

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
*CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT*  
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO**

**EXPEDITO FERNANDO SOARES DE SOUZA LIMA**

**RECIFE, 2020**

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
*CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT*  
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO**

**EXPEDITO FERNANDO SOARES DE SOUZA LIMA**

**Orientador: Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira**

**RECIFE, 2020**

**EXPEDITO FERNANDO SOARES DE SOUZA LIMA**

**RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de concentração em Engenharia de Construções.

**RECIFE  
2020**

**EXPEDITO FERNANDO SOARES DE SOUZA LIMA**

**RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO**

Avaliado por:

---

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira

DSc. UFPE

(Orientador)

---

Prof. Dr. Fuad Carlos Zarzar Júnior.

Dsc. UNICAP

(Avaliador Interno)

---

Prof.Dr. João Manoel Freitas Mota

Dsc. IFPE

(Avaliador Externo)

**RECIFE  
2020**

*Mesmo com minha sabedoria, jamais conseguiria almejar o objetivo deste trabalho sem que houvesse a ajuda do Soberano Deus.*

Expedito Lima.

## AGRADECIMENTOS

Ao nosso grande superior “DEUS” que sempre esteve comigo nos momentos de grandes dificuldades, me dando força para a conclusão do meu sonhado mestrado em Engenharia Civil.

Aos meus pais Amaro e Hilda (in memoriam) que tanto fizeram para eu chegar onde estou, dedico de coração a vocês este trabalho que eu consegui com muita dificuldade.

À minha esposa Teresinha, filha Ana, meu neto Ernesto e meu genro Thiago, que aceitaram a minha ausência durante este trabalho, devido à necessidade de estudar e trabalhar intensamente.

Ao meu orientador Dr. Romilde Almeida de Oliveira, que não mediu distância para esclarecer várias dúvidas que tive no decorrer do meu trabalho, devido ao longo tempo de minha graduação para início do mestrado. Fico muito grato pela sua dedicação e paciência, durante este período de montagem da minha dissertação.

Aos professores Dr. Fuad Zarzar Júnior e Dr. João Manoel Freitas Mota, através das contribuições ao trabalho e participação na banca de defesa.

Aos demais professores da pós-graduação, agradeço por todos os conhecimentos adquiridos através das disciplinas obrigatórias do mestrado.

Ao Engenheiro Civil MsC Wellington Amorim Rêgo, que muito fez por mim, incentivando cada dia para que eu conseguisse obter o meu grande objetivo de ser mestre. Paciência nunca faltou para esclarecer dúvidas que foram chegando à medida que o trabalho estava sendo desenvolvido.

Ao Engenheiro Civil Amâncio de Cruz Filgueira Filho, outrora meu aluno da graduação, foi meu colega nas disciplinas obrigatórias do mestrado e estudamos juntos algumas vezes, com bastante dedicação.

Ao Dr. Leonardo Bruno Ferreira de Souza, que esteve sempre me incentivando para a conclusão deste trabalho, não mediu distância quando eu precisei de sua ajuda, muito grato.

Ao Engenheiro Químico Ivan Xavier Lins, que tanto contribuiu nos últimos capítulos na digitação e organização da minha dissertação, com muita paciência e dedicação.

A Universidade Católica de Pernambuco, por me manter no seu quadro de professores durante 42 anos de trabalho e dedicação a essa grande instituição inserida em nossa região, permitindo almejar o meu sonho de ser Mestre em Engenharia Civil.

## RESUMO

Após o planejamento dos 6 capítulos para a montagem da minha dissertação, foi realizada uma revisão de forma ampla que permita descrever as técnicas de recuperação estrutural de vigas de concreto armado à flexão ou ao cisalhamento, mostrando vantagens e desvantagens que permitam escolher uma boa técnica de recuperação estrutural dentro da existente. Foi desenvolvida a técnica de encamisamento parcial para combater à flexão, através de Santos (2006), onde foram utilizadas para fins experimentais 4 vigas, sendo 2 vigas de referência que foram chamadas de (REF1 e REF2), e 2 vigas reforçadas (VR1 e VR2) à flexão por encamisamento parcial, tomando como base a viga (REF1), foi realizado os ensaios e encontrados os resultados. Um outro estudo bem interessante foi realizado por Júnior (1997), com chapas finas de aço coladas nas laterais da viga com resina a base de epóxi, para combater ao cisalhamento. Foram preparadas 4 vigas de concreto armado com as mesmas armaduras de tração e compressão que foram chamadas de VS1, VS2, VS3 e VS4 e com as mesmas dimensões uma outra desprovida de estribos que foi chamada de VSE (viga sem estribo) Em seguida foram pré fissuradas até aparecerem as primeiras fissuras decorrentes do cisalhamento para carga até 50 KN. Posteriormente foram coladas chapas finas de aço nas laterais das vigas VC1, VC2, VC3, e VC4, e após ensaios obtendo diversos resultados, foi possível traçar diversos gráficos que se encontram anexados a dissertação. Foi realizado um dimensionamento para o reforço de uma viga à flexão com uso da fibra de carbono, o método descrito é iterativo, partindo com uma profundidade arbitrada da linha de neutra mostrada no subitem 4.37 e com os cálculos das deformações e tensões dos elementos constituintes do elemento estrutural obtendo-se o valor da linha neutra calculada, se os valores convergirem do  $c$  (arbitrado) com o  $c$  (calculado), o método foi concluído. Finalmente foi desenvolvido o dimensionamento para a recuperação de uma viga de concreto armado ao cisalhamento com uso da fibra de carbono, com os resultados encontrados, foi possível comentar as discussões e conclusões, bem como, as recomendações para trabalhos futuros nesta área de grande relevância.

**Palavra – chave:** reforço estrutural, estrutura de concreto armado, técnicas de recuperação, fibra de carbono, flexão, cisalhamento.

## ABSTRACT

After planning the 6 chapters for the assembly of my dissertation, a comprehensive review was carried out to describe the structural recovery techniques of bending reinforced concrete beams or shear, showing advantages and disadvantages that allow choosing a good structural recovery within the existing one. The partial jacketing technique was developed to combat flexion, through Santos (2006), where 4 beams were used for experimental purposes, 2 reference beams that were called (REF1 and REF2), and 2 reinforced beams (VR1 and VR2) to partial bending, based on the beam (REF1), the tests were carried out and the results were found. Another very interesting study was carried out by Júnior (1997), with thin steel sheets glued to the sides of the beam with epoxy resin, to combat shear. Four reinforced concrete beams were prepared with the same tensile and compression reinforcement that were called VS1, VS2, VS3 and VS4 and with the same dimensions another one without stirrups that was called VSE (beam without stirrup). cracked until the first cracks resulting from shearing to load up to 50 KN appear. Subsequently, thin steel sheets were glued to the sides of beams VC1, VC2, VC3, and VC4, and after testing obtaining different results, it was possible to draw several graphs that are attached to the dissertation. A design was carried out to reinforce a bending beam using carbon fiber, the method described is iterative, starting with an arbitrary depth of the neutral line shown in subitem 4.37 and with the calculations of the deformations and stresses of the constituent elements of the structural element obtaining the value of the calculated neutral line, if the values converge from  $c$  (arbitrated) to  $c$  (calculated), the method was concluded. Finally, the dimensioning for the recovery of a reinforced concrete beam with the use of carbon fiber was developed, with the results found, it was possible to comment on the discussions and conclusions, as well as, the recommendations for future work in this highly relevant area.

**Key words:** structural reinforcement, reinforced concrete structure, recovery techniques, carbon fiber, bending, shear

## SUMARIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS .....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>19</b>
1 INTRODUÇÃO .....	19
1.1 <i>Considerações preliminares.....</i>	19
1.2 <i>Justificativas da pesquisa.....</i>	20
1.3 <i>Objetivos .....</i>	21
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	21
1.3.2 Objetivo específico .....	21
1.4 <i>Estrutura e organização da dissertação .....</i>	21
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>23</b>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 <i>Manifestações Patológicas no concreto.....</i>	23
2.2 <i>Estudo e importância dos reforços estruturais .....</i>	25
2.3 <i>Escolhas dos materiais para a recuperação estrutural .....</i>	27
2.4 <i>Materiais diversos usado em recuperação estrutural.....</i>	28
2.4.1 Concreto Moldado .....	28
2.4.2 Concreto projetado .....	29
2.4.3 Graute .....	30
2.4.4 Aço .....	30
2.4.5 Compósitos de Resinas e Fibra de carbono .....	31
2.4.5.1 Fibras .....	31
2.4.5.2 Resinas .....	33
2.4.6 Argamassa polimérica .....	34
2.4.7 Inibidores de Corrosão .....	35
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>36</b>
3 METODOLOGIA .....	36
3.1 <i>Técnicas de reforço estrutural .....</i>	36
3.1.1 <i>Técnica com aumento da seção de concreto (encamisamento).....</i>	36
3.1.1.1 Procedimento de execução.....	37
3.1.1.2 Tipos de encamisamento em vigas reforçadas à flexão .....	38
3.1.2 <i>Técnica de chapas finas de aço coladas.....</i>	41
3.1.2.1 Procedimento de execução.....	41
3.1.3 <i>Técnica com compósito de fibras e resinas .....</i>	42
3.1.3.1 Procedimento de execução.....	43
3.1.4 <i>Técnica de protensão externa .....</i>	45

3.1.4.1 Procedimento de execução.....	45
3.1.5 Técnica de perfis metálicos .....	48
3.1.5.1 Procedimento de execução.....	49
CAPÍTULO IV.....	51
4 RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO À FLEXÃO E AO CISALHAMENTO.....	51
4.1 <i>Recuperação estrutural de viga de concreto armado à flexão por encamisamento parcial</i> .....	51
4.1.1 Procedimento experimental .....	51
4.1.2 Preparação das vigas.....	52
4.1.3 Ensaios e resultados.....	54
4.2 <i>Recuperação estrutural de viga de concreto armado ao cisalhamento com uso de chapas finas de aço coladas</i> .....	56
4.2.1 Procedimento experimental .....	56
4.2.2 Preparação das vigas.....	57
4.2.3 Ensaios preliminares e características importantes dos materiais de reforço .....	59
4.2.4 Ensaios das vigas .....	62
4.2.5 Obtenção dos resultados nos ensaios.....	64
4.2.5.1 Vigas VS1 e VC1 .....	64
4.2.5.2 Vigas VS2 e VC2.....	66
4.2.5.3 Vigas VS3 e VC3.....	68
4.2.5.4 Vigas VS4 e VC4.....	70
4.2.5.5 Viga VSE .....	72
4.2.6. Demais resultados.....	73
4.2.7 Análise dos resultados .....	75
4.3 <i>Recuperação estrutural de uma viga de concreto armado à flexão com uso da Fibra de carbono</i> .....	76
4.3.1 Resistência à compressão de cálculo .....	77
4.3.2 Deformação da viga apenas para a carga permanente: $g = 0,095 \text{ KN/cm}$ ..	77
4.3.3 Tensão de cálculo do Aço CA 50 .....	79
4.3.4 Área da armadura de tração devido à carga permanente .....	79
4.3.5 Momento máximo resistido pela armadura longitudinal existente.....	79
4.3.6 Módulo de Elasticidade secante do concreto.....	80
4.3.7 Reforço com uso de duas lâminas de fibra de carbono, arbitrando $c = 0,25d$ , onde $d = 94,5\text{cm}$ . .....	80
4.3.7.1 Determinação das deformações específicas.....	81
4.3.7.2 Determinação das tensões .....	83
4.3.7.3 Cálculo do equilíbrio das forças resultantes .....	83
4.3.8 Reforço com uso de duas lâminas de fibra de carbono, arbitrando $c = 0,18d$ , onde $d = 94,5\text{cm}$ . .....	84
4.3.8.1 Determinação das deformações específicas.....	84
4.3.8.2 Determinação das tensões .....	86

4.3.8.3 Cálculo do equilíbrio das forças resultantes .....	86
<i>4.4 Recuperação estrutural de uma viga de concreto armado ao cisalhamento com uso da Fibra de Carbono .....</i>	<i>87</i>
4.4.1 Dados relevantes são fornecidos através do detalhamento da viga com seus elementos constituintes abaixo. ....	87
4.4.1.1 Dados dos diversos materiais a serem utilizados no reforço estrutural desejado. ....	87
4.4.1.2 Esforços cortantes relevantes .....	88
4.4.2 Utilização do “Modelo de cálculo I” .....	88
4.4.2.1 Verificação da compressão do concreto .....	89
4.4.2.2 Cálculo da armadura transversal .....	89
4.4.3 Cálculo do reforço com a utilização do FRP .....	90
4.4.3.1 Comprimentos e fatores relevantes do reforço .....	91
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>93</b>
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	93
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>96</b>
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	96
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Percentual das manifestações patológicas nas etapas da obra.....	25
Figura 2.2 - Lançamento de concreto projetado.....	29
Figura 2.3 - Aplicação de graute. ....	30
Figura 2.4 - Representação esquemática de um compósito de resina e fibra.....	31
Figura 2.5 - Diagrama tensão versus deformação dos principais tipos de fibras e para aços de concreto armado e protendido. ....	32
Figura 2.6 - Tubo e folha de carbono. ....	33
Figura 2.7 - Materiais de resina e fibra. ....	33
Figura 2.8 –Perfis de resina e fibra. ....	33
Figura 2.9 - Adesivo epóxi em pasta e fluido. ....	34
Figura 2.10 - Aplicação de argamassa polimérica tixotrópica. ....	34
Figura 2.11- Tratamento anticorrosivo. ....	35
Figura 3.1 - Tipos de encamisamento em vigas reforçadas à flexão. ....	38
Figura 3.2 - Modo de ruptura em vigas reforçadas com chapas de aço.....	40
Figura 3.3 - Tipos de ancoragens utilizadas. ....	41
Figura 3.4 - Ancoragens utilizadas. ....	43
Figura 3.5 - Etapas da aplicação do compósito.....	44
Figura 3.6 -Configuração dos cabos de protensão.....	45
Figura 3.7 -Modos de ruína à protensão externa.....	46
Figura 3.8 - Detalhes dos desviador e conector na protensão externa.....	47
Figura 3.9 - Efeito de segunda ordem.....	47
Figura 4.1 - Esquema de ensaio e diagramas correspondentes.....	52
Figura 4.2 - Detalhamento das armaduras longitudinais e transversal.....	52
Figura 4.3 - Características geométricas do reforço.....	53
Figura 4.4 - Detalhe da armadura de reforço.....	53

Figura 4.5 - Preparação da viga para reforço.....	54
Figura 4.6 - Detalhe geométrico da viga.....	56
Figura 4.7 - Esquema para os ensaios das vigas.....	57
Figura 4.8 - Detalhamento das armaduras.....	57
Figura 4.9 - Viga sem estribos.....	58
Figura 4.10 - Detalhe da seção da viga.....	58
Figura 4.11- Fixação das chapas.....	59
Figura 4.12 - Vista frontal da viga.....	59
Figura 4.13 - Posicionamento dos extensômetros elétricos e flexímetros.....	62
Figura 4.14 - Posicionamento dos extensômetros elétricos nas chapas.....	63
Figura 4.15 - Tensão nos estribos das vigas VS1 e VC1.....	64
Figura 4.16 - Tensões de tração e compressão nas chapas da viga VC1.....	64
Figura 4.17- Gráfico Momento x Curvatura das vigas VS1 e VC1.....	65
Figura 4.18 - Gráfico Carga x Flecha das vigas VS1 e VC1.....	65
Figura 4.19 - Tensão nos estribos das vigas VS2 e VC2.....	66
Figura 4.20 - Tensões de tração e compressão nas chapas da viga VC2.....	66
Figura 4.21 - Gráfico Momento x Curvatura das vigas VS2 e VC2.....	67
Figura 4.22 - Gráfico Carga x Flecha das vigas VS2 e VC2.....	67
Figura 4.23 - Tensão nos estribos das vigas VS3 e VC3.....	68
Figura 4.24 - Tensões de tração e compressão nas chapas da viga VC3.....	68
Figura 4.25 - Gráfico Momento x Curvatura VS3 e VC3.....	69
Figura 4.26 - Gráfico Carga x Flecha das vigas VS3 VC3.....	69
Figura 4.27 - Tensão nos estribos das vigas VS4 e VC4.....	70
Figura 4.28 - Tensão de tração na chapa da viga VC4.....	70
Figura 4.29 - Gráfico Momento x Curvatura das vigas VS4 e VC4.....	71
Figura 4.30 - Gráfico Carga x Flecha das vigas VS4 e VC4.....	71

Figura 4.31 - Tensões de tração e compressão nas chapas da viga VSE.....	72
Figura 4.32 - Gráfico Carga x Flecha da viga VSE e da viga fictícia.....	72
Figura 4.33 - Gráfico Carga x Flecha das vigas VC2 e VSE.....	73
Figura 4.34 - Diagrama de deformações.....	78
Figura 4.35 - Diagrama de deformações.....	82
Figura 4.36 - Diagrama de deformações.....	85
Figura 4.37 - Corte transversal da viga.....	87
Figura 4.38 - Vista frontal (a) e lateral da viga (b) .....	92

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Causas que induzem a geração de manifestações patológicas no concreto.	24
Quadro 4.1 - Resultado das vigas ensaiadas.....	55
Quadro 4.2 - Resistência média à compressão e idades do concreto.....	60
Quadro 4.3 - Diâmetros e tensões de escoamento dos aços.....	61
Quadro 4.4 - Espessuras das chapas coladas nas vigas.....	61
Quadro 4.5- Rigidez média $(EJ)_M$ e rigidez da seção central $(EJ)_S$ das vigas VS1 e VC1.....	65
Quadro 4.6 - Rigidez média $(EJ)_M$ e rigidez da seção central $(EJ)_S$ das vigas VS2 e VC2.....	67
Quadro 4.7- Rigidez média $(EJ)_M$ e rigidez da seção central $(EJ)_S$ das vigas VS3 e VC3.....	69
Quadro 4.8 - Rigidez média $(EJ)_M$ e rigidez da seção central $(EJ)_S$ das vigas VS4 e VC4.....	71
Quadro 4.9 - Valores das tensões nos estribos das vigas com chapas.....	73
Quadro 4.10 - Tensões de trações nas chapas.....	74
Quadro 4.11- Resumo dos resultados dos ensaios das vigas sem chapas.....	74
Quadro 4.12- Resumo dos resultados dos ensaios das vigas com chapas.....	74
Quadro 4.13 - Dados relevantes para projeto de recuperação estrutural.....	76
Quadro 4.14 – Siglas utilizadas.....	81

## LISTA DE SIMBOLOS

$A_{fe}$  - Área efetiva da fibra;

$A_s$  - Área da armadura de tração;

$A_s'$  - Área da armadura de compressão;

$A_{sp}$  - Área da armadura do porta estribo;

$A_{s\ominus}$  - Área da armadura transversal referente a dois ramos;

$b_f$  - Base da fibra;

$b_w$  - Base da viga;

$c$  - Profundidade da linha neutra;

$d$  - Distância da armadura de tração a parte mais comprimida da viga;

$d'$  - Distância da armadura de compressão a parte mais comprimida da viga;

$d_f$  - Distância da armadura de tração ao fundo da laje;

$d_{fe}$  - Comprimento efetivamente aderido da lâmina de fibra de carbono;

$E_{cs}$  - Modulo de elasticidade secante do concreto;

$E_f$  - Módulo de elasticidade da fibra;

$E_s$  - Modulo de elasticidade do aço;

$f_{f\mu}^*$  - Tensão de tração máxima de projeto da fibra fornecida pela fabricante;

$f_{cd}$  - Resistência a compressão de cálculo;

$f_{ck}$  - Resistência a compressão do concreto;

$f_{ctd}$  - Resistência de cálculo do concreto a tração;

$f_f$  - Tensão limite de ruptura da fibra de carbono;

$f_{f\mu}$  - Tensão de tração máxima de projeto da fibra de carbono ;

$f_s$  - Tensão atuante na armadura de tração;

$f_s'$  - Tensão atuante na armadura de compressão;

$f_{sd}$  - Tensão atuante na armadura de tração;

$f_{yk}$  - Tensão de escoamento do aço;

$f_{yd}$  - Tensão de cálculo do aço;

$f_{ywd}$  - Tensão na armadura transversal limitada a 435MPa;

$g$  - Carregamento distribuído permanente;

$h$  - Altura da viga;

$h_f$  - Altura da laje;

$k_1$  - Fator de multiplicação de comprimento efetivo de aderência;

$k_2$  - Coeficiente de eficiência do aproveitamento da fibra;

$L$  - Comprimento da viga;

$L_e$  - Comprimento efetivo de aderência da lâmina;

$L_o$  - Comprimento efetivo de colagem de uma lâmina de fibra de carbono;

$M_d$  - Momento fletor majorado devido a carga permanente ( $g$ );

$M_d (Máx)$  - Momento máximo resistida pela armadura de tração;

$M_d (Total)$  - Momento máximo devido ao carregamento total ( $q_t$ );

$p$  - Carregamento distribuído acidental;

$q_t$  - Carregamento distribuído total;

$R$  - Fator de redução última da fibra de carbono;

$R_{st} (Máx)$  - Resistência a compressão de cálculo;

$R_{st} (Máx)$  - Resultante na armadura de tração;

$s_f$  - Espaçamento entre as fibras;

$t_f$  - Espessura da fibra;

$V_c$  - Parcela de força cortante resistida por mecanismo complementares ao modelo de treliça;

$V_f$  - Força cortante resistido pela fibra de carbono;

$VRd2$  - Força cortante resistente de cálculo relativo à ruína das diagonais comprimidas do concreto;

$V_{Rd3}$  – Força cortante resistente de cálculo relativo à ruína por tração diagonal;

$V_{sd}$  – Força cortante solicitante de cálculo;

$V_{sk}$  – Força cortante atuante na viga;

$V_{sw}$  (Efe.) – Força cortante resistida pela armadura de cisalhamento;

$V_{sw}$  (Nec.) – Força cortante resistida pela armadura transversal;

$z$  – Distância da resultante de compressão do concreto a armadura de tração;

$\alpha$  - O ângulo existente entre o ramo e o eixo longitudinal da viga;

$\gamma_c$  - Fator de redução da tensão do concreto;

$\gamma_F$  - Coeficiente de segurança de majoração do momento fletor máximo positivo;

$\epsilon_{fu}^*$  - Deformação máxima da fibra de carbono fornecida pelo fabricante;

$\epsilon'_c$  - Máxima deformação do concreto não confinado;

$\epsilon_{bi}$  - Deformação inicial do substrato no concreto;

$\epsilon_c$  - Deformação do concreto;

$\epsilon_{c\mu}$  - Máxima deformação do concreto;

$\epsilon_f$  - Deformação de tração da fibra;

$\epsilon_{fd}$  - Deformação de projeto da fibra;

$\epsilon_{fu}$  - Deformação máxima de projeto da fibra de carbono;

$\epsilon_s$  – Deformação da armadura de pressão;

$\epsilon_s'$  – deformação da armadura de compressão;

$\eta$  - Número de camadas da fibra;

$\phi$  - Fator de resistência do FRP;

$\omega_f$  - largura da fibra;

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Considerações preliminares

Com o decorrer do tempo a Engenharia Civil tornou-se uma área de extrema importância para o crescimento do país, tendo como responsabilidade a elaboração dos projetos, execução e orientação das diversas obras de grande porte, a busca de materiais de alta resistência, durabilidade e de reduzidas manutenções periódicas.

No momento que se deseja reforçar uma estrutura de forma que ocorra um aumento da sua seção é necessário se ter o cuidado da ligação entre os concretos de diferentes idades, de forma a conseguir uma melhor aderência possível entre os materiais. Esta aderência é decorrente do atrito existente entre as superfícies do substrato e do concreto novo, podendo ser conseguida naturalmente por um tratamento adequado da superfície do substrato, bem como a forma de aplicação do concreto novo (REIS, 1998).

As técnicas utilizadas para recuperação e reforço de uma estrutura se baseiam na elaboração de um projeto de reabilitação que tem como referencial o diagnóstico do problema oriundo da manifestação patológica existente, viabilidade técnica e econômica, tipo de intervenção a ser utilizada e dos materiais necessários para a execução do serviço de reabilitação, portanto é conveniente que os materiais utilizados no respectivo serviço, sejam de uma qualidade superior aos existentes na estrutura (CANAVAL, 2016).

É fato conhecido através de estudos, que o concreto armado continua sendo um material de extrema viabilidade e segurança para as edificações, decorrentes da forte união existente entre o concreto e a armadura, através da excelente aderência entre esses materiais, da pequena variação dos coeficientes de dilatação térmica desses materiais, e a proteção química e física fornecida pelo concreto e armadura oriunda do recobrimento. (SUSSEKIND, 1987).

Necessidade de um estudo mais aprofundado das manifestações patológicas das estruturas de forma a atender de uma maneira mais eficaz os problemas que vão surgindo com o decorrer do tempo, evitando com isso o desgaste da estrutura a ponto de comprometer a sua estabilidade.

Escolha de materiais adequados, bem como, técnicas que possibilitem uma melhor segurança do serviço de recuperação a ser executado com uma fiscalização adequada para se ter uma boa qualidade dentro dos padrões exigido pela ABNT.

As estruturas de concreto armado são conhecidas como estruturas de grande vida útil, pois apresentam características importantes de durabilidade e resistência. Com o decorrer do tempo está estrutura pode se desgastar devida a cargas excessivas, efeitos térmicos, agentes químicos e entre outros, a ponto de comprometer a sua utilização ou resistência da estrutura, tendo a necessidade de um reforço estrutural (SÁNCHEZ FILHO, 1998)

O concreto continua sendo um material de grande durabilidade e de menor percentual de manutenção, comparados com os demais materiais (ROMERO, 2007).

## **1.2 Justificativas da pesquisa**

Existe no Brasil uma grande quantidade de estrutura em concreto armado que necessitam de reabilitação (PIANCASTELLI, 2005). No momento que a estrutura não atenda às necessidades de uso, é necessário à sua reabilitação para que a mesma consiga satisfazer com segurança a demanda da sociedade (REIS, 1998).

Para se garantir uma excelente aderência entre os materiais, é necessária que se faça perfurações na viga de forma a colar os conectores metálicos com adesivo a base de epóxi em pontos estratégicos da viga, que servirão para a fixação dos estribos necessários para a armação da armadura de tração adicional. Fazendo uso de graute para o preenchimento de forma a garantir uma grande aderência entre os materiais e tendo a argamassa um grande poder de resistência e fluidez, é possível preencher os locais de difícil acesso de maneira a envolver as armaduras e os conectores utilizados.

Nas reabilitações estruturais decorrentes de várias técnicas que serão utilizadas, surgirão sistemas complexos. Um dos principais de grande relevância é a ligação de concreto com diferentes idades, sendo a aderência um fator predominante para a ligação das superfícies em contato. Obtendo-se uma excelente aderência entre o concreto novo e o substrato, conseguiremos um bom desempenho, durabilidade e sucesso do respectivo serviço. (CANAVAL, 2016).

Uma quantidade expressiva de edificações que necessitam de recuperações estruturais, decorrentes de manifestações patológicas, excesso de carga acima do

especificado pelo projeto, erro de projeto, materiais de péssima qualidade ou mão de obra não compatível com a qualidade necessária para uma melhor durabilidade e resistência do concreto.

Um trabalho que juntamente com os demais existente possa servir como um meio de referencial para possíveis serviços de recuperação estrutural, que permita uma maior segurança e economia para o ser humano.

### **1.3 Objetivos**

#### 1.3.1 Objetivo geral

O estudo das manifestações patológica e recuperação estrutural de vigas de concreto armado.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Mostrar a importância da recuperação estrutural de viga de concreto armado à flexão, com uso da técnica de encamisamento parcial;

Descrever a relevância da recuperação estrutural de viga de concreto armado ao cisalhamento, com uso da técnica de chapas finas de aço;

Detalhar o dimensionamento para a recuperação estrutural de viga de concreto armado à flexão, com uso da técnica da fibra de carbono;

Detalhar o dimensionamento para a recuperação estrutural de viga de concreto armado ao cisalhamento, com uso da técnica da fibra de carbono.

### **1.4 Metodologia**

Uma revisão bibliográfica que permita um bom entendimento das técnicas a serem apresentadas para as futuras recuperações estruturais de vigas de concreto armado;

Descrição detalhada das técnicas e materiais de reforço a serem aplicadas na recuperação estrutural de viga de concreto armado, mostrando as vantagens e desvantagens que permitam a escolha da técnica mais conveniente;

Mostrando aplicação de técnicas que possibilite um aumento substancial à flexão ou ao cisalhamento, com uso de determinados materiais;

Resultados e discussões;

Conclusões e recomendações.

### **1.5 Estrutura e organização da dissertação**

No capítulo 1, apresenta as considerações preliminares, o objetivo, a justificativa e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2, será realizada uma revisão bibliográfica necessária, para um bom desenvolvimento dos conteúdos de maneira que permita um melhor entendimento do objetivo desejado.

No capítulo 3, são mostradas as possíveis técnicas de recuperação estrutural, mostrando as vantagens e desvantagens e seus procedimentos de execução.

No capítulo 4, estudaremos o comportamento de vigas de concreto armado que foram reforçadas através das técnicas que permitirão um aumento substancial à flexão ou ao cisalhamento.

No capítulo 5, oriundos dos resultados do presente trabalho, são feitas as discussões.

No capítulo 6, conclusões e recomendações.

## CAPÍTULO II

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Manifestações Patológicas no concreto

Geralmente os problemas patológicos são oriundos de manifestações externas, com algumas exceções, sendo importante conhecer a origem destas patologias para uma possível recuperação estrutural (HELENE, 1992).

O estudo da patologia das estruturas é de grande importância na engenharia civil, pois possibilita estudar as origens, formas de manifestação, consequência e os processos de deterioração da estrutura com o decorrer do tempo (SOUZA; RIPPER, 1998).

As principais causas geradoras de manifestações patológicas são decorrentes das ações:

- ações mecânicas: devido a cargas excessivas e a erosão;
- ações físicas: variações de temperatura e ligação na interface de materiais com diferentes coeficientes de dilatação a mesma temperatura;
- ações químicas: Existem na natureza substâncias que podem penetrar no concreto através dos seus poros em condições especiais de temperatura e umidade, ocasionando reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto através dos seguintes mecanismos: Reações Álcalis Agregados (RAA);
- ataque por concretos, por carbonatação e sulfatos;
- ações biológicas: decorrentes de crescimento de vegetação nas estruturas através de fissuras, falhas de concretagem e juntas de dilatação (ANDRADE ; SILVA , 2005).

A deterioração das estruturas se origina das causas intrínsecas, com origem dos materiais e elementos estruturais utilizados e em causas excêntricas que surgem de fora para dentro da estrutura durante a concepção e vida útil da estrutura (TIMERMAN, 2011).

A ausência de manifestação prévia ou uso inadequado desta estrutura pode acarretar manifestações patológicas que devem ser corrigidas o mais breve possível (CANAVAL, 2016).

O Quadro 2.1 apresenta as possíveis causas que induzem a geração de diversas manifestações patológicas no concreto.

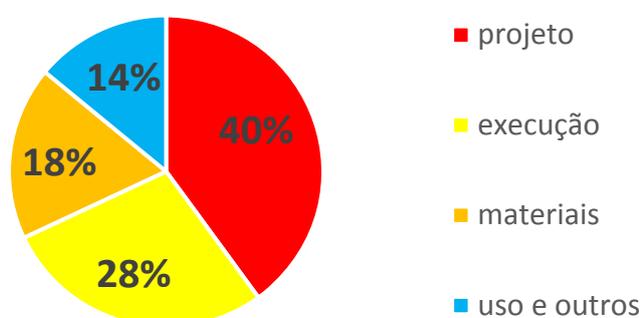
Quadro 2.1 – Causas que induzem a geração de manifestações patológicas no concreto

<b>Etapas</b>	<b>Possíveis Causas</b>
Elaboração do Projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de um melhor estudo preliminar na elaboração do anteprojeto ou projeto definitivo;</li> <li>• Dimensionamento não adequado de peças estruturais decorrentes de cargas aplicadas;</li> <li>• A não avaliação da resistência do solo adequadamente;</li> <li>• Deficiência de detalhes existentes entre os projetos (Arquitetônicos; estrutural, hidro- sanitário, elétrico, entre outros);</li> <li>• Uma especificação não adequada dos materiais e componentes a serem utilizados;</li> <li>• Utilização de grandes vãos nos elementos estruturais de formas a proporcionar grandes deformações nas estruturas.</li> </ul>
Execução de estrutura (construção)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uma má qualidade nas confecções das fôrmas, escoramentos, posicionamento e quantidade de armaduras;</li> <li>• Uso de materiais e componentes de baixa qualidade;</li> <li>• Utilização incorreta dos materiais;</li> <li>• Inexistência de um controle de qualidade;</li> <li>• Capacitação insuficiente do quadro de operários necessário decorrente do avanço tecnológico atual e a falta de profissionais com maior experiência;</li> <li>• Adensamento inadequado e processo de cura não suficiente.</li> </ul>
Utilização da estrutura (Manutenção)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mudança de utilização da estrutura;</li> <li>• A não utilização de um programa de manutenção periódica;</li> <li>• Excesso de cargas aplicadas à estrutura;</li> <li>• Agentes externos atuantes nas estruturas.</li> </ul>

Estudos mostram que as causas mais relevantes das manifestações patológicas são oriundas das etapas de projeto e execução. Os agentes externos tais como: ação da umidade, variação da temperatura, instabilidade do solo, ação de ventos, íons cloreto, sulfatos e gás carbônico, são grandes potenciais de geração dessas manifestações patológicas nas estruturas.

Na Figura 2.1, são indicados os respectivos percentuais das manifestações patológicas em relação às etapas da obra.

Figura 2.1 – Percentuais das manifestações patológicas nas etapas da obra



Fonte: (HELENE, 1992) adaptado.

## 2.2 Estudo e importância dos reforços estruturais

A necessidade do uso do reforço estrutural acontece quando um elemento estrutural ou quando parte da estrutura já não é capaz de absorver aos esforços solicitantes, podendo também ser utilizada quando ocorre um possível aumento de carga e mudança no sistema estrutural (REIS, 1998; PIANCASTELLI, 1997).

No momento que se pretende estabelecer as condições originais de carga ou de um possível aumento da capacidade de carga da estrutura, estaremos basicamente efetuando uma intervenção de reparo ou reforço estrutural (SANTOS, 2006).

As intervenções de reparo e reforço estrutural se tornam necessárias devido ao tempo de uso, projeto não adequado, efeitos ambientais e acidentais, péssima execução, necessidade de uma maior segurança e acréscimo de carga na estrutura existente (ROMERO, 2007).

Outros fatores que permitem a sua utilização são devido à falta de manutenção periódica, choques, sismos, incêndios e outros (SIMÕES, 2007).

Para uma melhor compreensão do trabalho a ser realizado, descreveremos algumas técnicas que permitam uma escolha mais adequada da técnica a ser utilizada na recuperação estrutural desejada.

O reforço estrutural tem como relevância o uso de várias técnicas através da associação de diversos materiais, tais como, adição de barras de aço com uso de graute, colagem de chapas metálicas com fixação de parafusos (Parabolt), colagem de fibras de carbono com resina a base de epóxi, protensão externa e perfis metálicos (ALMEIDA, 2001; REIS, 1998; ROMERO, 2007; RIPPER & SOUZA, 1998).

Na elaboração do projeto de reforço necessita-se previamente a avaliação da estrutura como um todo, informações importantes sobre o projeto estrutural e a sua execução, inspeção detalhada da estrutura a ser reforçada, levando em consideração os aspectos de segurança (REIS, 1998).

Existem vários aspectos relevantes para um melhor dimensionamento do reforço, conforme indicação abaixo:

- condições de segurança, utilização e durabilidade, deverão ser garantidas;
- uma proteção adequada ao fogo;
- garantia de uma excelente aderência entre os materiais;
- analisar o grau de monolitismo no comportamento da estrutura; (REIS, 1998).

Na execução de um serviço de reforço estrutural é importante tomar alguns cuidados:

- fazer a verificação da viabilidade do projeto;
- Analisar a estrutura através de ensaios não destrutivos, se baseando na rigidez e redistribuição de cargas;
- definir o material e a correspondente técnica mais conveniente;
- elaboração do projeto com os detalhes necessários para uma boa execução do reforço;
- utilizar um controle rigoroso da qualidade do serviço a ser executado (SANTOS, 2006).

A prática do reforço estrutural está ocorrendo com bastante frequência na construção civil. Os motivos são diversos, conforme indicado abaixo:

- não manutenção periódica da edificação;
- excesso de carga acima da permitida pelo projeto e o envelhecimento da própria estrutura;
- falhas no projeto, com execução de péssima qualidade;
- fator de agressividade do meio onde se encontra a estrutura, comprometendo os materiais com o decorrer do tempo (MACHADO, 2002).

A garantia da eficiência do reforço estrutural está associada a uma boa qualidade dos materiais utilizados, bem como possuírem boa durabilidade, trabalhabilidade, resistência, excelente aderência ao concreto e aço, baixa retração, baixa permeabilidade e propriedades compatíveis com o concreto e o aço (SIMÕES, 2007).

### **2.3 Escolhas dos materiais para a recuperação estrutural**

É de fundamental importância o tipo de material a ser utilizado na recuperação estrutural, por esta razão necessita estabelecer regras que permitam um estudo mais detalhado destes materiais através de suas características, requisitos para a sua aplicação, metodologia de aplicação, etc.

Estando os requisitos e as propriedades dos materiais já definidos é possível se fazer as especificações dos mesmos.

Na aplicação dos materiais de reparo é necessário um melhor entendimento de suas propriedades, observando vantagens e desvantagens, preparação cuidadosa da estrutura a ser reforçada, a técnica aplicada, custos e procedimentos.

Uma grande dificuldade ocorre na escolha de materiais que possibilitem estudar o seu comportamento com o substrato. As diferentes tensões atuantes no substrato e material de reparo podem ocasionar trincas, fissuras, delaminação e desagregação do material de reparo. A aderência existente entre o substrato e o reparo deve ser de tal modo a atingir uma estrutura sólida e monolítica (GRANATO, 2002).

## 2.4 Materiais diversos usado em recuperação estrutural

Existe uma grande quantidade de materiais no mercado que permitam a escolha mais adequada de suas propriedades e utilização nas estruturas. Como propriedades destes materiais podem citar: resistência, aderência, permeabilidade do meio, ductilidade, dilatação térmica e outros (GRANATO, 2002).

Podemos classificar os reparos conforme a profundidade existente no substrato, da seguinte maneira:

- rasos: quando a profundidade no substrato atinge valores compreendidos entre 3 mm a 30 mm (atingindo as armaduras);
- médios: quando a profundidade no substrato atinge valores compreendidos entre 3 mm a 60 mm;
- profundos: quando a profundidade no substrato atinge valor superior a 60 mm (GRANATO, 2002).

### 2.4.1 Concreto Moldado

Utilizado para reparo com grande profundidade no substrato da estrutura, de forma que às suas características iniciais seja modificada para um possível aumento de propriedades e características mais adequadas de sua utilização, como impermeabilidade, resistência, redução de retração, etc (GRANATO, 2002).

Fatores que devem ser levados em consideração para a preparação deste concreto:

- uso de cimentos especiais ou compostos, como o CP II-Z (com pozolana), CP IV (com adição de pozolana), CP V (alta resistência inicial), CP II-RS (resistência a sulfatos), etc;
- aditivos inibidores de corrosão, como nitrato de sódio ou cálcio, éster aminas, benzoato de sódio, molibdato de sódio, etc;
- polímero em forma de látex, como acrílico, sbr (estirenobutadieno), etc.
- CAD – concreto de alto desempenho: concreto com elevada resistência e adição de aditivos superplastificantes, sílica ativa. Podendo ser adicionado escória, fibras metálicas ou sintéticas (GRANATO,2002).

### 2.4.2 Concreto projetado

Sendo usado para reparos que atingem profundidades médias e profundas no substrato. Tendo-se uma larga utilização em revestimento de túneis, minas, muros de contenção.

Podemos citar algumas características importantes deste concreto:

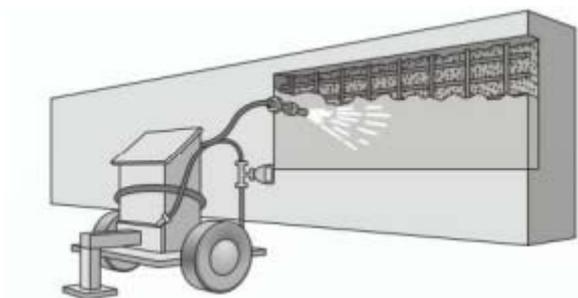
- não há necessidade de fôrmas nas aplicações verticais ou sobre cabeça;
- uma excelente aderência decorrente do forte impacto com o substrato;
- uma forte compacidade associada a uma impermeabilidade;
- a sua utilização em locais de difícil acesso que permita uma boa execução do serviço.

A sua aplicação é feita de duas maneiras:

via seca: a água e aditivos são adicionados no bico de projeção. Necessitando que o operador possua uma grande experiência para regular a quantidade de água necessária;

via úmida: o concreto já se encontra hidratado com água e aditivos plastificantes e redutores de água, sendo instalado na saída do equipamento o aditivo acelerador. Devido a um controle adequado do fator água/cimento e da boa qualidade do produto final da concretagem, é ainda um sistema de grande utilidade nas grandes obras já citada anteriormente (GRANATO, 2002). Observar na Figura 2.2 a aplicação do concreto projetado.

Figura 2.2 – Lançamento de concreto projetado



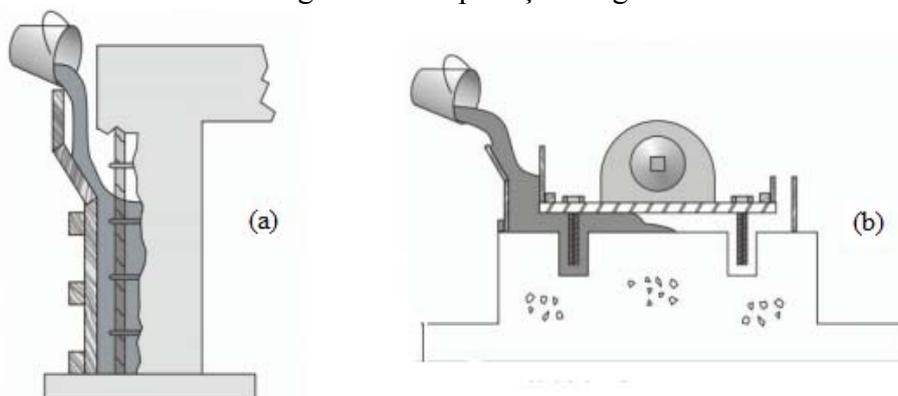
Fonte: (GRANATO, 2002) adaptado.

### 2.4.3 Graute

O mesmo sendo encontradas no mercado na forma de argamassa industrializada, cujas características relevantes são as elevadas resistências iniciais e finais, grande fluidez, baixa permeabilidade e ausência de retração (retração compensada). A sua utilização pode ocorrer por vários tipos de serviço a serem executados tais como: chumbamentos de equipamentos, ancoragem de tirantes, encamisamento de pilares e vigas, etc.

Por se tratar de um material de grande fluidez, o graute tem uma maior facilidade de se locomover em locais de difícil acesso, garantindo assim um preenchimento eficiente com um alto poder de aderência. Quando o volume de graute a ser utilizado for elevado é possível adicionar brita de granulometria até 9 mm com 30 % do volume do graute como medida de economia (GRANATO, 2002). Ver Figura 2.3 (a) e (b), aplicação de graute.

Figura 2.3 – Aplicação de graute



Fonte: (GRANATO, 2002) adaptado.

### 2.4.4 Aço

A utilização do aço como material de reforço para peças estruturais foi largamente aplicada a partir de década de 60, através de chapas soldadas e tubos de diferentes seções transversais e configurações em várias obras como: residenciais, comerciais, industriais, obras de arte, etc. (CARNEIRO, 2004).

Com o decorrer do tempo o uso de perfis se tornou de menor interesse para reforço de peças estruturais devido à corrosão produzidas pelos agentes externos, provocando

uma menor: resistência, durabilidade e aderência com o concreto, bem como, seu alto custo, elevado peso, emendas das ferragens devido à extensão dos elementos, tornou-se o aço um material de pouco uso na década de 90 (CARNEIRO, 2004).

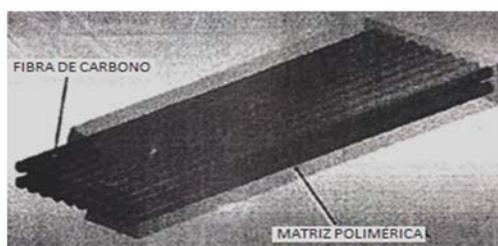
Quando ocorre uma perda de 15 % da seção da armadura da estrutura decorrente da corrosão é feita a devida substituição da armadura com o transpasse recomendado pela norma. Em seguida o preenchimento é realizado com um material adequado de forma a restaurar o elemento estrutural. Ciente da necessidade de conseguir uma boa aderência do material de reparo com o substrato (GRANATO, 2002).

#### 2.4.5 Compósitos de Resinas e Fibra de carbono

Compósitos é uma estrutura formada através da associação de vários materiais não solúveis entre si, um dos materiais chamado de matriz e o outro de reforço, onde a matriz envolve o reforço. Podendo ser adicionado aditivo e materiais de preenchimento (fillers) para um possível aumento das propriedades do compósito a ser utilizado (CARNEIRO, 2004).

Decorrente de sua elevada resistência, boa durabilidade, baixo peso específico comparado com os demais materiais e de fácil aplicação, faz com que os compósitos de resinas e fibras consigam atingirem bons espaços nas recuperações estruturais (CARNEIRO, 2004). A Figura 2.4 mostra um compósito.

Figura 2.4 – Representação esquemática de um compósito de resina e fibra



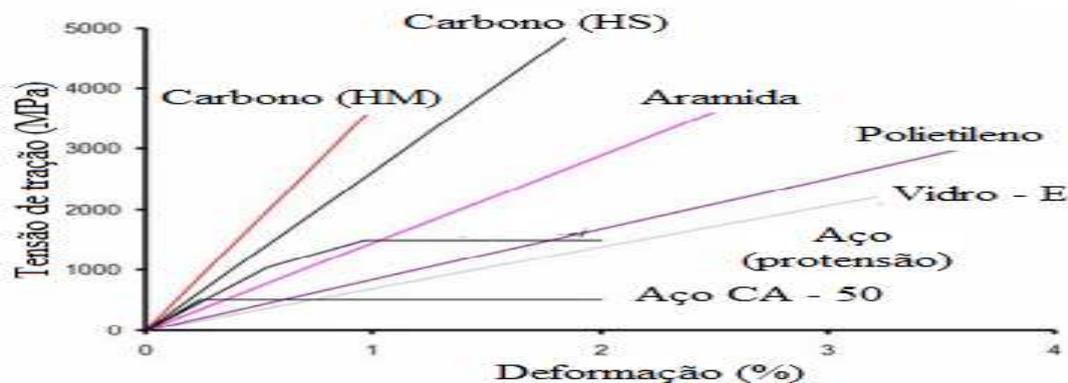
Fonte:(MACHADO, 2002) adaptado.

##### 2.4.5.1 Fibras

É um dos componentes do compósito de grande importância que se originam através de filamentos contínuos e rígidos, podendo ser de carbono, vidro, ou de aramida.

As fibras possuem característica comum relativo ao gráfico de tensão versus deformação na fase elástica, dos principais tipos de fibras e para os aços de concreto armado e protendido, conforme Figura 2.5.

Figura 2.5– Diagrama tensão versus deformação dos principais tipos de fibras e para aços de concreto armado e protendido



Fonte: (BEBER, 2003) adaptado.

Existem vários tipos de fibras no mercado que possuem um peso específico de cerca de três a seis vezes menores que o do aço, facilitando dessa maneira o seu manuseio e sua aplicação. Das fibras existentes a que tem maior peso específico é a de vidro com valor  $26 \text{ KN/m}^3$ , as de aramida com o menor valor próximo de  $14 \text{ KN/m}^3$  e as de carbono com o peso específico variando no intervalo de  $17 \text{ KN/m}^3$  a  $21 \text{ KN/m}^3$  (CARNEIRO, 2004).

No mercado são encontrados vários tipos de fibras com propriedades diversas que permitem uma melhor escolha do tipo de fibra utilizada. Estudos mostram que as fibras longas (contínuas) e de pequeno diâmetro são mais convenientes para o reforço de estruturas de concreto, decorrente de sua ótima capacidade de transferência de tensão e beneficiamento de suas propriedades (SIMÕES, 2007).

Sendo as fibras um dos componentes do compósito que tem como função principal de resistência e rigidez do compósito, associado a um critério de seleção através de parâmetros conforme o tipo de fibra a ser utilizado, seu grau de concentração, comprimento (curtas ou longas) e a forma que se dispõem na matriz (SIMÕES, 2007).

A Figura 2.6 (a) e (b) apresenta os materiais composto de resina e fibra de carbono na forma de tubo e folha de fibras de carbono. A Figura 2.7 (a) e (b) mostra os tipos de barras de compósito de resina e fibras na forma de barras lisas ou nervuradas, podendo ser barras ou cordoalhas. A Figura 2.8, mostra os tipos de perfis do compósito de resinas e fibras.

Figura 2.6 – Tubo e folha de carbono



(a) Tubo de resina e Fibras de carbono (b) Folhas de Fibras de carbono

Fonte:(CARNEIRO, 2004) adaptado.

Figura 2.7 – Materiais de resina e fibra



(a) Barras Lisas e Nervuradas (b) Barras ou Cordoalhas

Fonte: (CARNEIRO, 2004) adaptado.

Figura 2.8 – Perfis de resina e fibra



Fonte: (CARNEIRO, 2004) adaptado.

#### 2.4.5.2 Resinas

Tal resina tem como base o epóxi, podendo ser de fenóis, acrílico, poliamido, poliéster ou poliuretano, formando assim a matriz polimérica dos compósitos, que tem função básica de envolver e colar as fibras de forma a garantir uma melhor distribuição de tensões entre as mesmas, produzindo uma maior proteção devido a agentes externos e desgastes (CARNEIRO, 2004).

As propriedades das mesmas possibilitam uma excelente aderência entre a superfície do concreto e do material de reparo, de maneira a garantir uma maior durabilidade e aplicabilidade ao compósito, também usada para a colagem do compósito ao concreto ou de fibras em fibras no caso de várias camadas de reforço (CARNEIRO, 2004).

Estudos mostram que a resina tem pouca influência na resistência à tração do polímero, porém é de relevante importância ao corte e compressão (SIMÕES, 2007). Na Figura 2.9 mostra os tipos de adesivo usado em recuperação.

Figura 2.9 – Adesivo epóxi em pasta e fluido



Fonte: (GRANATO, 2002) adaptado.

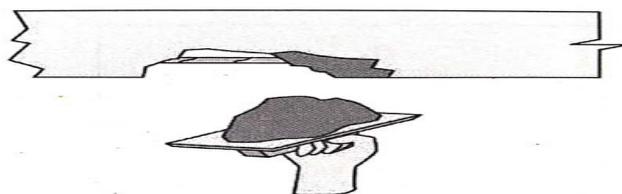
#### 2.4.6 Argamassa polimérica

Tendo larga aplicação como material de reparo para reforço de estrutura de concreto, possuindo propriedades que permitirão a sua utilização em várias situações. Podendo ser a base de cimento ou de resinas.

Base de cimento: na sua produção é utilizado cimento portland, associado ou não com cimentos aluminosos, que tem na sua formação, quartzo de granulometria apropriada, através de polímeros em pó ou líquido em sua composição. Sendo possíveis adições de microssílica para proporcionar uma maior impermeabilização e resistência mecânica (GRANATO, 2002).

Base de Resina: na sua produção é utilizada resina à base de epóxi, poliéster, furânica, éster vinílica. Podendo ser adicionado quartzo com granulometria apropriada. Quando ocorre necessidade extrema de seu uso em situações como resistência química, vibração, alta resistência a compressão, etc, irão proporcionar excelente resultado (GRANATO, 2002). Na Figura 2.10, observa-se a aplicação da argamassa polimérica tixotrópica para preenchimento de um reparo estrutural.

Figura 2.10 – Aplicação de argamassa polimérica tixotrópica

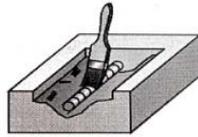


Fonte: (GRANATO, 2002) adaptado.

### 2.4.7 Inibidores de Corrosão

São produtos utilizados para se garantir uma maior proteção da armadura. Podendo ser utilizado como um primer anticorrosivo aplicado diretamente sobre a armadura ou com uso de aditivos inibidores incorporados na argamassa, graute e concretos. Na Figura 2.11, aplicação de material para tratamento anticorrosivo.

Figura 2.11 – Tratamento anticorrosivo



Fonte: (GRANATO, 2002) adaptado.

## CAPÍTULO III

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Técnicas de reforço estrutural

##### 3.1.1 Técnica com aumento da seção de concreto (encamisamento)

Para uma melhor compreensão do trabalho a ser realizado, descreveremos algumas técnicas que permitam uma escolha mais adequada da técnica a ser utilizada na recuperação estrutural desejada.

Nesta técnica utiliza-se reposição de ferragens quando necessária, com uso do microconcreto ou graute para envolver os elementos já existentes ou adicionados. Este material de preenchimento deve ter propriedades ideais de resistência e aderência com o substrato de maneira que possa ser considerado como uma estrutura monolítica. É de fundamental importância para o sucesso da recuperação, que exista uma ligação adequada entre os concretos de diferentes idades e o substrato.

Mediante o uso da técnica, são citadas vantagens e desvantagens.

Algumas vantagens são:

- materiais e mão de obra disponível no mercado;
- baixo custo comparado com outras técnicas;
- maior proteção das armaduras contra o fogo;
- facilidade na execução (SANTOS, 2006).

Algumas desvantagens são:

- fabricação de formas e ferragens para sua concretagem;
- decorrente do aumento da seção transversal um maior peso da estrutura ocasionando um acréscimo de carga na fundação;
- a retração que pode ocorrer do material novo com o substrato;
- aguardar que a estrutura reforçada atinge a sua resistência de projeto para sua utilização (REIS, 1998).

O encamisamento pode ser parcial ou total, no encamisamento parcial ocorre a retirada do concreto deteriorado de maneira que as armaduras fiquem livre do concreto de no mínimo 20 mm , de forma que o material de reparo possa envolver as ferragens através de um recobrimento desejado a ponto de conseguir uma excelente aderência, fator relevante para uma ótima recuperação estrutural, já o encamisamento total é utilizado quando se necessita de um aumento substancial da seção transversal para um possível aumento da seção de ferro para um correspondente aumento de carga .Vale salientar que em ambas situações é necessário que seja feita o tratamento anticorrosivo das ferragens que estiverem depreciadas.

### 3.1.1.1 Procedimento de execução

Devido às vigas reforçadas por encamisamento ter um comportamento de uma peça composta de dois materiais, onde um deles é o próprio substrato de concreto e o outro um material de reforço com características bem distintas e por possuírem diferentes idades é importante o estudo na interface de ligação entre o substrato e o material de reforço, podendo o material de reforço ser concreto ou graute. Existe uma interface de ligação entre esses materiais que proporcione uma melhor aderência entre os materiais, de forma que a viga reforçada tenha um comportamento monolítico.

Devido ao graute possuir alta resistência inicial e final, é bastante utilizado nas recuperações estruturais, além de garantir uma melhor aderência entre os materiais. É relevante a preparação da superfície da interface de forma a garantir melhor aderência do material de reparo a ser utilizado, com uso de conectores metálicos e pinos.

Alguns cuidados devem ser tomados no tratamento da superfície do concreto antes do lançamento do material escolhido:

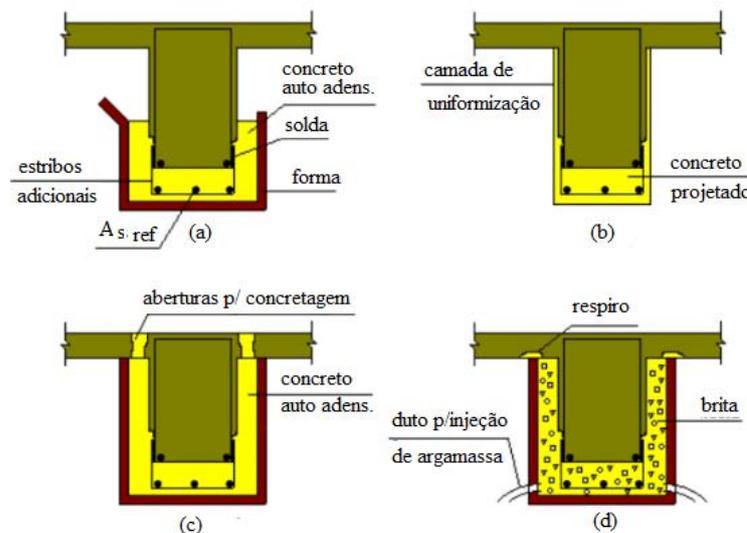
- a remoção cuidadosa do material deteriorado, deixando uma distância mínima de 20 mm da ferragem para o concreto;
- utilizar camada de reforço de valores superiores a 75 mm;
- fazer o tratamento das armaduras corroídas com escova de aço nos locais necessários, de forma a remover todo excesso de corrosão existente;
- se houver necessidade de adicionar armadura na estrutura, utilizar conectores metálicos ou pinos para uma melhor fixação das mesmas de forma a proporcionar uma melhor aderência entre os materiais envolvidos;

- fazer uso de material inibidor de corrosão a base de zinco na armadura, com uso de trincha para sua aplicação;
- limpar à superfície do concreto, utilizando jato de água;
- é necessária a saturação do concreto pelo menos 6 horas antes da aplicação do material de reparo;
- fazer a aplicação do reparo com um material de grande fluidez de forma que possa ser lançado de um único lado da fôrma, evitando com isso a formação de bolhas de ar;
- se necessária abertura na fôrma para lançamento e adensamento;
- a cura através do umedecimento da superfície pelo menos 10 dias;
- o material de reparo deve ter uma resistência a mais que o concreto do substrato de pelo menos 5 MPa;
- é conveniente uso de superplastificantes para redução da água de amassamento.

### 3.1.1.2 Tipos de encamisamento em vigas reforçadas à flexão

O encamisamento pode ser parcial ou total, mostrado na Figura 3.1, sendo em (a) encamisamento parcial com concreto lançado em forma de cachimbo, (b) encamisamento parcial com concreto projetado (com aumento de seção), (c) encamisamento total com concreto lançado por aberturas nas lajes e (d) encamisamento total com argamassa injetada sobre brita acondicionada nas fôrmas.

Figura 3.1 – Tipos de encamisamento em vigas reforçadas à flexão



Fonte: (PIANCASTELLI, 1997) adaptado.

### 3.1.2 Técnica de chapas finas de aço coladas

Consiste do uso de chapas de aço coladas em vigas de concreto armado, largamente utilizada em muitos países da Europa (BEBER, 2003). A relevância desta técnica ocorre quando há necessidade extrema da colocação de armadura que permita uma melhor distribuição dos esforços solicitantes, não tendo necessidade de aumento expressivo nas dimensões dos elementos estruturais.

Mediante o uso da técnica, são citadas vantagens e desvantagens.

Algumas vantagens são:

- pequena alteração nas dimensões dos elementos a ser recuperado, proporcionando um baixo peso na estrutura;
- uma execução prática e de fácil limpeza;
- reutilização da estrutura de uma maneira rápida;
- materiais de fácil aquisição no mercado (REIS, 1998).

Algumas desvantagens são:

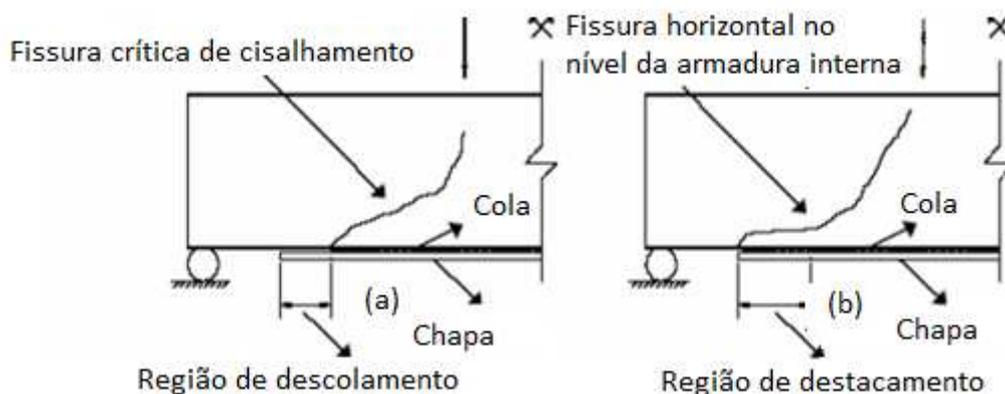
- dificuldade de visualizar possíveis fissuras na peça original após a colagem das chapas;
- corrosão possível na interface de ligação aço-adesivo, reduzindo a aderência com o substrato após longo tempo de exposição;
- a necessidade de uso de escoramento para a colocação das chapas e a dificuldade de colagem da chapa devido ao seu peso;
- possíveis emendas devido à limitação do comprimento das chapas existentes no mercado;
- necessidade de aplicação de proteção contra incêndio (SANTOS, 2006).

O grande problema que pode ocorrer em vigas de concreto armado reforçadas com esta técnica é que, além dos modos de ruptura convencionais que podem existir em qualquer viga de concreto armado, pode ocorrer ainda a ruptura por descolamento ou destacamento da chapa.

Vale salientar a preocupação devido ao descolamento da chapa de aço em sua extremidade, decorrente de uma má colagem da chapa com a resina a base de epóxi ou quando o carregamento ocorre de uma maneira rápida e em situações de impacto.

Relativo ao destacamento da chapa oriunda de fissuras devido à flexão atuantes nas proximidades da chapa que tende a se horizontalizar no nível das armaduras internas de tração. Na Figura 3.2 (a) e (b), podemos observar as rupturas por deslocamento e destacamento da chapa.

Figura 3.2 – Modos de ruptura em vigas reforçadas com chapas de aço



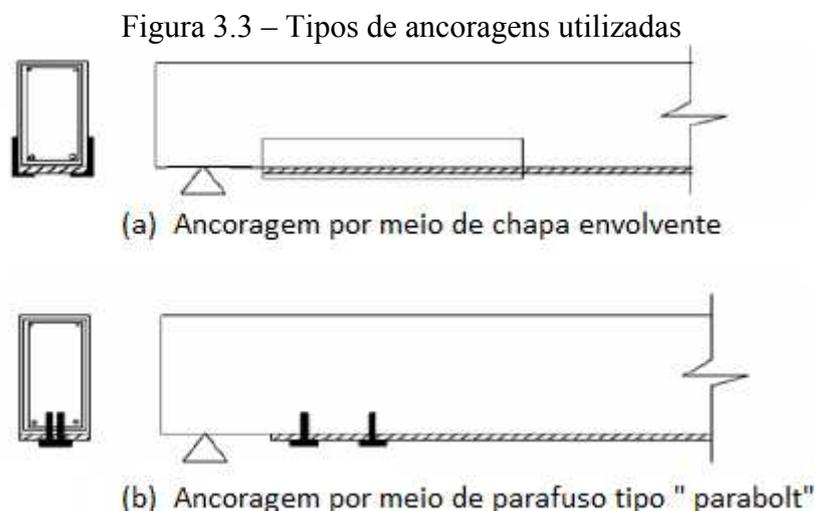
Fonte: (SILVEIRA, 1977 apud REIS, 1998) adaptado.

Para se evitar esta ruptura da viga utilizando chapas coladas, o CEB (1983) sugere limites para o valor da tensão tangencial  $\tau$  na interface reforço com o substrato. Decorrente de a aderência depender mais da resistência do concreto à tração do que a resistência do adesivo ao cisalhamento adota-se uma tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) menor que a resistência média de tração. Este problema pode ser resolvido com tiras de chapas colocadas em forma de estribo nas extremidades das chapas e parafusadas para evitar o destacamento da chapa de aço do reforço à flexão (MORAIS, 1997).

Para garantir uma melhor qualidade na ligação entre o concreto, chapa e resina devem pressionar no período de cura da resina uma leve e constante pressão na chapa contra o concreto por no mínimo 24 horas. O tempo necessário vai depender do tipo de resina utilizada e da temperatura ambiente (RIPPER & SOUZA, 1998).

Foi verificado por alguns pesquisadores que a espessura da chapa representa um fator relevante para o sucesso do reforço (JONES & SWAMY, 1995). O CEB (1983) recomenda usar chapas de no máximo 3 mm, e com espessura máxima da camada de

resina epóxi de 1,5 mm, fazendo a proteção contra o fogo. Na Figura 3.3 (a) e (b) mostra tipos de ancoragens utilizadas.



Fonte: (CAMPAGNOLO, 1993 apud REIS, 1998) adaptado.

Antes da aplicação das chapas de aço é conveniente uma preparação cuidadosa da superfície do concreto, retirando todo excesso de materiais que possam influenciar negativamente para a colagem das chapas, para que se consiga uma excelente aderência entre a chapa, adesivo e o concreto.

### 3.1.2.1 Procedimento de execução

No processo de execução são apresentados os procedimentos que irão favorecer para o desempenho da técnica:

- retirada de qualquer excesso de materiais na superfície do concreto, com a sua respectiva limpeza;
- quando é percebível fissuras em determinadas seções da viga, é necessário fazer cortes nos segmentos das fissuras, de forma ser possível fazer uma aplicação através de injeção a base de epóxi e posterior fechamento com argamassa polimérica.
- um tratamento rigoroso da superfície do concreto e das chapas de aço, que juntamente com a resina a base de epóxi produza uma aderência adequada;
- utilizar resina com espessura inferior a 1,5 mm;

- a chapa deve ter espessura inferior a 3 mm, exceto quando se utiliza conectores metálicos nas regiões de ancoragem;
- na colagem das chapas é necessária aplicação de pressões constantes de forma a expulsar o excesso de cola e em seguida fazer o escoramento da chapa até que a resina atinge o tempo de secagem indicada pelo fabricante da resina;
- necessidade de proteção contra o fogo devido à baixa resistência da resina a altas temperaturas.

### **3.1.3 Técnica com compósito de fibras e resinas**

Com o decorrer do tempo houve necessidade de utilizar outras técnicas de recuperação de estrutura, através de polímeros reforçados com fibras, quando o emprego dos materiais tradicionais como o aço e o concreto já não mais atendia as necessidades.

Os materiais compósitos são constituídos de propriedades de elevada resistência à tração, leveza, resistência à corrosão, à fadiga e amortecimento ao choque.

Mediante o uso da técnica, são citadas vantagens e desvantagens.

Algumas vantagens são:

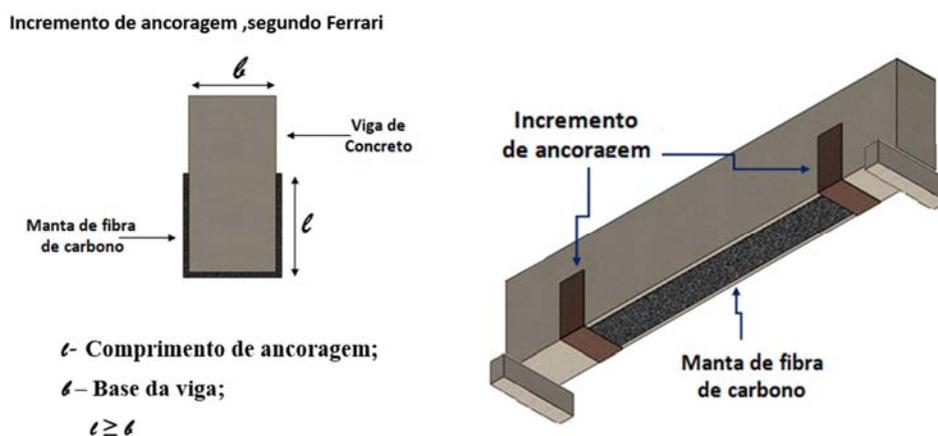
- resistência à tração e a fadiga elevada;
- boa resistência a corrosão, ataques químicos e a cargas dinâmicas;
- baixo peso específico, proporcionando uma maior facilidade de aplicação com um menor peso adicional na estrutura;
- boa capacidade de deformação;
- sendo disponíveis no mercado em várias formas, tipos e dimensões, que permite uma escolha adequada do material em função do projeto de recuperação;
- baixa expansão térmica (FORTES, 2000).

Algumas desvantagens são:

- um custo bastante elevado comparado ao aço;
- é necessária proteção contra o incêndio, devido à baixa resistência da resina para determinadas temperaturas;
- Possibilidade de desprendimento da manta nas bordas devido à concentração de tensões (ROMERO, 2007)

Segundo Ferrari (2002), pode-se evitar o desprendimento nas bordas da manta com uso de um mecanismo de incremento de ancoragem, capaz de atingir a capacidade mecânica do reforço. É utilizada uma manta de fibra de carbono colada de forma transversal ao reforço, com uma ancoragem de comprimento igual ou maior que a base da viga conforme Figura 3.4 (a) e (b) ancoragens utilizadas na extremidade da manta.

Figuras 3.4 – Ancoragens utilizadas



Fonte: (FERRARI, 2002) adaptado.

### 3.1.3.1 Procedimento de execução

Antes da aplicação do compósito é recomendável uma análise superficial do substrato para possíveis intervenções que permitam a utilização da técnica de uma maneira satisfatória. Observe as orientações abaixo:

- se perceber fissuras em algumas seções da viga, recomendamos o uso de talhadeira para aumentar um pouco a abertura da fissura para possível injeção de resina epóxi, para posterior fechamento com argamassa polimérica;
- retirada de qualquer excesso de materiais da superfície do concreto por meio de um disco de lixa acoplada a uma esmerilhadeira através de movimentos circulares ao longo das seções necessárias, de forma a se ter uma superfície regular desejada;
- se desejar aplicar o compósito em várias superfícies laterais da viga é necessário fazer o arredondamento das arestas existentes, de forma a evitar vazios entre o compósito e o concreto, de forma a reduzir a concentração de tensões;

- estando a superfície seca, podemos iniciar a aplicação do imprimador primário (primer) que servirá como ligação entre o compósito e o concreto a ser recuperado e esperar a secagem do material usado;
- utilizar resina com espessura inferior a 1,5 mm;
- aplicar uma camada de massa apropriada de regularização, que irá proporcionar uma superfície mais adequada para aplicação do compósito;
- na aplicação do compósito é necessária aplicação de pressão constante de forma a expulsar o excesso de cola;
- estando a superfície totalmente seca, se faz o corte do tamanho do compósito a ser usado e a primeira imprimação com resina de saturação, podendo essa saturação ser feita no próprio compósito por medida de economia, com o cuidado do tempo de aplicação devido à resina ser de 30 minutos;
- para se evitar possíveis formações de bolhas entre o compósito e o concreto pode passar roletes de aços denteados sobre o compósito aplicado. Após 30 minutos deste procedimento, é necessária a segunda camada de imprimação, garantindo a imersão do compósito;
- camada de acabamento de proteção do compósito.

Na Figura 3.5 mostra as etapas do processo de aplicação do compósito de resina e fibra detalhadamente.



Fonte: (MACHADO, 2002) adaptado.

### 3.1.4 Técnica de protensão externa

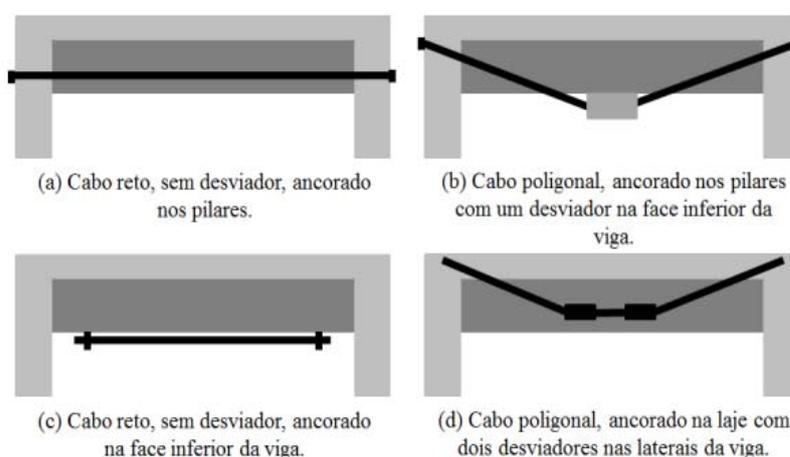
Nos meados de 50 a protensão externa foi largamente utilizada para o reforço de viga a flexão e ao cisalhamento, contribuindo para uma diminuição das deformações e flechas em elementos de concreto armado (ROMERO, 2007).

A força de protensão é transmitida à viga por meios de cabos externos ancorados nos seus extremos, com ou sem desviadores. O uso desta técnica se ampliou à medida que houve uma maior preocupação em se garantir a proteção dos cabos externos a corrosão através de epóxi ou graxa, bem como, cabos de fibra (FRP) não sujeitos a corrosão (ALMEIDA, 2001).

A técnica da protensão externa da viga de concreto armado, tem como finalidade de aplicar uma carga axial associado com um momento fletor para aumento da resistência à flexão e ao esforço cortante numa menor escala, proporcionando menores deformações e conseqüente redução de fissuras do elemento estrutural.

As configurações dos cabos de proteção podem assumir formas diferentes como retos ou poligonais, ancorados nos pilares, nas vigas ou nas lajes, com uso ou não de desviadores, conforme Figura 3.6. Os desviadores são elementos que vão ser fixados na estrutura de forma a desviar os cabos de proteção em determinados pontos (ALMEIDA, 2001).

Figura 3.6 – Configuração dos cabos de protensão



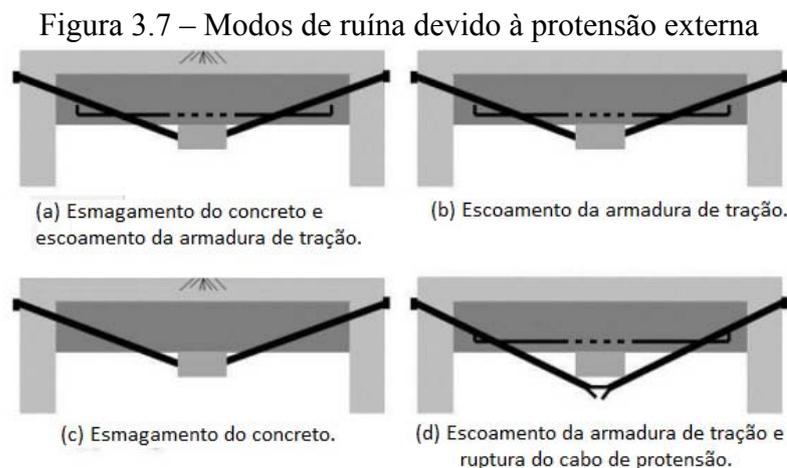
Fonte: (ALMEIDA, 2001) adaptado.

De acordo com Santos (2006), os modos de ruína de vigas reforçadas por protensão externa ocorrem através dos seguintes elementos do concreto armado:

- Escoamento do aço.
- Esmagamento do concreto.

Estudo mostra que o modo de ruína provocado pela ruptura do cabo de protensão pode ocorrer antes ou após o escoamento do aço passivo (SANTOS, 2006).

Na Figura 3.7 (a), (b), (c) e (d) mostra os modos de ruína de tipos de vigas que são reforçadas por proteção externa.



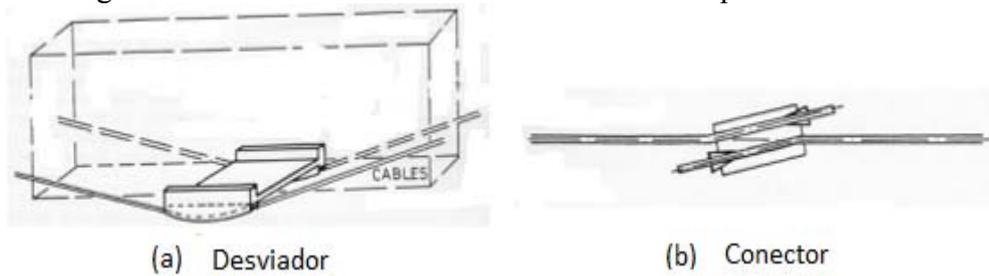
Fonte: (SANTOS, 2006) adaptado.

Uma grande relevância desta técnica está associada a um detalhamento minucioso dos desviadores e conectores a serem utilizados, conforme Figura 3.8 (a) e (b). A escolha dos dispositivos de desvio deve ser tal maneira a transmitir à estrutura as tensões radiais e tangenciais gerados pelos cabos e ser liso para diminuir o atrito entre os cabos e os desviadores.

Já os conectores, sendo elementos cilíndricos que permitem a passagem de dois cabos, em sentidos contrários, que serão ancorados em uma das extremidades do cilindro, sendo bastante usado em situações que não é possível ancorar os cabos isoladamente.

No detalhamento dos desviadores e ancoragens, deve ser levada em consideração a concentração de tensões nas regiões de sua localização, sendo necessário um reforço da região para uma protensão adequada.

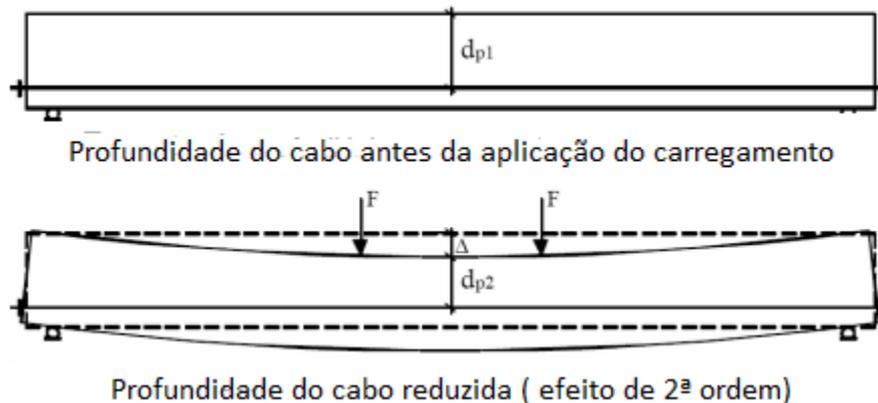
Figura 3.8 – Detalhes dos desviador e conector na protensão externa



Fonte: (CANÔVAS, 1988 apud SIMÕES, 2007).

Na protensão externa os cabos não acompanham a deflexão da viga em todas as seções, ocasionando uma variação da excentricidade do cabo, este deslocamento relativo entre o cabo e o eixo da viga é denominado de efeito de segunda ordem, conforme Figura 3.9.

Figura 3.9 - Efeito de segunda ordem



Fonte: (ALMEIDA, 2001).

Mediante o uso da técnica, são citadas vantagens e desvantagens.

Algumas vantagens são:

- aumento da resistência à flexão e ao esforço cortante sem alteração significativa do peso próprio da viga;
- perdas por atrito de cabos externos são menores do que a dos cabos internos;
- fácil inspeção, re-protensão e substituição de cabos;
- pode o serviço de reforço ser executado sem nenhuma interrupção do uso da construção (ALMEIDA, 2001).

Algumas desvantagens são:

- necessidade de se fazer um estudo mais detalhado das tensões devido ao acréscimo de força axial, decorrente do uso da técnica por um concreto de baixa resistência ou deteriorado, a ponto de ocorrer à ruptura da peça estrutural;
- os cabos externos estão mais vulneráveis à ação do fogo, ao impacto e atos de vandalismo;
- necessidade de detalhamento dos desviadores e das ancoragens, decorrentes de concentrações de tensões nestes pontos;
- possível redução da ductilidade da viga, devido a um aumento da resistência a flexão e ao cisalhamento (ALMEIDA, 2001).

#### 3.1.4.1 Procedimento de execução

É necessária uma análise do substrato do concreto para possíveis identificações de manifestações patológicas de forma a se fazer uma intervenção parcial para posterior aplicação da técnica desejada:

- definir o tipo de solicitação desejada para posterior aplicação da técnica;
- fazer a escolha dos cabos, conectores e desviadores necessários para uma boa execução do serviço;
- nos pontos de ancoragens é importante um reforço nesta região devido à concentração de tensões, bem como, nos desviadores;
- estando as etapas já concluídas, se faz a protensão com uso de macacos de protensão adequados com a capacidade de carga necessária de projeto.

#### 3.1.5 Técnica de perfis metálicos

É uma técnica com larga aplicação em situações emergenciais, onde é necessário destacar a importância da ligação estrutura – reforço (REIS, 2001). É relevante que as peças estruturais estejam em plena condição para receber os perfis.

Em muitas situações utilizam-se como pilares ou vigas os próprios perfis metálicos em seguida a interligação desses elementos através de soldas ou parafusos.

A utilização do reforço de viga de concreto armado à flexão com uso de perfis metálicos se tornou uma técnica bastante usada, devido à facilidade de aquisição das

seções dos perfis no mercado e sua fácil aplicabilidade e rapidez para a conclusão do serviço.

Mediante o uso desta técnica, são citadas vantagens e desvantagens.

Algumas vantagens são:

- uma maior rapidez na execução do serviço, decorrente das peças existirem com as seções desejadas no mercado;
- não tendo necessidade de espera para sua utilização, pois não há necessidade de cura;
- a estrutura é leve e fixada através de parafusos expansivos ou soldas;

Algumas desvantagens são:

- perda de material devido à extensão dos elementos;
- necessidade de mão de obra qualificada com o respectivo projeto de execução;
- uma manutenção periódica dos perfis com o decorrer do tempo, para inibir possíveis fontes de corrosão;
- o aço é um material suscetível à propagação de chamas em um incêndio, sendo necessário um tratamento adequado de sua superfície.

#### **3.1.5.1 Procedimento de execução**

Sempre é necessária uma análise dos elementos estruturais existentes na estrutura, relativos a manifestações patológicas para possíveis intervenções que garanta uma melhor qualidade desses elementos, que servirão como ligação dos perfis metálicos para uma boa execução da referida técnica:

- inicialmente é elaborado um projeto de execução especificando os perfis metálicos a serem utilizados com as suas características desejadas e os mínimos detalhes de execução que irão permitir uma boa qualidade da técnica a ser utilizada;
- na condição de usar os perfis metálicos como colunas há necessidade de se preparar uma fundação adequada para chumbamentos dos mesmos com concreto ou graute.

- na possibilidade do uso de colunas de concreto armado, fazer a ligação dos perfis metálicos diretamente com as colunas, utilizando parafusos parabolt com resina a base de epóxi;
- após a conclusão da colocação dos perfis, fazer um tratamento anticorrosivo de proteção dos perfis e uma pintura especial para aumento da durabilidade da estrutura.
- a manutenção periódica dos perfis deve acontecer , quando for percebível pontos de corrosão que irá surgir com o decorrer do tempo nos pontos de ligações dos perfis.

## CAPÍTULO IV

### **4 RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO À FLEXÃO E AO CISALHAMENTO**

Através das técnicas discriminadas neste trabalho é possível comprovar a eficiência da recuperação estrutural em vigas de concreto armado à flexão e ao cisalhamento.

#### **4.1 Recuperação estrutural de viga de concreto armado à flexão por encamisamento parcial**

Devido à técnica de encamisamento parcial ser utilizado em larga escala nas recuperações estrutural de vigas à flexão, será analisado um ensaio realizado por Santos (2006). Se baseando nos valores experimentais, perceberemos um aumento substancial da resistência à flexão, de forma que a viga reforçada possa acatar cargas adicionais para sua finalidade.

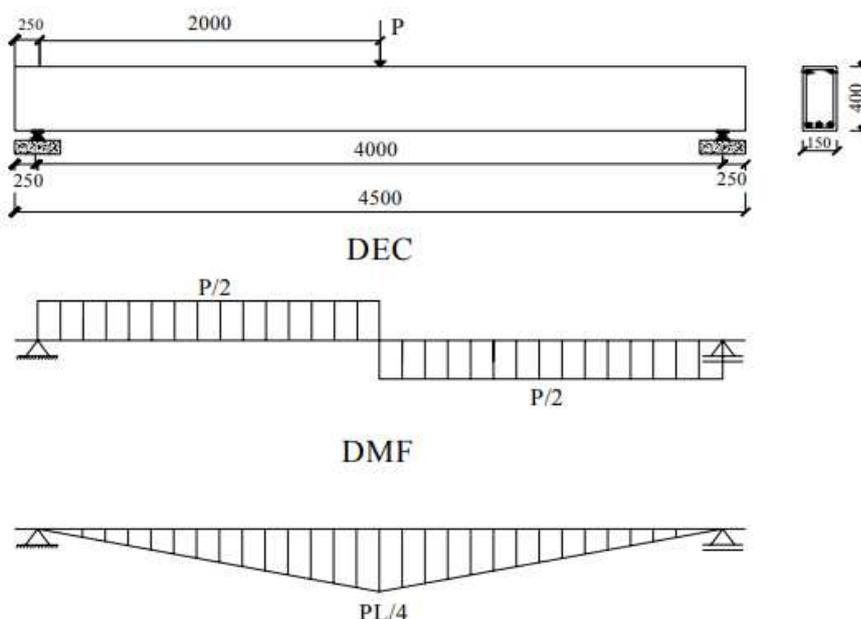
##### **4.1.1 Procedimento experimental**

Nesta técnica, Santos (2006), analisou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão por encamisamento parcial, com adicionamento de concreto e aço apenas na região tracionada.

Foram utilizadas 4 vigas de seção retangular de 150 mm por 400 mm e com 4500 mm de comprimento, sendo 2 vigas usada como referência, sem uso do reforço (REF1 e REF2) e 2 vigas reforçadas (VR1 e VR2) à flexão por encamisamento parcial, tomando como base à viga (REF1), apenas na região de maiores solicitações de tração.

Como referência para o ensaio, utilizou-se uma carga concentrada no meio do vão, estando às vigas bi-apoiadas (three pointing load test), conforme Figura 4.1, com os seus respectivos diagramas de esforço cortante e momento fletor. Observando que o momento fletor máximo ocorre no ponto de aplicação da carga concentrada onde existe uma descontinuidade do gráfico do esforço cortante. Fazendo os prolongamentos de 250 mm nos apoios para uma melhor ancoragem da armadura longitudinal de tração e compressão.

Figura 4.1 – Esquema de ensaio e diagramas correspondentes

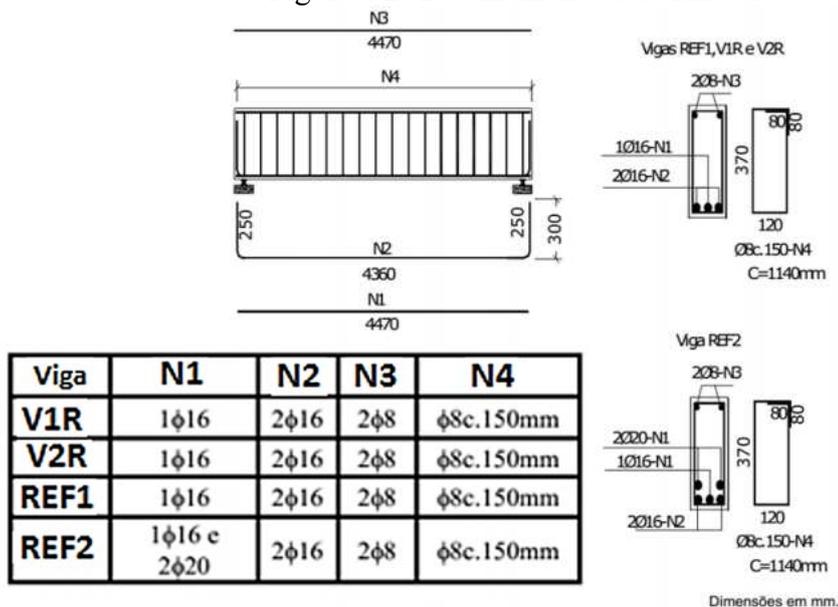


Fonte: (SANTOS, 2006) adaptado.

#### 4.1.2 Preparação das vigas

As taxas de armaduras do reforço das vigas (REF1 e REF2) tiveram valores diferentes na região de flexão. Sendo a viga (REF2) com armadura de flexão próxima à armadura balanceada, enquanto a viga (REF1) com armadura de flexão próxima da metade da armadura da viga (REF2), ver o detalhe da armadura na Figura 4.2.

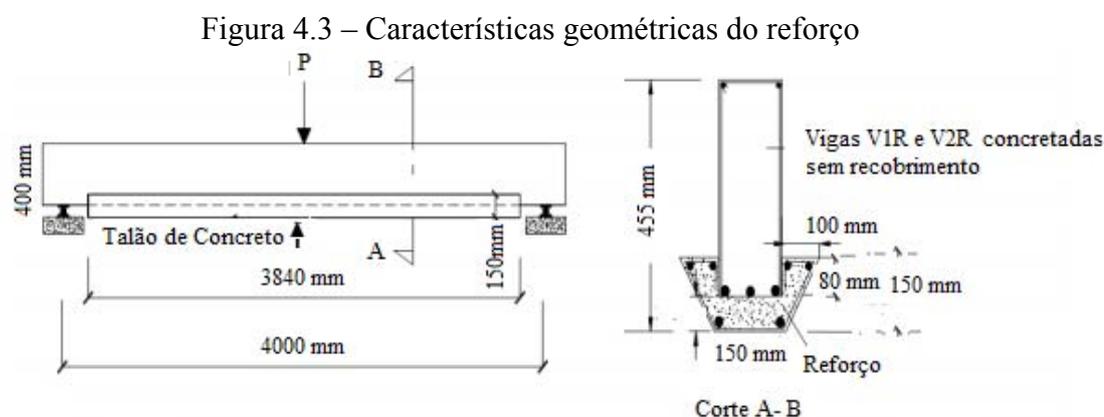
Figura 4.2- Detalhamento das armaduras



Fonte: (SANTOS, 2006) adaptado.

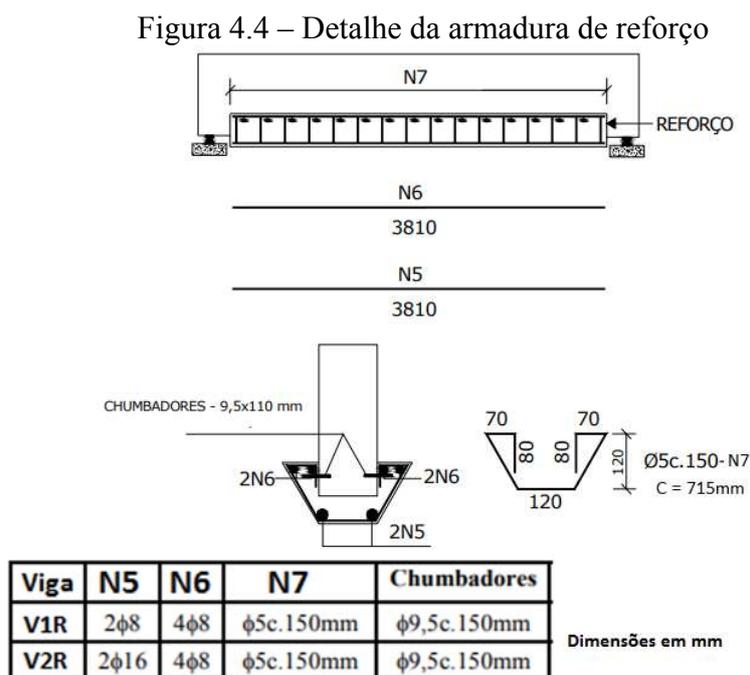
As vigas de referência REF1 e REF2 após a preparação das formas e a colocação das armaduras, foram concretadas e após o tempo de cura recomendado, serão pré-fissuradas através de ensaios. É de se esperar que a carga de ruptura da REF2 seja bem maior que a de REF1, devido à maior seção de armadura na região de tração. Após a pré-fissuração da viga REF1 é feito o encamisamento parcial para a geração das duas vigas reforçadas VR1 e VR2, que serão submetidas ao carregamento até a sua ruptura.

Na Figura 4.3 são mostradas as características geométricas do reforço utilizado para as vigas reforçadas VR1 e VR2 com uso de encamisamento parcial.



Fonte: (SANTOS, 2006) adaptado.

A Figura 4.4 mostra o detalhamento das armaduras de reforço que foi utilizado para fazer o encamisamento parcial das duas vigas reforçadas VR1 e VR2.

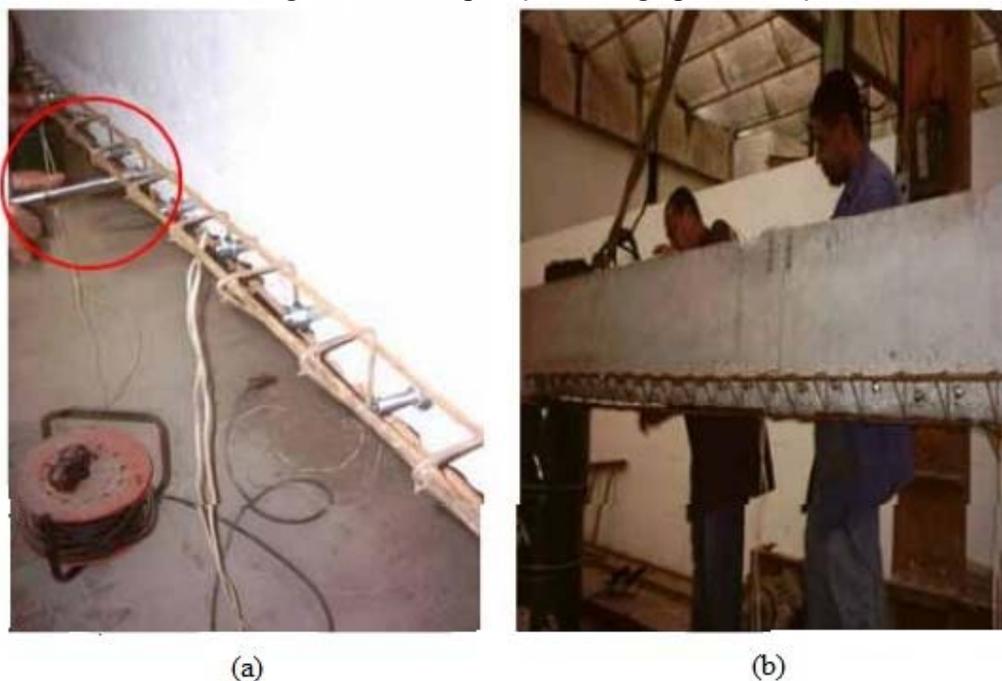


Fonte: (SANTOS, 2006) adaptado.

Na execução do encamisamento parcial para obtenção das vigas reforçadas VR1 e VR2, é necessário apicoamento da região de ligação do reparo de reforço com o substrato, com profundidade aproximada de 15 mm. Antes da concretagem do reforço, à superfície das vigas deve ser umedecida.

Com uso de chumbadores de expansão que serão necessários na lateral da viga, com finalidade de aumentar a ligação viga- reforço, bem como meio de fixação das armaduras de reforço, produzindo uma excelente aderência entre o material de reforço e o substrato, tornando o conjunto como uma estrutura monolítica. Veja o preparo da viga de reforço na Figura 4.5 (a) e (b).

Figura 4.5 – Preparação da viga para reforço



Fonte: (SANTOS, 2006) adaptado.

#### 4.1.3 Ensaio e resultados

No que se refere aos ensaios realizados, às vigas de referência REF1 e REF2, foram ensaiadas em apenas um ciclo de carregamento. As vigas reforçadas VR1 e VR2 necessitaram de dois ensaios. No primeiro ciclo foi realizado com carregamento aproximado de 80 % da carga de ruptura teórica. No segundo ciclo, com as vigas reforçadas, foi provocada ruptura em apenas um ciclo de carregamento. Valores da

resistência média à compressão do concreto da viga original e do reforço foram respectivamente 40 MPa e 32 MPa.

Foi observado que as vigas romperam por escoamento da armadura longitudinal de tração, seguido do esmagamento do concreto na seção de momento fletor máximo, com comportamento de material dúctil. No Quadro 4.1 mostra os valores teóricos e experimentais das vigas ensaiadas por (SANTOS, 2006).

Quadro 4.1 – Resultados das vigas ensaiadas

Viga	$\rho$ (%)	d(mm)	$P_u$ (KN)	$P_{u, exp}$	$P_{u, exp} / P_u$	R	
						REF1	REF2
REF1	1,08	369	112	129,5	1,16	-	
V1R	1,66	360	156	186,4	1,19	1,44	-
V2R	2,12	377	212	234,9	1,11	1,81	1,07
REF2	2,33	351	197	219,3	1,11	-	
<p><math>\rho</math>: taxa geométrica da armadura</p> <p><math>P_u</math>: carga de ruptura teórica</p> <p><math>P_{u, exp}</math>: carga de ruptura experimental</p> <p>R: razão entre a carga de ruptura experimental da viga reforçada e a carga de ruptura experimental das vigas de referência.</p>							

Fonte: (SANTOS, 2006) adaptado.

Decorrentes dos ensaios realizados e das análises efetuadas foram possíveis para Santos (2006), observar etapas que colaboraram para uma boa aplicação da técnica do encamisamento parcial das vigas reforçadas:

- O encamisamento parcial para o reforço à flexão de vigas foi excelente, sem muitas dificuldades. A técnica foi desenvolvida de maneira rápida e sem necessidade de mão de obra especializada.
- A preparação da superfície do substrato (apicoamento e umedecimento) foi de fundamental importância para a ligação entre o reforço e a viga, bem como a utilização de chumbadores de expansão para aumento da resistência às tensões de cisalhamento. Foi comprovada uma excelente aderência entre às seções de ligações entre concreto da viga e do reforço, sem uso de agentes adesivos.

- Um aumento da rigidez e a capacidade das vigas foram aumentados em até 81 % com a adição do reforço.
- Ocorreu diminuição nas deformações da armadura longitudinal original devido à ação conjunta com a armadura do reforço.

## 4.2 Recuperação estrutural de viga de concreto armado ao cisalhamento com uso de chapas finas de aço coladas

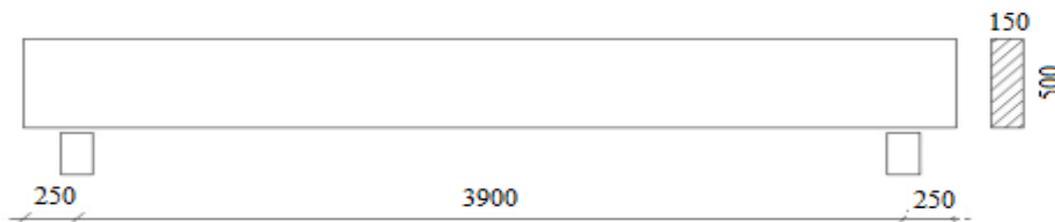
Técnica bastante utilizada a partir dos anos 60, sendo utilizada de forma experimental no reforço de edifícios e pontes em diversos países da Europa.

As chapas de aço coladas em vigas de concreto armado mostraram resultados bastante satisfatórios para um aumento substancial ao cisalhamento, descreveremos um ensaio realizado por Júnior (1997).

### 4.2.1 Procedimento experimental

Nesta técnica, Júnior (1997) elaborou um programa experimental de vigas de concreto armado reforçadas por chapas de aço coladas para uma análise relativa ao cisalhamento. Foram preparadas 4 vigas de concreto armado todas com vão de 3900 mm e prolongamentos de 250 mm nos apoios para uma melhor ancoragem da armadura longitudinal de tração e compressão. A seção transversal de todas as vigas utilizadas foi de 150 mm x 500 mm, observe detalhes geométricos da viga na Figura 4.6.

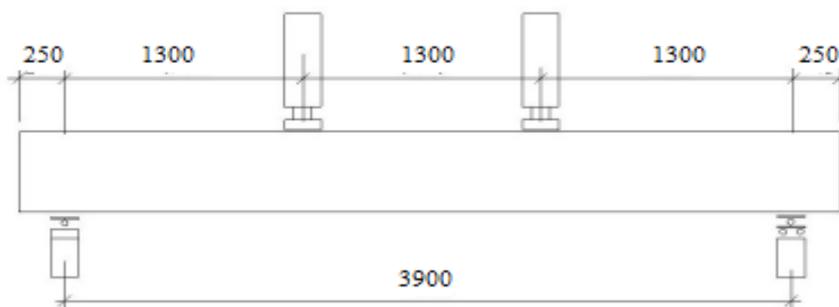
Figura 4.6 – Detalhe geométrico da viga



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

A viga utilizada para fins de ensaios foi constituída de dois apoios, sendo um fixo e outro móvel, caracterizando uma viga bi-apoiada. Foram aplicadas duas cargas  $P$  concentradas simétricas, de forma a provocar uma região de esforço cortante nulo entre as cargas. As cargas aplicadas são introduzidas por dois macacos hidráulicos idênticos, acoplados a uma célula de carga (JÚNIOR, 1997). Na Figura 4.7 esquemas para os ensaios da viga.

Figura 4.7 – Esquema para os ensaios da viga



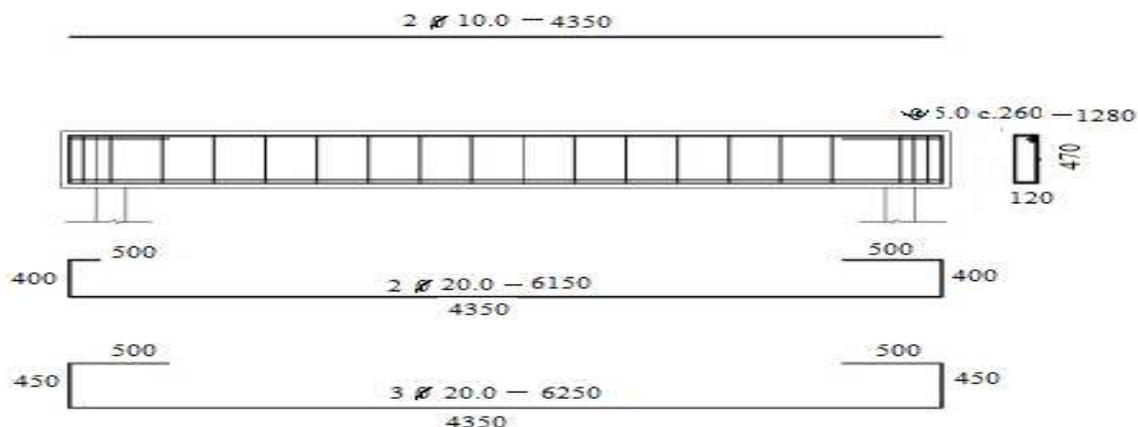
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

#### 4.2.2 Preparação das vigas

As dimensões e as armaduras das vigas foram escolhidas de tal forma que garantisse que as vigas utilizadas quando ensaiadas não rompesse à flexão e sim ao cisalhamento.

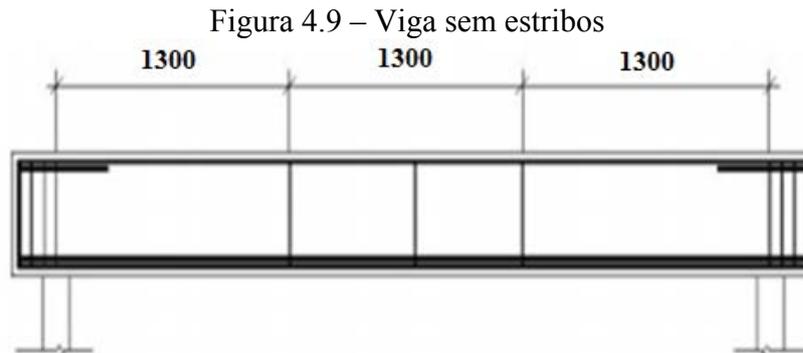
As armaduras longitudinais de tração e compressão foram compostas de 5 barras de 20 mm e 2 barras de 10 mm respectivamente. Já a armadura transversal foram estribos verticais de 5 mm espaçados de 260 mm, conforme Figura 4.8.

Figura 4.8 – Detalhamento das armaduras longitudinais e transversal



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Além das quatro vigas citadas, foi preparada uma viga com as mesmas dimensões e armaduras de flexão, com ausência de estribos, considerando que a armadura transversal não estivesse contribuindo ao combate dos esforços cortantes para os quais ela foi dimensionada. Na Figura 4.9 é mostrada a viga sem estribos.



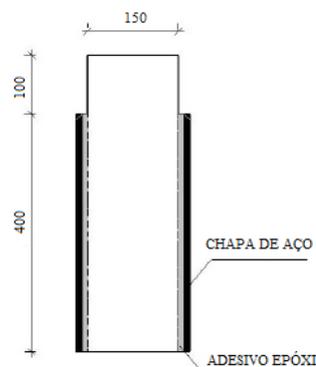
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

As primeiras quatro vigas com exceção da última (sem estribos) foram ensaiadas de maneira que foi preparada e posteriormente feita a colagem das placas nas duas faces de cada viga. Foi realizado um novo ensaio para cada viga, após o tempo necessário de secagem do adesivo, simulando dessa maneira o reforço estrutural proposto devido às deficiências provocadas pelo cisalhamento (JÚNIOR, 1997).

Na colagem das chapas em cada viga, foram utilizadas quatro chapas de 2000 mm de comprimento por 400 mm de altura medida a partir do fundo da viga, deixando 100 mm livre para face superior da viga. Visto que essas chapas são encontradas no mercado sob dimensões padrões 1000 mm x 2000 mm, então a chapa foi cortada na direção da medida 2000 mm, obtendo-se duas chapas de 2000 mm x 400 mm que serão coladas em cada face da viga, ultrapassando em 100 mm o vão livre da viga que é de 3900 mm.

A variação da espessura da chapa tem finalidade de estudar o comportamento de sua influência na seção composta concreto/chapa. Na Figura 4.10 detalhes da seção.

Figura 4.10 – Detalhe da seção da viga

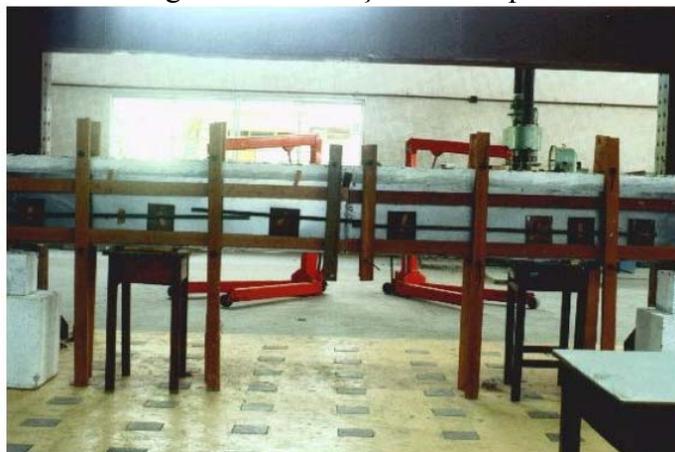


Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Para a colagem das placas com adesivo a base de epóxi foi utilizado desempenho e uma espátula de aço, com o devido cuidado do tempo de aplicação da resina para não

exceder a vida útil do produto ora fornecido pelo fabricante. Na colocação das placas foi usado barrote para fixação das mesmas com uso de parafusos para melhor compressão das placas devido à grande extensão das mesmas (JÚNIOR, 1997), conforme Figura 4.11.

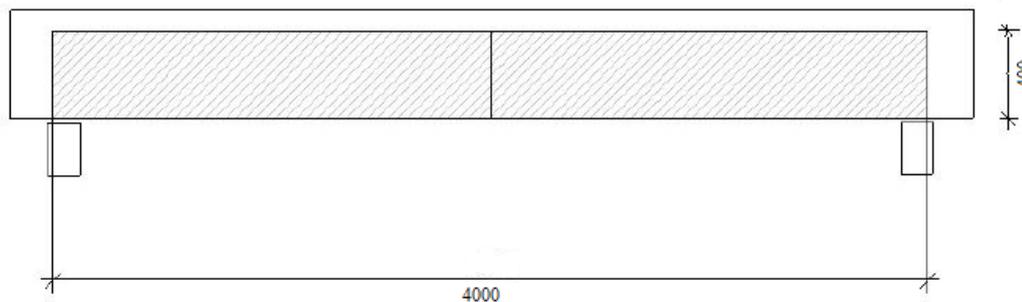
Figura 4.11–Fixação das chapas



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Vamos mostrar através da vista frontal da viga as placas que foram coladas na face da viga para melhor esclarecimento, observando que é constituída em cada face por duas placas de 2000 mm x 400 mm, conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 – Vista frontal da viga



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

#### 4.2.3 Ensaio preliminares e características importantes dos materiais de reforço

As vigas ensaiadas sem chapas foram representadas por VS1, VS2, VS3 e VS4 que posteriormente serão ensaiadas com chapas coladas com a seguinte representação VC1, VC2, VC3, VC4 e ainda existindo uma viga desprovida de estribo a qual chamaremos de VSE.

Para a concretagem das vigas a serem ensaiadas foi usada uma dosagem que permitisse uma resistência à compressão próxima de 20 MPa, com uso de cimento Portland, areia média lavada e brita 25. Em cada concretagem foram retirados 4 (quatro) corpos de prova, sendo dois rompidos no ensaio da viga sem as chapas e os outros dois, nos dias de ensaios das vigas com chapas coladas. Assim a resistência à compressão do concreto adotada para cada análise de viga (sem e com chapa), foi à média entre cada par destes corpos de prova (JÚNIOR 1997).

Após os rompimentos dos corpos de prova, foi possível obter a resistência média à compressão do concreto usado com suas respectivas idades, possibilitando dados que permitirão uma melhor análise do comportamento do concreto ora utilizado. No Quadro 4.2 mostra os valores respectivos da resistência média à compressão com as idades do concreto.

Quadro 4.2– Resistência média à compressão e idades do concreto

<b>Vigas</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b>Idade do concreto</b>
VS1	17,8	07 dias
VC1	22,0	40 dias
VS2	21,8	07 dias
VC2	27,0	28 dias
VS3	21,8	21 dias
VC3	23,0	37 dias
VS4	20,6	17 dias
VC4	21,6	26 dias
VSE	21,3	17 dias

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

A armadura transversal utilizada foi o aço do tipo CA 60B (na época), hoje conhecido CA 60 e para as armaduras longitudinais CA 50 A (na época), hoje CA 50, cujas tensões de escoamento foram verificadas através de ensaios de tração, ver Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Diâmetros e tensões de escoamento dos aços

$\Phi$ (mm)	$f_y$ (MPa)
5.0	740
10.0	610
20.0	520

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

As chapas que foram usadas são do tipo SAE 1006 e 1008. As características mecânicas das chapas pelo fabricante não são totalmente garantidas, necessitando realizar ensaios à tração para a sua utilização nas recuperações estruturais. No Quadro 4.4 mostra as espessuras das chapas utilizadas nas vigas.

Quadro 4.4 – Espessuras das chapas coladas nas vigas

Vigas	Espessuras das chapas (mm)
VC1	1,2
VC2	0,9
VC3	0,9
VC4	0,7
VCE	0,9

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

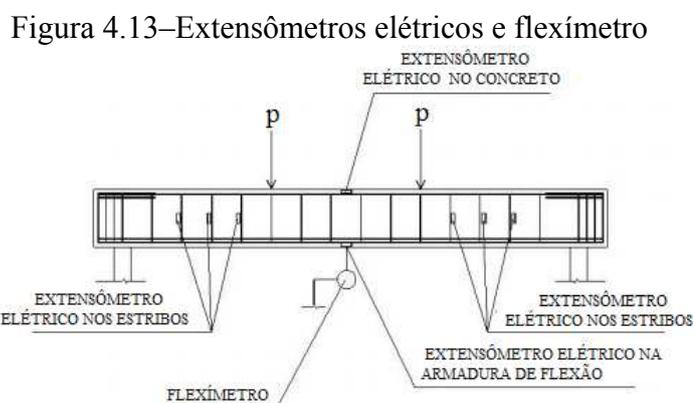
Foi relevante o estudo feito sobre o adesivo a base de epóxi que melhor se aplique a colagem das placas para uso da técnica de reforço estrutural desejada. Achou essencial analisar a resistência do conjunto aço/adesivo/concreto. Consequência disto foi necessário no laboratório da instituição um método que permitisse a utilização do equipamento para o ensaio de arrancamento. (JÚNIOR, 1997).

O adesivo utilizado na colagem dos materiais mostrou-se bastante aceitável o seu uso devido apresentar uma adequada consistência e trabalhabilidade, uma alta resistência média ao cisalhamento de 9 MPa e uma resistência à tração média de 25 MPa, embora existam outros produtos de qualidade semelhantes que poderiam ser aplicados sem comprometer o processo de reforço (JÚNIOR, 1997).

Na colagem de cada viga a quantidade de adesivo a base de epóxi foi de 6 Kg para uma correspondente espessura média de 1 mm de adesivo, suficiente para a colagem da chapa.

#### 4.2.4 Ensaio das vigas

As tensões de cisalhamento na armadura foram obtidas com uso de extensômetros elétricos um em cada ramo posicionados na metade da altura dos 06 (seis) estribos, sendo um em cada ramo. No meio do vão da viga foram colocados dois extensômetros elétricos, sendo um na armadura de flexão e o outro no concreto, com objetivo do cálculo da curvatura e conseqüentemente a rigidez  $(EJ)_s$ . Com a finalidade de calcular a flecha máxima e a rigidez média da peça  $(EJ)_M$ , foram colocados dois flexímetros na posição do vão central da viga (JÚNIOR, 1997). Na Figura 4.13 mostra o posicionamento dos extensômetros elétricos e flexímetro.

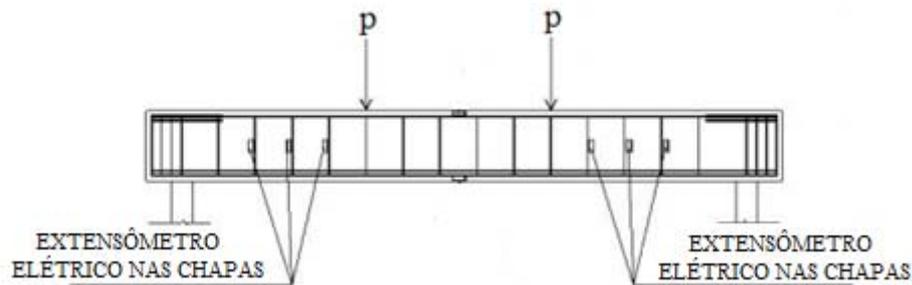


Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Nas chapas laterais foram colocadas a uma distância de 780 mm do apoio e sobre o eixo horizontal da viga, dois extensômetros, um formando  $45^\circ$  e o outro  $135^\circ$  com aquele eixo. Ao todo foram quatro pares de extensômetros elétricos, sendo dois pares para cada face, assim obtiveram-se as tensões de compressão e tração nas chapas (JÚNIOR, 1997). Na Figura 4.14 mostra o posicionamento dos extensômetros nas chapas.

Com os instrumentos já posicionados foi possível obter diversas características relevantes para o estudo da utilização de reforço estrutural de vigas para aumento da resistência ao cisalhamento, como foi citado anteriormente. Poderemos perceber mais adiante através dos resultados que o uso da técnica de chapas de aço coladas é bastante eficaz.

Figura 4.14 –Extensômetros aplicados nas chapas



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Através dos instrumentos de medidas posicionados em pontos estratégicos das armaduras e do concreto, permitirão obter valores médios decorrentes das posições equivalentes ou simétricas dos mesmos. Se baseando nesses valores é possível elaborar gráficos que foram ajustados através da função polinomial, obtendo-se aos dados adequados para a elaboração dos gráficos e tabelas analisadas neste trabalho (JÚNIOR, 1997).

Preferencialmente foram ensaiadas as vigas VS1, VS2 e VS4 sem uso de chapas de aço. Posteriormente as vigas foram coladas chapas de aço nas suas faces laterais que deu origem as vigas VC1, VC2 e VC4 no prazo mínimo de 7 (sete) dias da cura do adesivo, serão ensaiadas até o colapso (JÚNIOR, 1997).

Segundo Júnior (1997), o carregamento aplicado ocorreu de uma forma monotônico crescente em níveis de 10 KN. Devido ao esforço de cisalhamento máximo assumir um valor próximo da carga de um dos macacos, foi desprezado o peso próprio da viga.

As vigas VS1, VS2 e VS4 sem chapas, foram ensaiadas até atingirem uma carga próxima ao esforço de cisalhamento último teórico, cujos valores das fissuras de cisalhamento se aproximaram de 0,5 mm em média.

Foi ensaiada uma viga sem armadura de cisalhamento (VSE) com chapas de aço coladas lateralmente.

Já a viga VS3 e as vigas VC1, VC2 e VC3 com chapas de aço coladas foram ensaiadas até a ruptura. Os valores obtidos foram um pouco antes das vigas se romperem, devido à dificuldade de leitura nos instrumentos de medidas, decorrentes das oscilações das vigas,

#### 4.2.5 Obtenção dos resultados nos ensaios

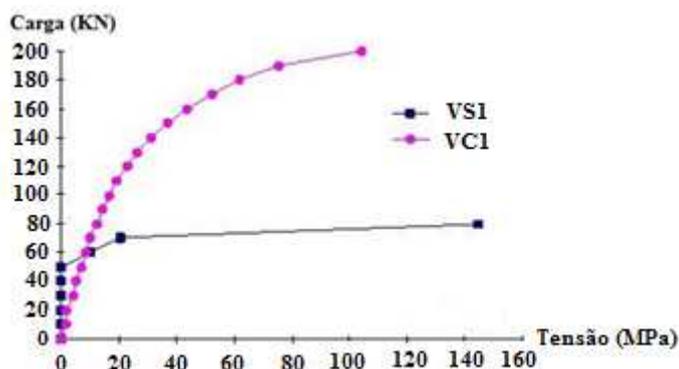
São apresentados os resultados nas vigas VS1, VC1, VS2, VC2, VS3, VC3, VS4, VC4 e VSE. No qual foi estudada com ou sem estribos para as devidas análises das cargas para obtenção de suas tensões atuantes como resultados finais.

##### 4.2.5.1 Vigas VS1 e VC1

Na viga VS1 foi aplicado um carregamento de forma a atingir o esforço de cisalhamento último teórico de 80 kN e posteriormente descarregado. Em seguida foram coladas as chapas de aço com espessura de 1,2 mm nas suas faces laterais e aguardando o tempo de cura do adesivo a viga agora denominada de VC1 foi ensaiada posteriormente atingindo a sua ruptura a uma carga de 240 kN.

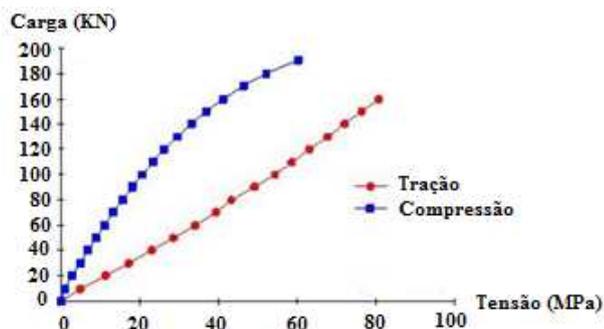
Os resultados dos ensaios das vigas VS1 e VC1 são fornecidos através dos gráficos mostrados nas Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 e no Quadro 4.5.

Figura 4.15 – Tensões nos estribos das vigas VS1 e VC1



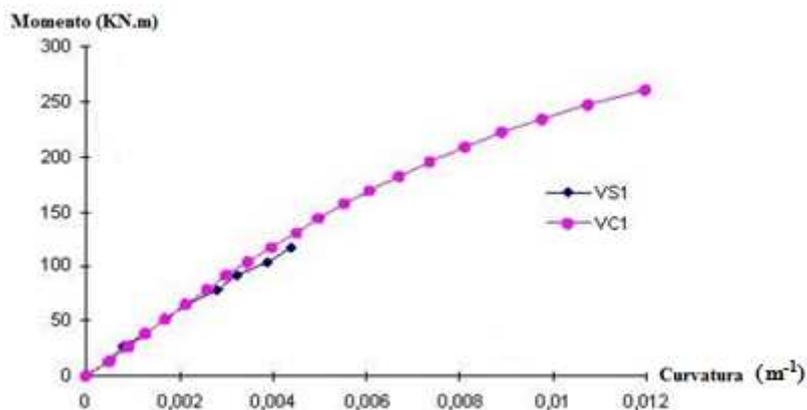
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.16 – Tensões de tração e compressão nas chapas da viga VC1



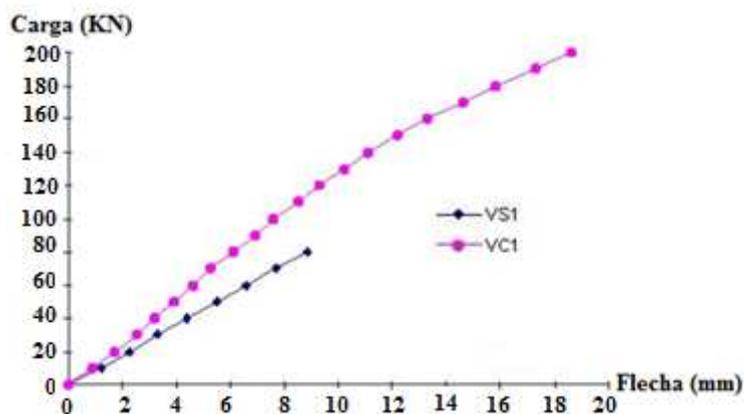
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.17– Gráfico Momento x Curvatura das vigas VS1 e VC1



Fonte: (JÚNIOR, 1997).

Figura 4.18 – Gráfico Carga x Flecha das vigas VS1 e VC1



Fonte: (JÚNIOR, 1977) adaptado.

Quadro 4.5 – Rigidez média  $(EJ)_M$  e rigidez da seção central  $(EJ)_S$  das vigas VS1 e VC1

Cargas kN	$(EJ)_M$		$K_M$	$(EJ)_S$		$K_S$
	VS1 kN.m <sup>2</sup>	VC1 kN.m <sup>2</sup>		VS1 kN.m <sup>2</sup>	VC1 kN.m <sup>2</sup>	
10	25599	23660	0,92	29392	25896	0,88
20	23724	24340	1,03	30239	28729	0,95
30	23074	25270	1,10	29953	30564	1,02
40	21947	26570	1,21	29601	30824	1,04
50	21034	27200	1,29	29227	30374	1,04
60	20131	27230	1,35	27610	30116	1,09
70	19128	27810	1,45	27643	30333	1,10
80	17962	27480	1,53	26466	30058	1,14

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Os valores de  $K_M$  e  $K_S$  são fornecidos através das equações abaixo:

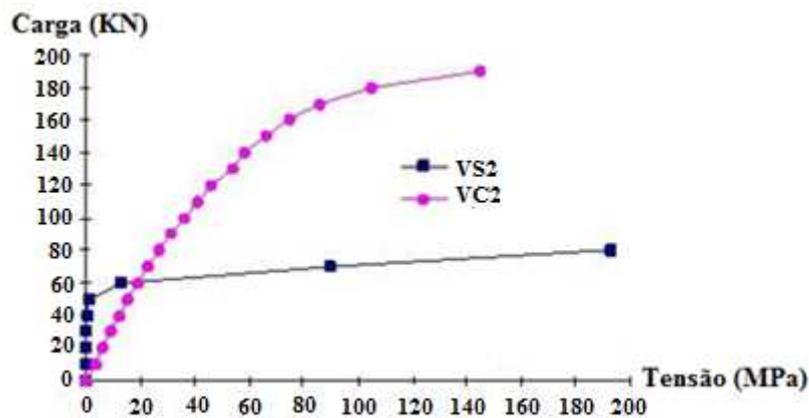
$$K_M = \frac{(EJ)_M^{VC1}}{(EJ)_M^{VS1}} \quad \text{e} \quad K_S = \frac{(EJ)_S^{VC1}}{(EJ)_S^{VS1}}$$

#### 4.2.5.2 Vigas VS2 e VC2

A viga VS2 foi submetida a uma carga de 80 kN e posteriormente foi feito o descarregamento, para serem coladas chapas de aço em suas faces laterais, que resultou na viga VC2, cuja ruptura ocorreu na carga de 193 kN.

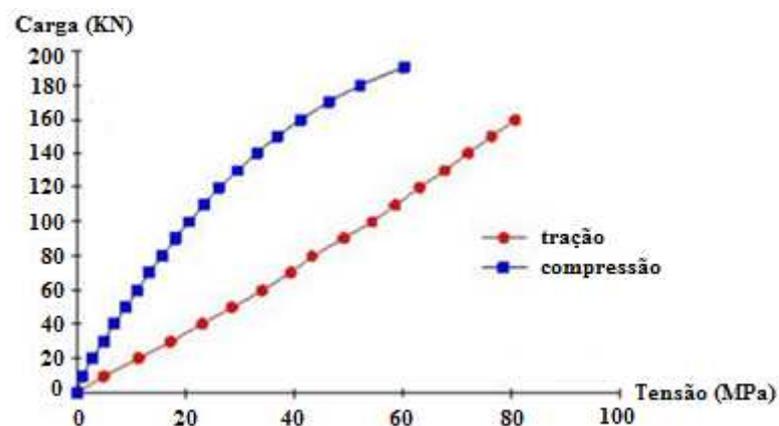
Os resultados dos ensaios das vigas VS2 e VC2 são apresentados através dos gráficos mostrados nas Figuras 4.19, 4.20, 4.21, e 4.22 e do Quadro 4.6.

Figura 4.19 – Tensões nos estribos das vigas VS2 e VC2



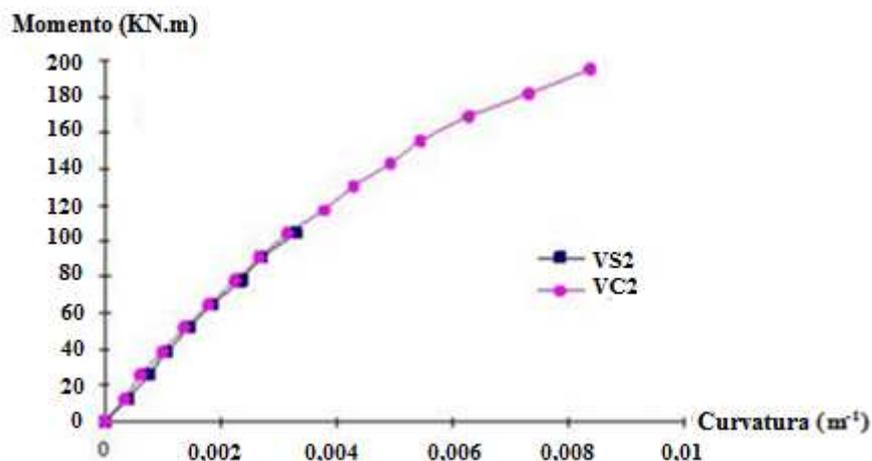
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.20 – Tensões de tração e compressão nas chapas da viga VC2



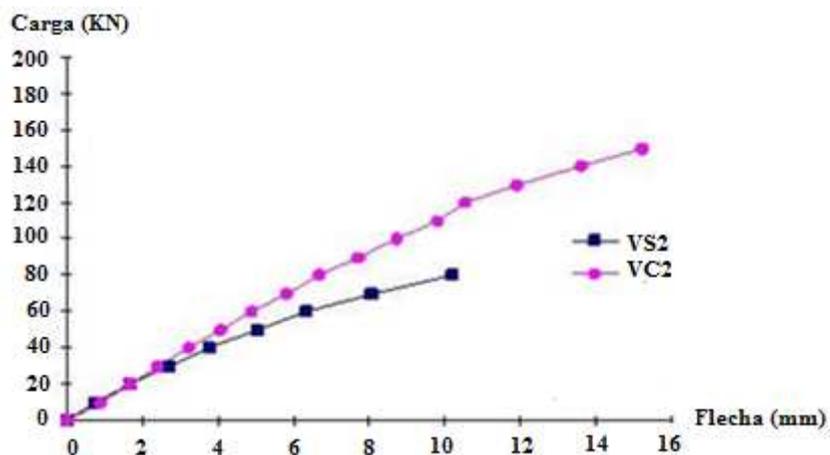
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.21 – Gráfico Momento x Curvatura das vigas VS2 e VC2



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.22 – Gráfico Carga x Flecha das vigas VS2 e VC2



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Quadro 4.6 – Rigidez média  $(EJ)_M$  e rigidez da seção central  $(EJ)_s$  das vigas VS2 e VC2

Cargas kN	$(EJ)_M$		$K_M$	$(EJ)_s$		$K_s$
	VS2 kN.m <sup>2</sup>	VC2 kN.m <sup>2</sup>		VS2 kN.m <sup>2</sup>	VC2 kN.m <sup>2</sup>	
10	28842	23394	0,81	32665	39770	1,22
20	25521	25521	1,00	34915	42494	1,22
30	23746	26319	1,11	37119	39478	1,06
40	22280	26319	1,18	36002	38162	1,06
50	21055	25994	1,23	35543	36391	1,02
60	19863	25782	1,30	33171	35063	1,06
70	18331	25411	1,39	33904	34051	1,00
80	16514	25140	1,52	31515	33185	1,05

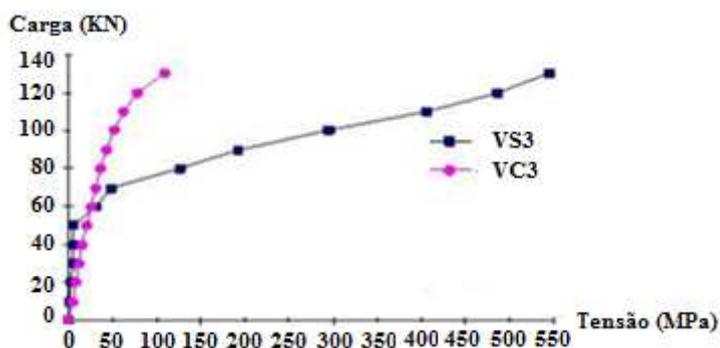
Fonte: (JUNIOR, 1997) adaptado.

### 4.2.5.3 Vigas VS3 e VC3

A viga VS3 foi submetida a um ensaio e quando a carga atingiu o valor de 130 kN, ocorreu o colapso total da viga, sendo necessária a sua recuperação através de uma argamassa de cimento e areia grossa lavada no traço 1:3, como substituição do concreto danificado. Após 15 (quinze) dias foram coladas as chapas de aço de espessura 0,9 mm nas faces laterais da viga VS3 recuperada e 7 (dias) após a cura do adesivo e em seguida submetida ao ensaio com rompimento para uma carga de 137 kN.

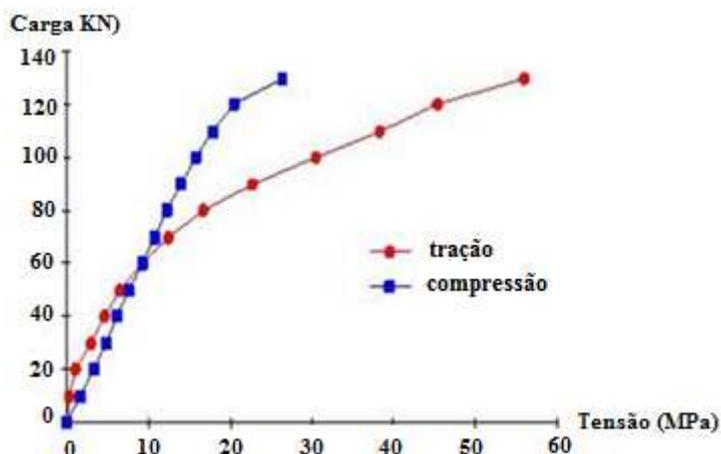
Os resultados dos ensaios das vigas VS3 e VC3 são fornecidos através dos gráficos mostrados nas Figuras 4.23, 4.24, 4.25, e 4.26 e no Quadro 4.7.

Figura 4.23 – Tensão nos estribos das vigas VS3 e VC3



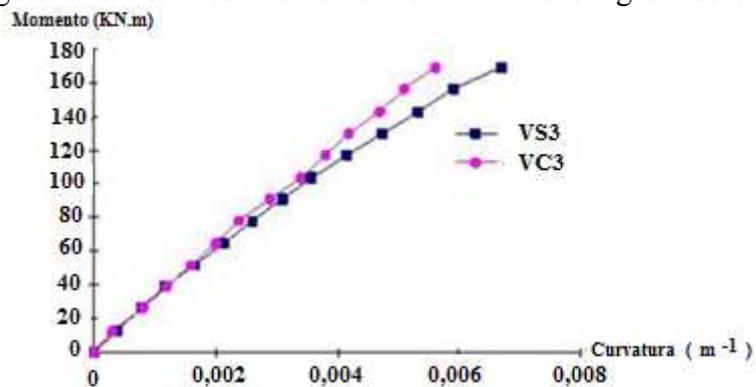
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.24 – Tensões de tração e compressão nas chapas da viga VC3



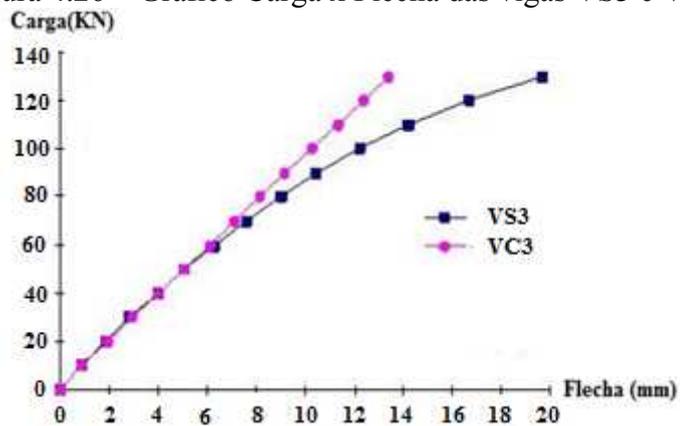
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.25– Gráfico Momento x Curvatura das vigas VS3 e VC3



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.26 – Gráfico Carga x Flecha das vigas VS3 e VC3



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Quadro 4.7 – Rigidez média  $(EJ)_M$  e rigidez da seção central  $(EJ)_S$  das vigas VS3 e VC3

Cargas kN	$(EJ)_M$		$K_M$	$(EJ)_S$		$K_S$
	VS3 kN.m <sup>2</sup>	VC3 kN.m <sup>2</sup>		VS3 kN.m <sup>2</sup>	VC3 kN.m <sup>2</sup>	
10	24370	24200	0,99	36225	40630	1,12
20	22948	21930	0,96	33300	34670	1,04
30	22124	21630	0,98	33012	32770	0,99
40	21105	21060	1,00	31590	32300	1,02
50	20775	20890	1,01	30797	31860	1,03
60	20023	20780	1,04	30292	31880	1,05
70	19385	20670	1,07	29530	31270	1,06
80	18692	20620	1,10	28644	30500	1,06
90	18025	20660	1,15	28253	31030	1,10
100	17263	20540	1,19	27501	30880	1,12
110	16326	20440	1,25	26883	30560	1,14
120	15162	20390	1,34	26214	30530	1,16
130	13905	20400	1,47	25338	30400	1,20

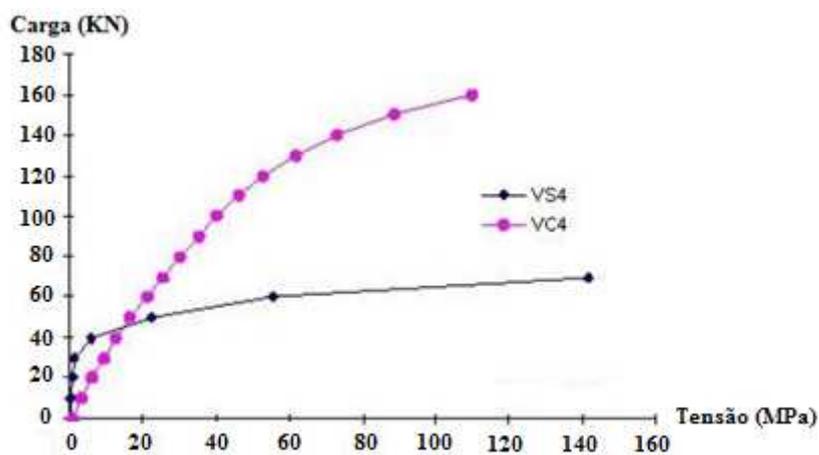
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

#### 4.2.5.4 Vigas VS4 e VC4

Com intenção de simular a recuperação de uma viga ao cisalhamento com uso de chapas de aço coladas, a viga VS4 foi ensaiada até atingir a carga de 85 kN. Em seguida descarregada e posteriormente aplicadas às chapas de aço com espessura de 0,7 mm nas suas faces laterais, dando origem à viga VC4. Após o tempo de cura do adesivo foi realizado um novo ensaio cuja ruptura ocorreu a uma carga de 170 kN.

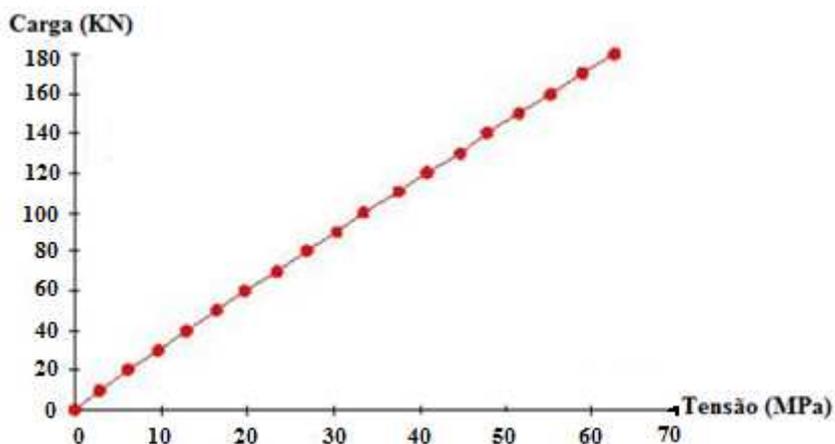
Os resultados das vigas VS4 e VC4 são apresentados através dos gráficos mostrados nas Figuras 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 e no Quadro 4.8.

Figura 4.27 – Tensões nos estribos das vigas VS4 e VC4



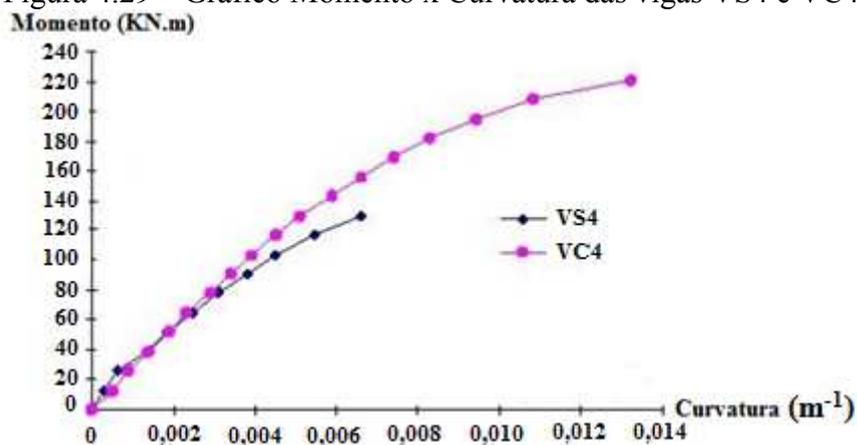
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.28 – Tensão de tração nas chapas da viga VC4



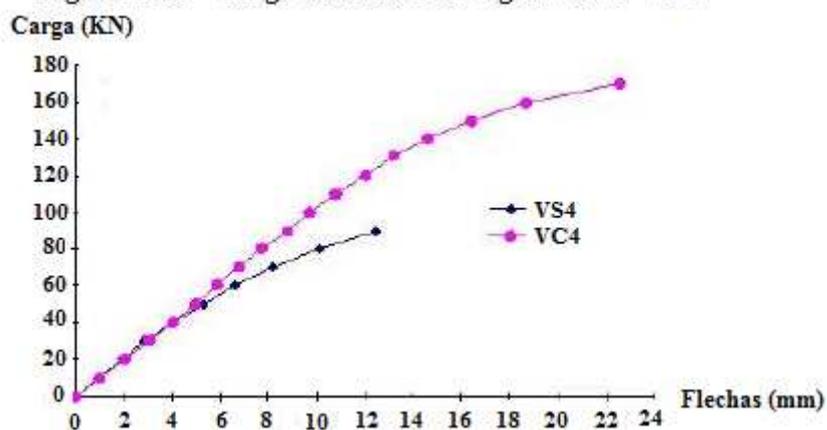
Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.29 – Gráfico Momento x Curvatura das vigas VS4 e VC4



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Figura 4.30 – Carga x Flecha das vigas VS4 e VC4



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Quadro 4.8 – Rigidez média  $(EJ)_M$  e rigidez da seção central  $(EJ)_S$  das vigas VS4 e VC4

Cargas kN	$(EJ)_M$		$K_M$	$(EJ)_S$		$K_S$
	VS4 kN.m <sup>2</sup>	VC4 kN.m <sup>2</sup>		VS4 kN.m <sup>2</sup>	VC4 kN.m <sup>2</sup>	
10	22529	21055	0,93	41399	26000	0,63
20	21456	20343	0,95	42603	28889	0,68
30	21802	20332	0,93	29429	27857	0,95
40	20957	20898	1,00	27876	27368	0,98
50	19762	21225	1,07	26255	28261	1,08
60	19038	21521	1,13	24988	26897	1,08
70	17921	21674	1,21	23726	26765	1,13
80	16688	21790	1,31	23208	26667	1,15
90	—	21534	1,41	21371	26000	1,22

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

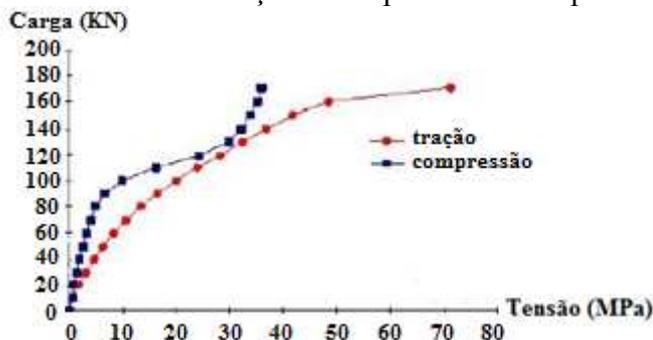
#### 4.2.5.5 Viga VSE

A viga VSE foi preparada sem armadura de cisalhamento com uso de chapas de aço coladas de 0,9 mm nas suas faces laterais antes de ser submetida a qualquer carregamento. A sua ruptura foi ocorrida para uma carga de 170 KN. A correspondente simulação pode estar associada a uma viga de concreto armado cujos estribos não mais absorvem os esforços de cisalhamento, situação que ocorrem em larga escala devido às patologias das estruturas, visto que os estribos estão mais próximos às superfícies externas da peça estrutural, ocorrendo uma maior agressão dos agentes externos.

Decorrente da viga VSE não ter a correspondente viga sem chapas, a mesma foi ensaiada sem antes ter sido fissurada, devido a esse fato foi elaborado um gráfico baseado nas médias das flechas das vigas sem chapas. Didaticamente o gráfico corresponderá a uma viga fictícia que chamaremos de VSf (Viga Sem chapa fictícia).

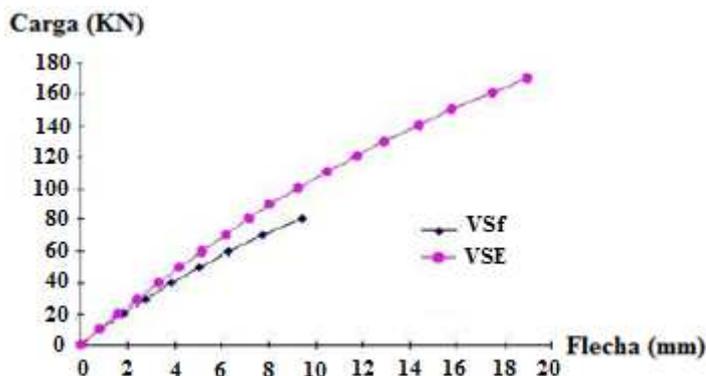
Os resultados dos ensaios da viga VSE e da viga fictícia VSf serão mostrados nas Figuras 4.31 e 4.32.

Figura 4.31 – Tensões de tração e compressão na chapa da viga VSE



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

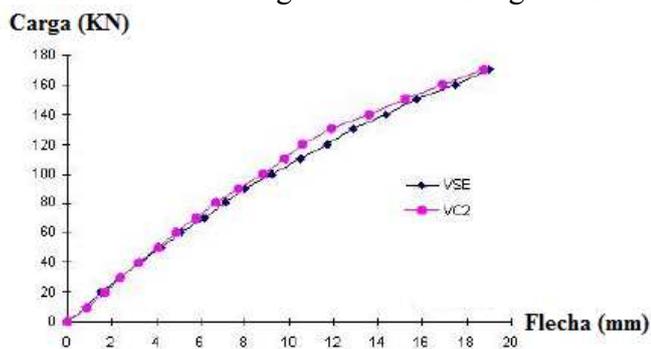
Figura 4.32 – Gráfico Carga x Flecha da viga VSE e da viga fictícia VSf



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Nas vigas VSE e VC2 foram colocadas chapas de mesma espessura que permita um estudo mais detalhado através do gráfico Carga x Flecha dessas vigas que são apresentados conjuntamente, para podermos analisar a influência da armadura transversal numa viga de concreto armado reforçadas com chapas de aço através da Figura 4.33.

Figura 4.33 – Gráfico Carga x Flecha das vigas VC2 e VSE



Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

#### 4.2.6. Demais resultados

Para uma melhor análise dos resultados experimentais deste trabalho são fornecidos Quadros 4.9 e 4.10, referentes aos valores das tensões nos estribos das vigas com chapas e os valores das tensões de tração nas chapas. São ainda apresentados Quadros 4.11 e 4.12 de forma resumida, que permitirão esclarecer a importância do uso de chapas de aço coladas com aumento substancial da resistência ao cisalhamento.

Quadro 4.9 – Valores das tensões nos estribos das vigas com chapas

Carga kN	VC1 MPa	VC2 MPa	VC3 MPa	VC4 MPa
0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	1,7	3,4	5,1	1,1
20	1,9	6,3	8,6	3,4
30	4,2	9,3	12,5	6,2
40	5,5	12,4	16,4	9,4
50	7,1	15,6	20,7	12,9
60	8,7	19,0	25,7	16,7
70	10,3	22,9	31,1	21,1
80	12,6	26,8	36,9	25,5
90	14,5	31,2	43,9	30,1
100	16,8	36,1	52,1	35,3
110	19,4	41,0	62,9	40,3
120	22,9	46,3	78,6	46,2
130	26,5	54,1	108,6	53,0

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Quadro 4.10 – Tensões de tração nas chapas

Carga kN	VC1 MPa	VC2 MPa	VC3 MPa	VC4 MPa	VSE MPa
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	4,2	4,9	0,3	2,8	0,4
20	7,3	11,2	1,1	6,2	1,8
30	12,8	17,2	2,9	9,6	3,1
40	17,2	23,0	4,7	13,0	4,6
50	21,3	28,6	6,5	16,4	6,3
60	25,9	34,0	9,3	19,8	8,2
70	30,3	39,2	12,4	23,4	10,7
80	25,0	43,1	16,7	26,8	13,3
90	39,4	49,1	22,7	30,4	16,5
100	43,8	54,2	30,4	33,5	20,0
110	48,1	58,6	38,4	37,5	23,9
120	53,1	63,3	46,3	40,9	28,2
130	57,2	67,9	56,0	44,7	32,5

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Quadro 4.11 – Resumo dos resultados dos ensaios das vigas sem chapas

Vigas sem chapas	Últimas cargas KN	Flecha máximas mm	Tensões nos estribos MPa
VS1	80,0	9,8	128,0
VS2	80,0	8,8	131,0
VS3	130,0	18,5	545,0
VS4	85,0	10,8	164,0

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

Quadro 4.12 – Resumo dos resultados dos ensaios das vigas com chapas

Vigas com chapas	Espessura das chapas mm	Cargas de ruptura kN	Flechas máximas (extrapoladas) mm	Tensões nos estribos MPa	Cargas antes da ruptura kN	Flechas antes da ruptura mm	Tensões nos estribos MPa
VC1	1,2	240	24,4	214,0	200	18,6	105,1
VC2	0,9	193	22,9	166,0	190	22,3	144,4
VC3	0,9	137	13,8	131,0	130	13,0	103,1
VC4	0,7	170	20,9	131,0	165	20,0	103,5
VSE	0,9	170	19,0	--	165	18,3	--

Fonte: (JÚNIOR, 1997) adaptado.

#### 4.2.7 Análise dos resultados

De início faremos análise do comportamento das vigas reforçadas com chapas de aço quanto às tensões nos estribos, tensão de tração e compressão nas chapas e quanto a rigidez. Também poderemos analisar a influência das chapas de aço coladas relativa a deformações das vigas através das Figuras 4.18, 4.22, 4.26 e 4.30, que relaciona a carga com a flecha.

Analisando as Figuras 4.15, 4.19, 4.23 e 4.27, nota-se que o início das solicitações nos estribos das vigas sem chapas ocorreu para valores próximos da carga de 50KN, onde surgiram as primeiras fissuras de cisalhamento. Nas vigas com chapas essas solicitações foram nos primeiros carregamentos, decorrentes das pré fissuração das vigas antes da colocação das chapas para posteriores ensaios.

As Figuras 4.15, 4.19, 4.23 e 4.27, que relaciona as cargas com as tensões nos estribos das vigas sem ou com chapas, mostra claramente que às tensões nos estribos das vigas com chapas são bem menores que nas vigas sem chapas, consequência da absorção do cisalhamento por parte das chapas.

Analisando o Quadro 4.10 relativos às tensões de tração nas chapas para diversas vigas reforçadas correspondentes a várias cargas aplicadas, perceberemos valores das tensões bem inferiores a tensão de 270 MPa que corresponde a tensão de escoamento das chapas obtida através dos ensaios de tração. Consequentemente a chapa não contribuiu de forma mais eficaz.

As tensões de compressão e tração são mostradas através das Figuras 4.16, 4.20, 4.24, e 4.28 onde claramente se observa valores menores das tensões de compressão quando comparadas com as de tração. Sabendo que na flexão surgem tensões de tração e compressão e ciente que o concreto trabalha a compressão, irá existir uma transferência das tensões de tração e compressão para as respectivas chapas.

Tendo como importância avaliar o comportamento das flechas para diversas cargas e fazendo a devida comparação entre as vigas com ou sem chapas, através das Figuras 4.18, 4.22, 4.26 e 4.30, percebe-se uma redução expressiva das flechas das vigas após a colocação das chapas.

Visto que a linha elástica de deformação tem como uma função inversa de sua rigidez (EJ) ocorrerá uma majoração da rigidez da peça estrutural em estudo, fato este que pode ser visto através dos Quadros 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

A influência da espessura das chapas do ponto de vista de rigidez não foi levada em consideração no trabalho mencionado.

### 4.3 Recuperação estrutural de uma viga de concreto armado à flexão com uso da Fibra de carbono

Vários dados são relevantes para o projeto de recuperação estrutural. Sendo fornecidos alguns desses elementos com seus valores e unidades respectivas necessárias. Conforme apresenta o Quadro 4.13.

Quadro 4.13 – Dados relevantes para projeto de recuperação estrutural.

Elementos/valores	Identificação	Unidades
$g = 0,095$	Carregamento distribuído permanente	KN/cm
$p = 0,13$	Carregamento distribuído acidental	KN/cm
$q_t = g + p$	Carregamento distribuído total	KN/cm
$L = 12$ ou $1200$	Comprimento da viga	m ou cm
$\phi = 0,85$	Fator de resistência da Fibra de Carbono	-
$f_{ck} = 3$	Tensão de compressão do concreto	KN/cm <sup>2</sup>
$\gamma_f = 1,4$	Coefficiente de segurança de majoração do momento fletor máximo positivo	-
$d = 94,5$	Distância da armadura de tração a parte mais comprimida da viga	cm
$d' = 4,815$	Distância da armadura de compressão a parte mais comprimida da viga	cm
$\gamma_c = 1,4$	Fator de redução da tensão do concreto	
$h = 100$	Altura da viga	cm
$bw = 25$	Base da viga	cm

Fonte: (AUTOR, 2020).

### 4.3.1 Resistência à compressão de cálculo

Para fins de projeto, calcula-se a resistência a compressão de cálculo, através do  $f_{ck}$  do concreto, com uso de um fator de redução de tensão do concreto igual a  $\gamma_c = 1,4$ , então é dada pela seguinte equação.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad , \text{ onde:}$$

$f_{cd}$  – Resistência à compressão de cálculo

$f_{ck}$  – Resistência à compressão do concreto

$\gamma_c$  – Fator de redução do  $f_{ck}$

Sendo,  $f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}^2$  e  $\gamma_c = 1,4$ , portanto temos  $f_{cd} = 2,14 \text{ KN/cm}^2$

### 4.3.2 Deformação da viga apenas para a carga permanente: $g = 0,095 \text{ KN/cm}$

É necessário que se determine o Momento Fletor Máximo positivo, através da equação,  $M_g = \frac{gL^2}{8}$ , sendo  $L = 1200 \text{ cm}$ ,  $M_g = 1,71 \times 10^4 \text{ KN.cm}$  e  $\gamma_f = 1,4$  (Fator de majoração). Obtendo o resultado do Momento Fletor Máximo positivo de projeto:

$$M_d = \gamma_f \cdot M_g; \quad M_d = 2,394 \times 10^4 \text{ KN.cm}; \quad X = 1,25d \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{M_d}{0,425b_w d^2 f_{cd}}} \right]$$

$$d = 94,5 \text{ cm}; \quad M_d = 2,394 \times 10^4 \text{ KN.cm}; \quad b_w = 25 \text{ cm}$$

$$f_{cd} = 2,14 \text{ KN/cm}^2$$

$$X = 7,172 \text{ cm}$$

$$Z = d - \frac{0,8 \cdot X}{2}; \quad Z = d - 0,4X;$$

$$\text{Logo, } Z = d - \frac{0,8X}{2} \therefore d = 94,5 \text{ cm}, \quad Z = 91,631 \text{ cm}$$

Onde  $Z$  representa a distância da resultante de compressão do concreto até a armadura de tração. Logo a resultante pode ser expressa da seguinte maneira:

$$R_{st} = \frac{M_d}{Z}; \quad \text{Onde, } M_d = 2,394 \times 10^4 \text{ KN.cm}, \quad Z = 91,631 \text{ cm}, \quad R_{st} = 261,265 \text{ KN}.$$

Já calculada a resultante  $R_{st}$ , podemos calcular a tensão resultante atuante na armadura de tração, que pode ser obtida através da equação,  $f_{sd} = \frac{R_{st}}{A_s}$

Onde  $R_{st} = 261,265\text{KN}$  e  $A_s = 12,57\text{ cm}^2$ , que corresponde a 4 barras de 20 mm de Aço CA 50.

$f_{sd} = 20,785\text{ KN/cm}^2$ , que corresponde a tensão atuante na armadura de tração.

Fazendo uso da Lei de Hooke, pode-se relacionar a deformação sofrida pela armadura de tração com a tensão  $f_{sd}$ .

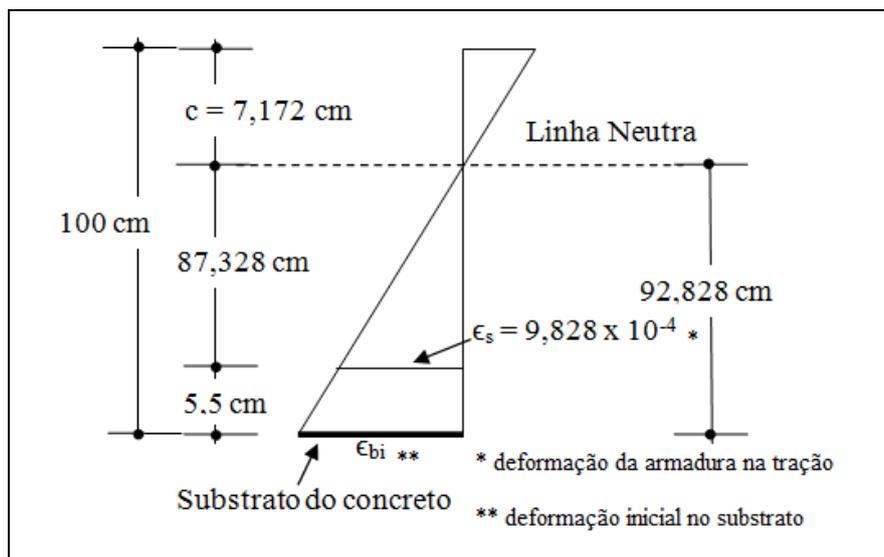
$$f_{sd} = E_s \cdot \epsilon_s \therefore \epsilon_s = \frac{f_{sd}}{E_s}, E_s = 21000\text{ KN/cm}^2; \text{Módulo de elasticidade do Aço CA 50.}$$

Visto que:  $f_{sd} = 20,785\text{ KN/cm}^2$ , podemos escrever,  $\epsilon_s = 9,898 \times 10^{-4}$ , deformação específica do aço na armadura de tração.

Visto anteriormente que a profundidade da linha neutra devido a carga permanente  $g = 0,095\text{ KN/cm}$  foi de  $c = 7,172\text{ cm}$ , podemos determinar a deformação inicial no substrato do concreto onde será aplicado o reforço, através da semelhança de triângulo.

Na Figura 4.34 mostra o diagrama de deformação decorrente da carga permanente e sabendo que,  $\epsilon_s = 9,898 \times 10^{-4}$ , podemos calcular a deformação inicial  $b_i$  a ser utilizada nos cálculos posteriores, com uso da semelhança de triângulo.

Figura 4.34 - Diagrama de deformação



Fonte: (AUTOR, 2020).

Utilizando a semelhança de triângulos, pode-se escrever:

$$\frac{\epsilon_{bi}}{\epsilon_s} = \frac{92,828}{87,328}; \epsilon_{bi} = 1,06298\epsilon_s$$

$\epsilon_s = 9,898 \times 10^{-4}$ ;  $\epsilon_{bi} = 1,052 \times 10^{-3}$ ,  $\epsilon_{bi}$  – deformação inicial na parte inferior do substrato.

### 4.3.3 Tensão de cálculo do Aço CA 50

Para fins de dimensionamento essa tensão é calculada através da relação entre a tensão de escoamento do aço CA 50 ( $F_{yk}$ ) por um fator  $\gamma_s$ , que depende se houve ou não o ensaio do aço. O valor correspondente do  $\gamma_s$  pode ser obtido conforme as condições abaixo.

$$\gamma_s = 1,15, \text{ caso seja realizado o ensaio}$$

$$\gamma_s = 1,25, \text{ caso não seja realizado o ensaio}$$

$$f_{yk} = 5000 \text{ kgf/cm}^2, 1 \text{ kgf} \approx 10 \text{ N}, f_{yk} = 50000 \text{ N/cm}^2, \text{ logo } f_{yk} = 50 \text{ KN/cm}^2,$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ supondo que seja realizado o ensaio, logo } \gamma_s = 1,15, \text{ substituindo}$$

$$f_{yd} = 43,48 \text{ KN/cm}^2.$$

### 4.3.4 Área da armadura de tração devido à carga permanente

A área a ser calculada será a mínima necessária para observar o momento fletor máximo positivo majorado, já calculado anteriormente.

$$A_s = \frac{M_d}{Z f_{yd}}, M_d = 2,394 \times 10^4 \text{ KN.cm}; Z = 91,631 \text{ e } f_{yd} = 43,48 \text{ KN/cm}^2$$

$$A_s = 6,01 \text{ cm}^2$$

### 4.3.5 Momento máximo resistido pela armadura longitudinal existente

Para fins de projeto usaremos uma área de armadura de tração igual a  $12,57 \text{ cm}^2$ , que corresponde a 4 (quatro) barras de aço de diâmetro 20 mm. A resistência máxima  $R_{st(máx)} = A_s \cdot f_{yd}$ , onde  $A_s = 12,57 \text{ cm}^2$  e  $f_{yd} = 43,48 \text{ KN/cm}^2$ , portanto  $R_{st(máx)} = 546,54 \text{ KN}$ .  $M_{d(máx)} = R_{st(máx)} \cdot Z_{(máx)}$ , então calcula  $Z_{(máx)}$  através da profundidade máxima da linha neutra. As equações dos cálculos são apresentadas abaixo.

$X_{máx}$  – profundidade máxima da linha neutra.

$$X_{máx} = 1,25d \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{R_{st(máx)} \cdot Z_{máx}}{0,425b_w d^2 f_{cd}}} \right], Z_{máx} = d - 0,4X_{máx};$$

$$X_{máx} = 1,25d \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{R_{st(máx)}(d - 0,4X_{máx})}{0,425b_w d^2 f_{cd}}} \right]$$

Então resolvendo a equação, teremos que  $X_{máx} = 15 \text{ cm}$ ,  $Z_{máx} = d - 0,4X_{máx}$ , sabendo que  $d = 94,5 \text{ cm}$  encontramos o  $Z_{máx} = 88,5 \text{ cm}$ .

$M_d (máx) = R_{st} (máx) \cdot Z_{máx}$ ,  $R_{st} (máx) = 546,54 \text{ KN}$ ,  $Z_{máx} = 88,5 \text{ cm}$ ; então podemos escrever:  $M_d (máx) = 4,837 \times 10^4 \text{ KNcm}$ .

Analisando o carregamento distribuído total  $q_t = g + p = 0,095 + 0,13$ ;

$q_t = 0,225 \text{ KN/cm}$ , podemos calcular o momento fletor máximo positivo decorrente da carga distribuída total, conforme apresentado abaixo.

$$M_d (\text{total}) = M_{máx} (\text{positivo}) \cdot \gamma_F, \quad M_{máx} (\text{positivo}) = \frac{q_t L^2}{8}, \quad q_t = 0,225 \text{ KN/cm},$$

$$L = 1200 \text{ cm e } \gamma_F = 1,4, \text{ portanto } M_d (\text{total}) = 5,67 \times 10^4 \text{ KN.cm}$$

Devido o  $M_d (\text{total}) > M_d (\text{máx})$ , há necessidade de se fazer um reforço estrutural.

#### 4.3.6 Módulo de Elasticidade secante do concreto

O módulo de elasticidade é uma grandeza mecânica que mede a rigidez de um material sólido, podendo ser definido a partir do gráfico que envolve tensões e deformações. O módulo de elasticidade secante também pode ser obtido segundo ABNT NBR 6118:2014, pela expressão abaixo.

$$E_{ci} = (0,1)\alpha_E \cdot 5600\sqrt{f_{ck} \cdot 10}, \quad \alpha_E = 1, f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}^2, \quad E_{ci} = 3,067 \times 10^3 \text{ KN/cm}^2$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 (f_{ck} \cdot 10)/80 \therefore \alpha_i = 0,875, \quad E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \therefore E_{cs} = 2,684 \times 10^3 \text{ KN/cm}^2$$

#### 4.3.7 Reforço com uso de duas lâminas de fibra de carbono, arbitrando $c = 0,25d$ , onde $d = 94,5\text{cm}$ .

Dados relevantes são necessários para um melhor dimensionamento e entendimento das deformações e tensões que atuam em vários elementos do reforço. Tratando-se de um método iterativo onde se parte com uma profundidade da linha neutra, que será comparada com um valor obtido através de uma equação, cujo cálculo chamaremos de  $c$  (calculado), fazendo a comparação entre esses valores, se os valores os valores encontrados se convergirem, o método utilizado se encerraria, caso divergirem, precisaríamos partir com uma outra profundidade da linha neutra. No Quadro 4.14 mostramos várias siglas que serão utilizadas para o cálculo das deformações e tensões necessárias para obter o valor do  $c$  (calculado).

Quadro 4.14 – Siglas utilizadas.

Sigla	Identificação
$\epsilon_{fd}$	Deformação de projeto da fibra
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra
$\epsilon_{f\mu}$	Deformação máxima de projeto
$\epsilon_{f\mu}^*$	Deformação máxima da fibra fornecida pelo fabricante
$\eta$	Número de camadas da fibra
$t_f$	Espessura da fibra
$f_{ck}$	Resistência à compressão
$b_f$	Base da fibra
$A_f$	Área da fibra
$E_s$	Modulo de elasticidade aço 50
$f_{f\mu}$	Tensão máxima da fibra
$\epsilon_{c\mu}$	Máxima deformação do concreto
$\epsilon_{bi}$	Deformação inicial do substrato no concreto
$c$	Profundidade da linha neutra
$d$	Distância da armadura de tração a parte mais comprimida da viga
$d'$	Distância da armadura de compressão a parte mais comprimida da viga
$h$	Altura da viga

Fonte: (AUTOR, 2020).

#### 4.3.7.1 Determinação das deformações.

É necessário o cálculo das deformações dos materiais envolvidos, para a determinação das tensões.

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{ck}}{nE_f t_f}} \leq 0,9\epsilon_{f\mu}, t_f \text{ (mm)}$$

$n = 2$  lâminas de fibra;  $t_f = 0,033 \text{ cm} = 0,33 \text{ mm}$ ;  $f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}^2$ ;  $E_f = 22800 \text{ KN/cm}^2$

$$\epsilon_{fd} = 0,005789 = 5,789 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_{f\mu} = 0,95 \cdot \epsilon_{f\mu}^* = 0,95(0,017) = 0,016$$

$$\epsilon_{fd} \leq \epsilon_{f\mu} \text{ ok!}$$

visto que  $c = 0,25d = 0,25 (94,5) \therefore c = 23,625 \text{ cm}$

Sabendo que a deformação do concreto não deve ultrapassar de 0,35 %, quando dimensionado segundo os critérios da ABNT, então:

$\epsilon_{c\mu} = 0,35 \% = 0,0035$ , deformação específica do encurtamento do concreto;

$h = 100 \text{ cm}$ ;  $\epsilon_{bi} = 0,00152$ ;  $c = 23,625 \text{ cm}$

$$\epsilon_f = \epsilon_{c\mu} \left( \frac{h-c}{c} - \epsilon_{bi} \right); \quad \epsilon_{c\mu} = 0,0035; \quad \epsilon_f = 0,011$$

Visto que:  $\epsilon_f \leq \epsilon_{fd} = 0,005789$ , atribuiremos a  $\epsilon_f = 0,005789$ .

$$\epsilon_c = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \cdot \left( \frac{c}{h-c} \right), \text{ substituindo, teremos que: } \epsilon_c = 2,116 \times 10^{-3} = 0,002116,$$

visto que:  $\epsilon_c \leq \epsilon_{c\mu} = 0,0035$ , atribuiremos a  $\epsilon_c = 0,002116 = 2,116 \times 10^{-3}$

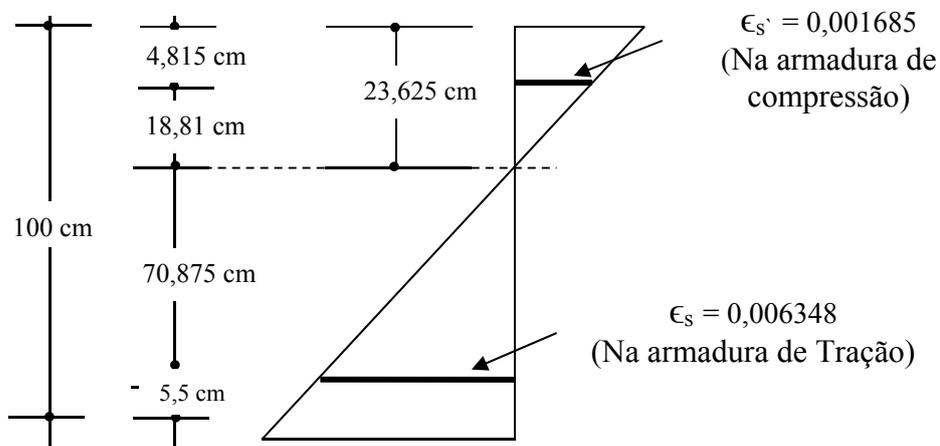
$$\epsilon_s = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \cdot \left( \frac{d-c}{h-c} \right), \text{ substituindo, teremos que: } \epsilon_s = 0,006348 = 6,348 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_{s'} = \epsilon_s \cdot \frac{(c-d')}{(d-c)}, \quad d' = 4,815 \text{ cm}; \quad c = 23,625 \text{ cm} \text{ e } d = 94,5 \text{ cm}$$

$$\epsilon_{s'} = 1,685 \times 10^{-3} = 0,001685$$

Na Figura 4.35, mostra o diagrama de deformação das armaduras de tração e compressão.

Figura 4.35 - Diagrama de deformação



#### 4.3.7.2 Determinação das tensões

Com base nos cálculos das deformações específicas obtidas anteriormente, partiremos para as tensões dos materiais constituintes dos elementos do reforço. Conforme são apresentadas nas equações.

$$f_s = E_s \cdot \epsilon_s, E_s = 21000 \text{ KN/cm}^2; \epsilon_s = 6,348 \times 10^{-3}$$

$$f_s = 133,31 \text{ KN/cm}^2, \text{ visto que } f_s \leq f_{yd} = 43,48 \text{ KN/cm}^2, \text{ atribuiremos a } f_s = 43,48 \text{ KN/cm}^2.$$

$$f_{s'} = E_s \cdot \epsilon_{s'}, \epsilon_{s'} = 1,685 \times 10^{-3}, f_{s'} = 35,382 \text{ KN/cm}^2, \text{ visto que}$$

$$f_{s'} \leq f_{yd} = 43,48 \text{ KN/cm}^2, \text{ atribuiremos a } f_{s'} = 35,382 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_f = E_f \cdot \epsilon_f, \epsilon_f = 0,005789; E_f = 22800 \text{ KN/cm}^2; f_f = 131,99 \text{ KN/cm}^2$$

#### 4.3.7.3 Cálculo do equilíbrio das forças resultantes

É necessário para analisar o equilíbrio, calcular alguns parâmetros que permitem obter o valor da profundidade da linha neutra, isto é, o valor de  $c$ . As equações são apresentadas.

$$\epsilon'_c = \frac{1,71 f_{ck}}{E_{cs}}, f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}^2; E_{cs} = 2,684 \times 10^3 \text{ KN/cm}^2;$$

$$\epsilon'_c = 1,911 \times 10^{-3}$$

$$\beta_1 = \frac{4\epsilon'_c - \epsilon_c}{6\epsilon'_c - 2\epsilon_c}, \epsilon'_c = 1,911 \times 10^{-3}; f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}^2;$$

$$E_{cs} = 2,684 \times 10^3 \text{ KN/cm}^2; \beta_1 = 0,764$$

$$\alpha_1 = \frac{3\epsilon'_c \cdot \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1 \cdot \epsilon_c^2}, \epsilon'_c = 1,911 \times 10^{-3}, \epsilon_c = 2,16 \times 10^{-3}, \beta_1 = 0,764$$

$$\alpha_1 = 0,914$$

$$c_{\text{calculado}} = \frac{A_s f_s + A_f f_f}{\alpha_1 f_{ck} \beta_1 b_w}, A_s = 12,57 \text{ cm}^2; A_f = 1,452 \text{ cm}^2; f_s = 43,48 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_f = 131,99 \text{ KN/cm}^2 ; f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}; \alpha_1 = 0,914; \beta_1 = 0,764 ; b_w = 25 \text{ cm.}$$

Então,  $c_{\text{calculado}} = 14,09 \text{ cm}$  ;  $c_{\text{arbitrado}} = 0,25d = 0,25(94,5) \therefore c_{\text{arbitrado}} = 23,625 \text{ cm}$ , os valores não se convergiram, então é necessário partir com um novo valor da profundidade da linha neutra, até que os valores se convirjam, para a conclusão final do método iterativo.

#### 4.3.8 Reforço com uso de duas lâminas de fibra de carbono, arbitrando $c = 0,18d$ , onde $d = 94,5\text{cm}$ .

Assim como visto no item anterior, é conveniente o cálculo das deformações e tensões que atuam em vários elementos do reforço.

##### 4.3.8.1 Determinação das deformações.

Cálculo das deformações dos materiais envolvidos, para a determinação das tensões.

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{ck}}{nE_f t_f}} \leq 0,9\epsilon_{f\mu} , t_f (\text{mm})$$

$$n = 2 \text{ lâminas de fibra}; t_f = 0,033 \text{ cm} = 0,33 \text{ mm}; f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}^2;$$

$$E_f = 22800 \text{ KN/cm}^2; \epsilon_{fd} = 0,005789 = 5,789 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_{f\mu} = 0,95 \cdot \epsilon_{f\mu}^* = 0,95(0,017) = 0,016$$

$$\epsilon_{fd} \leq \epsilon_{f\mu} \text{ ok!}$$

$$\text{Visto que } c = 0,18d = 0,18(94,5); c = 17,01 \text{ cm}$$

Sabendo que a deformação do concreto não deve ultrapassar de 0,35 %, já definido anteriormente.

$$\epsilon_f = \epsilon_{c\mu} \left( \frac{h-c}{c} - \epsilon_{bi} \right), \epsilon_{bi} = 0,00152; c = 17,01 \text{ cm}; h = 100\text{cm}$$

$$\epsilon_f = 0,017, \text{ visto que: } \epsilon_f \leq \epsilon_{fd} = 0,005789, \text{ atribuiremos a } \epsilon_f = 0,005789.$$

$\epsilon_c = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{h-c}\right)$ , substituindo, teremos que:  $\epsilon_c = 1,402 \times 10^{-3}$ , visto que:

$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu} = 0,0035$ , atribuiremos  $\epsilon_c = 0,001402$ ;  $\epsilon_s = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{h-c}\right)$

Onde,  $d = 94,5$  cm;  $c = 17,01$  cm;  $h = 100$ cm;  $\epsilon_f = 0,005789$ ;  $\epsilon_{bi} = 0,00152$ ;

Logo,

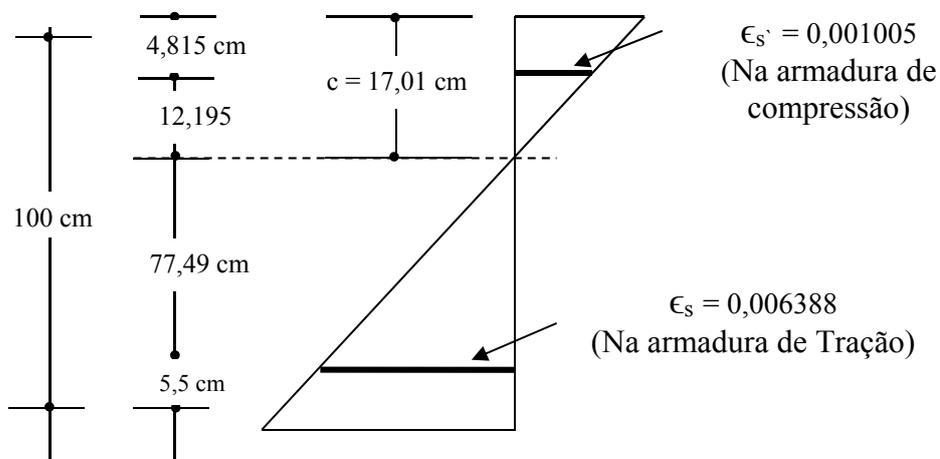
$$\epsilon_s = 6,388 \times 10^{-3} = 0,006388$$

$\epsilon_{s'} = \epsilon_s \cdot \frac{(c-d')}{(d-c)}$ ,  $d' = 4,815$  cm;  $c = 17,01$  cm e  $d = 94,5$  cm

$$\epsilon_{s'} = 1,005 \cdot 10^{-3} = 0,001005$$

Pode-se comprovar o valor do  $\epsilon_{s'}$  com uso do diagrama de deformação, utilizando semelhança de triângulo, conforme figura 4.36.

Figura 4.36 - Diagrama de deformação



Fonte: (AUTOR, 2020).

$$\frac{\epsilon_{s'}}{\epsilon_s} = \frac{12,195}{77,49}; \quad \epsilon_s = 0,006388, \text{ então } \epsilon_{s'} = 0,001005$$

#### 4.3.8.2 Determinação das tensões

Conforme demonstrado anteriormente, foram calculadas as deformações dos materiais correspondentes.

$$f_s = E_s \cdot \epsilon_s, E_s = 21000 \text{ KN/cm}^2; \epsilon_s = 6,388 \times 10^{-3}$$

$$f_s = 134,15 \text{ KN}, \text{ visto que } f_s \leq f_{yd} = 43,48 \text{ KN/cm}^2, \text{ atribuiremos a}$$

$$f_s = 43,48 \text{ KN/cm}^2.$$

$$f_{s'} = E_s \cdot \epsilon_{s'}, E_s = 21.000 \text{ KN/cm}^2; \epsilon_{s'} = 1,005 \times 10^{-3}; f_{s'} = 21,1 \text{ KN/cm}^2, \text{ então:}$$

$$f_{s'} \leq f_{yd} = 43,48 \text{ KN/cm}^2, \text{ atribuiremos a } f_{s'} = 21,1 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_f = E_f \cdot \epsilon_f, \epsilon_f = 0,005789; E_f = 22800 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_f = 131,99 \text{ KN/cm}^2$$

#### 4.3.8.3 Cálculo do equilíbrio das forças resultantes

Já comentado no item 4.3.7.3, é necessário o cálculo do valor de  $c$ , através da equação de equilíbrio abaixo:

Inicialmente vamos calcular o coeficiente  $\beta_1$ , que é expresso pela equação abaixo:

$$\beta_1 = \frac{4\epsilon_c' - \epsilon_c}{6\epsilon_c' - 2\epsilon_c}, \epsilon_c' = 1,911 \times 10^{-3}, \epsilon_c = 1,482 \times 10^{-3}, \text{ então } \beta_1 = 0,721;$$

Em seguida vamos determinar o coeficiente  $\alpha_1$ , conforme equação abaixo.

$$\alpha_1 = \frac{3\epsilon_c' \cdot \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1 \cdot \epsilon_c'^2}, \alpha_1 = 0,769$$

$$C_{\text{calculado}} = \frac{A_s f_s + A_f f_f}{\alpha_1 f_{ck} \beta_1 b_w}, A_s = 12,57 \text{ cm}^2; A_f = 1,452 \text{ cm}^2; f_s = 43,48 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_f = 131,99 \text{ KN/cm}^2; f_{ck} = 3 \text{ KN/cm}; \alpha_1 = 0,769; b_w = 25 \text{ cm}; \beta_1 = 0,721;$$

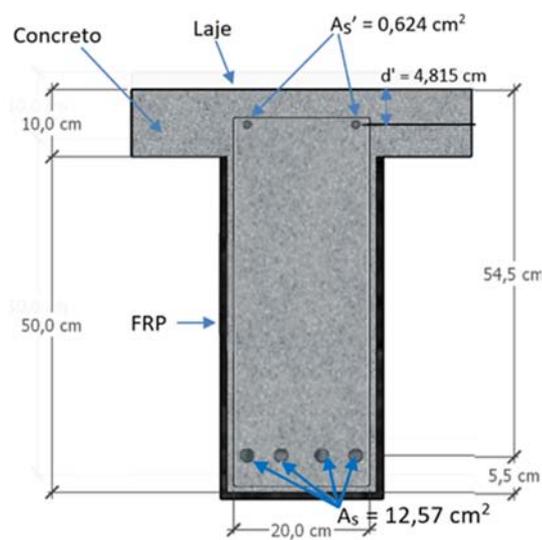
Então, o  $C_{\text{calculado}} = 17,75 \text{ cm}$ ; mas o valor de  $C_{\text{arbitrado}} = 0,18d = 0,18(94,5)$ ;  $C_{\text{arbitrado}} = 17,01 \text{ cm}$ , analisando os resultados é possível observar que os valores se convergem, concluindo o método iterativo utilizado, com uma pequena margem de erro de 4,35%, que corresponde a um erro aceitável estatisticamente.

#### 4.4 Recuperação estrutural de uma viga de concreto armado ao cisalhamento com uso da Fibra de Carbono

##### 4.4.1 Dados relevantes são fornecidos através do detalhamento da viga com seus elementos constituintes abaixo.

É fornecido através da Figura 4.37, detalhes da viga com seus elementos.

Figura 4.37: Corte transversal da viga



Fonte: (AUTOR, 2020).

##### 4.4.1.1 Dados dos diversos materiais a serem utilizados no reforço estrutural desejado.

###### CONCRETO:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa} = 3 \text{ KN/cm}^2; \gamma_c = 1,4 \text{ (Coeficiente de segurança)}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; f_{cd} = 21,43 \text{ MPa ou } f_{cd} = 2,14 \text{ KN/cm}^2$$

###### AÇO:

Sendo utilizado 4 Ø 20 mm CA 50, como armadura longitudinal de tração e sendo

$$A_s = \frac{\pi d_{s1}^2}{4}; d_{s1} = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}; A_s = 12,57 \text{ cm}^2$$

Sendo usado 2 Ø 6.3 mm CA 50, como armadura do porta estribo e sabendo que:

$$A_{Sp} = 2 \left( \frac{\pi d_{Sp}^2}{4} \right); d_{Sp} = 0,63 \text{ cm, logo } A_{Sp} = 0,624 \text{ cm}^2$$

Foi usado estribo Ø 5 mm CA 60 através de 2 ramos com  $\alpha = 90^\circ$ , sendo  $\alpha$  o ângulo entre o ramo e o eixo longitudinal da viga.

$$d_{S\Theta} = 5,0 \text{ mm} = 0,5 \text{ cm}; A_{S\Theta} = 2 \left( \frac{\pi d_{S\Theta}^2}{4} \right); A_{S\Theta} = 0,393 \text{ cm}^2$$

### **FIBRA DE CARBONO**

$f_f = 3500 \text{ MPa}$  (resistência última de tração);

$t_f = 0,165 \text{ mm}$  (espessura da fibra);

$\omega_f = 15 \text{ cm}$  (largura da fibra);

$E_f = 22800 \text{ KN/cm}^2$

### **GEOMETRIA DA SEÇÃO DA VIGA:**

$b_\omega = 20 \text{ cm}$ ;

$h = 60 \text{ cm}$  (altura da viga);

$h_f = 10 \text{ cm}$  (altura da laje);

$d = 54,5 \text{ cm}$  (a distância do centro de geometria da armadura de tração até a face mais comprimida)

$d' = 4,815 \text{ cm}$  (a distância do centro de gravidade da armadura de compressão até a face mais comprimida)

#### **4.4.1.2 Esforços cortantes relevantes**

$V_{Sk} = 139 \text{ KN}$ , usando uma majoração deste esforço cortante através da equação:

$V_{Sd} = 1,4 (V_{Sk})$ , então:  $V_{Sd} = 194,6 \text{ KN}$ . Onde,  $V_{Sd}$  representa a força cortante solicitante de cálculo na seção.

#### **4.4.2 Utilização do “Modelo de cálculo I”**

Este modelo admite diagramas de diagonais de compressão inclinadas de  $\Theta = 45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, através do item 17.4.2.2 da ABNT NBR 6118: 2014

#### 4.4.2.1 Verificação da compressão do concreto

$V_{Rd2} = 0,27 \cdot (\alpha V_2) \cdot f_{cd} \cdot b_{\omega} \cdot d$ ; sendo  $V_{Rd2}$  – força cortante resistente de cálculo relativo a ruína das diagonais comprimidas de concreto. Onde,  $\alpha V_2 = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$ ;  $f_{ck}$  (MPa);

$f_{ck} = 30$  MPa; então  $\alpha V_2 = 0,88$ . Sabendo que  $f_{cd} = 2,14$  KN/cm<sup>2</sup>;  $b_{\omega} = 20$  cm;  $d = 54,5$  cm;

Obtendo:  $V_{Rd2} = 554,23$ KN.

Observa-se que  $V_{Rd2} > V_{sd}$ , sendo assim não existirá problema de compressão nas bielas do concreto, OK!

#### 4.4.2.2 Cálculo da armadura transversal

Para o cálculo da armadura transversal poderemos utilizar a seguinte equação:

$$f_{ctd} = 0,21 \frac{f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c}; \quad f_{ck} = 30 \text{ MPa}; \quad \gamma_c = 1,4, \text{ então:}$$

$f_{ctd} = 1,45$  MPa =  $0,145$  KN/cm<sup>2</sup>, onde  $f_{ctd}$  representa a resistência de cálculo do concreto à tração.

Sendo  $V_c = V_{co}$ ; e sabendo que  $V_c$  corresponde a parcela de força cortante resistido por mecanismos complementares ao modelo de treliça.

$V_{cd}$  = valor de referência para  $V_c$ , quando  $\Theta = 45^\circ$ , mas,  $V_{co} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_{\omega} \cdot d$ ; onde:

$$f_{ctd} = 0,145 \text{ KN/cm}^2; \quad b_{\omega} = 20 \text{ cm}; \quad d = 54,5 \text{ cm}; \quad \text{então, } V_{co} = 94,83 \text{ KN.}$$

$V_{Rd3} = V_c + V_{s\omega} \text{ (Nec.)} \geq V_{sd}$  e considerando que:  $V_{Rd3} = V_{sd}$ , chegaremos na seguinte equação:

$$V_{s\omega} \text{ (Nec.)} = V_{sd} - V_c$$

$$V_{sd} = 194,6 \text{ KN}; \quad V_c = 94,87 \text{ KN}; \quad V_{s\omega} \text{ (Nec.)} = 99,77 \text{ KN}$$

$$\text{Logo, } V_{s\omega} \text{ (Nec.)} = \left( \frac{A_{s\theta}}{S_c} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{y\omega d} \cdot [\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha],$$

$$V_{s\omega} \text{ (Nec.)} = 99,77 \text{ KN}; \quad A_{s\theta} = 0,393 \text{ cm}^2; \quad d = 54,5 \text{ cm}; \quad f_{y\omega d} = 43,5 \text{ KN/cm}^2; \quad \alpha = 90^\circ.$$

Logo,  $S_c = 8,4$  cm, de acordo com o resultado obtido, visto que  $S < 15$  cm (valor utilizado na viga), o que indica a necessidade de reforço na estrutura.

$f_{ctd}$  – Resistência de cálculo do concreto a tração;

$f_{y\omega d}$  – Tensão da armadura transversal limitada a 435MPa;

$V_c$  – Parcela de força cortante resistida por mecanismo complementares ao modelo de treliça.

$VRd3$  – Força cortante resistente de cálculo relativo à ruína por tração diagonal.

$V_{sd}$  – Esforço cortante de cálculo solicitante;

$V_{s\omega}$  (Nec.) – Cortante resistida pela armadura transversal.

#### 4.4.3 Cálculo do reforço com a utilização do FRP

$$V_{s\omega (efe)} = \left(\frac{A_{s\theta}}{L}\right) \cdot 0,9d \cdot f_{y\omega d} \cdot [\sin(90^\circ) + \cos(90^\circ)],$$

$$A_{s\theta} = 0,393 \text{ cm}^2; \quad d = 54,5 \text{ cm}; \quad f_{y\omega d} = 43,5 \text{ KN/cm}^2; \quad L = 15 \text{ cm}.$$

$V_{s\omega (efe)} = 55,9 \text{ KN}$ , cortante resistido pela armadura de cisalhamento. Em seguida será realizado o cálculo da cortante resistido pela fibra de carbono.

$$V_f = V_{s\omega (nec.)} - V_{s\omega (efe.)}$$

$$V_{s\omega (nec.)} = 99,77 \text{ KN}$$

$$V_{s\omega (efe.)} = 55,9 \text{ KN}$$

Logo,

$$V_f = 43,87 \text{ KN}$$

Sendo  $V_f$  o cortante resistivo devido ao uso da fibra de carbono, é necessário verificar se o valor calculado do  $V_f$  satisfaz a condição abaixo:

$$V_f \leq 0,332 \sqrt{f_{cd}} \cdot b_{\omega} \cdot d;$$

$$f_{cd} = 21,43 \text{ MPa}; \quad b_{\omega} = 200 \text{ mm}; \quad d = 545 \text{ mm}.$$

$V_f < 167,52 \text{ KN}$ , visto que  $V_f = 43,87 \text{ KN}$  é menor que  $167,52 \text{ KN}$ , a condição foi satisfeita.

Fazendo uso do  $n = 1$  camada, com geometria em forma de U, podemos calcular a área efetiva da fibra,  $A_{fe} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot \omega_f$ ,  $n$  – Número de camadas da fibra;  $t_f$  – Espessura da fibra;  $\omega_f$  – Largura da fibra.

$$\text{Sendo, } n = 1 \text{ camada; } t_f = 0,0165 \text{ cm; } \omega_f = 15 \text{ cm}.$$

$$\text{Logo, } A_{fe} = 0,495 \text{ cm}^2.$$

#### 4.4.3.1 Comprimentos e fatores relevantes do reforço

Analisando a profundidade da lâmina de fibra de carbono para reforço ao cisalhamento, obtemos a equação abaixo.

$$d_f = d - h_f$$

Inserindo os seguintes resultados obtidos anteriormente:  $h_f = 10$  cm (altura da laje);  $d = 54,5$  cm, logo:

$$d_f = 44,5 \text{ cm}$$

Fator de multiplicação do comprimento efetivo de aderência estabelecida em função da resistência do concreto, isto é:

$$K_1 = \left(\frac{f_{cd}}{27}\right)^{2/3}$$

$$f_{cd} = 21,43 \text{ MPa}; K_1 = 0,857$$

Comprimento efetivo de colagem de uma lâmina de fibra de carbono, expressa pela equação:

$$L_o = \frac{2500}{(t_f E_f)^{0,58}}; t_f = 0,0165 \text{ cm}; E_f = 2.280.000 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$L_o = 5,55 \text{ cm}$$

Comprimento efetivo de aderência da lâmina de fibra de carbono.

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} L_o, n = 1 \text{ camada}; L_o = 5,55 \text{ cm.}$$

Inserindo os resultados obtidos na equação temos que:

$$L_e = 5,55 \text{ cm}$$

Comprimento efetivamente aderido da lâmina de fibra de carbono correspondente a altura útil da viga.

$$d_{fe} = d_f - L_e$$

$$d_{fe} = 38,95 \text{ cm}$$

Sendo assim, calcula-se o coeficiente de eficiência do aproveitamento da fibra na altura útil da viga.

$$K_2 = \frac{d_{fe}}{d_f}; d_{fe} = 38,95 \text{ cm}; d_f = 44,5 \text{ cm}$$

$$K_2 = 0,875$$

#### 4.4.3.2 Informação importante sobre a deformação última da fibra de carbono

Pelo (ACI committee 440 – 10.4), é utilizado a deformação última da fibra de carbono  $\epsilon_{f\mu} = 0,017$ . Pode-se determinar o fator de redução última da fibra na ruptura (R), que determina o nível de tensão da fibra na ruptura, através da equação:

$$R = \frac{K_1 K_2 L_e}{11900 \epsilon_{f\mu}}$$

$L_e = 55,5$  mm;  $K_1 = 0,857$ ;  $K_2 = 0,875$ ;  $R = 0,206$  e sabendo que  $R \leq \frac{0,005}{\epsilon_{f\mu}}$ , teremos que,  $0,206 \leq \frac{0,005}{0,017}$ ;  $0,206 \leq 0,294$ , sendo assim satisfaz a desigualdade. Ok!

A tensão limite de ruptura da fibra de carbono será calculada pela equação:

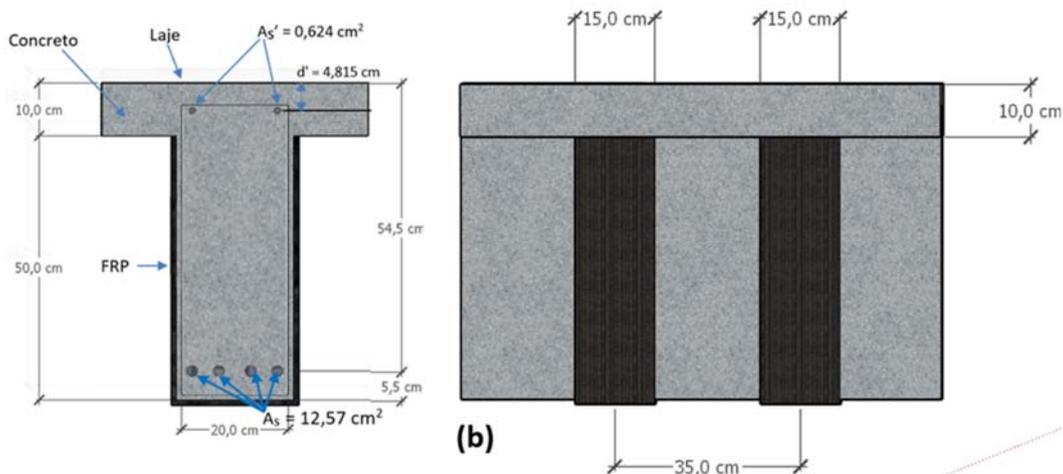
$$f_f = R \cdot f_{f\mu}$$

Sabendo que  $f_{f\mu} = 350$  KN/cm<sup>2</sup> e  $R = 0,206$ , teremos que  $f_f = 72,1$  KN/cm<sup>2</sup>

Após o cálculo da tensão limite da ruptura da fibra de carbono, poderemos obter o espaçamento entre as fibras verticais coladas nas faces laterais da viga, que tem como forma geométrica uma seção U, como mostra a Figura 4.38. Onde  $\beta$  é o ângulo formado entre a fibra e o eixo longitudinal da viga.

$S_f = \frac{A_{fe} \cdot f_f \cdot [\text{sen}\beta + \text{cos}\beta] \cdot d_f}{V_f}$ , onde  $A_{fe} = 0,495$  cm<sup>2</sup>;  $f_f = 72,1$  KN/cm<sup>2</sup>;  $\beta = 90^\circ$ ; ;  $d_f = 44,5$  cm; e  $V_f = 43,87$ KN, logo,  $S_f = 36,2$  cm, sendo assim utilizaremos o valor do espaçamento entre as fibras,  $S_f = 35$  cm.

Figura 4.38 - Vista frontal (a) e Lateral da viga (b)



Fonte: (AUTOR, 2020).

Conclusão final, o citado reforço será executado com lâminas de fibras de carbono com largura de 15 cm espaçadas de 35 cm entre os eixos das fibras.

## CAPÍTULO V

### 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No item 4.1 Santos (2006), mostrou um Quadro 4.1 referente as vigas ensaiadas na parte experimental, referente ao encamisamento parcial para combater à flexão.

Analisando o Quadro 4.1, podemos fazer uma comparação da carga de ruptura obtida experimental da viga VR1 com a viga REF1, ocasionando um ganho de 44 % com aumento substancial à flexão com uso do encamisamento parcial.

Analisando o Quadro 4.1, podemos fazer uma comparação da carga de ruptura encontrada experimental da viga VR2 com a viga RF1, ocasionando um ganho expressivo de 81,4 %, com uso do encamisamento parcial.

Os resultados experimentais encontrados por Santos (2006), tem bastante sentido, devido a armadura de tração utilizada na viga VR2 do encamisamento possuir maior valor do que a armadura de tração utilizada na viga VR1 do encamisamento.

Analisando o Quadro 4.1, podemos fazer uma comparação da carga de ruptura experimental da viga VR2 com a carga de ruptura experimental da viga referencial REF2, que corresponderá a 7,1 % de ganho para o aumento à flexão, devido ao encamisamento da viga VR2. Apesar da área da armadura de tração da viga REF2 ter sido  $A_t(REF2) = 12,31 \text{ cm}^2$  e a armadura de tração da viga VR2 ser  $A_t(VR2) = 12,05 \text{ cm}^2$ , observem que as áreas das armaduras de tração são bem próximas uma da outra, poderíamos pensar que as cargas de ruptura atingissem valores muito próximos, mas existe um pequeno detalhe referente a rigidez da viga VR2 com relação a constante de rigidez (EI) da viga reforçada, que é maior que o da viga REF2. O aumento da rigidez de VR2 produzirá um ganho a resistência à flexão.

No item 4.2 Júnior (1977), elaborou um programa experimental de vigas de concreto armado reforçadas por chapas finas de aço coladas nas faces laterais da viga com resina a base de epóxi. Obteve diversos resultados relevantes ao combate ao cisalhamento.

Vamos analisar através da Figura 4.15, que relaciona as cargas aplicadas com as tensões de cisalhamento, medidas através dos extensômetros colocados nos estribos.

Iremos utilizar as vigas VS1 (sem chapas) e VC1 (com chapas), perceberemos que para uma dada carga aplicada, encontraremos menores valores de tensões de cisalhamentos para a viga VC1 e maiores valores para a viga VS1, isto mostra que a chapa de aço fina absorveu as tensões de cisalhamento a partir da carga 50KN, quando se iniciou as primeiras fissuras de cisalhamento.

Vamos analisar através da Figura 4.16, que relaciona as cargas aplicadas com as tensões de tração e compressão na viga VC1. Para uma dada carga aplicada, perceberemos valores menores de tensão de compressão e valores maiores de tensão de tração. Sabendo que na flexão surgem tensões de tração e compressão e ciente que o concreto trabalha a compressão, ocorrerá uma transferência de tensões de tração e compressão nas chapas.

Vamos analisar através da Figura 4.18, que relaciona as cargas aplicadas com as flechas, para as vigas VS1 e VC1. Perceberemos que para diversas cargas aplicadas, que as flechas são menores para as vigas com chapas VC1 do que as vigas sem chapas (VS1), isto mostra que a rigidez do elemento estrutural aumentou, quando se colocou chapas na viga. Sabendo que a equação da linha elástica de deformação é uma função polinomial dividida pela constante de rigidez, quando a constante de rigidez aumenta a deformação diminui, logo a flecha também irá diminuir.

No item 4.3 foi realizado um dimensionamento com uso da fibra de carbono, para aumento da resistência à flexão de uma viga de concreto armado. Inicialmente foi definido algumas características da fibra de carbono a ser utilizada, como espessura, números de camadas a ser utilizada e largura da fibra de carbono. Sendo utilizado o método iterativo, é necessário partir com uma profundidade arbitrada da linha neutra que foi chamado de  $c$  (arbitrado) =  $0,18 d$ ,  $d = 94,5\text{cm}$ , então  $c$  (arbitrado) =  $17,01\text{cm}$  e posteriormente calcular o valor do  $c$  (calculado) através de uma fórmula que envolve as deformações e tensões dos elementos da viga e outras características da viga. Após todos os cálculos necessário, se determina o  $c$  (calculado). Caso os valores de  $c$  (arbitrado) convirja para o  $c$  (calculado), o método foi concluído.

No item 4.4 foi realizado outro dimensionamento com uso da fibra de carbono, para o aumento da resistência ao cisalhamento. Foi definido algumas características da fibra de carbono necessária e outros dados relevantes da viga a ser reforçada para o efetuar

o dimensionamento. No final obteve-se o espaço necessário entre os eixos da fibra a ser utilizada, conforme no corpo da dissertação.

## CAPÍTULO VI

### 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ciente que as vigas VS1, VS2, VS3 e VS4 foram inicialmente pré fissuradas para as cargas até 50 KN, onde iniciou as primeiras fissuras de cisalhamento na estrutura da viga. Após a colocação das chapas finas de aço, observou-se que a rigidez de cada viga foi restabelecida.

Foi observado através da Figura 4.15, relativo as vigas VS1 e VC1, absorção por parte das chapas das tensões de cisalhamento medidos nos estribos através dos extensômetros colocados nos estribos.

Percebeu-se redução da flecha para diversas cargas nas vigas com chapa fina de aço, mostrando que a colagem das chapas de aço fina aumentou a resistência do elemento estrutural.

Na Figura 4,18, que relaciona as cargas aplicadas com a flecha, para as vigas VS1 e VC1, para várias cargas aplicadas, se observa que as flechas são menores para as vigas com chapas (VC1) do que as vigas sem chapas (VS1), isto mostra que a rigidez do elemento estrutural aumentou quando se colocou as chapas na viga.

A relevância do uso das chapas de aço de forma a absorver as tensões de tração e compressão, oriundos da flexão da viga.

Recomendações,

Estabelecer o limite das espessuras das chapas fina de aço que devem ser usadas para resistência ao cisalhamento.

Definir metas de dimensionamento a flexão de viga de concreto armado, com uso de chapas de aço parafusadas (parabolt).

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Tatiana Gesteira Martins de. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2001

BEBER, Andriei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósito de fibra de carbono**. Faculdade de Engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CANAVAL, Júnior Henrique. **Estudo experimental do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão por meio de graute**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

CARNEIRO, Luiz Antônio Vieira. **Reforço de vigas e pilares de concreto armado com materiais de resina e fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

FERRARI, Vladimir José; PADARATZ, Ivo José; LORIGGIO, Daniel Domingos. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismo e sistemas de ancoragem**. In: XXX Jornadas Sul – Americanas de Engenharia Estrutural, 2002, Brasília.

FORTES, Adriano Silva. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

GRANATO, José Eduardo. **Patologia das Construções**. [S.I.: s.n.]:2002:  
Disponível em:  
<<http://irapuama.dominiotemporario.com/doc/Patologiadasconstrucoes2002.pdf>>  
Acesso em: 07out2019.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Manual para o reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

JÚNIOR, Luis Otávio de Melo. **Comportamento ao cisalhamento de vigas em concreto armado reforçadas com chapas de aço coladas lateralmente**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, 1997.

MACHADO, Ari de Paula. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 1ª Ed., São Paulo, 2002.

PIANCASTELLI, Elvio Mosci. **Patologia e terapia das estruturas** – Reforço com concreto. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

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**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

ROMERO, Diana Valeria Schwenk. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de proteção externa**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SANCHÉS FILHO, Emil. **Reforço e terapêutica das estruturas de concreto**. In: Seminário Reforço e Recuperação de Estruturas. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de fora, 1998.

SANTOS, Euler Wagner Freitas. **Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SIMÕES, Maria Luisa de Farias. **Reforço de vigas de concreto armado por encamisamento parcial**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. São Paulo: Pini, 1998.

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de Concreto**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. V.1.

TIMERMAN, Julio. **Reabilitação e reforço de estrutura de concreto**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. V.2.