,52	-34,67	-31,74	1896,34	5880,57	803,14			-1981,35	-1887,45
90,09	0,11	0,55	-36,48	-33,59	1981,32	5771,94	842,87			-2077,81	-1996,10
91,89	0,12	0,58	-38,64	-35,87	1797,13	5271,73	882,83			-2187,86	-2143,61
93,06	0,15	0,59	-39,12	-36,38	1834,34	5085,93	885,36			-2217,13	-2175,22

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 63 - Resultados experimentais da viga VC-3

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 2 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 3 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 4 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 5 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 6 ($\mu\text{m/m}$)	Ext. 7 ($\mu\text{m/m}$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,59	0,00	0,00	-0,39	-0,36	35,83	36,06	0,92	39,04	36,52	-70,95	-22,48
5,26	0,00	0,00	-0,79	-0,72	84,29	85,89	1,38	91,41	84,75	-148,21	-48,70
7,46	0,00	0,00	-1,11	-1,00	125,86	128,84	1,84	136,42	126,32	-200,66	-71,65
10,24	0,00	0,00	-1,49	-1,34	177,07	181,44	2,30	191,31	176,84	-255,69	-100,92
12,61	0,00	0,00	-1,84	-1,64	225,76	230,81	2,76	244,36	225,30	-299,47	-128,08
15,06	0,00	0,00	-2,40	-2,15	313,95	315,79	2,99	344,27	313,72	-366,91	-166,95
17,52	-0,01	0,00	-3,16	-2,83	421,89	419,83	2,76	466,45	426,49	-433,64	-211,90
20,05	-0,01	-0,01	-3,93	-3,50	533,28	530,30	2,30	594,14	542,24	-495,92	-257,33
22,61	-0,01	-0,02	-4,83	-4,29	653,40	646,28	1,84	727,58	674,53	-559,38	-305,09
25,09	-0,01	-0,03	-5,61	-4,97	762,49	752,61	1,61	846,78	797,17	-614,87	-349,11
27,51	-0,01	-0,05	-6,85	-6,04	916,59	875,94	1,84	1008,92	956,78	-649,29	-409,99
30,02	-0,01	-0,05	-7,41	-6,52	1001,11	959,08	2,53	1098,72	1045,67	-693,54	-445,81
32,50	-0,01	-0,07	-8,25	-7,25	1117,55	1042,91	3,22	1224,57	1171,75	-748,57	-488,20
35,03	-0,01	-0,08	-9,10	-7,96	1236,75	1106,99	6,89	1347,22	1301,05	-802,65	-530,81
37,57	-0,01	-0,09	-9,87	-8,61	1343,77	1159,12	12,86	1452,40	1422,55	-850,65	-570,85
40,07	-0,01	-0,11	-10,65	-9,28	1451,25	1236,98	20,90	1562,64	1541,74	-898,19	-609,48
42,52	-0,01	-0,13	-11,44	-9,97	1563,79	1299,22	31,69	1681,38	1662,09	-943,84	-646,95
45,06	-0,01	-0,16	-12,14	-10,57	1663,23	1194,03	37,21	1784,27	1768,65	-986,93	-683,00
47,56	-0,01	-0,18	-12,99	-11,30	1776,46	1198,85	44,33	1905,30	1882,11	-1035,16	-720,94
50,04	-0,01	-0,20	-13,86	-12,05	1889,91	1243,87	50,07	2022,66	1994,87	-1081,76	-759,57
52,52	0,00	-0,23	-14,69	-12,77	1997,63	1282,45	67,52	2098,68	2059,87	-1105,64	-799,84
55,00	0,00	-0,24	-15,25	-13,25	2081,68	1346,30	72,80	2196,06	2158,62	-1141,70	-831,45
57,70	0,00	-0,27	-16,03	-13,91	2191,69	1407,62	108,17	2323,29	2276,90	-1188,06	-866,34
60,04	0,00	-0,30	-16,77	-14,51	2284,02	1452,86	141,24	2432,84	2372,67	-1229,50	-893,03
62,63	0,00	-0,32	-17,59	-15,20	2386,91	1500,86	188,78	2551,12	2471,89	-1276,57	-918,79
65,03	0,00	-0,36	-18,34	-15,85	2484,29	1543,81	233,57	2659,52	2556,40	-1321,76	-943,84
67,51	0,00	-0,38	-19,10	-16,51	2584,42	1593,88	278,58	2767,00	2632,88	-1367,88	-972,64
70,12	0,00	-0,41	-19,95	-17,24	2693,28	1639,35	353,91	2880,69	2703,62	-1418,69	-1003,32
72,68	0,00	-0,44	-21,10	-18,24	2825,80	1747,75	439,12	3013,89	2781,24	-1460,84	-1048,74
75,05	0,00	-0,45	-21,79	-18,81	3205,67	1894,97	457,26	3154,68	2913,07	-1502,99	-1086,67
77,50	0,00	-0,45	-22,77	-19,62	3451,18	2504,04	488,04	3353,34	3196,02	-1559,41	-1135,84
80,06	0,00	-0,44	-24,15	-20,77	4008,34	2443,87	529,84	3665,68	3552,00	-1633,64	-1198,13
82,52	0,00	-0,42	-25,63	-22,00		1646,24	565,89	4045,55	4065,99	-1718,63	-1259,47
85,08	0,00	-0,39	-27,16	-23,27		1089,07	610,22	4384,54	4577,68	-1802,46	-1313,80
87,56	0,00	-0,38	-28,85	-24,71		908,33	674,53	4706,99	4924,02	-1865,44	-1376,08
90,47	0,00	-0,34	-30,51	-26,11		901,89	714,49	5120,61	5346,83	-1943,65	-1439,06
92,62	0,00	-0,31	-31,55	-26,98		881,45	747,79	5464,88	5597,63	-1993,76	-1475,82
95,18	0,00	-0,28	-33,20	-28,43		850,22	796,94			-2059,08	-1529,44
97,42	0,00	-0,27	-34,88	-29,92		827,25	827,02			-2114,58	-1580,02

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 64 - Resultados experimentais da viga VC-4

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 (µm/m)	Ext. 2 (µm/m)	Ext. 3 (µm/m)	Ext. 4 (µm/m)	Ext. 5 (µm/m)	Ext. 6 (µm/m)	Ext. 7 (µm/m)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,94	0,00	-0,04	-0,67	-0,60	100,82	103,58	-1,84	109,32	127,69	-82,19	-59,24
7,27	0,00	-0,06	-0,84	-0,75	127,00	129,76	-2,30	136,65	161,00	-101,39	-73,76
10,19	0,00	-0,10	-1,21	-1,08	186,49	189,70	-3,44	198,89	236,33	-145,64	-107,47
15,04	0,00	-0,12	-1,89	-1,67	319,00	317,63	-5,05	327,04	396,40	-229,23	-174,20
17,27	0,00	-0,12	-2,34	-2,07	453,59	406,97	-6,20	410,64	504,11	-276,29	-212,37
20,21	0,00	-0,13	-3,08	-2,73	645,13	538,56	-8,27	530,30	644,90	-343,02	-268,33
25,01	0,00	-0,19	-4,50	-3,96	981,59	774,89	-10,56	743,66	903,04	-467,12	-363,86
27,54	0,00	-0,22	-5,12	-4,51	1111,58	873,19	-11,02	839,43	1014,43	-524,96	-407,65
30,02	0,00	-0,25	-5,94	-5,23	1289,80	995,83	-14,01	959,08	1150,16	-596,14	-458,22
32,66	0,01	-0,28	-6,73	-5,93	1414,05	1106,30	-15,39	1068,86	1256,73	-679,02	-513,48
35,11	0,01	-0,30	-7,20	-6,32	1515,10	1184,15	-16,54	1140,98	1343,54	-727,73	-552,59
37,40	0,01	-0,32	-7,83	-6,86	1679,08	1281,30	-17,45	1235,14	1455,39	-785,56	-596,37
40,05	0,01	-0,34	-8,51	-7,46	1855,23	1382,35	-15,16	1343,08	1565,63	-852,29	-643,43
42,61	0,00	-0,37	-9,22	-8,06	2048,38	1483,87	-14,93	1448,50	1681,15	-921,83	-691,43
45,03	0,00	-0,40	-10,00	-8,74	2242,68	1591,81	-13,09	1564,71	1798,74	-1000,27	-742,01
47,56	0,00	-0,42	-10,64	-9,29	2391,96	1684,59	-9,88	1660,25	1898,64	-1071,69	-788,60
50,18	0,00	-0,44	-11,38	-9,93	2610,14	1794,60	1,84	1768,19	2013,47	-1152,47	-840,12
50,10	0,00	-0,47	-12,07	-10,51	2668,02	1856,84	47,54	1835,94	2056,19	-1246,60	-874,07
52,63	0,00	-0,48	-12,36	-10,76	2745,42	1908,98	48,69	1886,70	2113,61	-1284,76	-905,21
55,19	0,00	-0,49	-12,86	-11,19	2871,50	1994,41	51,44	1971,22	2204,56	-1338,38	-947,12
57,59	0,00	-0,51	-13,55	-11,82	3057,53	2115,45	64,54	2092,48	2204,56	-1410,03	-997,00
60,10	0,01	-0,53	-14,10	-12,25	3143,20	2169,42	62,24	2154,49	2406,43	-1463,41	-1033,05
62,57	0,01	-0,55	-14,77	-12,81	3286,28	2264,50	73,03	2254,39	2513,68	-1538,11	-1075,90
65,33	0,01	-0,58	-15,55	-13,47	3434,64	2370,60	92,33	2371,98	2637,47	-1633,87	-1124,37
67,59	0,01	-0,59	-16,21	-14,04	3560,73	2464,31	112,54	2473,26	2742,66	-1720,04	-1166,05
70,09	0,01	-0,61	-16,92	-14,67	3676,94	2563,29	144,92	2580,75	2853,13	-1822,13	-1211,24
72,60	0,01	-0,65	-18,05	-15,66	3871,46	2695,81	223,23	2715,56	2926,39	-2055,34	-1285,70
75,16	0,01	-0,66	-18,55	-16,08	3996,63	2778,03	227,37	2806,74	3031,81	-2115,75	-1325,27
77,67	0,01	-0,69	-19,37	-16,80	886,28	2882,76	273,07	2936,96	3170,99	-2262,79	-1376,55
80,09	0,01	-0,70	-19,83	-17,20	819,67	3140,44	279,27	3025,61	3263,77	-2318,28	-1414,24
82,49	0,01	-0,72	-20,55	-17,85	926,24	3717,82	316,94	3188,21	3430,05	-2412,18	-1468,10
85,16	0,01	-0,76	-22,00	-19,20	875,94	5109,82	566,58	3450,72	3685,67	-2650,07	-1541,85
87,56	0,01	-0,78	-22,96	-20,06	461,63	5109,82	635,71	3653,51	3908,44	-2820,76	-1600,86
90,31	0,01	-0,81	-24,11	-21,06	406,97	5109,82	667,18	3966,55	4223,31	-3046,24	-1680,00
92,76	0,01	-0,87	-25,74	-22,47	317,63	4641,99	713,34	4222,62	4423,58	-3492,76	-1777,17
95,32	0,01	-0,89	-26,68	-23,25	331,64	4559,31	726,66	4413,93	4627,98	-3592,04	-1834,77
97,55	0,01	-0,90	-27,67	-24,08	338,30	4538,41	741,13	4604,10	4814,93	-3707,94	-1886,99
100,06	0,01	-0,91	-28,84	-25,08	337,61	4477,78	759,27	4804,82	5000,27	-3867,86	-1937,33
103,95	0,01	-0,98	-30,98	-26,94	341,28	4422,20	794,18	5167,00	5317,67	-4168,51	-2016,70

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 65 - Resultados experimentais da viga VC-5

Carga (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	Ext. 1 (µm/m)	Ext. 2 (µm/m)	Ext. 3 (µm/m)	Ext. 4 (µm/m)	Ext. 5 (µm/m)	Ext. 6 (µm/m)	Ext. 7 (µm/m)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,72	0,00	0,00	-0,64	-0,53	80,15	73,49	-1,15	79,46	82,68	-22,24	-49,40
10,54	0,00	-0,01	-1,19	-1,01	155,25	142,62	-2,53	154,33	160,08	-42,85	-96,23
15,06	0,00	-0,01	-1,78	-1,52	243,90	224,84	-4,36	242,99	250,33	-67,43	-148,68
20,21	0,00	-0,01	-2,87	-2,42	431,77	403,98	-7,58	429,24	454,74	-103,73	-225,48
25,04	0,00	-0,01	-3,99	-3,38	636,63	595,29	-11,48	636,17	675,22	-140,72	-302,99
27,84	0,00	-0,01	-4,88	-4,17	754,68	722,07	-12,86	770,53	826,56	-165,31	-351,69
30,07	0,00	-0,01	-5,23	-4,49	813,47	781,32	-14,01	833,68	896,61	-180,76	-380,25
32,69	0,00	-0,01	-5,78	-4,95	895,46	867,90	-15,62	926,70	1002,95	-200,90	-417,01
35,41	0,00	-0,01	-6,44	-5,50	985,49	964,36	-17,45	1033,72	1123,75	-223,38	-456,35
37,73	0,00	-0,01	-6,99	-5,96	1055,08	1047,04	-17,91	1124,90	1224,34	-242,81	-490,30
40,13	0,00	-0,01	-7,62	-6,51	1109,05	1140,98	-16,54	1230,09	1339,87	-263,65	-527,30
42,61	0,00	-0,01	-8,16	-6,99	1176,57	1221,36	-15,62	1320,11	1437,47	-284,02	-562,19
45,11	0,00	-0,01	-8,90	-7,63	1266,37	1325,86	1,38	1442,30	1567,69	-307,43	-601,99
47,37	0,00	-0,03	-9,80	-8,43	1348,36	1437,93	113,91	1523,60	1606,97	-335,77	-644,14
50,12	0,00	-0,03	-10,13	-8,72	1397,05	1490,99	118,05	1588,36	1685,51	-354,03	-673,64
52,58	0,00	-0,03	-10,66	-9,18	1468,02	1570,91	146,99	1688,04	1811,83	-374,63	-707,59
55,30	0,00	-0,03	-11,26	-9,69	1545,65	1657,72	180,06	1791,85	1938,60	-397,35	-744,35
57,56	0,00	-0,03	-11,84	-10,18	1621,89	1736,96	243,90	1892,21	2069,97	-421,70	-777,83
60,07	0,00	-0,03	-12,42	-10,68	1693,32	1816,42	296,50	1990,28	2192,15	-443,47	-812,25
62,68	0,00	-0,03	-13,04	-11,22	1768,19	1901,17	348,40	2091,79	2318,24	-466,19	-848,55
65,52	0,01	-0,02	-13,79	-11,88	1856,15	1993,49	438,43	2213,05	2470,28	-491,00	-891,16
70,58	0,01	-0,03	-15,21	-13,13	1529,11	2152,19	536,27	2410,34	2726,58	-537,37	-971,00
72,54	0,01	-0,03	-15,56	-13,42	1569,53	2207,54	545,91	2470,74	2799,16	-552,35	-994,19
75,35	0,01	-0,03	-16,19	-13,96	1629,70	2298,49	573,24	2570,87	2929,61	-575,06	-1031,41
77,75	0,01	-0,02	-16,75	-14,44	1670,35	2373,13	627,90	2656,77	3040,54	-593,80	-1063,73
80,42	0,01	-0,02	-17,43	-15,05	1711,92	2460,40	703,69	2757,82	3170,30	-613,46	-1103,30
85,65	0,01	-0,02	-18,78	-16,25	1793,00	2627,83	866,07	2956,94	3413,51	-651,16	-1184,78
87,23	0,01	-0,02	-20,02	-17,34	1675,41	2741,28	957,24	3129,19	3634,45	-671,77	-1248,23
90,09	0,01	-0,02	-20,29	-17,57	1725,24	2784,46	970,11	3182,70	3694,85	-689,33	-1275,16
92,54	0,01	-0,03	-20,80	-18,01	1818,26	3054,09	1002,72	3287,66	3831,04	-709,70	-1308,18
95,13	0,01	-0,04	-21,34	-18,49	1748,44	3073,61	1036,02	3397,44	3963,79	-728,66	-1341,66
97,47	0,01	-0,04	-22,08	-19,12	1669,21	3038,01	1083,56	3560,27	4176,00	-745,76	-1381,23
100,30	0,01	-0,04	-22,97	-19,91	1681,61	3232,31	1141,89	3767,20	4454,58	-760,51	-1429,23
105,34	0,01	-0,05	-24,80	-21,45	664,19	3184,77	1235,37	4209,76	4957,78	-782,75	-1524,29
107,52	0,01	-0,05	-25,77	-22,30	650,18	3366,66	1273,49	4449,30	5224,65	-789,54	-1573,46
110,06	0,02	-0,07	-27,14	-23,48	608,15	3491,14	1310,24	4666,79	5490,60	-789,78	-1623,34
111,09	0,02	-0,07	-27,89	-24,13	593,22	3470,93	1327,69	4761,42	5607,96	-788,14	-1645,35

Fonte: Elaborada pela autora.