

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**REFORÇO ESTRUTURAL À FORÇA CORTANTE EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE COLAGEM
EXTERNA DE MANTAS FLEXÍVEIS DE FIBRAS DE CARBONO
(PRFC)**

Lizette Elena Mazzocato Galvez

Campinas

2003

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

200403000

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**REFORÇO ESTRUTURAL À FORÇA CORTANTE EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE COLAGEM
EXTERNA DE MANTAS FLEXÍVEIS DE FIBRAS DE CARBONO
(PRFC)**

Lizette Elena Mazzocato Galvez

Orientador: Armando Lopes Moreno Junior

Dissertação de Mestrado apresentada à
Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade Estadual de
Campinas, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil, na área de concentração em Estruturas.

Campinas, SP

2003

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

JNIDADE BC
1ª CHAMADA UNICAMP
G139r
EX
OMBO BC/ 57055
ROC 16/11/04
D x
IEÇO 11,00
ITA 01/03/04
CPD

CM00195049-3

IB ID 310999

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

G139r

Galvez, Lizette Elena Mazzocato

Reforço estrutural à força cortante em vigas de concreto armado por meio de colagem externa de mantas flexíveis de fibras de carbono (PRFC) / Lizette Elena Mazzocato Galvez.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Armando Lopes Moreno Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Cisalhamento. 2. Reforço civil. 3. Fibras. 4. Carbono. 5. Concreto. I. Moreno Júnior, Armando Lopes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

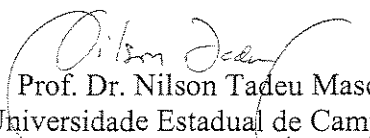
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

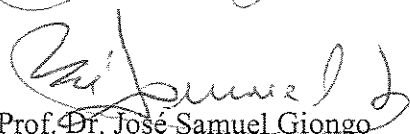
**REFORÇO ESTRUTURAL À FORÇA CORTANTE EM VIGAS
DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE COLAGEM
EXTERNA DE MANTAS FLEXÍVEIS DE FIBRAS DE CARBONO
(PRFC)**

Lizette Elena Mazzocato Galvez

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

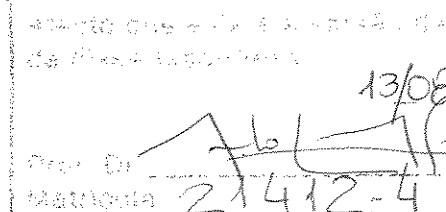

Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Júnior
Presidente e Orientador


Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
Universidade Estadual de Campinas


Prof. Dr. José Samuel Giongo
USP/ Escola de Engenharia de São Carlos

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Campinas, 28 de fevereiro de 2003.


13/08
21412-4

AGRADECIMENTOS

A REAX Indústria e Comércio, atual FOSROC REAX, pelo fornecimento da fibra de carbono e resinas utilizadas na pesquisa, e, pelo apoio técnico, fundamental na realização deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, em especial ao Luciano.

Ao orientador Armando Lopes Moreno Júnior pelo apoio, compreensão e orientação durante todos os anos.

Aos meus pais e irmãos pelo carinho e compreensão nos momentos difíceis.

Aos amigos Dani e Dudu por sempre me apoiarem e incentivarem a continuar estudando, principalmente nos momentos difíceis.

Ao Marquinhos pelo ajuda indispensável e incentivo nos momentos finais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE FOTOS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 OBJETIVOS.....	03
1.2 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	03
2 MÉTODOS DE REFORÇO	05
2.1 REFORÇO COM CHAPA DE AÇO COLADA E PARAFUSADA.....	05
2.2 REFORÇO COM ACRÉSCIMO DE ARMADURA TRANSVERSAL E CONCRETO.....	07
2.3 REFORÇO POR MEIO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA (PRF)....	08
2.3.1 Propriedades físicas.....	09
2.3.1.1 Densidade.....	09
2.3.1.2 Coeficiente de expansão térmica.....	10
2.3.1.3 Efeito da alta temperatura.....	10
2.3.2 Propriedades mecânicas.....	11
2.3.2.1 Comportamento à tração.....	11
2.3.2.2 Comportamento à compressão.....	12

2.3.3	Durabilidade.....	12
2.3.4	Aplicações no reforço em estruturas de concreto.....	12
2.4	POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO (PRFC).....	14
2.4.1	Fibra de carbono.....	14
2.4.2	Resinas.....	15
2.4.3	Folhas flexíveis unidirecionais.....	16
3	REFORÇO À FORÇA CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE PRFC.....	17
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1.1	Al Sulaimani, G. J.; Sharif, A.; Basunbul, I. A.; Baluch, M. H.; Ghaleb, B. N.....	17
3.1.2	Miyauchi, K.; Inoue, S.; Nishibayashi, S.; Tanaka, Y.....	21
3.1.3	Norris, T.; Saadatmanesh, H.; Ehsani, M. R.....	24
3.1.4	Outros pesquisadores.....	25
3.2	DIMENSIONAMENTO SEGUNDO CHAALLAL ET AL.	27
3.2.1	Ruína da fibra.....	28
3.2.2	Ruína por descolamento da fibra.....	30
3.3	DIMENSIONAMENTO SEGUNDO ACI-440R-2000.....	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	36
4.2	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	42
4.2.1	Concreto.....	42
4.2.1.1	Cimento.....	43
4.2.1.2	Sílica Ativa.....	44
4.2.1.3	Agregados.....	44
4.2.1.4	Aditivos.....	44
4.2.2	Armaduras.....	44
4.2.3	Manta de fibra de carbono utilizada no compósito de PRFC.....	46
4.2.4	Resina Epóxi.....	46
4.2.5	Massa Epóxi.....	47
4.2.6	Resina de impregnação.....	48
4.3	METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DA MANTA DE PRFC.....	49

4.4	INSTRUMENTAÇÃO.....	53
4.4.1	Deformação na armadura.....	53
4.4.2	Deformação no concreto.....	54
4.4.3	Deslocamentos verticais.....	55
4.4.4	Deformação na fibra.....	56
4.5	ENSAIO DE ARRANCAMENTO.....	58
4.6	RESULTADOS ESPERADOS PARA AS VIGAS REFORÇADAS.....	64
4.6.1	Dimensionamento segundo Chaallal et al.	65
4.6.1.1	Resistência ao descolamento para as vigas V1G1, V2G1 e V1G2.....	66
4.6.1.2	Resistência ao de descolamento para as vigas V2G2 e V3G2.....	66
4.6.1.3	V_R para a viga V1G1.....	67
4.6.1.4	V_R para a viga V2G1.....	68
4.6.1.5	V_R para a viga V1G2.....	69
4.6.1.6	V_R para as vigas V2G2 e V3G2.....	69
4.6.2	Dimensionamento segundo ACI-440R-00.....	70
4.6.2.1	Cálculo da deformação efetiva para as vigas do Grupo 1.....	71
4.6.2.2	Cálculo da deformação efetiva para as vigas do Grupo 2.....	71
4.6.2.3	V_R para a viga V1G1.....	72
4.6.2.4	V_R para a viga V2G1.....	72
4.6.2.5	V_R para a viga V1G2.....	72
4.6.2.6	V_R para as vigas V2G2 e V3G2.....	73
4.6.3	Resultados esperados.....	74
5	RESULTADO EXPERIMENTAIS.....	76
5.1	COMPORTAMENTO DAS VIGAS DURANTE O ENSAIO.....	77
5.2	DEFORMAÇÕES NO CONCRETO DAS VIGAS DOS GRUPOS 1 E 2.....	87
5.3	DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS.....	91
5.4	DEFORMAÇÕES NAS FIBRAS.....	99
5.5	DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL.....	104
5.6	DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	112
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	116
7	CONCLUSÕES.....	136

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138
ANEXO - Resultados experimentais.....	141

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 - Reforço em vigas de concreto com chapa de aço.....	06
2.2 - Reforço em vigas de concreto com acréscimo de armadura transversal.....	08
2.3 - Comparação da curva tensão-deformação das fibras e do aço.....	11
2.4 - Métodos de reforço com PRF.....	13
3.1 - Reforço em tiras.....	19
3.2 - Forças internas da armadura transversal e externas das fibras de PRFC.....	28
3.3 - Tensão de descolamento no reforço em tiras de PRFC.....	31
3.4 - Tensão de descolamento no compósito de PRFC ao longo da superfície lateral da viga.....	33
3.5 - Detalhe de reforço com PRF.....	34
4.1 - Arranjo do Reforço com PRFC na viga V1G1.....	37
4.2 - Arranjo do Reforço com PRFC na viga V2G1.....	38
4.3 - Arranjo do Reforço com PRFC na viga V1G2.....	39
4.4 - Arranjo do Reforço com PRFC na viga V2G2.....	39
4.5 - Arranjo do Reforço com PRFC na viga V3G2.....	39
4.6 - Esquema de carregamento para as vigas do Grupo 1.....	40
4.7 - Esquema de carregamento para as vigas do Grupo 2.....	40
4.8 - Armadura das vigas do Grupo 1.....	45
4.9 - Armadura das vigas do Grupo 2.....	45
4.10 - Posição dos extensômetros na viga VTG1.....	53

4.11 - Posição dos extensômetros na viga V1G1 e na V2G1.....	54
4.12 - Posição dos extensômetros nas vigas VTG2, V1G2, V2G2 e V3G2.....	54
4.13 - Posição do defletômetro em todas as vigas.....	55
4.14 - Posição dos extensômetros no compósito de PRFC da viga V2G1.....	57
4.15 - Posição dos extensômetros no compósito de PRFC da viga V1G2.....	58
4.16 - Posição dos extensômetros no compósito de PRFC das vigas V2G2 e V3G2.....	58
5.1 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V1G1.....	83
5.2 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V2G1.....	84
5.3 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V2G2.....	85
5.4 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V3G2.....	86
5.5 - Deformação do concreto da viga VTG1.....	87
5.6 - Deformação do concreto da viga V1G1.....	88
5.7 - Deformação do concreto da viga V2G1.....	88
5.8 - Deformação do concreto da viga VTG2.....	89
5.9 - Deformação do concreto da viga V1G2.....	90
5.10 - Deformação do concreto da viga V2G2.....	90
5.11 - Deformação do concreto da viga V3G2.....	91
5.12 - Deformações nos estribos da viga VTG1.....	92
5.13 - Deformações nos estribos da viga V1G1.....	93
5.14 - Deformações nos estribos da viga V2G1.....	94
5.15 - Deformações nos estribos da viga VTG2.....	95
5.16 - Deformações nos estribos da viga V1G2.....	96
5.17 - Deformações nos estribos da viga V2G2.....	97
5.18 - Deformações nos estribos da viga V3G2.....	98
5.19 - Deformações nas fibras da viga V2G1.....	100
5.20 - Deformações nas fibras da viga V1G2.....	101
5.21 - Deformações nas fibras da viga V2G2.....	102
5.22 - Deformações nas fibras da viga V3G2.....	103
5.23 - Deformações na armadura longitudinal da viga VTG1.....	105
5.24 - Deformações na armadura longitudinal da viga V1G1.....	106

5.25 - Deformações na armadura longitudinal da viga V2G1.....	107
5.26 - Deformações na armadura longitudinal da viga VTG2.....	108
5.27 - Deformações na armadura longitudinal da viga V1G2.....	109
5.28 - Deformações na armadura longitudinal da viga V2G2.....	110
5.29 - Deformações na armadura longitudinal da viga V3G2.....	111
5.30 - Deslocamento vertical da viga VTG1.....	112
5.31 - Deslocamento vertical da viga V1G1.....	112
5.32 - Deslocamento vertical da viga V2G1.....	113
5.33 - Deslocamento vertical da viga VTG2.....	113
5.34 - Deslocamento vertical da viga V1G2.....	114
5.35 - Deslocamento vertical da viga V2G2.....	114
5.36 - Deslocamento vertical da viga V3G2.....	115
6.1 - Deformações nos estribos.....	118
6.2 - Deformações nos estribos.....	118
6.3 - Deformações nas armaduras longitudinais – Grupo 1.....	119
6.4 - Deformações nas armaduras longitudinais – Grupo 2.....	120
6.5 - Deformações no concreto – Grupo 1.....	121
6.6 - Deformações no concreto – Grupo 2.....	122
6.7 - Deslocamentos verticais – Grupo 1.....	123
6.8 - Deslocamentos verticais – Grupo 2.....	124
6.9 - Deformações V2G1 – lado esquerdo.....	125
6.10 - Deformações V2G1 – lado direito.....	126
6.11 - Deformações V1G2 – lado esquerdo.....	127
6.12 - Deformações V1G2 – lado direito.....	128
6.13 - Deformações V2G2 – lado esquerdo.....	129
6.14 - Deformações V2G2 – lado direito.....	130
6.15 - Deformações V3G2 – lado esquerdo.....	131
6.16 - Deformações V3G3 – lado direito.....	132

LISTA DE FOTOS

Foto	Página
4.1 - Detalhe da aplicação do carregamento para as vigas do Grupo 1.....	41
4.2 - Detalhe da aplicação do carregamento para as vigas do Grupo 2.....	41
4.3 - Aplicação da resina epóxi.....	50
4.4 - Aplicação da massa epóxi.....	51
4.5 - Aplicação da resina de impregnação antes da colocação da manta.....	51
4.6 - Aplicação da resina de impregnação sobre a manta.....	52
4.7 - Detalhe do arredondamento das arestas.....	52
4.8 - Detalhe do extensômetro no concreto.....	55
4.9 - Detalhe do defletômetro.....	56
4.10 - Detalhe do extensômetro no compósito de PRFC.....	57
4.11 - Detalhe do recorte da chapa.....	59
4.12 - Detalhe do equipamento.....	60
4.13 - Amostra 1 - Putty + Resina + Fibra.....	61
4.14 - Amostra 2 - Resina + Fibra.....	61
4.15 - Amostra 3 - Primer + Putty + Resina + Fibra.....	62
4.16 - Amostra 4 - Primer + Resina + Fibra.....	62
4.17 - Detalhe do equipamento durante o ensaio.....	63
5.1 - Detalhe da ruína da viga VTG1.....	78
5.2 - Detalhe da ruína da viga VTG2.....	78
5.3 - Detalhe da ruína da viga V1G1.....	79

5.4 - Detalhe da ruína da viga V2G1.....	79
5.5 - Detalhe da ruína da viga V1G2.....	80
5.6 - Detalhe da ruína da viga V2G2.....	80
5.7 - Detalhe do descolamento do compósito de PRFC na viga V2G2.....	81
5.8 - Detalhe da ruína da viga V3G2.....	81
5.9 - Detalhe da ruptura do concreto na viga V3G2.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 - Densidades do aço e das fibras.....	10
2.2 - Coeficientes de expansão térmica com volume ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).....	10
2.3 - Comparação das propriedades entre as fibras.....	13
4.1 - Propriedades do concreto.....	43
4.2 - Propriedades do aço.....	45
4.3 - Propriedades da manta de PRFC.....	46
4.4 - Propriedades da resina de tamponamento.....	47
4.5 - Características da massa epóxi.....	48
4.6 - Propriedades da Resina de impregnação.....	49
4.7 - Valores médios da resistência ao descolamento.....	64
4.8 - Resultados teóricos segundo Chaallal et al.	74
4.9 - Resultados teóricos segundo ACI-440R-00.....	75
5.1 - Resultados dos ensaios das vigas.....	77
6.1 - Comparação entre o resultado teórico, segundo Chaallal et al., e o experimental.....	116
6.2 - Comparação entre o resultado teórico, segundo ACI-440R-00, e o experimental.....	117
6.3 - Acréscimo na força cortante última para cada viga.....	117

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

Símbolo	Descrição
A_{SW}	área de aço da seção transversal de um estribo
A_{PRFC}	área da seção transversal de PRFC
b_{PRFC}	largura da folha ou tira de PRFC
b_a	largura onde foi aplicada a resina
b_w	largura da seção da viga
d	Altura útil da seção da viga
E_c	módulo de deformação do concreto
E_s	módulo de deformação do aço
E_{PRFC}	módulo de deformação da fibra de carbono
E_a	módulo de Young da resina
f_{cd}	valor de cálculo da tensão de compressão no concreto
f_{yd}	tensão de escoamento da armadura transversal
f_{uPRFC}	tensão de tração última da fibra de carbono
h_{PRFC}	altura da folha ou tira de PRFC
I_{PRFC}	momento de inércia da folha de fibra de carbono
k_1	constante
k_n	rigidez normal da resina
n	número de barras que cortam as fissuras inclinadas
R_C	força resultante de compressão no concreto
R_S	força resultante de tração no aço da armadura longitudinal

R_{PRFC}	força de tração na fibra de PRFC
R_{SW}	força de tração na armadura transversal
s	espaçamento entre os estribos, ou tiras de PRFC
t_{PRFC}	espessura do compósito de PRFC
t_a	espessura de aplicação da resina
V_C	parcela do esforço cortante total atuante, atribuída ao concreto
V_d	valor de cálculo do esforço cortante
V_R	esforço cortante atuante na viga reforçada
V_S	componente vertical das forças na armadura transversal, numa inclinação qualquer α
V_{PRFC}	componente vertical das forças na fibra de PRFC, numa inclinação qualquer α
z	distância entre a resultante de tração da armadura longitudinal e a resultante de compressão do concreto

Letras Gregas

Símbolo	Descrição
α	ângulo de inclinação da armadura transversal e da fibra de PRFC
θ	ângulo de inclinação das fissuras de cisalhamento
ε_{PRFC}	deformação última da fibra
ε_{fe}	deformação efetiva da fibra
σ_{SW}	tensão atuante na armadura transversal (estribos)
σ_{PRFC}	tensão atuante de tração na fibra de carbono
$\tau_{méd}$	tensão média de cisalhamento de descolagem
$\tau_{méd}^{descol}$	tensão máxima de cisalhamento de descolagem na interface
τ_c	tensão de cisalhamento no concreto
τ_d	tensão τ_{wd} de cálculo
τ_{wd}	tensão de cisalhamento no concreto, valor de cálculo
τ_{wu}	tensão última de cisalhamento

RESUMO

O reforço em estruturas de concreto armado tem sido cada vez mais utilizado na engenharia civil, devido a erros de projeto, falhas na execução, falta de manutenção, etc. Nos últimos anos, o método de reforço utilizando-se mantas flexíveis de fibras de carbono vem sendo utilizado como uma alternativa para o reforço à força cortante.

Este trabalho analisa o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à força cortante por meio de mantas flexíveis unidirecionais de fibra de carbono (PRFC), coladas às laterais da viga. Dois grupos de vigas foram estudados, no grupo 1 três vigas foram executadas com concreto convencional, e no grupo 2 quatro vigas foram executadas com concreto de alta resistência à compressão. As vigas dos grupos 1 e 2 foram reforçadas em arranjos diferentes para incrementar a resistência em relação à força cortante. As vigas do grupo 1 foram reforçadas com PRFC aplicado em folhas posicionadas nos terços do vão próximos aos apoios, com as fibras a 90^0 e a 45^0 em relação ao eixo longitudinal. As vigas do grupo 2 foram reforçadas com PRFC aplicado em folhas nas laterais, ao longo do vão, e em tiras de PRFC enlaçando a viga em "U" ou enlaçando a viga por completo. Os resultados desta pesquisa comprovaram a eficiência do método de reforço ao esforço cortante de vigas em concreto armado utilizando-se PRFC.

Palavras-chave: cisalhamento, fibras de carbono, reforço, reparo.

ABSTRACT

The reinforcement of concrete structures has been used in civil engineering due to problems such as errors in design or construction, no maintenance, etc. In the last years, the reinforcement method with carbon fiber sheets has been used for alternative of shear reinforcement.

This paper studies the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic (CFRP). Two groups of beams were studied, in group 1 three beams were executed with conventional concrete, and in the group 2 four beams were executed with high performance concrete. The beams were strengthened in different configurations to improve in shear strengthening. The first group was strengthened with CFRP by sheets with fibers in 90° and 45° with the longitudinal axis. The beams of group 2, were strengthened with CFRP by sheets glued throughout the span, and strengthened with CFRP strips "U" or strips with the anchors on the top of the beam. The results of this research shown the effectiveness of the method of reinforcement in reinforced concrete beam with CFRP.

Keywords: shear, carbon fiber, reinforcement, repair.

1 INTRODUÇÃO

O setor de recuperação e/ou reparo de estruturas de concreto vem crescendo na construção civil devido a vários fatores, como erros no dimensionamento ou falha na execução de peças em concreto armado e mudanças de uso da estrutura, fazendo-se necessária a execução de reparo ou reforço nas estruturas de concreto armado.

As vigas de concreto armado podem ser reparadas ou reforçadas de maneira que sua resistência à flexão ou à força cortante seja restabelecida no caso de reparos, ou incrementada no caso de reforço.

O reforço ao esforço cortante de vigas em concreto armado pode ser executado por meio de vários métodos, dependendo da disponibilidade e necessidade de cada estrutura, como por exemplo, custo, tempo disponível para submeter a estrutura a um reforço e espaço para a realização do trabalho.

Dentre os métodos de reforço à força cortante, pode-se citar o reforço com a adição de barras de aço e concreto à viga; com chapas de aço coladas e/ou parafusadas à viga; e também com a aplicação de polímeros reforçados com fibras (PRF).

O método de reforço pela adição de barras de aço e concreto, dentre todos os métodos existentes, é o que apresenta menor custo, entretanto, vale ressaltar, é o que apresenta mais desvantagens em relação aos demais, como interferência arquitetônica, provocada por eventual

aumento significativo da seção da viga e maior tempo necessário para que a estrutura reforçada seja colocada em utilização.

O reforço feito com a colagem de chapa de aço à viga pode solucionar problemas como a interferência arquitetônica e o tempo de execução, quando comparado ao método de reforço com adição de barras de aço e concreto, uma vez que as chapas têm pequena espessura e este tipo de reforço tem execução relativamente rápida. No entanto, um grande inconveniente deste método é o problema da corrosão do aço, que pode ocorrer durante a fase de utilização do elemento reforçado.

Já o método de reforço pela adição de polímeros reforçados com fibras (PRF) possui as mesmas vantagens que o método de reforço por adição de chapas de aço sem apresentar o problema da corrosão e ter maior facilidade de se moldar à estrutura, quando utilizada a folha flexível de fibra (manta).

Por estas vantagens, o método de reforço com o uso de polímeros reforçados com fibras (PRF) vem, gradativamente, ocupando o espaço antes destinado às chapas de aço no reforço de elementos estruturais em concreto.

Os produtos de PRF podem alcançar comportamento estrutural semelhante ou até mesmo superior aos produtos metálicos geralmente utilizados no reforço de elementos estruturais em concreto armado, como as barras de aço, cabos de aço protendidos e chapas de aço coladas (ACI 440R-96⁽³⁾).

Geralmente, o polímero reforçado com fibra (PRF), ou simplesmente compósito, é empregado para o reforço de elementos estruturais em concreto, na forma de finas lâminas ou mantas flexíveis (Triantafillou⁽²¹⁾). O método de reforço com mantas flexíveis é o mais adequado na execução de reforço para a grande maioria dos elementos estruturais de concreto armado.

Os produtos de PRF utilizados para o reforço de estruturas são constituídos por fibras contínuas, geralmente de vidro (PRFV), aramida (PRFA) ou de carbono (PRFC), fixadas por uma

matriz polimérica de resina, que protege as fibras e permite o seu trabalho em conjunto, como um único elemento (ACI 440R-96⁽³⁾).

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como principal objetivo estudar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à força cortante utilizando-se um polímero reforçado com fibras de carbono (compósito) e analisar, por meio de ensaios, a metodologia de cálculo proposta para o dimensionamento do reforço à força cortante.

1.2 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em sete capítulos, sendo o capítulo 2 destinado a um breve estudo comparativo entre os sistemas de reforço à força cortante, como a utilização de chapa de aço colada, o reforço com acréscimo de armadura transversal, e o reforço com a utilização do polímero reforçado com fibras. Em seguida, estão descritas as características e comparações entre os compósitos de fibra de vidro (PRFV), fibra de carbono (PRFC) e aramida (PRFA).

No capítulo 3, é feita uma revisão bibliográfica sobre as técnicas de reforço com o polímero reforçado com fibras, com ênfase nos trabalhos de reforço à força cortante. Estão apresentadas, também, as metodologias de cálculo para o dimensionamento do reforço, considerando as prováveis formas de ruptura, que foram utilizadas nesta pesquisa para obtenção dos resultados teóricos esperados.

As características dos materiais, assim como o programa experimental, incluindo a metodologia de aplicação do compósito, estão apresentados no capítulo 4. Também são apresentados os resultados teóricos para cada viga e a demonstração dos cálculos utilizados para a obtenção destes valores.

Os resultados dos experimentos demonstrando o comportamento das vigas durante os ensaios, com a apresentação dos resultados obtidos nas medições (por meio dos extensômetros) das deformações nas armaduras transversais e longitudinais, deformações no concreto e os valores dos deslocamentos verticais, estão apresentados no capítulo 5.

No capítulo 6 são feitas as análises dos resultados de cada viga, apresentados no capítulo 5, e várias comparações entre as vigas ensaiadas, analisando as deformações das armaduras e do concreto, como também os deslocamentos verticais. Os valores obtidos nos ensaios são comparados com os resultados teóricos.

Por fim, no capítulo 7, estão apresentadas as conclusões desta pesquisa, obtidas pela análise dos resultados dos ensaios das vigas reforçadas com PRFC.

2 MÉTODOS DE REFORÇO

Neste capítulo serão apresentados os métodos de reforço à força cortante utilizados em estruturas de concreto armado por meio da adição de chapa de aço colada e parafusada, do acréscimo de armadura transversal, e da colagem externa de polímero reforçado com fibras (PRF). Em seguida, será apresentado um estudo sobre o PRF, suas características, métodos de fabricação etc., com ênfase no compósito de fibra de carbono (PRFC).

2.1 REFORÇO COM DE CHAPA DE AÇO COLADA E PARAFUSADA

O estudo da técnica de reforço utilizando-se chapa de aço colada surgiu na década de 70 e os trabalhos experimentais realizados para reforço à força cortante mostraram um bom desempenho, proporcionando um aumento na capacidade resistente da viga reforçada.

O reforço por meio de chapa de aço colada vem sendo utilizado por se mostrar eficiente, de fácil execução, baixo custo e outras vantagens quando comparado com o método de reforço através da adição de barras de aço e concreto.

A técnica de reforço com chapa de aço pode ser executada de duas maneiras, sendo a primeira por meio de chapas metálicas coladas e/ou parafusadas, e a segunda, pela fixação de perfis metálicos com a utilização de resinas injetadas.

Este tipo de reforço à força cortante em vigas de concreto armado é feito com a colagem de chapas de aço nas laterais da viga, utilizando-se de faixas de grande extensão ou tiras de pequena largura, como mostra a Figura 2.1.

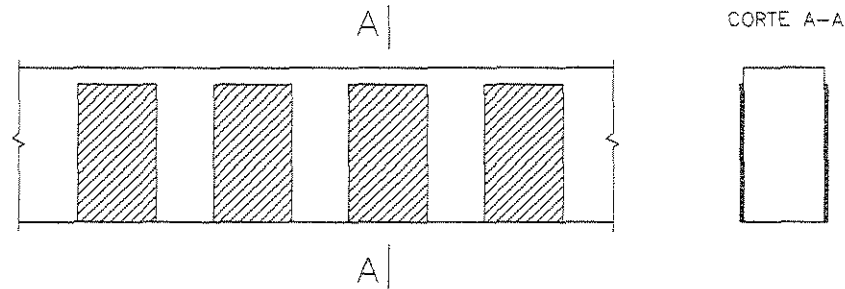


FIGURA 2.1 – Reforço em vigas de concreto com chapa de aço

Após a colagem, é necessário manter a chapa sob pressão por no mínimo 24 horas, para garantir a espessura ideal da resina. Neste caso, podem ser utilizados chumbadores para garantir a manutenção da chapa na posição correta até o endurecimento.

A resina utilizada na aplicação de chapas de aço ao concreto deve ser de alta capacidade de aderência e resistência mecânica (CUSTÓDIO, 1998). As resinas utilizadas neste tipo de reforço são as epoxídicas e os poliésteres.

Apesar desta técnica de reforço ser muito utilizada, existem algumas restrições para o uso da chapa de aço colada, sendo que:

- a) a espessura da camada de cola não exceda a 1,5 mm;
- b) a espessura da chapa não ultrapasse 3 mm; e
- c) o incremento na capacidade resistente da peça reforçada não ultrapasse 50% do valor existente, antes da execução do reforço.

Para a aplicação da chapa de aço, as superfícies do concreto e da chapa devem ser preparadas a fim de garantir a aderência entre elas. Portanto, a superfície do concreto não pode ser muito rugosa para não dificultar a aplicação da resina e para controlar a espessura da camada

de resina. A rugosidade uniforme da superfície de concreto pode ser obtida com jato de areia ou por apicoamento. Após a obtenção de uma superfície rugosa, é feita uma limpeza com jato d'água de alta pressão, e, em seguida, a secagem com jato de ar comprimido.

A chapa de aço também deve receber um tratamento antes de ser colada à peça de concreto. O aço deverá ser desengordurado com acetona, submetido à decapagem a jato abrasivo e protegido para ser transportado até o local do reforço. Para evitar a corrosão da chapa de aço, a superfície metálica que não ficar em contato com a resina deve receber um tratamento de pintura anticorrosiva.

A resina utilizada no reforço não possui resistência ao fogo, sendo a sua utilização limitada a peças sujeitas a temperaturas inferiores a 80°C.

No dimensionamento do reforço à força cortante, o cálculo da chapa de aço necessária é feito utilizando-se o mesmo método que determina a área de aço interna (estribos) necessária para absorver o esforço cortante. A distância entre as chapas deve ser pequena, a fim de evitar a propagação das fissuras de cisalhamento.

2.2 REFORÇO COM ACRÉSCIMO DE ARMADURA TRANSVERSAL E CONCRETO

A técnica de reforço feita com o acréscimo de armadura transversal e concreto é a mais utilizada, pois apresenta baixo custo material e de mão-de-obra, além de ser relativamente fácil a sua execução.

Este método de reforço consiste em acrescentar armadura transversal (estribos) e concreto à estrutura existente, promovendo um aumento da seção na viga de concreto existente, como mostra a Figura 2.2.

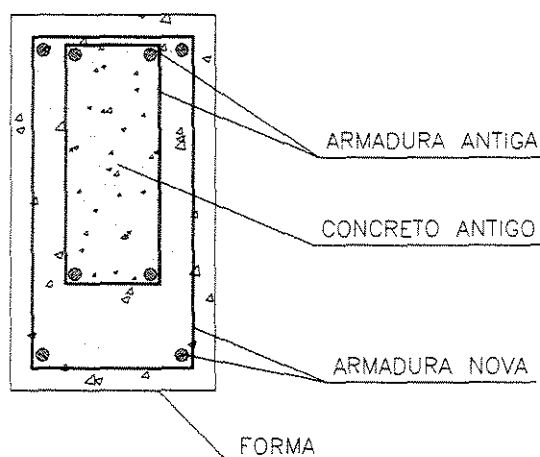


FIGURA 2.2 – Reforço em vigas de concreto com acréscimo de armadura transversal

Para a execução deste método de reforço, é necessário retirar o concreto deteriorado e criar uma superfície rugosa no concreto existente com o auxílio de uma talhadeira. Se a armadura existente apresentar corrosão, deve ser retirada e substituída, e em seguida deve-se posicionar a nova armadura e a fôrma para executar a concretagem.

Apesar de ser muito utilizada, esta técnica de reforço possui alguns inconvenientes, quando comparada à técnica de reforço com adição de chapa de aço, como a necessidade de escoramentos, o tempo de cura do concreto, o aumento significativo da seção da peça reforçada, entre outros.

2.3 REFORÇO POR MEIO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA (PRF)

Os polímeros reforçados com fibras, ou simplesmente compósitos, são à base de resina epóxi, armados com filamentos contínuos e rígidos de fibras de vidro, aramida e carbono.

As fibras do compósito de PRF utilizadas em reforço de estrutura são comercializadas de três formas:

- a) tecidos bidirecionais;
- b) folhas flexíveis unidirecionais; e

c) laminados (pré-impregnados).

Os tecidos bidirecionais apresentam a fibra orientada em duas direções, e as folhas flexíveis unidirecionais, em uma direção. A impregnação da fibra com a resina é feita durante a aplicação do produto na estrutura de concreto a ser reforçada.

O sistema laminado consiste na manta de fibra (folhas flexíveis unidirecionais ou tecidos bidirecionais) que recebe a impregnação da resina antes de ser aplicado na estrutura de concreto a ser reforçada, sendo que para a aplicação do laminado na estrutura é utilizado outro tipo de resina.

O sistema de reforço por manta de fibra possui a vantagem de se moldar à estrutura, quando comparado com o laminado.

As fibras utilizadas no compósito de PRF podem ser:

- a) fibras de vidro (PRFV);
- b) fibras de carbono (PRFC); e
- c) fibras de aramida (PRFA).

2.3.1 Propriedades físicas

2.3.1.1 Densidade

As fibras utilizadas nos compósitos de PRF, quando comparadas à chapa de aço em aplicações de reforço de estruturas, apresentam a característica da leveza, que facilita o transporte do material e torna a aplicação mais simples.

A Tabela 2.1 apresenta os valores comparativos da densidade das fibras e do aço, em g/cm^3 .

TABELA 2.1 – Densidades do aço e das fibras

Aço	PRFV	PRFC	PRFA
7,9	1,25-2,10	1,5-1,6	1,25-1,4

2.3.1.2 Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica varia de acordo com a direção das fibras (unidirecionais e bidirecionais) e de acordo com o sentido (longitudinal e transversal). Depende, também, do tipo e do volume de fibra, e da resina aplicada na impregnação da fibra.

A Tabela 2.2 apresenta os valores dos coeficientes de expansão térmica para os compósitos de PRF na forma de folhas flexíveis unidirecionais. O valor negativo indica que o material retrai com o acréscimo de temperatura e expande com decréscimo de temperatura. Para efeito de comparação entre os materiais, tomando-se como referência o concreto, o valor do coeficiente de expansão térmica é de $10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

TABELA 2.2 – Coeficientes de expansão térmica em $(\times 10^{-6} / ^\circ\text{C})^1$

Direção	PRFV	PRFC	PRFA
Longitudinal	6 a 10	-1 a 0	-6 a -2
Transversal	21 a 23	22 a 23	60 a 80

¹(para fração de volume entre 0,5 a 0,7)

2.3.1.3 Efeito da alta temperatura

O valor da temperatura de transição depende do tipo de resina, mas é normalmente em torno de 200°F a 300°F. No compósito, a fibra apresenta melhores propriedades térmicas que a resina. Dentre as fibras, o valor da temperatura de transição para a fibra de vidro é de 1.800°F, 350°F para a fibra de aramida, e até 3.000°F para a fibra de carbono.

Para o compósito PRF utilizado externamente (colado na superfície de concreto), as propriedades do polímero na interface do concreto e da fibra são essenciais para manter a aderência entre o compósito de PRF e o substrato. Para medidas próximas da temperatura de transição da fibra, as propriedades mecânicas do polímero são reduzidas significativamente e o polímero deixa de ser eficaz para transferir as tensões do concreto para a fibra.

2.3.2 Propriedades mecânicas

2.3.2.1 Comportamento à tração

O compósito de PRF não apresenta comportamento plástico próximo da ruptura. O comportamento é caracterizado por uma tensão-deformação elástica linear até a ruptura. A Figura 2.3 mostra uma comparação da curva tensão-deformação dos materiais: carbono, vidro, aramida, nylon e o aço utilizado na construção civil.

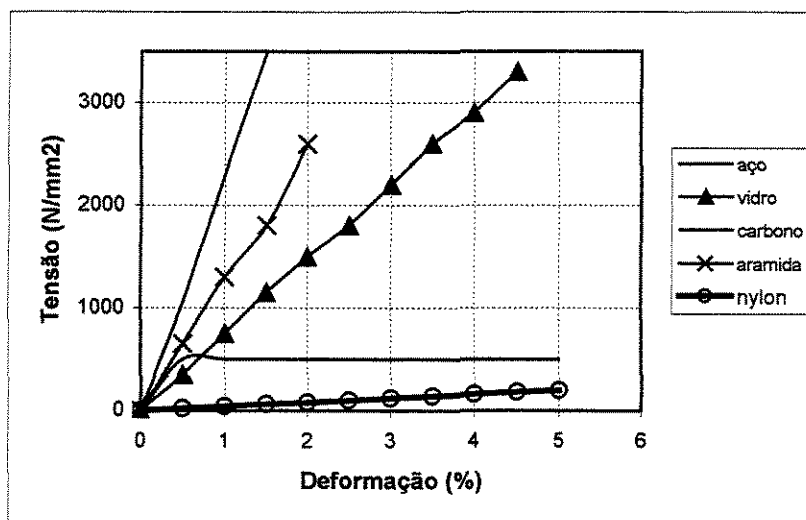


FIGURA 2.3 – Comparação da curva tensão-deformação das fibras e do aço

2.3.2.2 Comportamento à compressão

O valor da resistência à compressão nos compósitos PRF é inferior em relação à resistência à tração. A resistência à compressão é de 55%, 78% e 20% da resistência à tração para o PRFV, PRFC e PRFA, respectivamente. Em geral, a resistência à compressão é maior em materiais com maior resistência à tração, com exceção da aramida, onde a fibra apresenta um comportamento não-linear na compressão para um valor baixo da tensão. O modo de ruptura do compósito depende do tipo e do volume de fibra, e do tipo de resina.

De acordo com os estudos de Malek et al.⁽¹⁵⁾ e Norris et al.⁽¹⁷⁾, o módulo de elasticidade na compressão é, aproximadamente, 80% para PRFV, 85% para PRFC e 100% para PRFA do valor do módulo de elasticidade à tração.

2.3.3 Durabilidade

Os materiais utilizados no compósito de PRF têm suas propriedades mecânicas reduzidas após a exposição a certas condições de temperatura, umidade, e exposição química.

2.3.4 Aplicações no reforço em estruturas de concreto

O reforço à força cortante com PRF pode ser executado em diferentes arranjos, como mostra a Figura 2.4. A Figura 2.4 (a) mostra a folha de fibra aplicada envolvendo toda a peça de concreto; este sistema de reforço é mais comum em pilares. A Figura 2.4 (b) mostra a folha enlaçando a viga em “U”, possibilitando a ancoragem dada pela continuidade da fibra na face inferior da viga. E a Figura 2.4 (c) mostra a folha aplicada somente nas laterais da viga, podendo ser colada na forma de tiras ou com a folha cobrindo toda a lateral. Estes métodos de reforço promovem um aumento da resistência à força cortante em vigas de concreto.

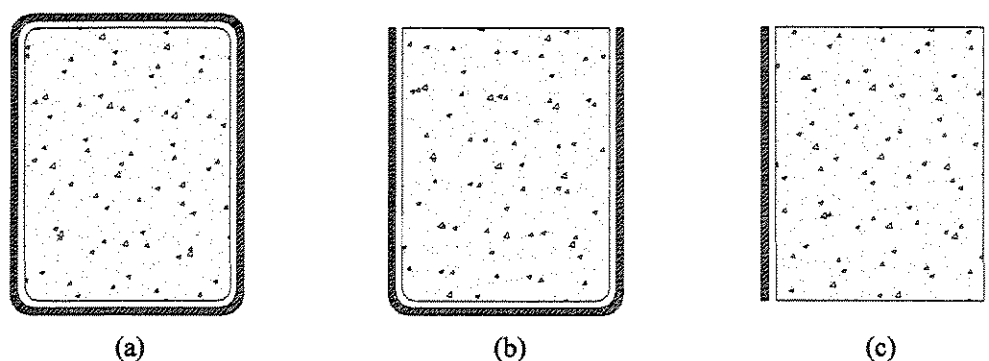


FIGURA 2.4 – Métodos de reforço com PRF

Os principais fatores que afetam a capacidade do reforço com o compósito de PRF são a orientação das fibras, o comprimento, as propriedades mecânicas da resina e a aderência entre o compósito e a superfície de concreto. A Tabela 2.3 apresenta uma comparação entre as propriedades dos compósitos de fibra de carbono, aramida e vidro.

TABELA 2.3 – Comparação das propriedades entre as fibras

Material	Diâmetro (microns)	Módulo de deformação à tração (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
PAN-Carbon T-300	7,0	231,0	3,65	1,4
PITCH-Carbon P-555	10,0	380,0	1,90	0,5
PITCH-Carbon P-100	10,0	758,0	2,41	0,3
E-Glass	10,0	72,4	3,45	4,8
S-Glass	10,0	86,9	4,30	5,0
Aramid Kevlar 49	11,9	131,0	3,62	2,8
Aramid Twaron 1055	12,0	127,0	3,60	2,5

2.4 POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO (PRFC)

A fibra de carbono é um material que apresenta algumas propriedades desejadas a um material empregado no reforço de estruturas, como leveza, resistência à corrosão, rigidez, elevado módulo de deformação e alta resistência à tração. No entanto, os estudos do comportamento de compósitos de PRFC tiveram início somente na década de 90.

Este item destina-se a estudar a fibra de carbono apresentada na forma de folha flexível (manta) e a resina de colagem utilizadas no programa experimental desta pesquisa.

2.4.1 Fibra de carbono

As fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros orgânicos, sendo suas características diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. A produção de fibras de carbono requer exposição ao ar das fibras base, seguida de processamento a temperaturas elevadas (da ordem dos 1.000°C), face as quais a grande maioria das fibras sintéticas derrete ou evapora. Isto não acontece, no entanto, com certas fibras como o acrílico, que mantém a sua estrutura molecular mesmo após a carbonização, ficando os átomos de carbono alinhados ao longo das fibras precursoras.

Quanto mais elevada for a temperatura, maior o módulo de elasticidade a obter, variando entre os 100 GPa e os 300 GPa. O agrupamento de um conjunto da ordem da dezena de milhares destes filamentos, que adquire uma espessura de décimos de milímetro, apresenta excepcionais características mecânicas, que, a depender do arranjo microestrutural das fibras, pode ser traduzido tanto em um maior módulo de elasticidade ou em uma maior resistência à tração.

Para utilização como elemento de reforço estrutural é usual trabalhar-se mais freqüentemente com compósitos de fibras de carbono de elevada resistência à tração e com módulo de elasticidade semelhante ao do aço utilizado na construção civil.

O compósito é apresentado na forma de laminado, cordões, folhas flexíveis unidirecionais e tecidos bidirecionais, pré-impregnadas ou não. Comercialmente, as fibras são mais empregadas na forma de folhas flexíveis pré-impregnadas. A espessura e o formato em “folhas” permitem a fácil moldagem do conjunto às diversas formas geométricas da superfície receptora da estrutura ou elemento estrutural a ser reforçado.

As folhas flexíveis unidirecionais de fibra de carbono são constituídas por feixes de fibras de carbono agrupadas de forma contínua, costurados por uma tela impregnada com mínimas quantidades de resina epóxi. O compósito, designado PRFC (plástico reforçado com fibra de carbono), é formado pela adição de resina epóxi na fibra de carbono durante a aplicação sobre o elemento estrutural, na execução do reforço.

As fibras de carbono possuem características como:

- a) resistência a ataque químico e corrosão;
- b) ótima resistência à fadiga e à atuação de cargas cíclicas;
- c) leveza, com peso específico de aproximadamente 18 kN/m^3 ;
- d) fluência; e
- e) rigidez.

2.4.2 Resinas

A resina constitui a matriz polimérica dos plásticos, firma a transferência dos esforços de fibra para fibra, protege contra o desgaste, impede descolamento do compósito, e garante a aderência do compósito ao substrato e entre as camadas (para o caso de tecidos e folhas).

A quantidade de resina deve ser sempre a mínima, para garantir a resistência e leveza da fibra no plástico.

As resinas de epóxi possuem as seguintes características:

- a) módulo de elasticidade da ordem de 2 GPa ;
- b) deformação de ruptura compatível com as armaduras;

- c) baixa retração durante a cura;
- d) estabilidade frente aos agentes químicos; e
- e) boa capacidade de adesão às fibras.

3 REFORÇO À FORÇA CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE PRFC

Neste capítulo será apresentado um histórico sobre a utilização do compósito PRF, no reforço em estruturas de concreto armado, e em seguida será apresentada a metodologia de cálculo para o reforço à força cortante que será utilizada nesta pesquisa.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.1 Al Sulaimani, G. J.; Sharif, A.; Basunbul, I. A.; Baluch, M. H.; Ghaleb, B. N.⁽¹⁾

Neste trabalho foram analisadas vigas reforçadas à força cortante, utilizando o compósito de fibra de vidro (PRFV) em diferentes arranjos e foi desenvolvido um estudo teórico para calcular o incremento da capacidade resistente à força cortante causado pelo reforço.

As vigas, utilizadas no programa experimental, foram carregadas até o aparecimento da primeira fissura de cisalhamento, para posterior aplicação do compósito de PRFV a fim de recuperar a capacidade resistente à força cortante.

O programa experimental consistiu em 16 vigas de concreto armado, sendo que 14 delas receberam o reforço em sete diferentes arranjos. Duas vigas foram utilizadas como viga testemunho e não receberam nenhum tipo de reforço (CO). O primeiro reforço foi feito com tiras de 20 mm de largura espaçadas a cada 50 mm e distribuídas nos terços do vão próximos aos apoios (SO). O segundo foi igual o primeiro, com reforço também à flexão (SP). O terceiro foi

feito com folha cobrindo toda a superfície lateral também nos terços do vão próximos aos apoios (WO). O quarto reforço recebeu o mesmo tratamento do terceiro, com acréscimo de reforço à flexão (WP). No quinto, a fibra foi aplicada em folha enlaçando a viga em forma de “U” nos terços do vão próximos aos apoios (JO). O sexto arranjo recebeu o mesmo reforço do anterior com acréscimo de reforço à flexão (JP). E, no último arranjo, a viga recebeu reforço somente à flexão (CP).

Em seu estudo teórico, a capacidade resistente à força cortante (V_R) após o reforço é composta por três parcelas indicadas na Equação 3.1:

$$V_R = V_C + V_S + V_{PRFV} \quad (3.1)$$

Sendo V_C a parcela de esforço cortante do concreto, V_S a parcela do aço e V_{PRFV} a parcela do compósito de fibra de vidro.

A Figura 3.1 mostra o reforço em PRFC aplicado em tiras coladas às laterais da viga sendo que o diagrama da tensão de cisalhamento na interface do substrato e do compósito de PRFC, apresentado na figura, mostra que a tensão é nula no ponto da fissura devido à perda de continuidade e crescente em direção à borda.

Neste método de reforço em tiras coladas às laterais da viga, a parcela V_{PRFV} é calculada através da Equação 3.2:

$$V_{PRFC} = \frac{2 \times \left[\tau_{méd} \times \left(\frac{b_{PRFC} \times h_{PRFC}}{2} \right) \right] \times d}{s} \quad (3.2)$$

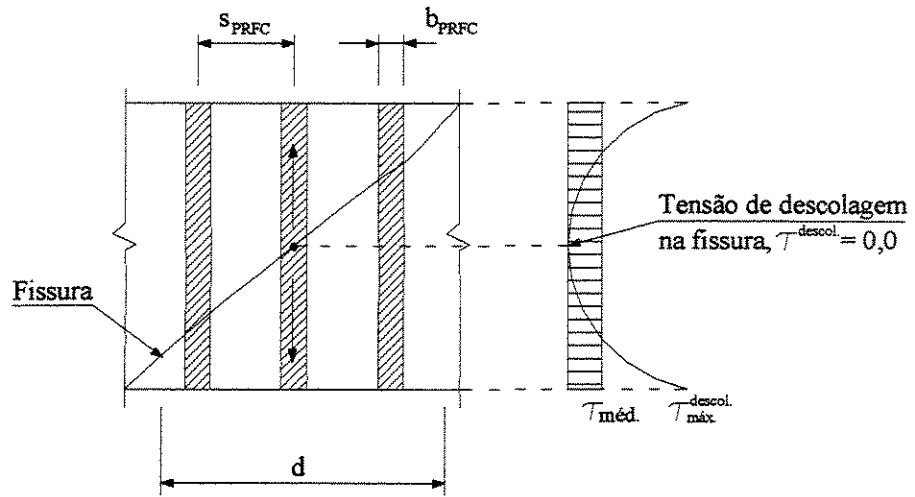


FIGURA 3.1 – Reforço em tiras

Onde b_{PRFV} corresponde à largura da tira, h_{PRFV} à altura da tira, d é a distância entre a extremidade comprimida da fibra e a armadura longitudinal de tração existente na viga, e s_{PRFV} é o espaçamento entre as tiras.

O valor de $\tau_{méd}$ é considerado 1,2 MPa, obtido através de resultados experimentais, e corresponde à tensão média de cisalhamento na interface do compósito de PRFC e da superfície de concreto.

Quando o reforço é feito através de manta colada nas laterais da viga, a parcela V_{PRFV} pode ser calculada através da Equação 3.3:

$$V_{PRFV} = 2 \times \left[\tau_{méd} \times \left(\frac{d \times h_{PRFV}}{2} \right) \right] \quad (3.3)$$

Neste caso, h_{PRFV} corresponde à altura da manta colada nas laterais da viga.

A componente V_{PRFV} é calculada assumindo a ruptura por descolamento, que ocorre quando a tensão máxima de cisalhamento na base do compósito de PRFC, aplicado na viga, alcança a tensão máxima de cisalhamento na interface ($\tau_{máx}^{descol}$), considerado 3,5 MPa.

A parcela de V_{PRFV} , para o reforço com a fibra aplicada em “U”, é calculada assumindo que não ocorrerá o descolamento da fibra, com base em resultados experimentais. Isto porque a fibra está ancorada na base, diminuindo assim a concentração de esforços de cisalhamento. Portanto, a parcela de V_{PRFV} é calculada pela Equação 3.4:

$$V_{PRFV} = 2 \times \left[\tau_{\max.}^{desc} \times \left(\frac{d \times h_{PRFV}}{2} \right) \right] \quad (3.4)$$

Nesta equação, h_{PRFV} corresponde à altura da manta nas laterais da viga.

A Tabela 3.1 apresenta a comparação entre os valores teóricos e os obtidos nos ensaios para as vigas reforçadas e as vigas testemunhos.

TABELA 3.1 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais

Grupo	Subgrupo	V_u Exper. (kN)	ε (%)	V_u (kN)		Modo de ruptura
				SF	FF	
C	CO	34,5	0,213	30,6	46,9	Força cortante
	CP	32,2	0,155	30,6	60,0	Força cortante
S	SO	41,5	0,317	38,7	46,9	Força cortante
	SP	41,2	0,087	38,7	60,0	Força cortante
W	WO	42,0	0,282	41,4	46,9	Força cortante
	WP	45,2	0,124	41,4	60,0	Força cortante
J	JO	50,1	0,557	89,9	46,9	Momento fletor
	JP	62,3	0,463	89,9	60,0	Momento fletor

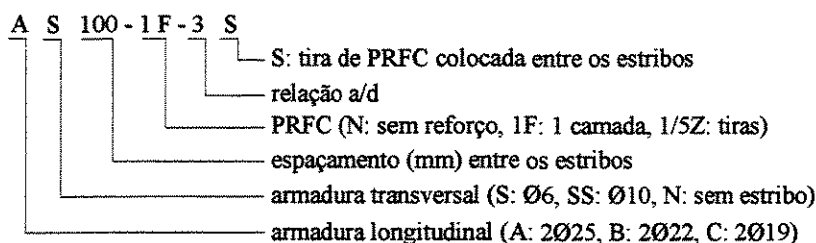
De acordo com os resultados experimentais, observou-se que a capacidade resistente do esforço cortante para as vigas reforçadas dos grupos S e W foi praticamente a mesma, não influenciando o arranjo em tiras ou em folhas nas laterais.

A ruína das vigas dos grupos S e W ocorreu por descolamento da fibra e em seguida o escoamento da armadura transversal.

O arranjo das vigas do grupo J apresentou um melhor desempenho, já que este sistema proporcionou uma melhor ancoragem, evitando a ruptura por descolamento. Neste caso, a ruptura ocorreu por flexão.

3.1.2 Miyauchi, K.; Inoue, S.; Nishibayashi, S.; Tanaka, Y.⁽¹⁶⁾

Neste estudo foi analisado o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à força cortante com compósito de fibra de carbono (PRFC), utilizando-se vigas em concreto com e sem armadura transversal (estribos). As vigas com armadura transversal foram reforçadas com a fibra colada em tiras na mesma posição dos estribos, e em outro caso entre os estribos. Nas vigas sem armadura transversal as tiras foram coladas às laterais da viga utilizando uma e duas camadas de fibra. Em todas as vigas as tiras foram coladas enlaçando a viga com traspasse de 6,0 cm e arredondamento das arestas com raio de 10 mm. A nomenclatura utilizada nas vigas foi elaborada a partir do seguinte modelo:



Em seu estudo teórico, a força cortante de uma viga reforçada com PRFC também é composta por três parcelas, a do concreto, a do aço e a do compósito de PRFC. Para calcular a parcela correspondente à fibra de carbono, Miyauchi et al.⁽¹⁶⁾ baseou-se no modelo da treliça, considerando o ângulo das fissuras de cisalhamento igual a 45° . Sendo V_{PRFC} calculada a partir da Equação 3.5:

$$V_{PRFC} = 2 \times t_{PRFC} \times f_{PRFC} \times z \times \cot g \theta \times n \quad (3.5)$$

Onde t_{PRFC} corresponde à espessura final de uma camada de compósito, z é considerado $d/1,15$, θ é o ângulo da biela de compressão (considerado 45°) e n é o número de camadas de fibra de carbono utilizadas no reforço. A tensão de tração da fibra (f_{PRFC}) é dada pelo produto do módulo de elasticidade da fibra (E_{PRFC}) e a deformação última da fibra (ϵ_{PRFC}).

A eficiência do reforço à força cortante utilizando o compósito de fibra de carbono é calculada pela Equação 3.6:

$$k_e = \frac{V_R - V_C - V_S}{2 \times t_{PRFC} \times f_{PRFC} \times z \times \cot g \theta \times n} \quad (3.6)$$

A Tabela 3.2 apresenta os resultados teóricos e experimentais para as vigas ensaiadas.

TABELA 3.2 – Resultados teóricos e experimentais

Amostra	f_c (MPa)	Reforço ao cisalhamento		F_U Teórico (kN)	$2V_u$ Ensaio (kN)	Modo de ruptura
		Estribo	PRFC			
AN -N-3	35,1	-	-	161,0	87,3	S
AN -1/5Z-3	35,1	-	1/5-tira	161,0	128,1	S
AN -1/2Z-3	32,4	-	1/2-tira	150,2	186,7	S
AS 150-1/5Z-2.7	35,0	D6-150	1/5-tira	178,6	182,2	FC
AS 150-1/5Z-2.7S	35,0	D6-150	1/5-tira	178,6	182,2	S
AS 150-1/5Z-3	35,0	D6-100	1/5-tira	160,6	204,0	FC
AS 150-1/5Z-3S	35,0	D6-100	1/5-tira	160,6	204,0	FC
AN -1/5Z-2.4	32,4	-	1/5-tira	187,7	125,5	S
AN -1/2Z-1.8	32,4	-	1/5-tira	250,4	147,3	S
CSS 55 -N-2	39,1	D10-55	-	192,6	380,5	FT
CN -N-2	38,3	-	-	191,8	98,3	S
CN -1/2Z-2	39,1	-	1/2-tira	192,6	166,7	S
CN -1F-2	39,1	-	1 camada	192,6	234,0	FT
CN -2F-2	38,3	-	2 camadas	192,6	367,4	FT
BN -1F-2	39,1	-	1 camada	236,3	244,2	FT
CS 110 -1/3Z-2	38,3	D6-100	1/3-tira	191,8	212,2	FT
CS 110 -1/2Z-2	38,3	D6-100	1/2-tira	191,8	234,6	FT

Modo de ruptura: S: Esforço cortante; FC: compressão; FT: flexão

Após os ensaios, observou-se que a deformação na armadura transversal e na fibra das vigas, com estribos e reforçadas com o compósito de PRFC, apresentou valores diferentes para medições feitas na mesma posição (estribo e fibra). O valor da deformação da fibra foi maior em comparação ao dos estribos.

Nas vigas com estribos, a posição das tiras de PRFC não influenciou na eficiência do reforço. O valor da eficiência do reforço k_e foi obtido através da média dos valores das vigas ensaiadas, sendo de 0,57.

3.1.3 Norris, T.; Saadatmanesh, H.; Ehsani, M. R.⁽¹⁷⁾

Neste trabalho foram estudadas 19 vigas de concreto armado reforçadas à flexão e à força cortante através de compósito de PRFC. Dentre as vigas reforçadas, foram utilizados três sistemas diferentes de reforço, variando o tipo de fibra (unidirecional ou bidirecional) e o tipo de resina.

O programa experimental contou com 13 vigas de 127 mm x 203 mm de seção transversal e 2440 mm de comprimento, que foram projetadas com segurança adicional com relação à ruína por força cortante, e avaliar o comportamento à flexão após o reforço.

A taxa de armadura longitudinal foi de 0,0067 (valor próximo à armadura mínima permitida pelo ACI), composta por duas barras de 9,5 mm de diâmetro (superior e inferior) e armadura transversal composta por estribos de 6,0 mm de diâmetro, espaçados a cada 165 mm na região central e a cada 51 mm nos terços do vão (próximos aos apoios).

As seis vigas restantes tinham mesma seção transversal, 1220 mm de comprimento e foram superdimensionadas para prevenir a ruína por flexão, a fim de avaliar o comportamento à força cortante após o reforço.

A taxa de armadura longitudinal foi de 0,0193, composta por duas barras de 16,0 mm de diâmetro (inferior) e 2 barras de 9,5 mm de diâmetro (superior), e armadura transversal composta por estribos de 6,0 mm de diâmetro espaçados a cada 206 mm.

No primeiro sistema de reforço, foram utilizadas duas camadas de fibra unidirecional com um tipo de resina epóxi, denominada como epóxi A, com espessura final do compósito de 0,1 mm. No segundo, foram utilizadas duas camadas de fibra unidirecional com um tipo de resina epóxi, denominada como epóxi B, com espessura final do compósito de 0,1 mm. No terceiro sistema foi utilizada uma camada de tecido bidirecional com a mesma resina epóxi utilizada no segundo sistema de reforço, com espessura final do compósito de 0,15 mm. Apesar da diferença de espessuras entre os sistemas, o volume de fibra foi o mesmo para os três sistemas.

As vigas que receberam o reforço com a fibra unidirecional, orientada perpendicularmente em relação ao eixo longitudinal da viga (90°), e com tecido bidirecional, orientada a $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal da viga, não receberam reforço à flexão. Os resultados obtidos nos ensaios dessas vigas foram comparados com a viga testemunho, que alcançou a ruína por força cortante.

Os resultados experimentais mostraram que não houve diferença significativa entre os diferentes sistemas de reforço, ou seja, entre as fibras unidirecionais e bidirecionais.

A resistência em relação à força cortante aumentou nas vigas reforçadas, como esperado, não ocorrendo ruptura por cisalhamento. A ruína da viga reforçada com a fibra unidirecional (90°) foi caracterizada pelo escoamento da armadura longitudinal e o descolamento da fibra próximo ao meio do vão.

A viga que recebeu o reforço com a fibra bidirecional ($\pm 45^\circ$), aproximadamente normal e paralela às fissuras de cisalhamento, apresentou um valor último da força cortante superior quando comparado ao resultado do ensaio da viga reforçada a 90° .

O incremento de rigidez observado nos ensaios entre as vigas reforçadas foi superior na viga que recebeu o reforço a $\pm 45^\circ$, em relação ao reforço da viga com a fibra aplicada a 90° (obliqua às fissuras de cisalhamento).

3.1.4 Outros pesquisadores

Chajes et al.⁽⁹⁾ estudaram o reforço à força cortante em vigas de seção “T” utilizando os compósitos de PRFA (aramida), PRFV (fibra de vidro) e PRFC (fibra de carbono).

Os resultados experimentais apresentaram valores superiores para o compósito de PRFC, no incremento da força cortante, em relação à fibra de vidro (PRFV) e à aramida (PRFA).

Malek et al.⁽¹⁵⁾ estudaram o ângulo de inclinação das fissuras de cisalhamento e o valor último da força cortante para as vigas reforçadas com PRFC, baseado no modelo da treliça.

O estudo mostrou que a espessura do compósito, o ângulo de orientação das fibras e o espaçamento dos estribos contribuem para o ângulo de inclinação das fissuras e o comportamento das vigas reforçadas.

Triantafillou⁽²¹⁾ analisou vigas em concreto armado, sem armadura transversal, que receberam reforço com compósito de PRFC aplicado apenas nas laterais da viga, com as fibras orientadas a 45° e a 90°.

O programa experimental constou em 11 vigas subdimensionadas à força cortante, sendo 9 vigas reforçadas com a folha de fibra de carbono colada nas laterais e 2 utilizadas como testemunho.

O modo de ruptura observado nos ensaios foi por descolamento da fibra, apresentando um incremento na capacidade resistente à força cortante entre 65% e 95%. A eficiência do reforço, com PRFC, foi superior nas vigas em que as fibras foram aplicadas a 45°, aproximadamente perpendiculares às fissuras de cisalhamento.

Chaallal et al.⁽⁷⁾ estudaram o reforço à força cortante em vigas de concreto armado utilizando fibras unidirecionais de carbono (PRFC), aplicadas em tiras coladas em duas direções: 45° e 90°.

As vigas foram subdimensionadas à força cortante e receberam o reforço suficiente para não ocorrer ruptura da viga por cisalhamento.

As tiras de 50 mm de largura foram coladas às laterais das vigas em dois arranjos diferentes: perpendiculares ao eixo longitudinal da viga (90°) e espaçadas a cada 100 mm; e a 45° em relação ao eixo longitudinal da viga (aproximadamente perpendicular às fissuras de cisalhamento) e espaçadas a cada 150 mm.

O modo de ruína observado nas vigas reforçadas foi por descolamento do PRFC. A viga que recebeu o reforço com as tiras aplicadas a 45° obteve um incremento de rigidez superior ao reforço feito com as tiras a 90°.

Chaallal et al.⁽⁸⁾ desenvolveram uma metodologia de cálculo para determinar o valor da força cortante resistente na viga reforçada com o compósito de PRFC, por meio da colagem da fibra de carbono em tiras distribuídas ao longo do vão, em manta cobrindo toda a superfície lateral ou manta enlaçando a viga em “U”.

A metodologia de cálculo proposta por Chaallal et al.⁽⁸⁾ foi empregada para calcular os valores teóricos esperados nos ensaios das vigas, assim como também a metodologia proposta pelo ACI-440R-00⁽⁴⁾, e comparados com os resultados obtidos neste trabalho. Estes dois métodos de cálculo serão explicados nos itens 3.2 e 3.3, respectivamente.

3.2 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO CHAALLAL ET AL.⁽⁸⁾

As vigas de concreto armado, reforçadas à força cortante com o compósito de PRFC, podem atingir a ruína por força cortante de duas maneiras, pela ruína da fibra ou ruína por descolamento do compósito da superfície de concreto. O dimensionamento do reforço à força cortante com PRFC deve, portanto, considerar estes dois modos de ruína.

A resistência à força cortante atuante, V_R , na viga de concreto armado reforçada com PRFC, é atribuída a três parcelas resistentes: a parcela do concreto V_C , a parcela do aço (armadura transversal) V_S , e a parcela de PRFC, V_{PRFC} , mostrada na Equação 3.7:

$$V_R = V_C + V_S + V_{PRFC} \quad (3.7)$$

Onde:

V_C : parcela da força cortante total atuante, atribuída ao concreto

V_S : componente vertical das forças na armadura transversal, numa inclinação qualquer α

V_{PRFC} : componente vertical das forças na fibra de PRFC

3.2.1 Ruína da fibra

Para o cálculo do reforço considerando a ruptura da fibra, a área necessária de PRFC é determinada da mesma maneira que a área de aço necessária para absorver as tensões de tração, oriundas da ação da força cortante pela analogia da treliça clássica de Morsch, de acordo com a Figura 3.2, admitindo-se as fissuras de cisalhamento num ângulo variável θ e a inclinação dos estribos e do reforço de PRFC num ângulo α .

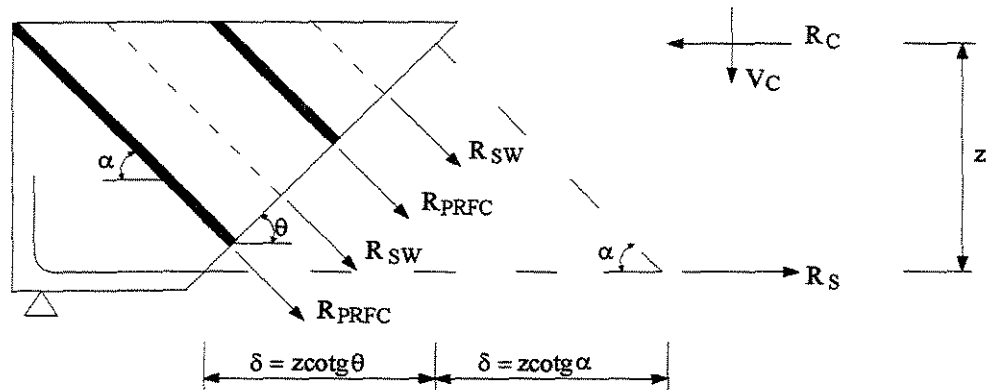


FIGURA 3.2 – Forças internas da armadura transversal e externas das de PRFC

Onde:

R_C : força resultante de compressão no concreto

R_S : força resultante de tração do aço na armadura longitudinal

R_{PRFC} : força de tração da fibra de PRFC

R_{SW} : força de tração da armadura transversal

z : distância entre a resultante de tração da armadura longitudinal e a resultante de compressão do concreto

θ : ângulo de inclinação das fissuras de cisalhamento

α : ângulo de inclinação da armadura transversal e da fibra de PRFC

Sendo V_{PRFC} a componente vertical das forças na fibra de PRFC, tem-se a Equação 3.8:

$$V_{PRFC} = R_{PRFC} \times \sen \alpha \times n \quad (3.8)$$

Sendo n o número de barras que cortam as fissuras inclinadas (de cisalhamento) de ângulo θ , e s o espaçamento entre as tiras de PRFC, tem-se:

$$n = \frac{z \cot g\theta + z \cot g\alpha}{s} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{z}{s} \times (\cot g\theta + \cot g\alpha)$$

E sendo R_{PRFC} a força de tração na fibra,

$$R_{PRFC} = A_{PRFC} \times \sigma_{PRFC}$$

Onde:

A_{PRFC} : área da seção transversal de PRFC

σ_{PRFC} : tensão atuante de tração no compósito de PRFC

Substituindo-se n e R_{PRFC} na Equação 3.8 têm-se a Equação 3.9:

$$V_{PRFC} = A_{PRFC} \times \sigma_{PRFC} \times \sen \alpha \cdot \frac{z}{s} \times (\cot g\theta + \cot g\alpha) \quad (3.9)$$

Considerando o ângulo de inclinação das fissuras com valor mais desfavorável, $\theta = 45^\circ$ e assumindo $\delta = d$, chega-se à Equação 3.10:

$$V_{PRFC} = A_{PRFC} \times \sigma_{PRFC} \times \frac{d}{s} \times (\sen \alpha + \cos \alpha) \quad (3.10)$$

Para a fibra, o valor da tensão de tração última da fibra, $f_{u,PRFC}$, é tomado como o produto do módulo de elasticidade da fibra de carbono (E_{PRFC}) pela deformação última a ser considerada

pela fibra no cálculo ($\varepsilon_{u, PRFC}$), já que a fibra apresenta um comportamento tensão x deformação linear até a ruptura.

Para a folha de fibra de carbono aplicada em tiras num ângulo α , o valor de V_{PRFC} é dado pela Equação 3.11:

$$V_{PRFC} = A_{PRFC} \times f_{u, PRFC} \times \frac{d}{s} \times (\sen \alpha + \cos \alpha) \quad (3.11)$$

Onde $f_{u, PRFC}$ é a resistência de tração última da fibra de carbono.

Quando a folha de fibra de carbono é aplicada de forma contínua, em toda a lateral da viga, num ângulo α , o valor de V_{PRFC} é dado pela Equação 3.12:

$$V_{PRFC} = A_{PRFC} \times f_{u, PRFC} \times (\sen \alpha + \cos \alpha) \quad (3.12)$$

3.2.2 Ruína por descolamento da fibra

Considerando a ruína por descolamento do compósito de PRFC da superfície de concreto (Figura 3.3) no reforço aplicado em tiras inclinadas num ângulo variável α , o valor de V_{PRFC} é calculado pela Equação 3.13.

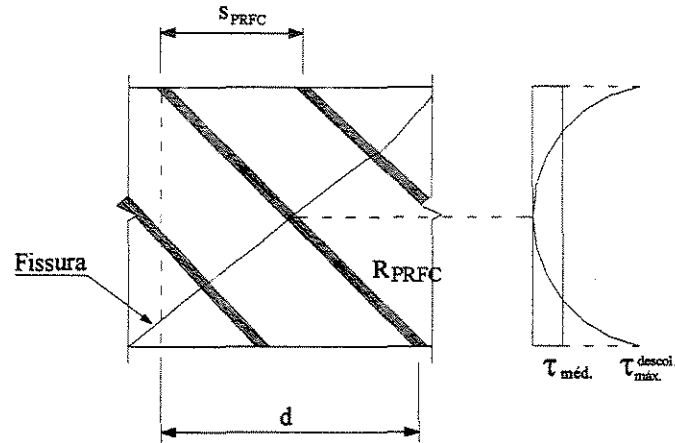


FIGURA 3.3 – Tensão de descolamento no reforço em tiras de PRFC

$$V_{PRFC} = 2 \times \left[\tau_{méd} \times \left(\frac{b_{PRFC} \times h_{PRFC}}{2} \right) \times \frac{d}{s} \times (\sen \alpha + \cos \alpha) \right] \quad (3.13)$$

Sendo:

$$\tau_{méd} = \frac{\tau_{máx}^{descol}}{2}$$

Onde:

$\tau_{méd}$: tensão média de cisalhamento de descolagem na interface

$\tau_{máx}^{descol}$: tensão máxima de cisalhamento de descolagem na interface

b_{PRFC} : largura da folha, ou tira, de PRFC

h_{PRFC} : altura da folha, ou tira, de PRFC

S_{PRFC} : espaçamento entre as tiras de PRFC

A tensão máxima de cisalhamento no composto de PRFC é dada pela Equação 3.14:

$$\tau_{máx}^{descol} = \frac{5,4}{1 + k_1 \times \tan 33^\circ} \quad (\text{MPa}) \quad (3.14)$$

Onde k_1 é uma constante calculada pela Equação 3.15:

$$k_1 = t_{PRFC} \times \left[\frac{k_n}{4 \times E_{PRFC} \times I_{PRFC}} \right]^{1/4} \quad (3.15)$$

Onde:

t_{PRFC} : espessura de PRFC utilizada no reforço

E_{PRFC} : módulo de elasticidade da fibra utilizada no reforço

I_{PRFC} : momento de inércia da folha de PRFC

A rigidez normal da resina, k_n , leva em consideração as propriedades da resina e é dada pela Equação 3.16:

$$k_n = E_a \times \frac{b_a}{t_a} \quad (3.16)$$

Onde:

E_a : módulo de Young da resina utilizada no reforço

b_a : largura onde foi aplicada a resina

t_a : espessura de aplicação da resina

Para a ruína da fibra por descolamento, quando a manta é aplicada ao longo do vão, o valor de V_{PRFC} é dado pela Equação 3.17:

$$V_{PRFC} = 2 \times \left[\tau_{med} \times \left(\frac{b_{PRFC} \times h_{PRFC}}{2} \right) \right] \quad (3.17)$$

Quando a fibra é aplicada em tiras ou ao longo do vão, enlaçando a viga em “U”, a tensão máxima de descolamento pode ser considerada no cálculo, dada pela continuidade da fibra, como mostra a Figura 3.4. O valor de V_{PRFC} é obtido pela Equação 3.18.

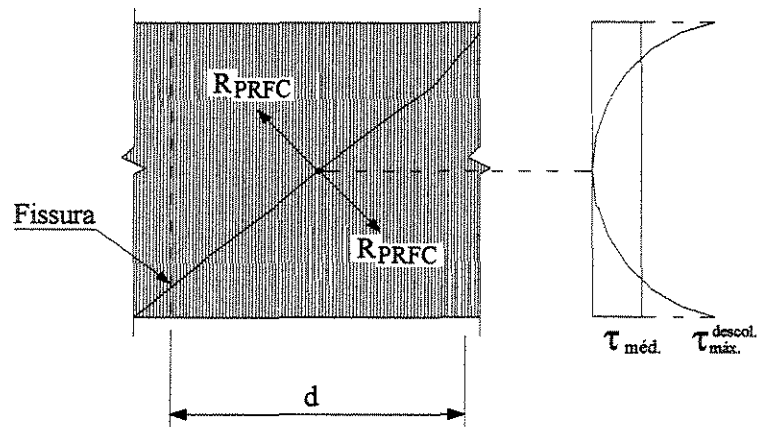


FIGURA 3.4 – Tensão de descolamento no compósito de PRFC ao longo da superfície lateral da viga

$$V_{PRFC} = 2 \times \left[\tau_{\max}^{desc} \times \left(\frac{b_{PRFC} \times h_{PRFC}}{2} \right) \right] \quad (3.18)$$

Visto que o cálculo para o reforço com PRFC deve ser feito considerando dois modos de ruína, a da fibra e a ruína por descolamento do compósito, o valor para V_{PRFC} a ser adotado deve corresponder ao menor valor obtido entre as equações 3.11 e 3.13, quando o reforço de PRFC é feito em tiras, 3.11 e 3.18, quando o reforço é feito em tiras enlaçando a viga, e o menor entre as equações 3.12 e 3.17 quando o reforço é feito por meio de mantas nas superfícies laterais, ou entre as equações 3.12 e 3.19 para o mesmo caso, enlaçando a viga.

O valor adotado para V_{PRFC} é somado à parcela do concreto V_C e à parcela do aço V_S , de acordo com a Equação 3.7.

3.3 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO O ACI-440R-2000⁽⁴⁾

Segundo o ACI, o reforço à força cortante através do compósito de PRF pode ser executado de três maneiras, conforme a Figura 3.5.

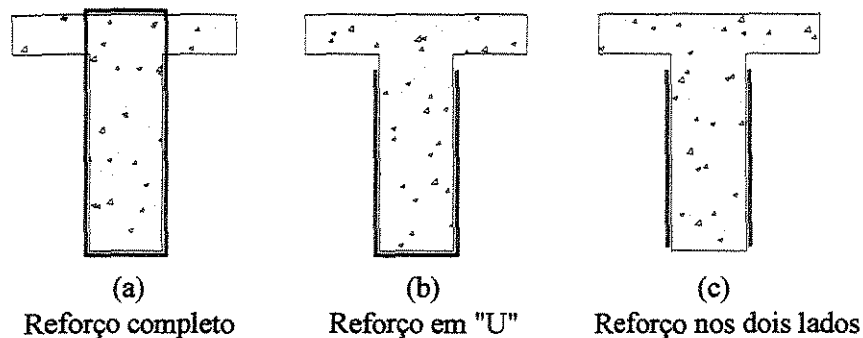


FIGURA 3.5 – Detalhe de reforço com PRF

A capacidade cortante V_R de estruturas de concreto reforçadas com PRF é calculada somando-se a contribuição do concreto (V_c), do aço (V_s) e do compósito de PRF (V_{PRF}) e aplicando-se o coeficiente de redução ψ , de acordo com a Equação 3.19:

$$\phi \cdot V_R = \phi \cdot (V_c + V_s + \psi \cdot V_{PRF}) \quad (3.19)$$

Em função do método de reforço aplicado, de acordo com as figuras 3.5(a), (b) ou (c), é considerado um fator de redução aplicado no valor de V_{PRF} , referente à parcela da força cortante do compósito de PRF. Este valor, ψ , para os sistemas de reforço enlaçando a viga por completo (Figura 3.5a), dever ser de 0,95 e, para o sistema de reforço aplicado em "U" ou em folhas (Figura 3.5b e 3.5c), o valor de ψ é 0,85.

De acordo com o ACI, o cálculo da resistência última à força cortante de uma peça de concreto armado, reforçada com compósito de PRF, é feito da mesma maneira que o dimensionamento segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾ descrito no item 3.2, diferenciando apenas no descolamento, que depende da espessura do compósito de PRFC, da resistência do concreto e do método de reforço aplicado.

O valor da deformação efetiva é limitado em 0,4% para o sistema de reforço enlaçando a

viga por completo (Figura 3.5a), e obtido pela Equação 3.20, segundo Khalifa⁽¹⁴⁾.

$$\varepsilon_{fe} = \frac{k_1 \times k_2 \times L_e}{468} \quad (3.20)$$

Onde k_1 , k_2 e L_e são calculados pelas equações 3.21, 3.22 e 3.23, respectivamente.

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{4000} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.21)$$

$$k_2 = \left(\frac{d_{PRFC} - L_e}{d_{PRFC}} \right) \quad (3.22)$$

$$L_e = \left(\frac{2500}{(n \times t_{PRFC} \times E_{PRFC})^{0,58}} \right) \quad (3.23)$$

Onde:

d_{PRFC} : distância entre o CG da armadura longitudinal e a tira, em polegadas

f_c : resistência do concreto em psi

n : número de camadas

t_{PRFC} : espessura da fibra em polegadas

E_{PRFC} : módulo de deformação da fibra em polegadas

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados o programa experimental, as características dos materiais utilizados nesta pesquisa e a metodologia de aplicação do compósito de PRFC.

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental constou de sete vigas de concreto armado que foram divididas em dois grupos, três no Grupo 1 e quatro no Grupo 2. Todas as vigas com a mesma seção transversal e o mesmo comprimento.

As vigas do Grupo 1 foram ensaiadas com concreto de resistência à compressão em torno de 30 MPa. Os resultados obtidos nas vigas reforçadas mostraram que o compósito foi pouco solicitado, causando assim uma ruína por flexão, caracterizada pelo escoamento da armadura longitudinal.

Visando um melhor aproveitamento dos dois materiais, aço e fibra de carbono, e, a fim de evitar a forma de ruína por esmagamento do concreto, as vigas do Grupo 2 foram moldadas com concreto de alta resistência à compressão, em torno de 90 MPa.

Em cada grupo foi ensaiada uma viga, sem a aplicação do reforço com PRFC, utilizada como viga testemunho. As vigas testemunhos receberam a letra T na nomenclatura para diferenciar das demais, as vigas do Grupo 1 receberam o nome seguido de G1 e as do Grupo 2, o nome seguido de G2. Assim, a viga testemunho do Grupo 1 foi chamada de VTG1 e a viga

testemunho do Grupo 2, VTG2. As demais vigas foram numeradas de acordo com os ensaios, sendo a primeira viga reforçada do Grupo 1 denominada V1G1 e a segunda viga reforçada V2G1. Da mesma forma, para as vigas do Grupo 2, a primeira reforçada foi denominada V1G2, a segunda, V2G2, e a terceira, V3G2.

As vigas do Grupo 1 foram executadas com concreto de resistência à compressão em torno de 30 MPa, armadura longitudinal inferior composta por três barras de 12,5 mm de diâmetro, armadura longitudinal superior composta por duas barras de 6,3 mm de diâmetro e armadura transversal composta por estribos de 5,0 mm de diâmetro espaçados a cada 17 cm ao longo da viga.

A primeira viga reforçada do Grupo 1, V1G1, recebeu um reforço à força cortante por meio da colagem de uma camada de manta de PRFC nos terços do vão próximos aos apoios, com as fibras direcionadas a 90° em relação ao eixo longitudinal da viga, de acordo com a Figura 4.1.

A segunda viga do Grupo 1, V2G1, recebeu o reforço na mesma posição da V1G1, mas com as fibras direcionadas a 45° em relação ao eixo longitudinal da viga, de acordo com a Figura 4.2.

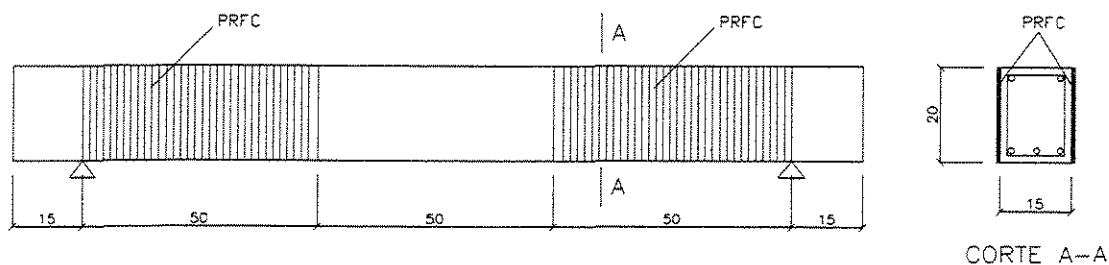


FIGURA 4.1 – Arranjo do reforço com PRFC na viga V1G1

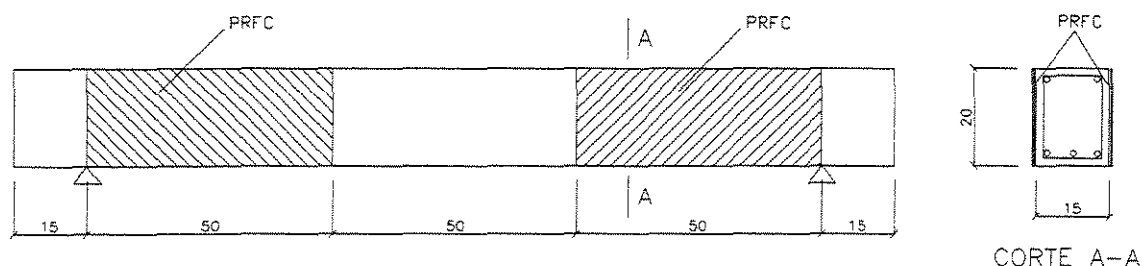


FIGURA 4.2 – Arranjo do reforço com PRFC na viga V2G1

As vigas do Grupo 2 foram executadas com concreto de resistência à compressão em torno de 90 MPa, armadura longitudinal inferior composta por cinco barras de 16 mm de diâmetro, armadura longitudinal superior composta por duas barras de 6,3 mm de diâmetro e armadura transversal composta por estribos de 4,2 mm de diâmetro espaçados a cada 15 cm.

A primeira viga reforçada do Grupo 2, V1G2, recebeu um reforço à força cortante por meio da colagem de uma camada de manta de PRFC na lateral da viga, ao longo de todo o vão com as fibras direcionadas a 90° em relação ao eixo longitudinal da viga, de acordo com a Figura 4.3.

A segunda viga do Grupo 2, V2G2, recebeu um reforço à força cortante através da colagem de tiras de PRFC nas laterais da viga, distribuídas ao longo de todo o vão, de acordo com a Figura 4.4. O arranjo do reforço em tiras foi feito de forma a enlaçar a viga em “U”.

A terceira viga do Grupo 2, V3G2, recebeu um reforço à força cortante através da colagem de tiras de PRFC, envolvendo toda a viga com tiras, distribuídas ao longo de todo o vão, de acordo com a Figura 4.5.

Para a execução do reforço com o compósito de PRFC na viga, foi utilizada a mesma metodologia para aplicação do produto nos grupos 1 e 2.

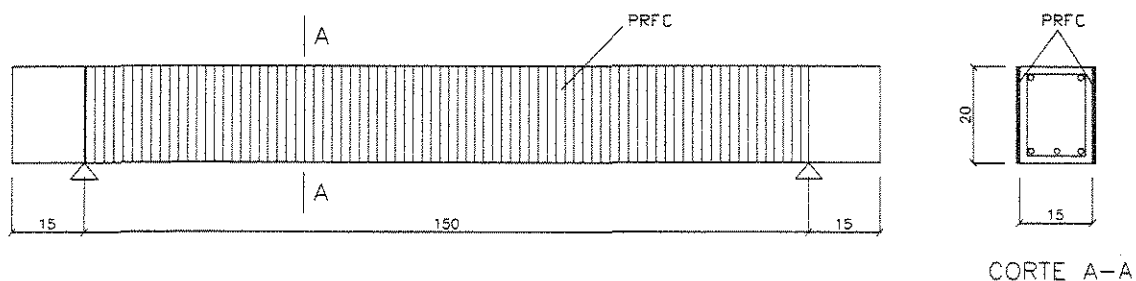


FIGURA 4.3 – Arranjo do reforço com PRFC na viga V1G2

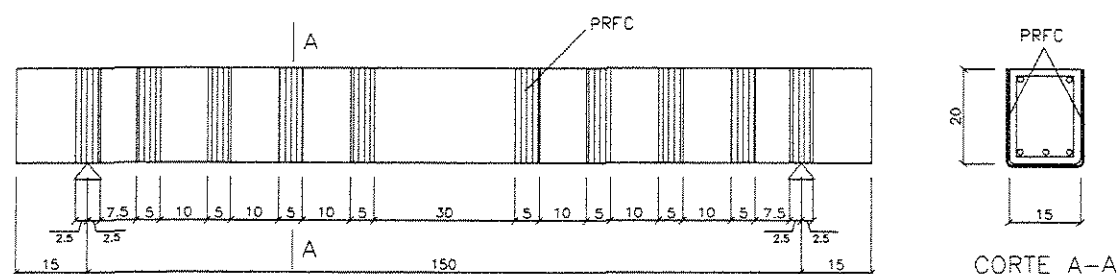


FIGURA 4.4 – Arranjo do reforço com PRFC na viga V2G2

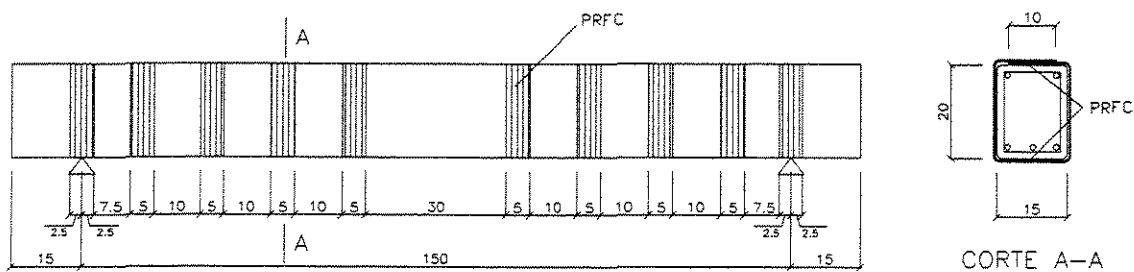


FIGURA 4.5 – Arranjo do reforço com PRFC na viga V3G2

O esquema de aplicação das forças para as vigas dos grupos 1 e 2 foi de duas forças em dois pontos equidistantes do centro do vão. Os esquemas de forças estão indicados nas figuras 4.6 e 4.7 para os grupos 1 e 2, respectivamente. Para as vigas do grupo 2 (com resistência à compressão do concreto em torno de 90 MPa) a distância entre os pontos de aplicação das forças foi menor, aumentando o vão de cisalhamento para evitar que uma parcela do carregamento fosse direto para o apoio.

As fotos 4.1 e 4.2 mostram o detalhe do esquema de carregamento para vigas dos grupos 1 e 2.

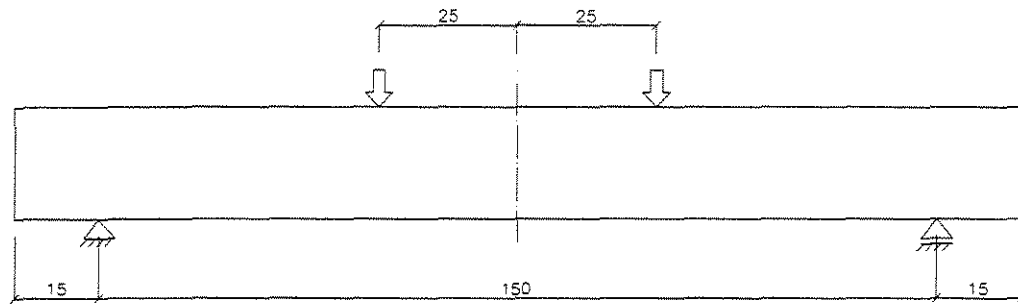


FIGURA 4.6 – Esquema de carregamento para as vigas do Grupo 1

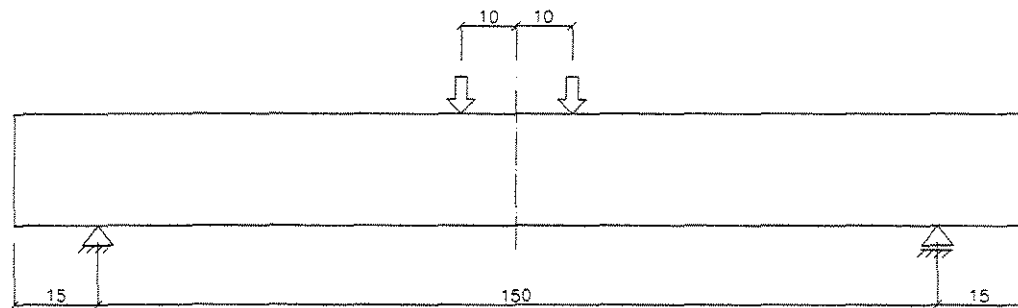


FIGURA 4.7 – Esquema de carregamento para as vigas do Grupo 2

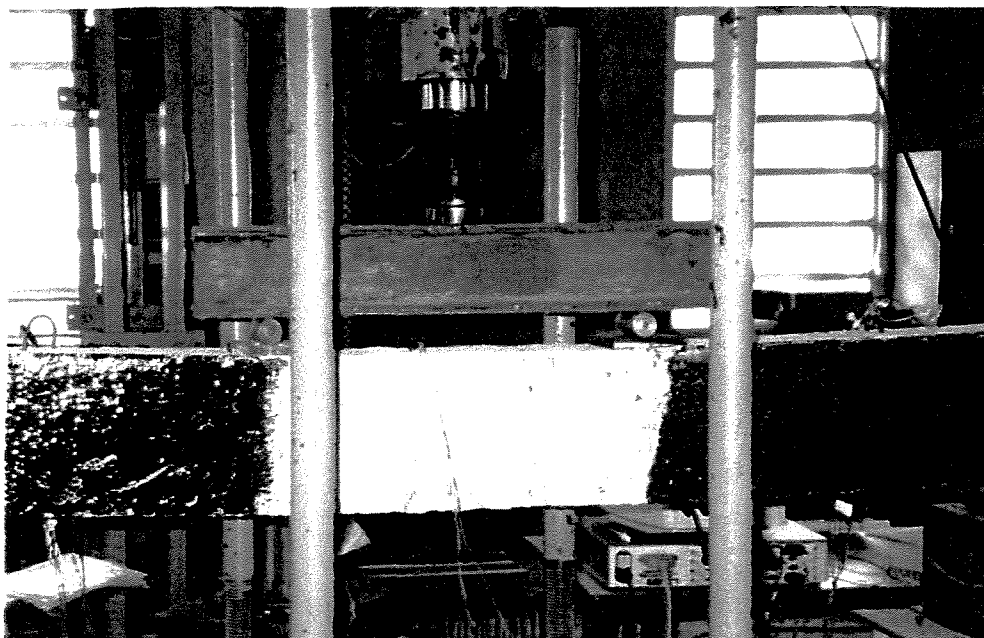


FOTO 4.1

Detalhe da aplicação do carregamento para as vigas do Grupo 1

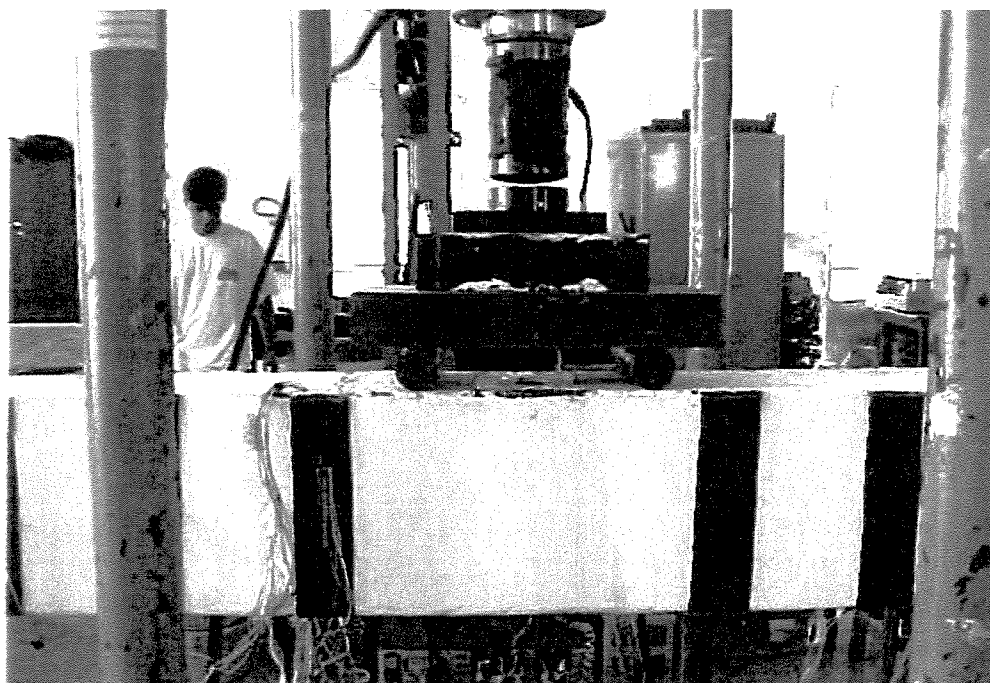


FOTO 4.2

Detalhe da aplicação do carregamento para as vigas do Grupo 2

Todas as vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos, colados nas armaduras longitudinal e transversal e monitorados por um aquisitor de dados durante o ensaio, e com um defletômetro no centro da viga, para leitura do deslocamento vertical.

As vigas VTG1 e VTG2 foram levadas à ruína por força cortante, caracterizada pelo escoamento da armadura transversal.

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Serão apresentadas a seguir as propriedades físicas do concreto, das armaduras, da manta de fibra de carbono e das resinas utilizadas nesta pesquisa.

4.2.1 Concreto

A concretagem das vigas foi dividida em duas betonadas por grupo. Na primeira betonada foram concretadas as duas primeiras vigas do Grupo 1, na segunda betonada foi preparada a terceira viga do Grupo 1, e na terceira e quarta betonadas foram preparadas as vigas do Grupo 2. No preparo do concreto dos grupos 1 e 2, os materiais foram colocados na betoneira na seguinte ordem:

- a) agregado graúdo;
- b) parte da água;
- c) cimento (cimento e sílica ativa misturados a seco para as vigas do Grupo 2);
- d) parte da água (com superplastificante no Grupo 2);
- e) areia; e
- f) o restante da água (com superplastificante no Grupo 2).

Para cada concretagem das vigas dos grupos 1 e 2, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação.

Os corpos-de-prova permaneceram nos moldes, cobertos com lona plástica, por 24 horas aproximadamente. Depois deste período, foram desmoldados, enrolados em jornal molhado e acondicionados em sacos plásticos.

As características dos concretos dos grupos 1 e 2 estão apresentadas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Propriedades do concreto

Característica	Grupo 1	Grupo 2
Consumo de cimento (kg/m^3)	300	650
Resistência à compressão (MPa)	30	90
Porcentagem de argamassa seca (%)	55	55
Abatimento (cm)	8,0	17,0
Sílica Ativa	-	97,5
Areia (kg/m^3)	888,00	488,99
Pedra 1 (kg/m^3)	972,00	910,539
Pedrisco (kg/m^3)	-	101,171
a/c	0,70	0,23
Superplastificante (l/m^3)	-	41,99
$(a+s)/(c+m)^{(1)}$	-	0,26
$s/(c+m)^{(1)}$	-	0,056
Traço	1:2,96:3,24	1:0,75:0,16:1,40

(1) m corresponde à sílica ativa

4.2.1.1 Cimento

O cimento utilizado nos grupos 1 e 2 foi cimento Portland de alta resistência inicial, o CP V – ARI – PLUS da Cimentos Nacionais de Minas S.A. – CIMINAS. Este cimento tem como características relativas, à finura, um resíduo na peneira número 200 de 1%, e uma superfície específica de Blaine de, aproximadamente, $400 \text{ m}^2/\text{kg}$.

4.2.1.2 Silica Ativa

A Silica Ativa empregada no concreto do Grupo 2 foi a SILMIX, produzida pela Camargo Corrêa Metais e distribuída pela Cimento Eldorado S.A.

As características físicas da sílica ativa são:

- a) massa específica de 2200 kg/m^3 ;
- b) massa unitária de 360 kg/m^3 ;
- c) superfície específica de $2000 \text{ m}^2/\text{kg}$; e
- d) partículas em formato esférico com diâmetro médio de $20 \mu\text{m}$.

4.2.1.3 Agregados

O agregado graúdo, pedra britada nº 1, utilizado no preparo do concreto foi constituído por pedra britada de origem basáltica, com dimensão máxima característica DMC = 19 mm e um módulo de finura MF = 6,82 mm. O agregado graúdo, pedrisco, foi constituído por brita de origem basáltica, com dimensão máxima característica DMC = 6,3 mm.

O agregado miúdo utilizado foi constituído por areia fina com diâmetro máximo de 2,4 mm e módulo de finura MF = 2,14 mm.

4.2.1.4 Aditivos

Foi utilizado superplastificante à base de melamina ADIMENT, da OTTO BAUMGART S.A.

4.2.2 Armaduras

As barras de aço utilizadas nos ensaios, tanto da armadura longitudinal como da armadura transversal, tiveram amostras de seu lote ensaiadas à tração no laboratório. A Tabela 4.2 apresenta as características, sendo a armadura longitudinal composta por barras de aço de

12,5 mm e 16 mm de diâmetro e a armadura transversal por barras de aço de 4,2 mm e 5,0 mm de diâmetro.

TABELA 4.2 – Propriedades do aço

Diâmetro (mm)	Grupo	Resistência de escoamento f_y (MPa)	Módulo de deformação (MPa)	Deformação de escoamento ϵ_y (‰)	Tipo de Aço
12,5	G1	602,8	207.600	2,90	CA-50
5,0	G1	773,8	204.700	5,80	CA-60
16,0	G2	539,2	205.200	2,60	CA-50
4,2	G2	799,2	207.800	5,90	CA-60

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam a distribuição das armaduras longitudinal e transversal das vigas dos grupos 1 e 2, respectivamente.

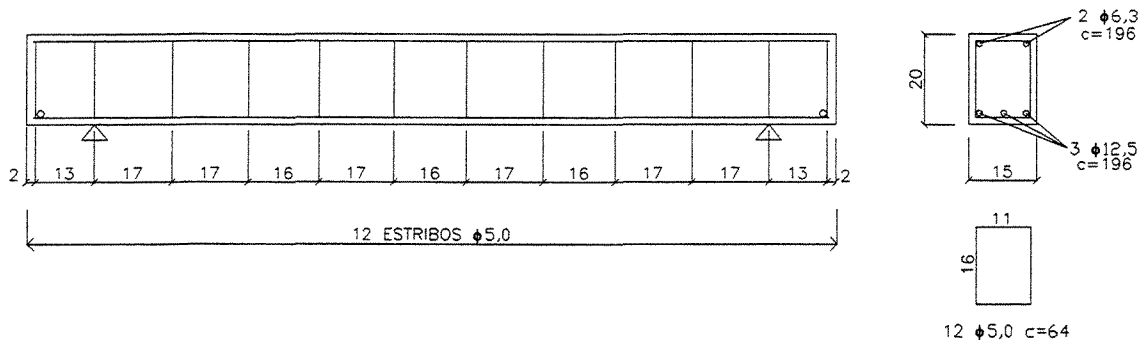


FIGURA 4.8 – Armadura das vigas do Grupo 1

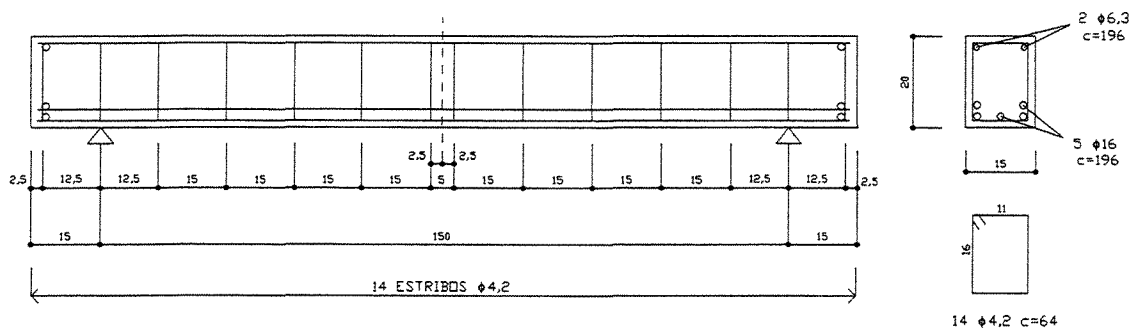


FIGURA 4.9 – Armadura das vigas do Grupo 2

4.2.3 Manta de fibra de carbono utilizada no compósito de PRFC

Para caracterização do sistema de reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono pré-impregnadas, foram seguidos os parâmetros estabelecidos pelas normas ASTM/C 881 e ASTM/D 3039. As características gerais e de cálculo da manta de fibra de carbono estão descritas na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Propriedades da manta de PRFC¹

Propriedade	Unidade	Csheet240
Resistência máxima à tração	MPa	3.900
Alongamento último de ruptura	%	1,55
Espessura para dimensionamento	mm	0,117
Mód. de deform. longitudinal	GPa	240
Deformação máx. projeto	%	0,4-0,8
Alinhamento das fibras	-	Unidir.
Peso da manta	G/m ²	200
Espessura final (1 camada)	mm	0,4
Fração de fibra por volume	%	20-30
Densidade da fibra	(g/cm ³)	1,7
Seção transversal para projeto	mm ²	117
Força a tração	kN	90
Alongamento limite das fibras	%	0,1

(Fonte: S&P CLEVER REINFORCEMENT, 1998)

¹ segundo o fabricante

4.2.4 Resina Epóxi

Este produto consiste em uma resina epóxi poliamina, de baixa viscosidade, sem solventes, cuja tecnologia permite cura a baixas temperaturas (2° C), sendo tolerante a superfícies úmidas. A resina epóxi possui excelente resistência a bases, ácidos diluídos, soluções salinas,

óleos lubrificantes, óleos carburantes e óleos minerais.

Esta resina epóxi tem a finalidade de tamponamento dos poros da superfície do substrato e resulta em alta resistência de aderência e fortalecimento do sistema a ser usado, entre a manta de fibra de carbono e o substrato.

A proporção da mistura é de 0,70 da mistura A para 0,30 da mistura B, em massa. As características da resina de tamponamento estão descritas na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Propriedades da resina de tamponamento¹

Característica	Unidade	Valor
Viscosidade	S	65
Sólidos por volume	%	100
Vida útil da mistura	min	15
Cura total	dia	7
Módulo de elasticidade	MPa	724,8
Resistência à compressão	MPa	45

(Fonte: REAX INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, 1998)

¹ segundo o fabricante

4.2.5 Massa Epóxi

A massa epóxi é um produto de dois componentes, sem solventes, especialmente formulado para reparos em concreto, por meio da aplicação de sistemas de reforço com fibra de carbono.

A massa epóxi é utilizada para nivelar a superfície de concreto com pequenas irregularidades, para receber, posteriormente, a fibra de carbono.

A proporção para preparo é de 0,75 da mistura A para 0,25 da mistura B, em massa. As características da massa epóxi estão descritas na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 – Características da massa epóxi¹

Característica	Unidade	Valor
Sólidos por volume	%	98±2
Vida útil da mistura	H	1
Espessura	mm	1 a 2
Alongamento à ruptura	%	1,6
Ponto de fulgor	°C	93
Resistência à compressão	MPa	80

(Fonte: REAX INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, 1998)

¹ segundo o fabricante

4.2.6 Resina de impregnação

A resina de impregnação é um produto de dois componentes formulados com emudecedor de amina, transparente e livre de solventes. Apresenta excelente resistência a bases, ácidos diluídos, soluções salinas, óleos minerais, além de ótima resistência ao intemperismo e ao amarelamento.

De acordo com o fabricante, por apresentar alto poder de umectabilidade, o produto pode ser utilizado como composto saturante sobre a manta de fibra de carbono.

A proporção para preparo é de 0,70 da mistura A para 0,30 da mistura B, em massa. As características da resina de impregnação estão descritas na Tabela 4.6.

TABELA 4.6 – Propriedades da resina de impregnação¹

Característica	Unidade	Valor
Ponto de fulgor	°C	72
Viscosidade	s	60
Sólidos por volume	%	100
Cura total	dia	7
Resistência a compr. aos 7 dias	MPa	44
Alongamento na ruptura	mm/mm	0,2903
Vida útil da mistura	min	20

(Fonte: REAX INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, 1998)

¹ segundo o fabricante

4.3 METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DA MANTA DE PRFC

De forma a garantir a eficiência do método de reforço com manta de PRFC coladas externamente em vigas de concreto, alguns procedimentos de preparo do substrato (concreto) e de aplicação das resinas, antes e após a aplicação da manta de fibra de carbono, devem ser obedecidos.

Estes procedimentos consistem em:

- regularização das imperfeições da superfície do concreto por meio de hidrojateamento ou lixamento;
- limpeza da superfície do concreto com a utilização de um solvente;
- tamponamento dos poros, por meio da aplicação da resina epóxi de baixa viscosidade, utilizando um rolo de pêlo curto, ou trincha (Foto 4.3¹)²;
- aplicação da massa epóxi para a regularização da superfície, utilizando uma espátula, desempenadeira ou colher de pedreiro (Foto 4.4)²;
- aplicação da resina epóxi de impregnação, utilizando um rolo de pêlo curto, ou trincha (Foto 4.5);

¹ Nas vigas V1G2, V2G2 e V3G2 não foi aplicada a resina para o tamponamento dos poros. No concreto de alta resistência, verificou-se uma boa aderência da fibra à superfície de concreto, sem a aplicação desta camada de resina.

- f) colocação da manta de fibra de carbono sobre a camada de impregnação e aplicação de um rolo pesado sobre a manta, de maneira que eventuais bolhas de ar sejam eliminadas;
- g) aplicação da segunda camada de resina epóxi de impregnação sobre a manta (Foto 4.6); e
- h) retirada do excesso de resina, utilizando um rodo de borracha.

Quando a manta for aplicada nas arestas da viga, é necessário arredondar as arestas com raio mínimo de 10 mm, como mostra a Foto 4.7.

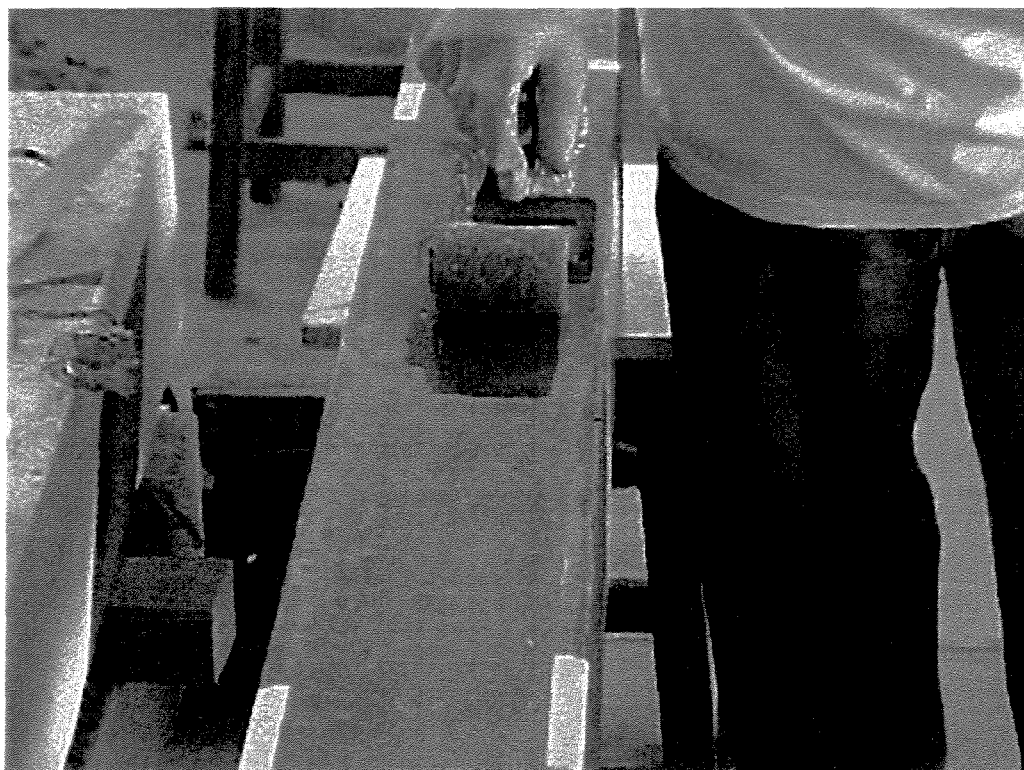


FOTO 4.3

Aplicação da resina epóxi

² Esta aplicação não deve ser feita com a umidade relativa do ar acima de 85%.



FOTO 4.4

Aplicação da massa epóxi

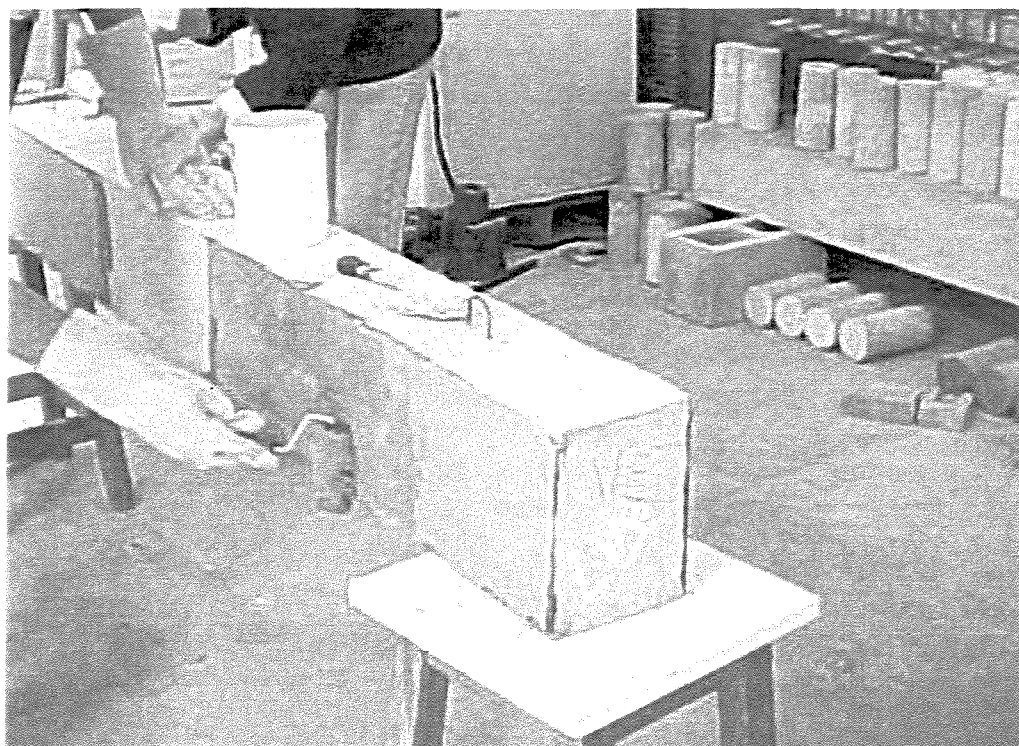


FOTO 4.5

Aplicação de resina de impregnação antes da colocação da manta

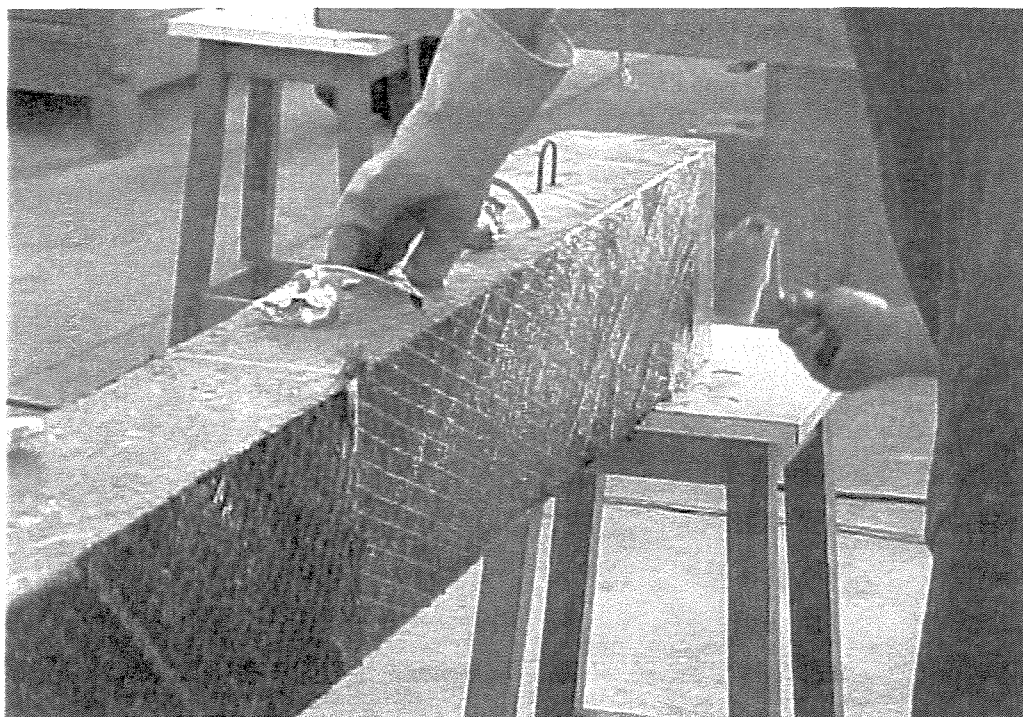


FOTO 4.6

Aplicação de resina de impregnação sobre a manta

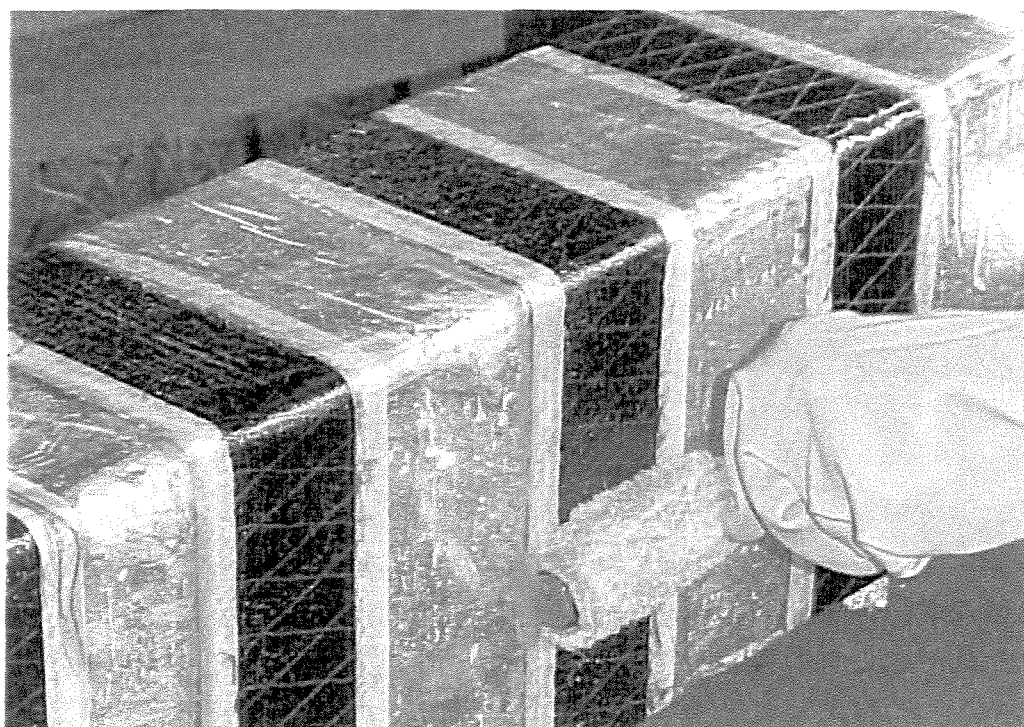


FOTO 4.7

Detalhe do arredondamento das arestas

4.4 INSTRUMENTAÇÃO

4.4.1 Deformação na armadura

Para medir as deformações das armaduras transversais e longitudinais, foram instalados extensômetros elétricos ligados a um aquisitor de dados. Foi adotada a letra L, acompanhada de um número, para denominar a posição dos extensômetros nas armaduras longitudinais, e a letra T, acompanhada de um número, para a posição dos extensômetros nas armaduras transversais. Os extensômetros foram colados nos estribos e nas armaduras longitudinais nas posições que seriam mais solicitadas durante o ensaio. A posição dos extensômetros nas armaduras transversais e longitudinais das vigas VTG1, V1G1 e V2G1 estão indicadas nas Figuras 4.10 e 4.11, e nas vigas VTG2, V1G2, V2G2 e V3G2, na Figura 4.12.

Para a aplicação dos extensômetros nas armaduras, foram feitos o lixamento da armadura, a limpeza com acetona¹ e a colagem do extensômetro com adesivo à base de éster de cianoacrilato. Após a colocação, os extensômetros foram protegidos com fita plástica a fim de proteger durante a concretagem.

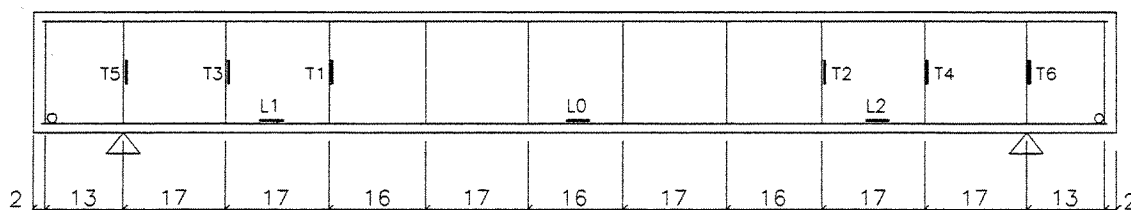


FIGURA 4.10 – Posição dos extensômetros na VTG1

¹ Na fase em que os ensaios foram realizados no laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, o uso da acetona era permitido.

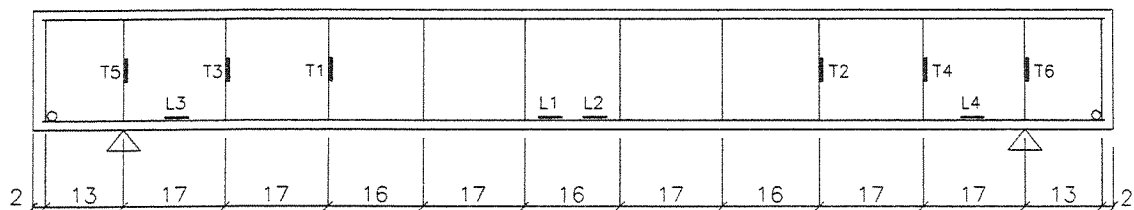


FIGURA 4.11 – Posição dos extensômetros na V1G1 e na V2G1

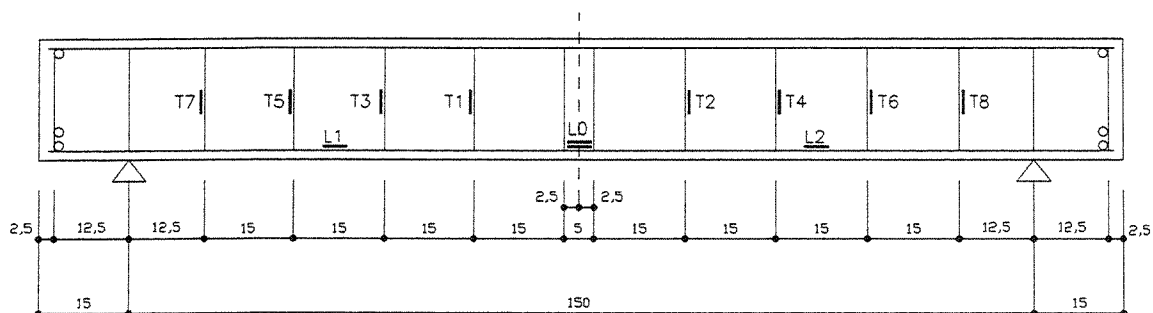


FIGURA 4.12 – Posição dos extensômetros nas vigas VTG2, V1G2, V2G2 e V3G2

4.4.2 Deformação no concreto

As medidas de deformação no concreto das vigas dos grupos 1 e 2 foram feitas por meio de extensômetros elétricos colados em dois pontos da viga, posicionados no meio do vão, a um centímetro da borda superior, como mostra a Foto 4.8.

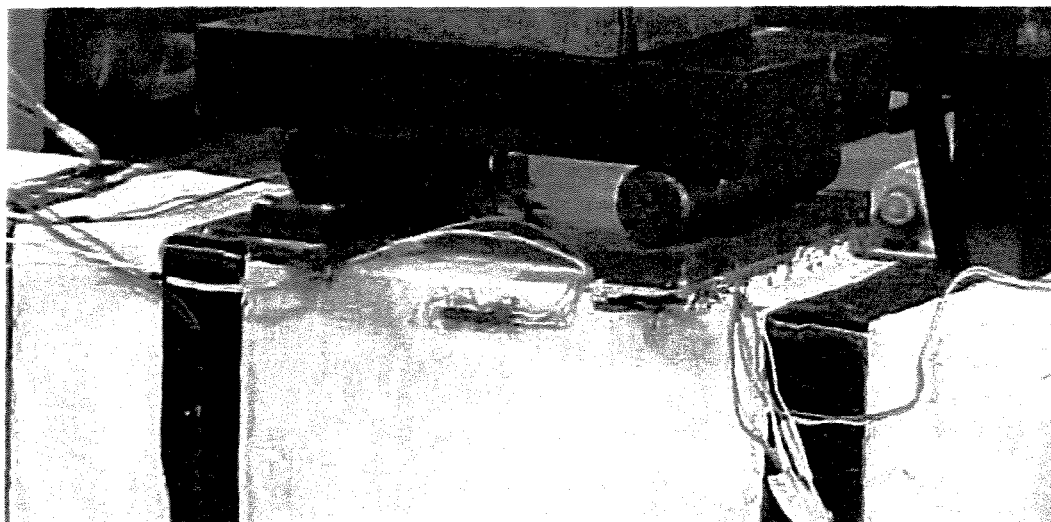


FOTO 4.8

Detalhe do extensômetro no concreto

4.4.3 Deslocamentos verticais

Para a leitura dos deslocamentos verticais, foi instalado um defletômetro mecânico na face inferior da viga, posicionado no meio do vão, de acordo com a Figura 4.13. O defletômetro mecânico de KAEFER, com curso de 50 mm e sensibilidade de 0,01 mm, está indicado na Foto 4.9.

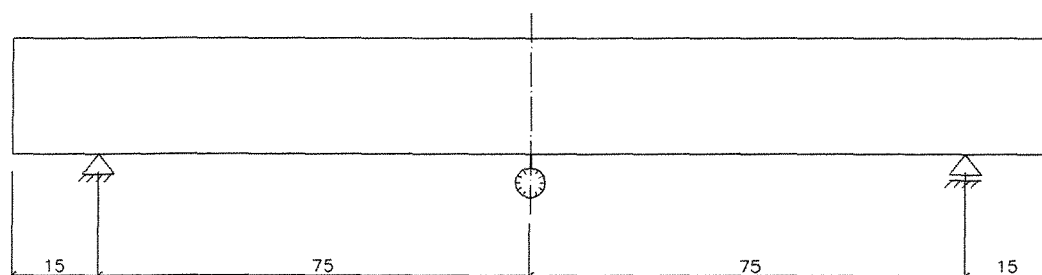


FIGURA 4.13 – Posição do defletômetro em todas as vigas

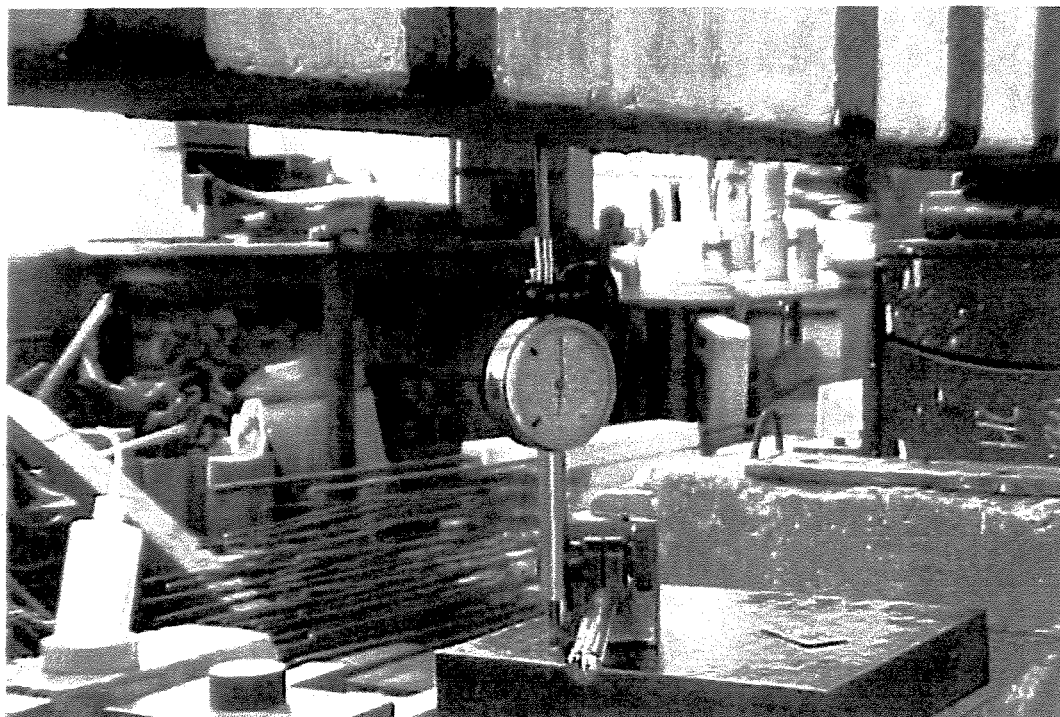


FOTO 4.9

Detalhe do defletômetro

4.4.4 Deformação na fibra

Para medir a deformação no compósito de PRFC, foram instalados extensômetros elétricos na mesma direção do alinhamento das fibras de carbono.

A viga V2G1, foi instrumentada na manta de PRFC de acordo com a Figura 4.14, por meio de extensômetros elétricos. Os extensômetros de numeração par (F2 a F8) foram colados do mesmo lado que os extensômetros T2, T4 e T6 (nos estribos). Analogamente, para os extensômetros de numeração ímpar, F1 a F7, no lado dos extensômetros T3 a T5.

Para a aplicação dos extensômetros sobre o PRFC foi feita a limpeza da superfície com acetona e em seguida, a colagem do extensômetro com adesivo à base de éster de cianocrilato.

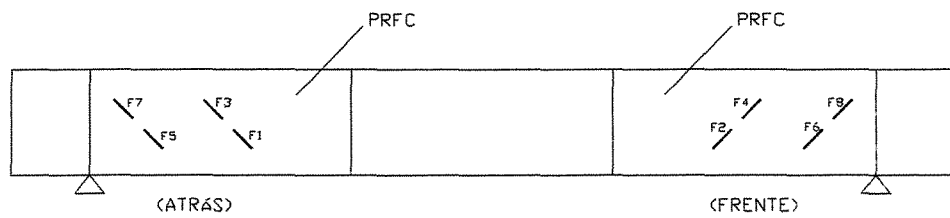


FIGURA 4.14 – Posição dos extensômetros no compósito de PRFC da viga V2G1

A Foto 4.10 mostra o detalhe do extensômetro colado sobre o compósito de PRFC na viga V2G1.

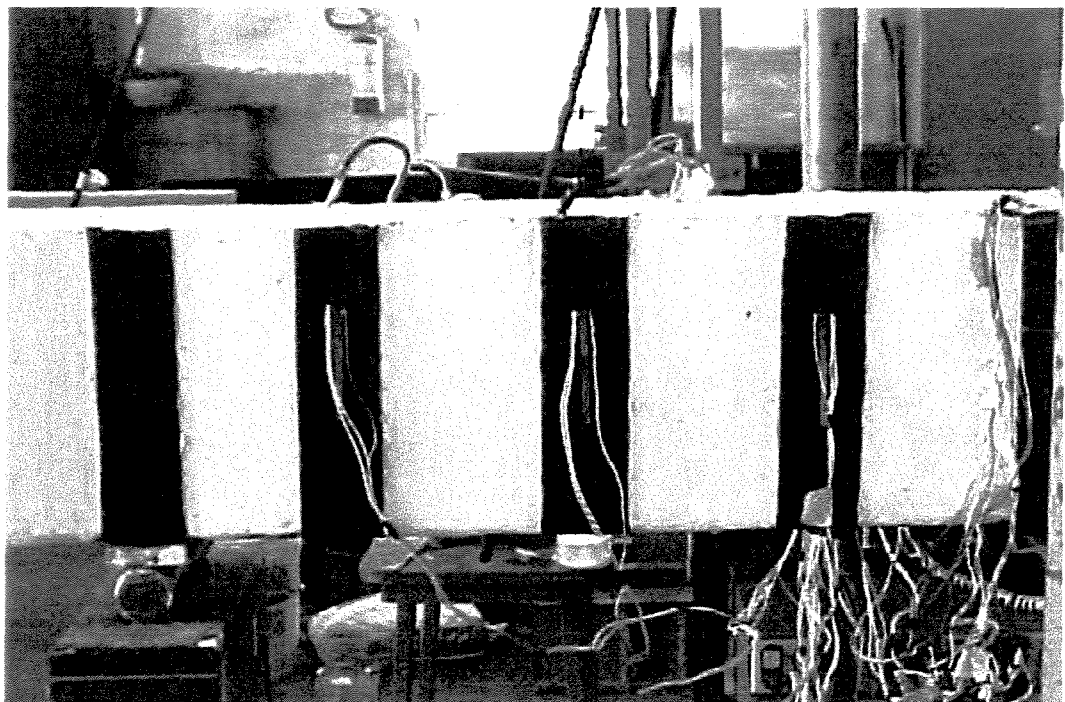


FOTO 4.10

Detalhe do extensômetro no compósito de PRFC

As vigas V1G2, V2G2 e V3G2 foram instrumentadas com extensômetros elétricos no compósito de PRFC de acordo com as Figuras 4.15 e 4.16, respectivamente. Os extensômetros de numeração par, F2 a F8, foram colados do mesmo lado que os extensômetros T2 a T8 (nos

estribos). Analogamente, para os extensômetros de numeração ímpar, F1 a F7, no lado dos extensômetros T3 a T7.

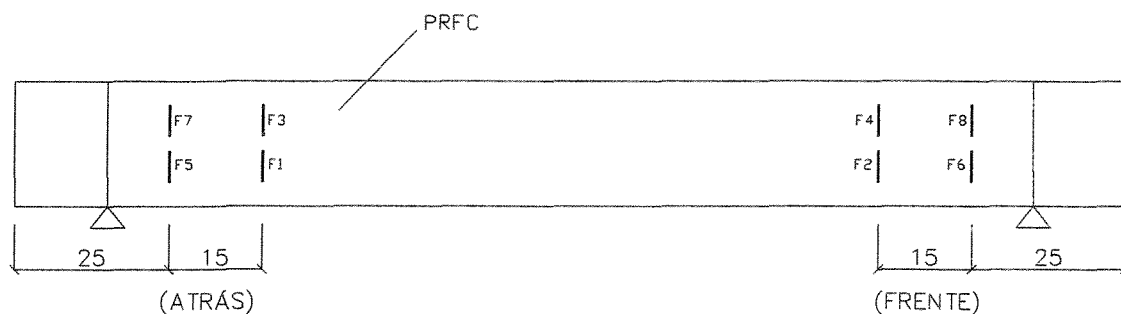


FIGURA 4.15 – Posição dos extensômetros no compósito de PRFC da viga V1G2

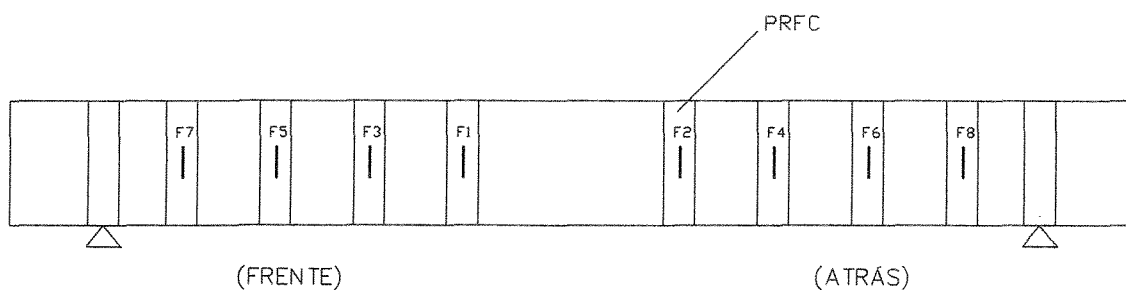


FIGURA 4.16 – Posição dos extensômetros no compósito de PRFC das vigas V2G2 e V3G2

4.5 ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Para determinar o valor da tensão máxima de descolamento do compósito de PRFC, foram realizados ensaios de arrancamento do compósito na superfície de concreto das vigas, na região onde não foi aplicado o reforço.

Para a realização deste ensaio, foram preparadas algumas amostras de PRFC na superfície de concreto das vigas do Grupo 2. Após a aplicação do compósito, foi colada uma chapa de aço em cada amostra, sobre o PRFC, com uma resina especial.

Após a secagem da resina, o compósito de PRFC foi recortado no contorno da chapa,

como pode ser observado na Foto 4.11, para a realização do ensaio de arrancamento do compósito apenas na região em contato com a chapa.

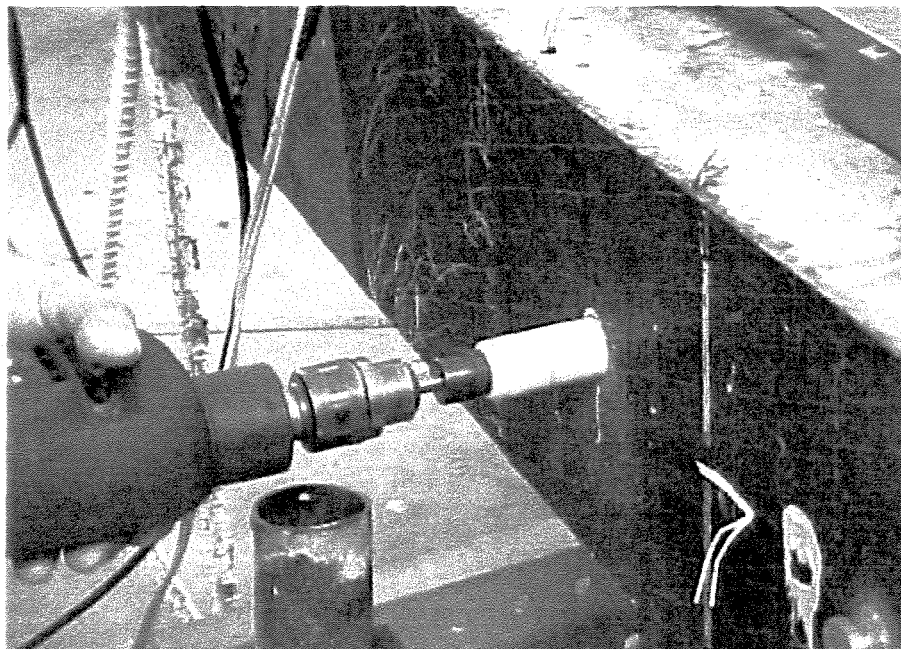


FOTO 4.11

Detalhe do recorte da chapa

O procedimento para aplicação do compósito em cada amostra foi feito de acordo com a metodologia de aplicação descrita no item 4.3.

A Foto 4.12 mostra o equipamento utilizado no ensaio de arrancamento.

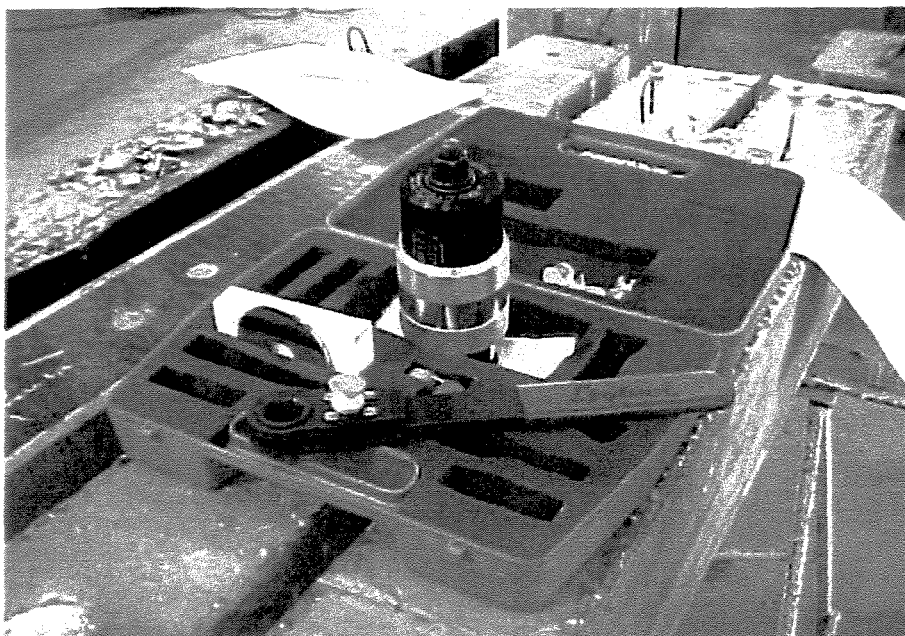


FOTO 4.12

Detalhe do equipamento

Na primeira amostra, a fibra de carbono foi colada utilizando-se a argamassa de regularização (Putty), a resina de impregnação (S) e a fibra de carbono (fibra). A Foto 4.13 apresenta a amostra 1.

Na segunda amostra, a fibra de carbono foi colada somente com a resina de impregnação e a fibra. A Foto 4.14 apresenta a amostra 2.

Na terceira amostra, a fibra de carbono foi colada utilizando-se a resina de tamponamento dos poros (Primer), a argamassa de regularização, a resina de impregnação e a fibra de carbono. A Foto 4.15 apresenta a amostra 3.

Na quarta amostra, a fibra de carbono foi colada utilizando-se a resina de tamponamento dos poros, a resina de impregnação e a fibra de carbono. A Foto 4.16 apresenta a amostra 4.

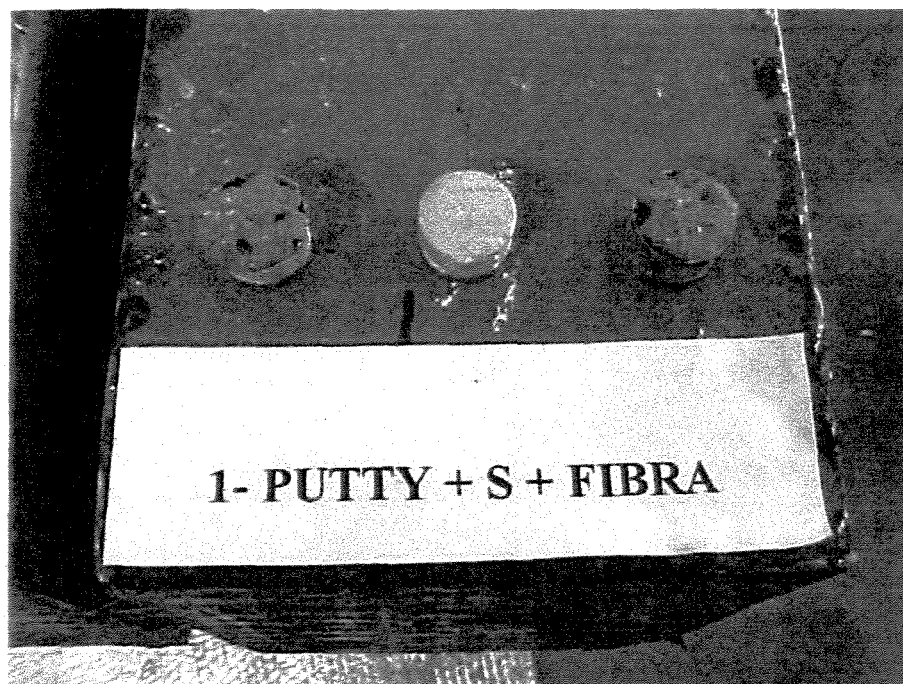


FOTO 4.13

Amostra 1 – Putty + Resina + Fibra

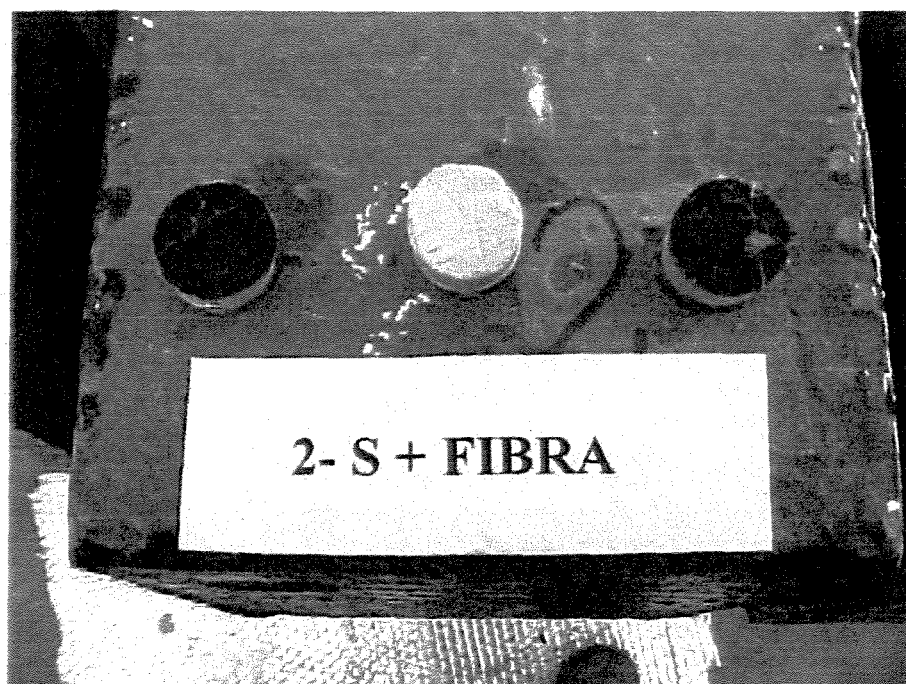


FOTO 4.14

Amostra 2 – Resina + Fibra

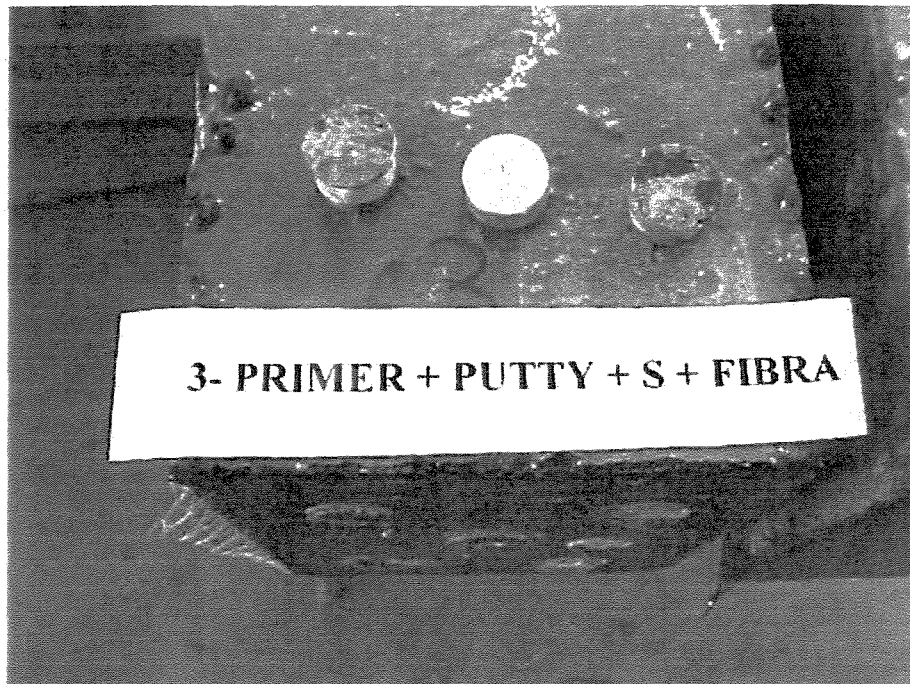


FOTO 4.15

Amostra 3 – Primer + Putty + Resina + Fibra

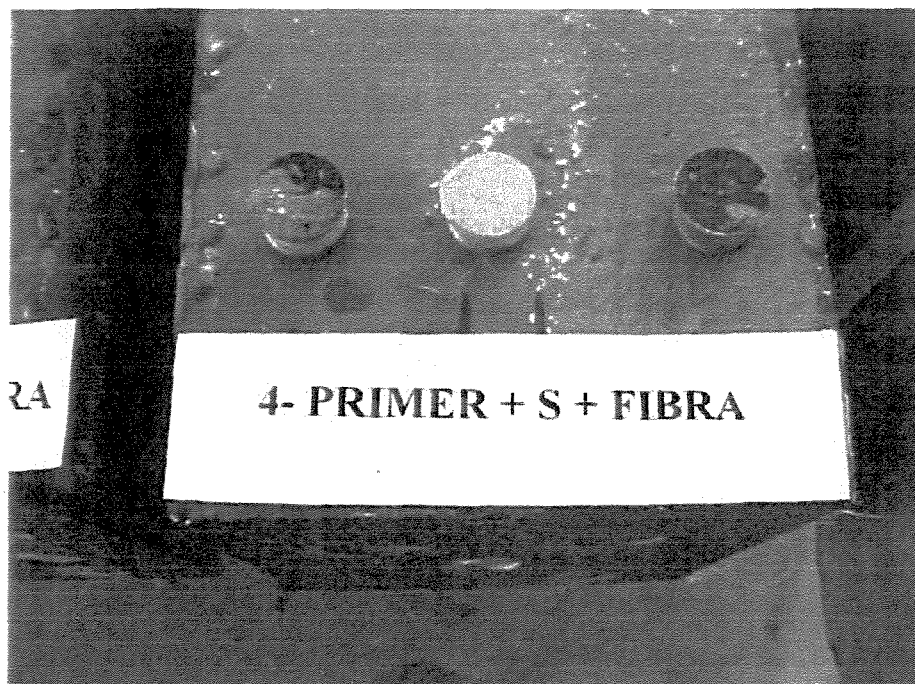


FOTO 4.16

Amostra 4 – Primer + Resina + Fibra

A Foto 4.17 mostra o equipamento durante o ensaio.

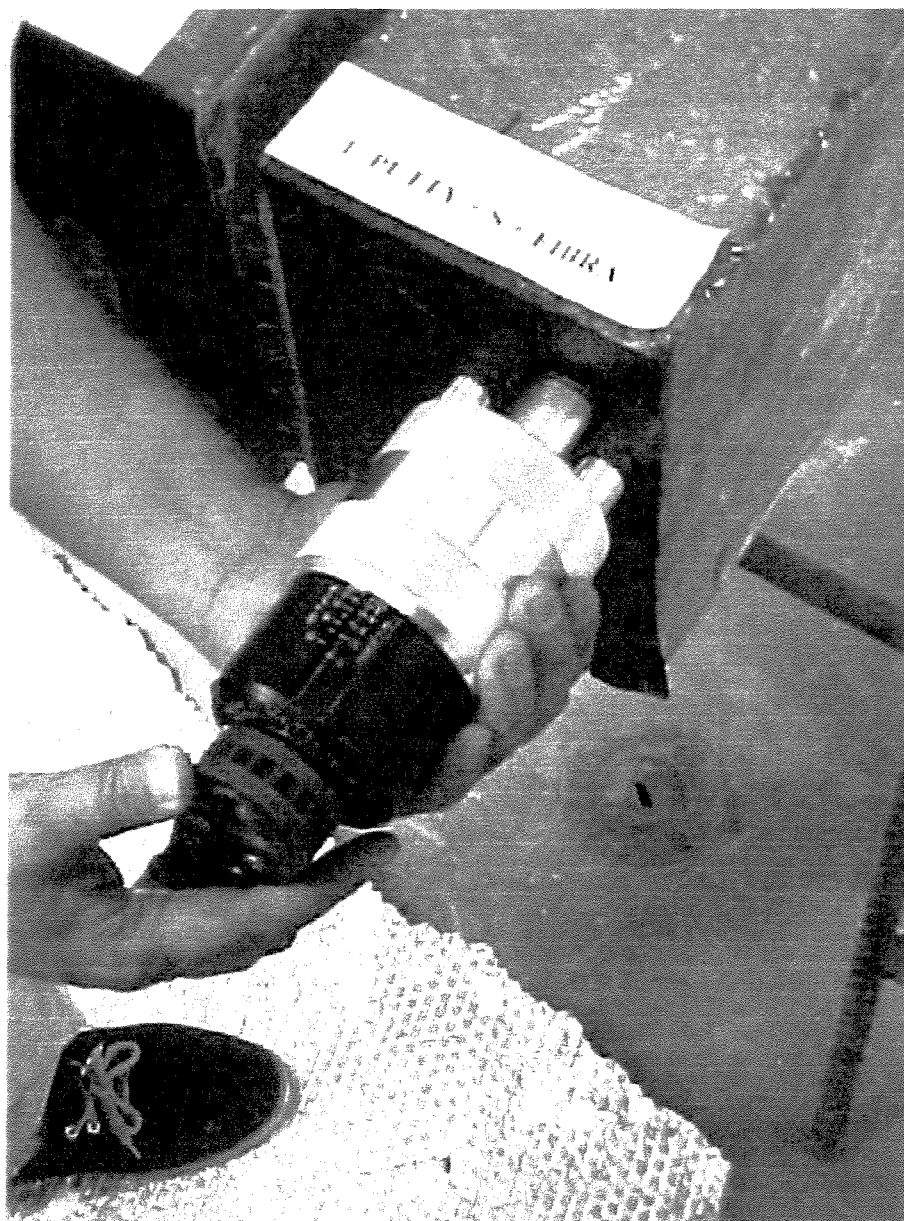


FOTO 4.17

Detalhe do equipamento durante o ensaio

A Tabela 4.7 apresenta a média dos valores obtidos nos ensaios, para cada amostra.

TABELA 4.7 – Valores médios da resistência de descolamento

Amostra	Descrição	Resistência de descolamento (MPa)
1	Putty + Resina + Fibra	3,50
2	Resina + Fibra	3,00
3	Primer + Putty + Resina + Fibra	3,75
4	Primer + Resina + Fibra	3,25

4.6 RESULTADOS TEÓRICOS PARA AS VIGAS REFORÇADAS

A seguir serão apresentados os valores dos resultados teóricos esperados para as vigas reforçadas e a demonstração do cálculo para determinar esses valores para cada viga, considerando as metodologias de cálculo apresentadas nos itens 3.2 e 3.3.

Os diferentes métodos de reforço à força cortante têm o objetivo de comparar o comportamento da fibra nas vigas reforçadas e do aço nas vigas testemunho. Para isso, a fim de analisar a diferença efetiva do comportamento ao cisalhamento, o valor da força cortante referente à soma das parcelas do concreto (V_c) e do aço (V_s), adotado no cálculo do valor de ruína teórico esperado para cada viga reforçada, foi o resultado obtido no ensaio da viga testemunho de cada grupo.

Ensaaiadas, as vigas testemunho, VTG1 e VTG2, alcançaram o Estado Limite Último por escoamento das barras da armadura transversal, como esperado, já que a área de armadura transversal foi adotada menor do que a indicada pelo dimensionamento. O esforço cortante de ruína obtido para estas vigas, correspondente ao início de escoamento da armadura transversal de cada viga, está apresentado nas tabelas 4.8 e 4.9.

O valor esperado para a parcela da força cortante atribuída ao PRFC, V_{PRFC} , resistido pela viga reforçada, deve ser calculado admitindo-se ruína por descolamento do compósito de PRFC e ruína da fibra. Os métodos de dimensionamento do reforço com PRFC apresentados nos itens 3.2 e 3.3 deste trabalho foram utilizados para a determinação destes dois valores, que estão apresentados nas tabelas 4.8 e 4.9.

O valor adotado para a força cortante teórico para a ruína de cada viga reforçada deve ser o menor valor encontrado, V_{PRFC} , entre o cálculo de ruína da fibra e ruína por descolamento, e somado à força cortante de ruína da viga testemunho correspondente, VTG1 ou VTG2.

4.6.1 Dimensionamento segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾

A seguir serão apresentados os cálculos utilizados para determinar o valor de V_{PRFC} para as vigas dos grupos 1 e 2, segundo a metodologia de cálculo apresentada no item 3.2.

Vale observar que, para o cálculo do V_{PRFC} , admitindo-se a ruína da fibra, o valor do alongamento último para a fibra foi adotado como o valor de alongamento correspondente ao início de escoamento da armadura transversal (estribo), isto é, 0,58% para as vigas do Grupo 1 e 0,59% para as vigas do Grupo 2.

Primeiramente, foi calculado o valor da resistência de descolamento, através das equações 3.13, 3.17 e 3.18, apresentadas no item 3.2 do Capítulo 3. De acordo com os resultados apresentados abaixo, pode-se observar que o valor obtido através das formulações é superior ao valor encontrado no ensaio de arrancamento, descrito no item 4.5. Portanto, para o cálculo da ruína por descolamento, o valor utilizado para a tensão de descolamento foi de $\tau_{máx}^{descol} = 3,00 \text{ .N/mm}^2$.

4.6.1.1 Resistência ao descolamento para as vigas V1G1, V2G1 e V1G2

Dados:

$$b_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$E_{PRFC} = 240000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_a = 724,80 \text{ N/mm}^2$$

$$b_a = 170 \text{ mm}$$

$$t_a = 0,1415 \text{ mm}$$

$$I_{PRFC} = \frac{b_{PRFC} \times t_{PRFC}^3}{12} = \frac{170 \times 0,117^3}{12} = 0,02269 \text{ mm}^4$$

$$k_n = 724,80 \times \frac{170}{0,1415} = 870784,45$$

$$k_1 = 0,117 \times \left[\frac{870784,45}{4 \times 240000 \times 0,02269} \right]^{1/4}$$

$$k_1 = 0,2942$$

$$\tau_{m\acute{a}x}^{descol} = \frac{5,4}{1 + 0,2942 \times \tan 33^\circ}$$

$$\tau_{m\acute{a}x}^{descol} = 4,53 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Valor adotado: } \tau_{m\acute{a}x}^{descol} = 3,00 \text{ N/mm}^2$$

4.6.1.2 Resistência ao descolamento para as vigas V2G2 e V3G2

Dados:

$$b_{PRFC} = 50 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$E_{PRFC} = 240000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_a = 724,80 \text{ N/mm}^2$$

$$b_a = 50 \text{ mm}$$

$$t_a = 0,1415 \text{ mm}$$

$$I_{PRFC} = \frac{b_{PRFC} \times t_{PRFC}^3}{12} = \frac{50 \times 0,117^3}{12} = 0,006673 \text{ mm}^4$$

$$k_n = 724,80 \times \frac{50}{0,1415} = 256113,07$$

$$k_1 = 0,117 \times \left[\frac{256113,07}{4 \times 240000 \times 0,006673} \right]^{1/4}$$

$$k_1 = 0,2942$$

$$\tau_{m\acute{a}x}^{descol} = \frac{5,4}{1 + 0,2942 \times \tan 33^\circ}$$

$$\tau_{m\acute{a}x}^{descol} = 4,53 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Valor adotado: } \tau_{m\acute{a}x}^{descol} = 3,00 \text{ N/mm}^2$$

4.6.1.3 V_R para a viga V1G1

Dados:

$$b_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

Ruína da fibra:

$$V_{PRFC} = 170 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,58}{100} \times 240000 \times (\sin 90 + \cos 90) = 55000 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 55 \text{ kN}$$

$$V_c + V_s = 47,5 \text{ kN}$$

$$V_R = 47,5 + 55 = 102,5 \text{ kN}$$

Descolamento:

$$V_{PRFC} = 2 \times \left[\frac{3,00}{2} \times \left(\frac{170 \times 170}{2} \right) \times (\sin 90 + \cos 90) \right] = 43350 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 43,4 \text{ kN}$$

$$V_C + V_S = 47,5 \text{ kN}$$

$$V_R = 47,5 + 43,4 = 90,9 \text{ kN}$$

Portanto, neste caso, a ruína ao cisalhamento esperada é por descolamento.

4.6.1.4 V_R para a viga V2G1

Dados:

$$b_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

Ruína da fibra:

$$V_{PRFC} = 170 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,58}{100} \times 240000 \times (\sin 45 + \cos 45) = 78000 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 78 \text{ kN}$$

$$V_R = V_C + V_S + V_{PRFC}$$

$$V_C + V_S = 47,5 \text{ kN}$$

$$V_R = 47,5 + 78 = 125,5 \text{ kN}$$

Descolamento:

$$V_{PRFC} = 2 \times \left[\frac{3,00}{2} \times \left(\frac{170 \times 170}{2} \right) \times (\sin 45 + \cos 45) \right] = 61306 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 61,3 \text{ kN}$$

$$V_C + V_S = 47,5 \text{ kN}$$

$$V_R = 47,5 + 61,3 = 108,8 \text{ kN}$$

Neste caso, a ruína ao cisalhamento esperada é por descolamento.

4.6.1.5 V_R para a viga V1G2

Dados:

$$b_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

Ruína da fibra:

$$V_{PRFC} = 170 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,59}{100} \times 240000 \times (\sin 90 + \cos 90) = 56000 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 56 \text{ kN}$$

$$V_C + V_S = 75 \text{ kN}$$

$$V_R = 75 + 56 = 131 \text{ kN}$$

Descolamento:

$$V_{PRFC} = 2 \times \left[\frac{3,00}{2} \times \left(\frac{170 \times 170}{2} \right) \times (\sin 90 + \cos 90) \right] = 43350 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 43,4 \text{ kN}$$

$$V_C + V_S = 75 \text{ kN}$$

$$V_R = 75 + 43,4 = 118,4 \text{ kN}$$

Neste caso, a ruína ao cisalhamento esperada é por descolamento.

4.6.1.6 V_R para as vigas V2G2 e V3G2

Dados:

$$b_{PRFC} = 50 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$d = 15 \text{ cm}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

Ruína da fibra:

$$V_{PRFC} = 50 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,59}{100} \times 240000 \times (\sin 90 + \cos 90) \times \frac{17}{15} = 19000 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 19 \text{ kN}$$

$$V_C + V_S = 75 \text{ kN}$$

$$V_R = 75 + 19 = 94 \text{ kN}$$

Descolamento:

$$V_{PRFC} = 2 \times \left[3,00 \times \left(\frac{50 \times 170}{2} \right) \times (\sin 90 + \cos 90) \right] \times \frac{17}{15} = 28900 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 28,9 \text{ kN}$$

$$V_C + V_S = 75 \text{ kN}$$

$$V_R = 75 + 28,9 = 103,9 \text{ kN}$$

Já neste caso, a ruína ao cisalhamento esperada é pela ruína da fibra.

4.6.2 Dimensionamento segundo ACI-440R-00 ⁽⁴⁾

O cálculo da parcela do compósito de PRFC para o reforço à força cortante foi obtido pela formulação apresentada no item 3.3 do Capítulo 3.

Para o cálculo da resistência à força cortante considerando a ruína da fibra, foi considerado um fator de redução parcial $\psi = 0,85$ para o reforço em folhas e tiras em “U”, e $\psi = 0,95$ para o reforço enlaçando por completo a viga.

Pode-se observar que os valores de V_R obtidos a seguir são inferiores quando comparados aos resultados esperados por Chaallal et al.⁽⁸⁾, visto que o ACI-440R-00⁽⁴⁾ limita o valor da deformação efetiva, ε_{fe} , em 0,40% para todos os casos, além dos coeficientes de redução aplicados no cálculo da parcela da fibra.

4.6.2.1 Cálculo da deformação efetiva para as vigas do Grupo 1

$$L_e = \left(\frac{2500}{(1 \times 0,0046 \times 34,80 \cdot 10^6)^{0,58}} \right) = 2,40 \text{ pol (6,10 mm)}$$

$$k_1 = \left(\frac{4351}{4000} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,0577$$

$$k_2 = \left(\frac{6,7 - 2,4}{6,7} \right) = 0,64$$

$$\varepsilon_{fe} = \frac{1,0577 \times 0,64 \times 2,40}{468} = 0,00347$$

4.6.2.2 Cálculo da deformação efetiva para as vigas do Grupo 2

$$L_e = \left(\frac{2500}{(1 \times 0,0046 \times 34,80 \cdot 10^6)^{0,58}} \right) = 2,40 \text{ pol (6,10 mm)}$$

$$k_1 = \left(\frac{13053,3}{4000} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,20$$

$$k_2 = \left(\frac{6,7 - 2,4}{6,7} \right) = 0,64$$

$$\varepsilon_{fe} = \frac{2,20 \times 0,64 \times 2,40}{468} = 0,0072 > 0,004$$

Valor adotado: $\varepsilon_{fe} = 0,004$.

4.6.2.3 V_R para a viga V1G1

Dados:

$$b_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$V_{PRFC} = 170 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,347}{100} \times 240000 \times (\sin 90 + \cos 90) \times \frac{170}{170} = 33128,8 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 33,13 \text{ kN}$$

4.6.2.4 V_R para a viga V2G1

Dados:

$$b_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$V_{PRFC} = 170 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,347}{100} \times 240000 \times (\sin 45 + \cos 45) \times \frac{170}{170} = 46851,18 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 46,85 \text{ kN}$$

4.6.2.5 V_R para a viga V1G2

Dados:

$$b_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$V_{PRFC} = 170 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,40}{100} \times 240000 \times (\text{sen } 90 + \cos 90) = 38188,8 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 38,2 \text{ kN}$$

4.6.2.6 V_R para as vigas V2G2 e V3G2

Dados:

$$b_{PRFC} = 50 \text{ mm}$$

$$h_{PRFC} = 170 \text{ mm}$$

$$t_{PRFC} = 0,117 \text{ mm}$$

$$d = 15 \text{ cm}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$V_{PRFC} = 50 \times 0,117 \times 2 \times \frac{0,40}{100} \times 240000 \times (\text{sen } 90 + \cos 90) \times \frac{170}{150} = 12729,60 \text{ N}$$

$$V_{PRFC} = 12,7 \text{ kN}$$

4.6.3 Resultados teóricos

Nas Tabelas 4.8 e 4.9 estão apresentados os valores teóricos para cada viga reforçada segundo o dimensionamento proposto por Chaallal et al.⁽⁸⁾ e ACI-440R-00⁽⁴⁾, respectivamente.

Para o cálculo de V_{PRFC} , segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾, o valor adotado para a deformação última da fibra foi igual ao valor de alongamento correspondente ao início do escoamento da armadura transversal.

Para o cálculo de V_{PRFC} , segundo o ACI-440R-00⁽⁴⁾, o valor adotado para a deformação efetiva foi calculado de acordo com o método proposto no Capítulo 3, limitando o valor 0,4%.

TABELA 4.8 – Resultados teóricos segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾

VIGA	Tipo de reforço	$V_c + V_s$ ^(a) (kN)	$V_{PRFC, RF}$ (kN)	$V_{PRFC, descol.}$ (kN)	V_U (kN)	Modo de Ruína
VTG 1	Sem reforço	47,50	-	-	47,5	Força cortante
V1G1	Folhas 90°	47,50	55,0	43,40	90,9	Descolamento
V2G1	Folhas 45°	47,50	78,0	61,30	108,8	Descolamento
VTG 2	Sem reforço	75,00	-	-	75,0	Força cortante
V1G2	Folhas 90°	75,00	56,0	43,40	118,4	Descolamento
V2G2	Tiras "U"	75,00	19,0	28,90	94,0	Ruína da fibra
V3G2	Tiras "0"	75,00	19,0	28,90	94,0	Ruína da fibra

^(a) A soma das parcelas V_c e V_s refere-se aos valores obtidos nos ensaios das vigas testemunhos.

TABELA 4.9 – Resultados teóricos segundo ACI-440R-00⁽⁴⁾

VIGA	Tipo de reforço	$V_c + V_s^{(a)}$ (kN)	$V_{PRFC, RF}$ (kN)	ϵ_{fe} (%)	ϕ	V_U (kN)	Modo de Ruína
VTG1	Sem reforço	47,50	-	-	-	47,50	Força cortante
V1G1	Folhas 90°	47,50	33,13	0,35	0,85	75,66	Descolamento
V2G1	Folhas 45°	47,50	46,85	0,35	0,85	87,32	Descolamento
VTG2	Sem reforço	75,00	-	-	-	75,00	Força cortante
V1G2	Folhas 90°	75,00	38,20	0,40 ^(b)	0,85	107,47	Descolamento
V2G2	Tiras "U"	75,00	12,78	0,40 ^(b)	0,85	85,86	Descolamento
V3G2	Tiras "O"	75,00	12,78	0,40 ^(b)	0,95	87,14	Descolamento

^(a) A soma das parcelas V_c e V_s refere-se aos valores obtidos nos ensaios das vigas testemunhos.

^(b) 0,40% corresponde ao valor adotado, visto que este valor é limitado pelo ACI, sendo o valor calculado de 0,72%.

5 RESULTADO EXPERIMENTAIS

Os resultados referentes ao comportamento das vigas dos grupos 1 e 2, obtidos nos ensaios, estão indicados na Tabela 5.1.

A resistência à compressão, f_c , foi obtida pela média da resistência à compressão de 2 corpos de prova (para cada viga ensaiada) de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura, ensaiados no dia do ensaio da viga correspondente.

O valor de f_t corresponde à resistência à tração e foi obtido pela média da resistência à tração dos ensaios de dois corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

O valor de E_c apresentado na Tabela 5.1 corresponde ao módulo de deformação longitudinal secante do concreto, onde foram utilizadas as tensões de 0,5 MPa e 40% da força última, para as vigas do Grupo 1, e 50% da força última para as vigas do Grupo 2.

O valor de $V_{RUPTURA}$ corresponde ao valor da força cortante no apoio no instante da ruptura, $\epsilon_{s,longitudinal}$ e $\epsilon_{s,transversal}$ correspondem às deformações nas armaduras, longitudinal e transversal (estribos verticais), respectivamente. O valor de ϵ_{PRFC} corresponde à deformação no compósito de PRFC e o valor de ϵ_c corresponde à deformação máxima do concreto no banzo comprimido da viga.

TABELA 5.1 – Resultados dos ensaios das vigas

	VTG1	V1G1	V2G1	VTG2	V1G2	V2G2	V3G2
f_c (N/mm ²)	38,00	32,10	35,30	85,20	85,20	93,20	101,86
f_t (N/mm ²)	3,50	3,50	3,50	5,95	5,95	5,95	5,26
E_c (N/mm ²)	22,15	29,30	26,21	37,50	37,50	38,85	38,85
$V_{RUPTURA}$ (kN)	47,50	67,00	72,50	75,00	120,50	87,50	116,00
ϵ_c máxima (%)	2,40	1,80	1,72	1,13	3,42	1,79	2,14
$\epsilon_{s,longit.}$ máx. (%)	2,47	10,00	10,00	2,26	10,00	2,61	5,58
$\epsilon_{s,transv.}$ máx. (%)	5,80	1,08	0,85	5,90	2,83	3,59	4,58
ϵ_{PRFC} máx. (%)	-	(a)	2,49	-	1,58	3,45	4,67
Flecha máx. (mm)	5,51	9,75	15,00	7,98	12,40	7,38	7,17
Modo de ruptura	Força cortante	Flexão	Flexão	Força cortante	Flexão	Descolamento	Descolamento

(a) Os extensômetros colados no compósito de PRFC da viga V1G1 apresentaram problemas durante o ensaio.

5.1 COMPORTAMENTO DAS VIGAS DURANTE O ENSAIO

As fotos a seguir apresentam as vigas ensaiadas dos grupos 1 e 2 após a ruptura e as figuras com o panorama de fissuração das vigas reforçadas, com exceção da viga V1G2, que, pelo método de reforço aplicado, não foi possível ilustrar.

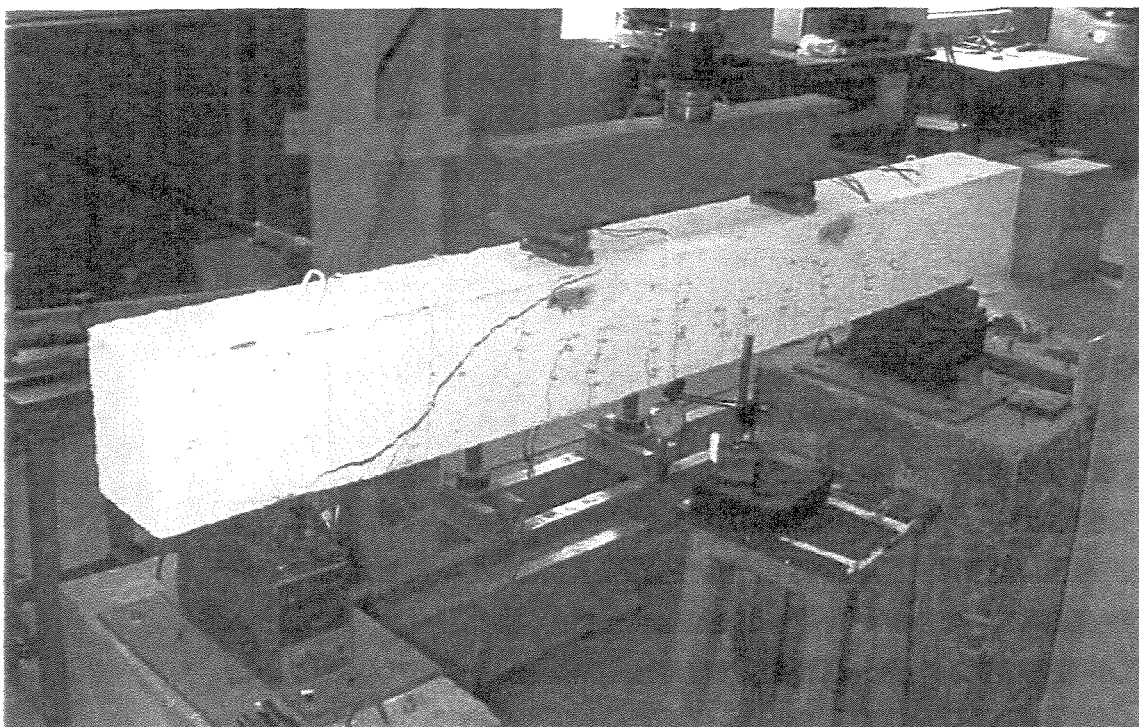


FOTO 5.1
Detalhe de Ruína da viga VTG1

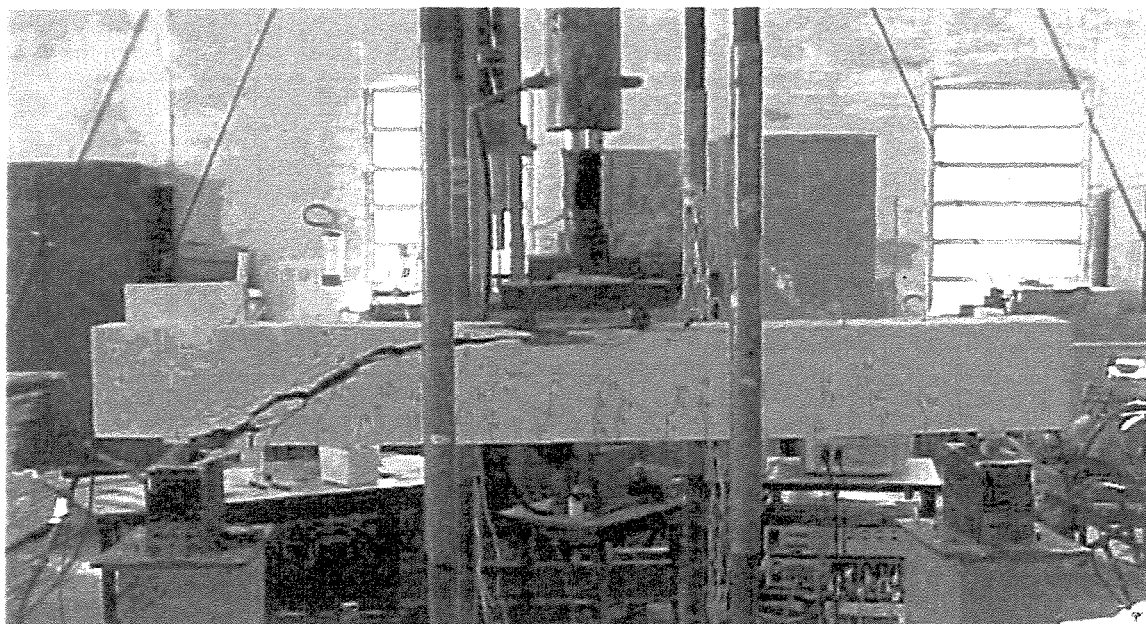


FOTO 5.2
Detalhe de Ruína da viga VTG2

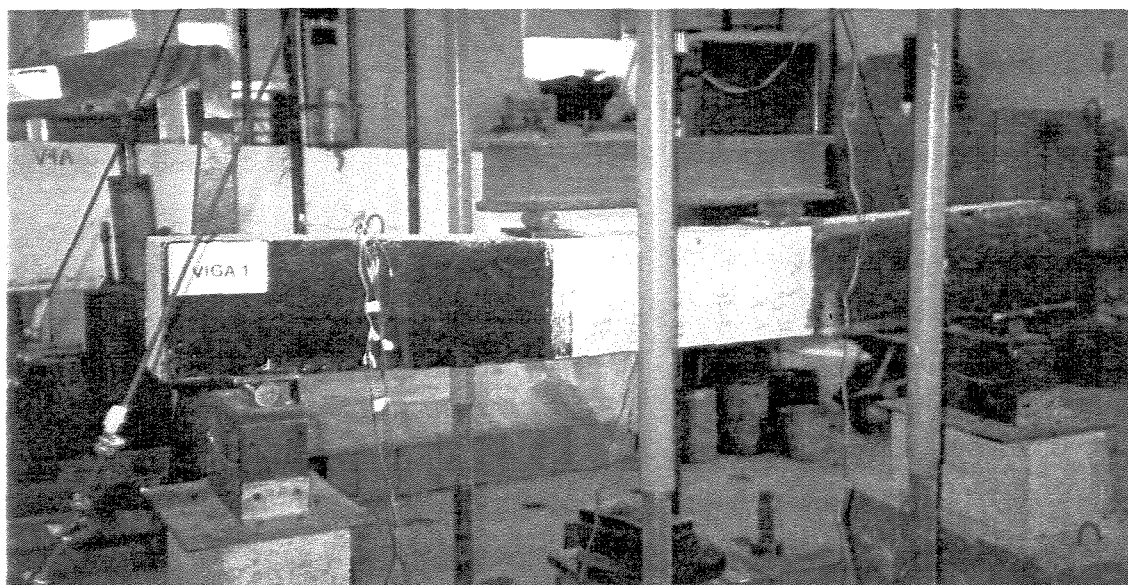


FOTO 5.3
Detalhe de Ruína da Viga V1G1



FOTO 5.4
Detalhe de Ruína da Viga V2G1

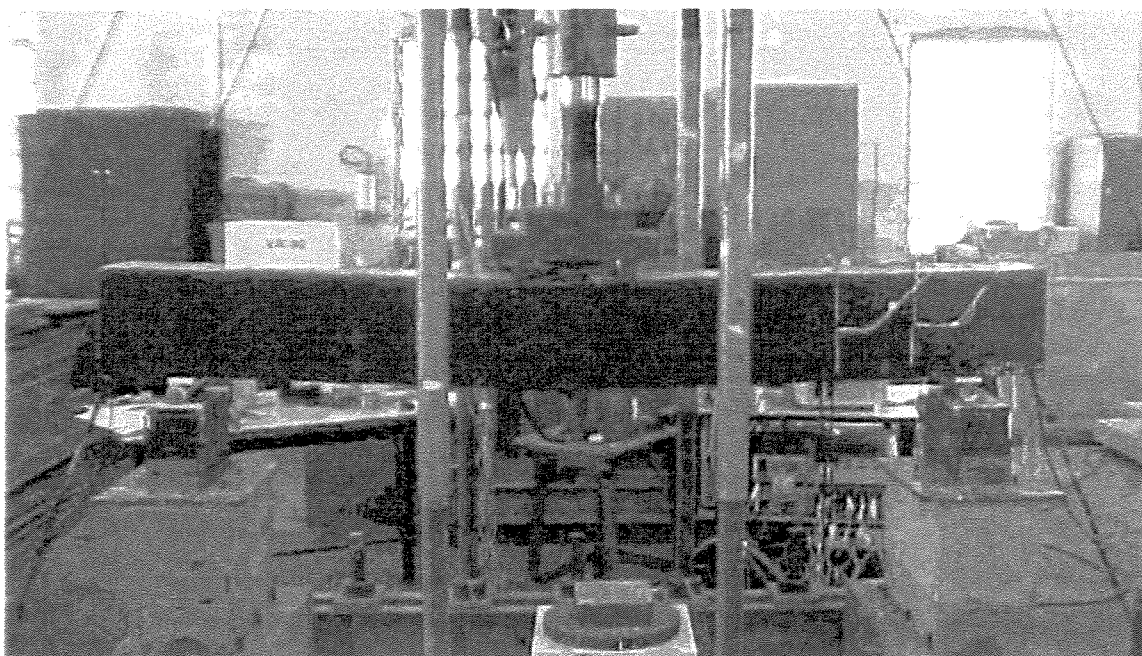


FOTO 5.5
Detalhe de Ruína da Viga V1G2

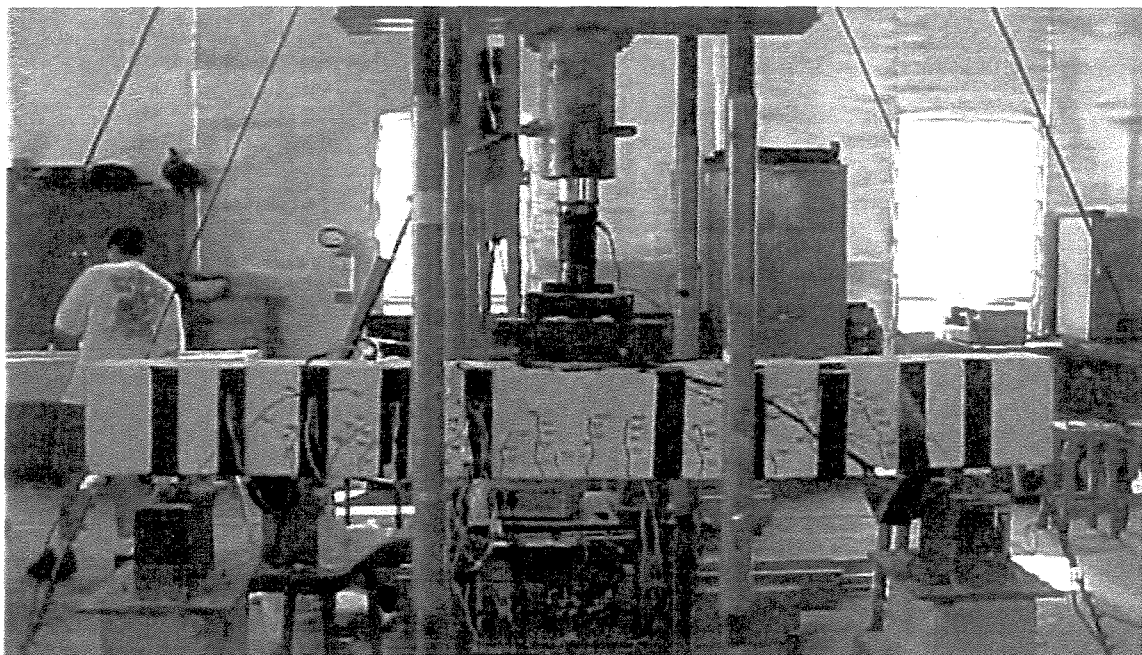


FOTO 5.6
Detalhe de Ruína da Viga V2G2

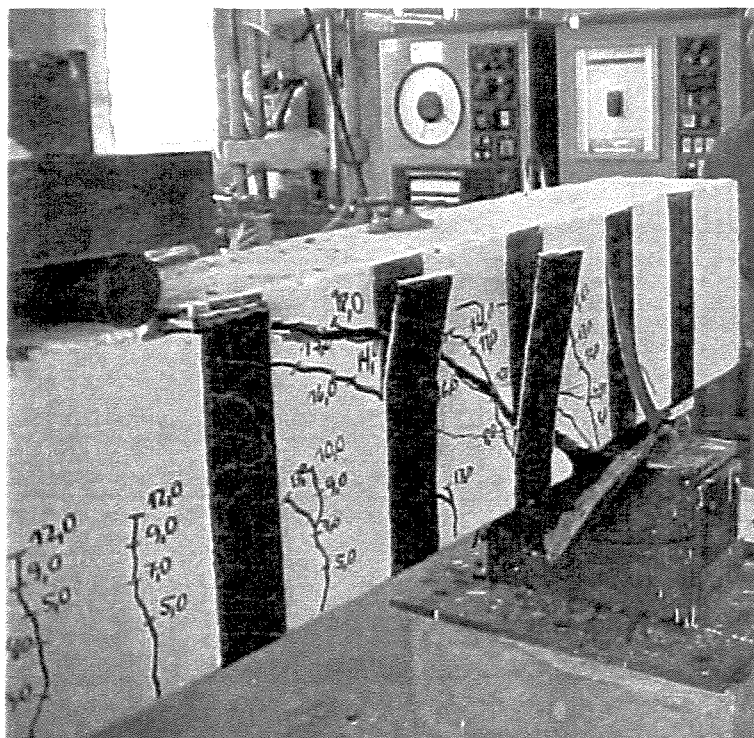


FOTO 5.7

Detalhe do descolamento do compósito de PRFC na viga V2G2

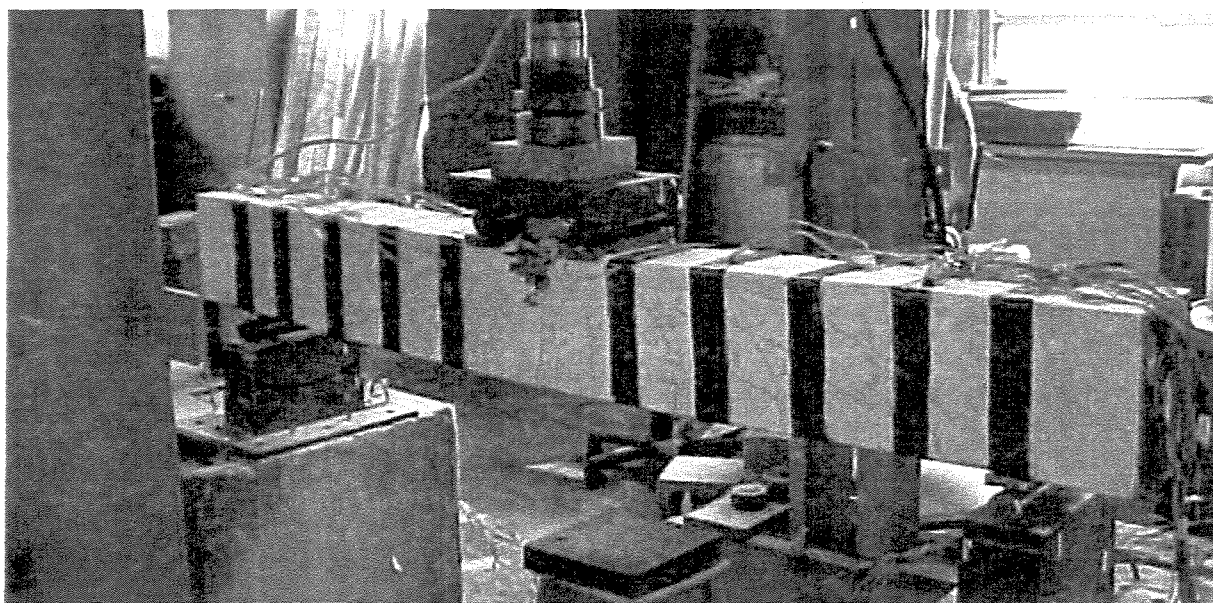


FOTO 5.8

Detalhe de ruína da viga V3G2

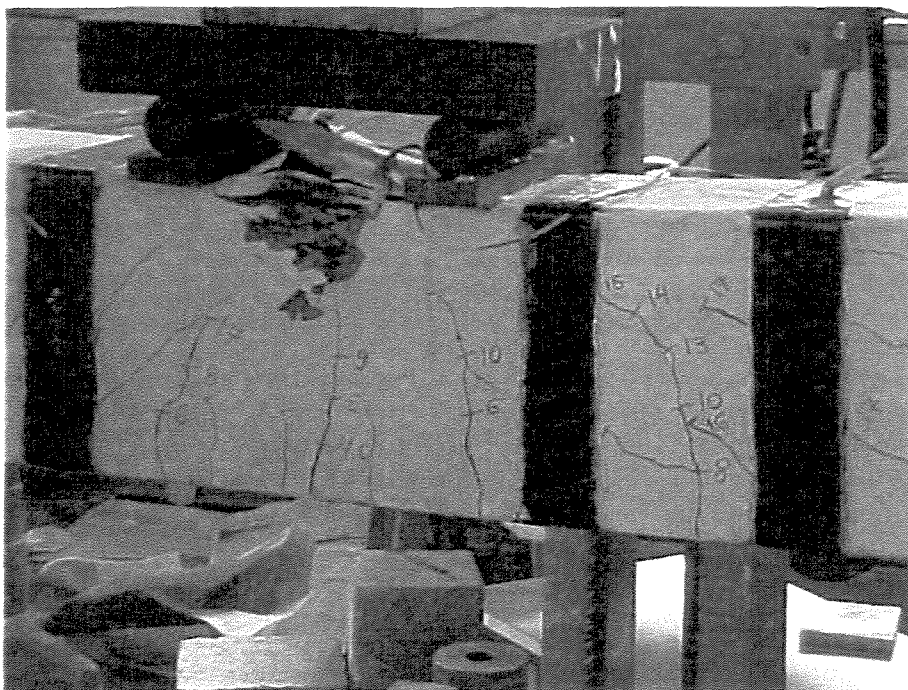


FOTO 5.9

Detalhe da ruptura do concreto na Viga V3G2

PANORAMA DE FISSURAÇÃO - V1G1

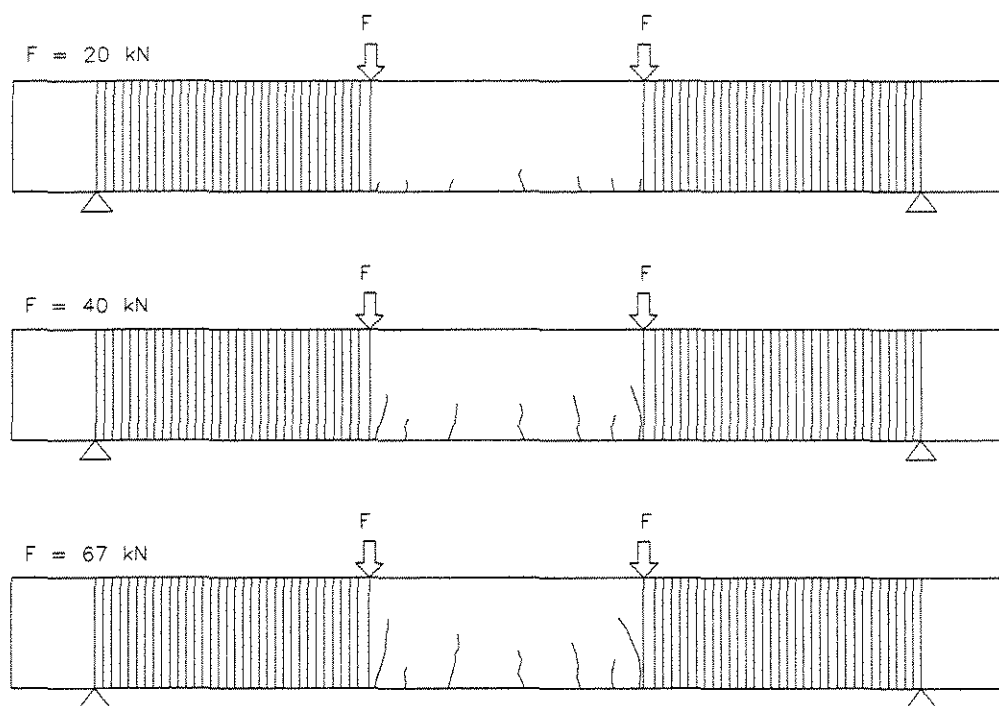


FIGURA 5.1 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V1G1

PANORAMA DE FISSURAÇÃO - V2G1

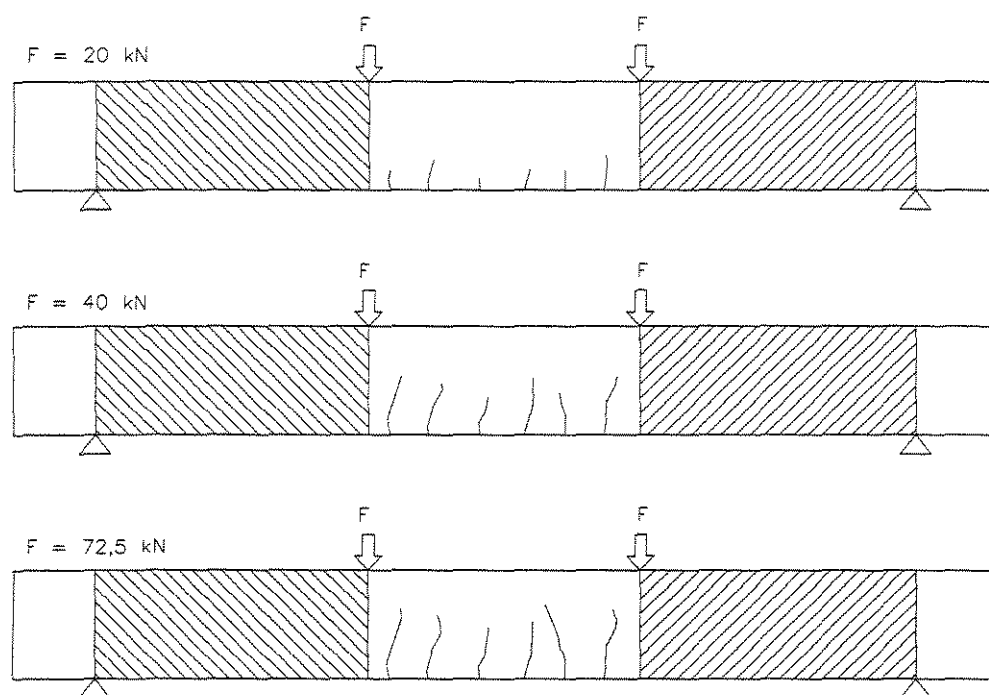


FIGURA 5.2 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V2G1

PANORAMA DE FISSURAÇÃO - V2G2

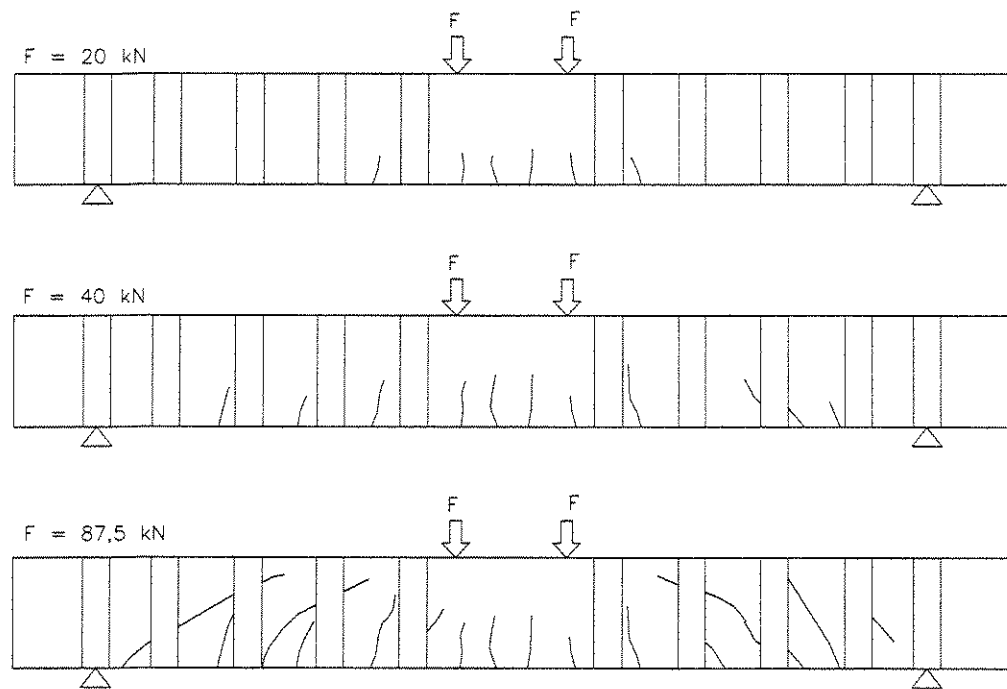


FIGURA 5.3 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V2G2

PANORAMA DE FISSURAÇÃO - V3G2

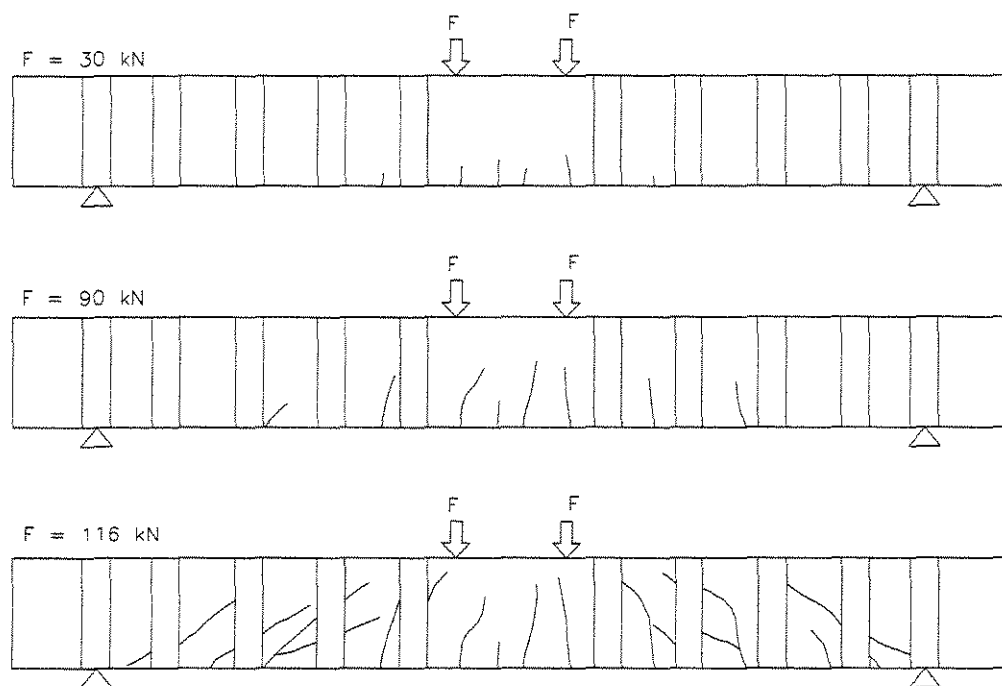


FIGURA 5.4 - Evolução das fissuras durante o ensaio da viga V3G2

5.2 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO DAS VIGAS DOS GRUPOS 1 E 2

As figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam o encurtamento do concreto no banzo superior para as vigas VTG1, V1G1 e V2G1, respectivamente. Os valores apresentados correspondem ao extensômetro colado no meio do vão na parte superior da viga. O gráfico apresenta os valores da força cortante pela deformação.

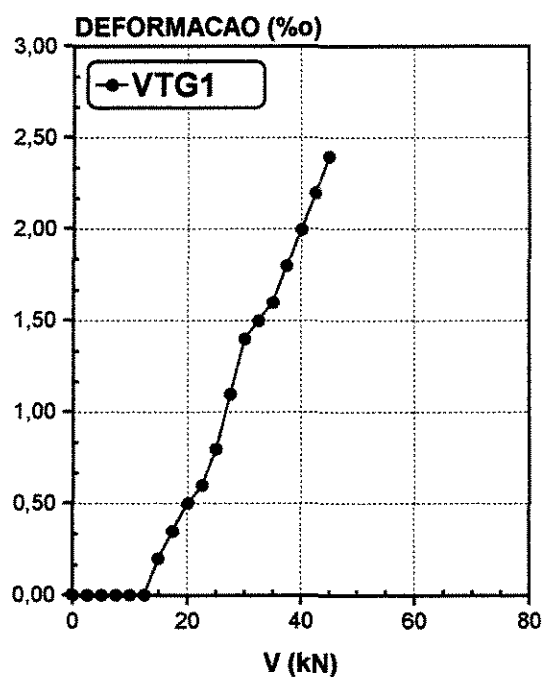


FIGURA 5.5 – Deformação do concreto da viga VTG1

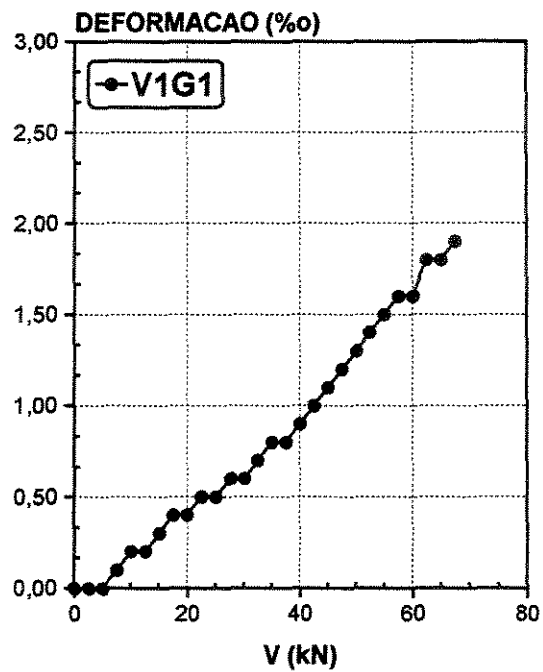


FIGURA 5.6 – Deformação do concreto da viga V1G1

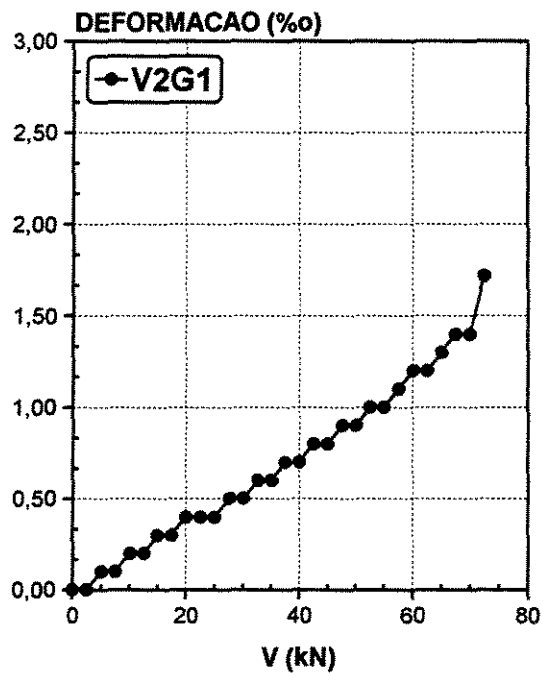


FIGURA 5.7 – Deformação do concreto da viga V2G1

As figuras 5.8 e 5.9 apresentam o encurtamento do concreto no banzo superior para as vigas VTG2 e V1G2, respectivamente. Os valores apresentados correspondem ao extensômetro colado no meio do vão na parte superior da viga. O gráfico apresenta os valores da força cortante pela deformação. As figuras 5.10 e 5.11 apresentam os diagramas para as vigas V2G2 e V3G2, respectivamente.

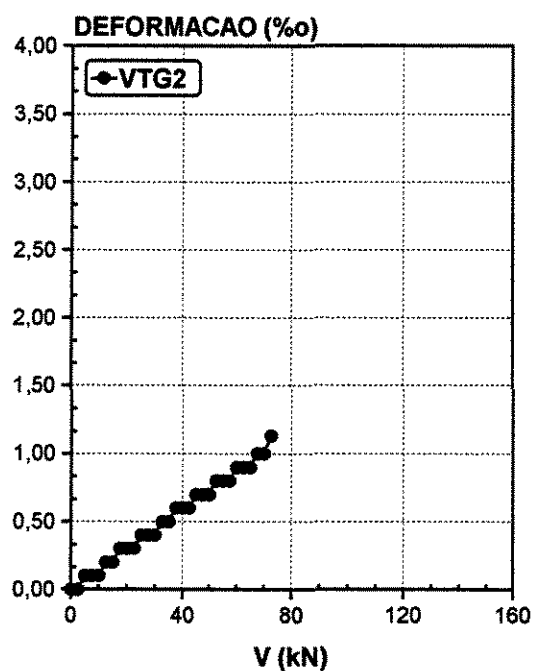


FIGURA 5.8 – Deformação do concreto da viga VTG2

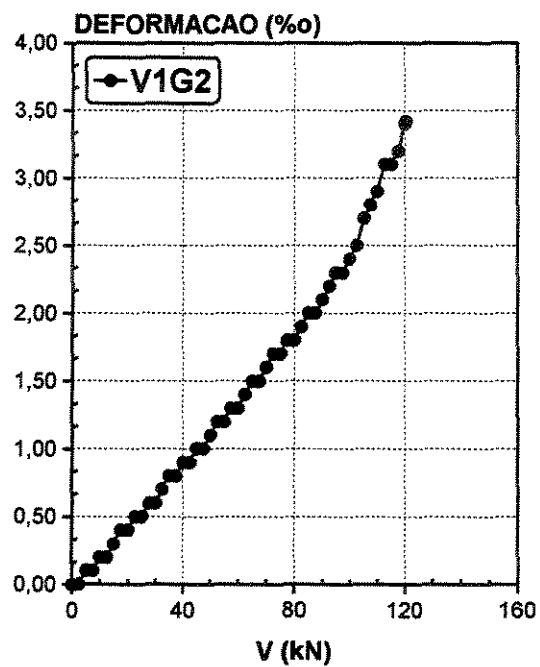


FIGURA 5.9 – Deformação do concreto da viga V1G2

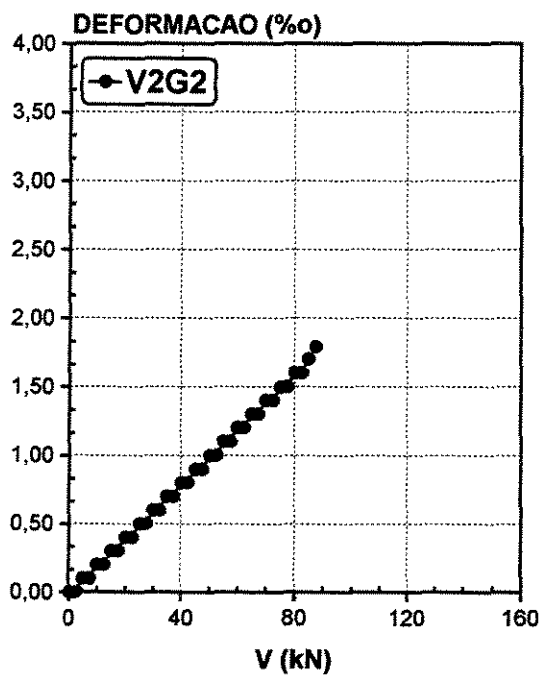


FIGURA 5.10 – Deformação do concreto da viga V2G2

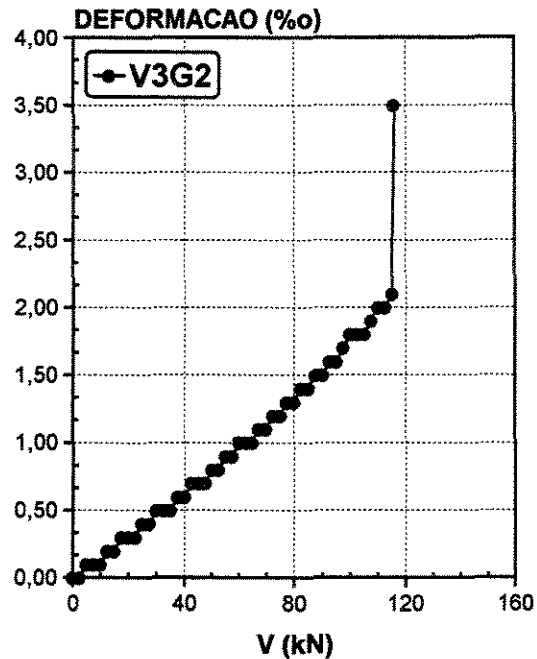


FIGURA 5.11 – Deformação do concreto da viga V3G2

5.3 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

A evolução das deformações nos estribos, nos pontos T1, T2, T3, T4, T5 e T6, indicados nas figuras 4.10 e 4.11 para as vigas do Grupo 1, está representada nas figuras 5.12, 5.13 e 5.14 para as vigas VTG1, V1G1 e V2G1, respectivamente. As medições individuais dos extensômetros encontram-se no anexo deste trabalho.

A evolução das deformações nos estribos, nos pontos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T8 indicados na Figura 4.12 para as vigas do Grupo 2, está representada nas figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 para as vigas VTG2, V1G2, V2G2 E V3G2, respectivamente. As medições individuais dos extensômetros encontram-se no anexo deste trabalho.

VIGA VTG1 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

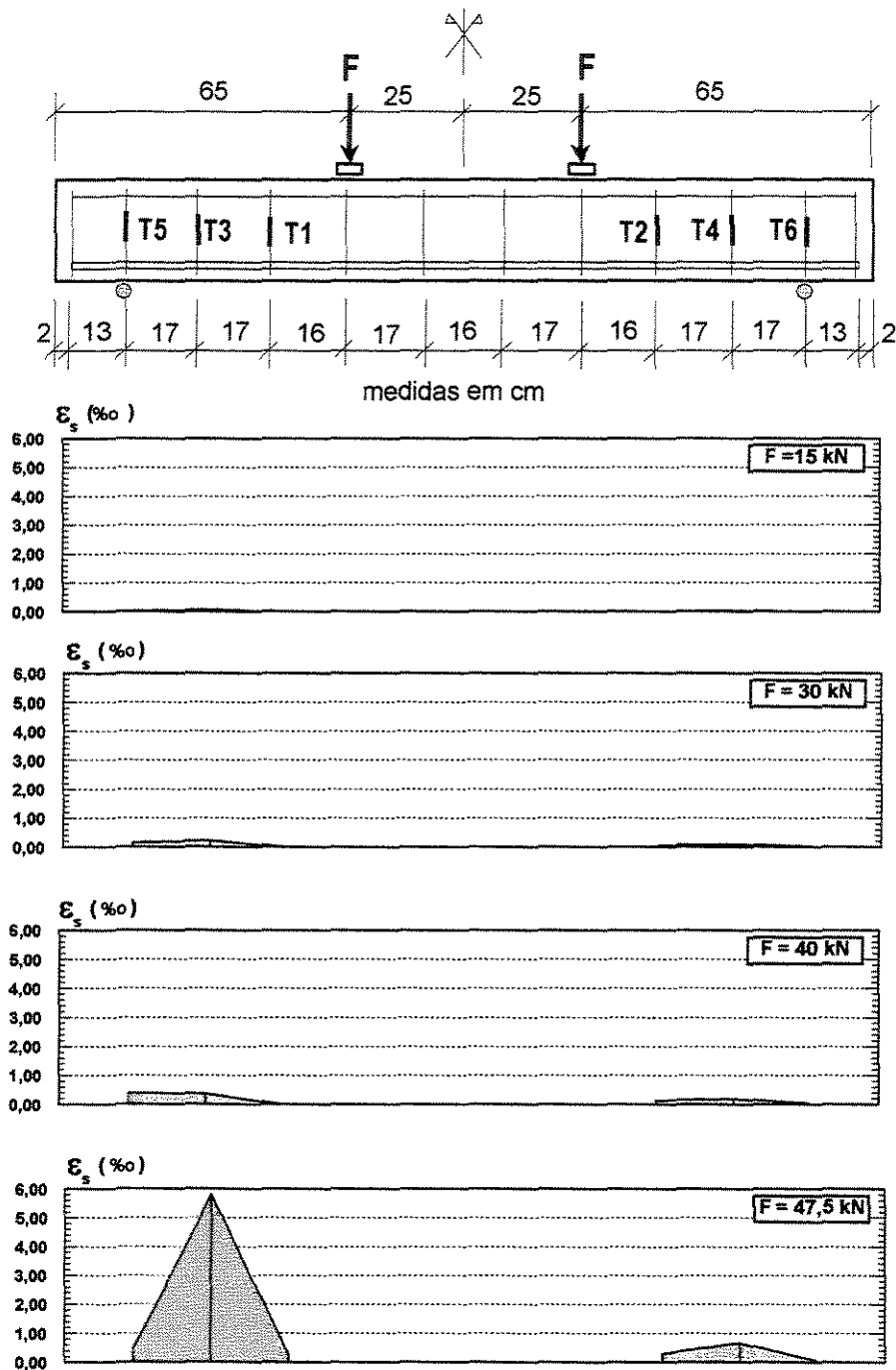


FIGURA 5.12 – Deformações nos estribos da viga VTG1

VIGA V1G1
DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

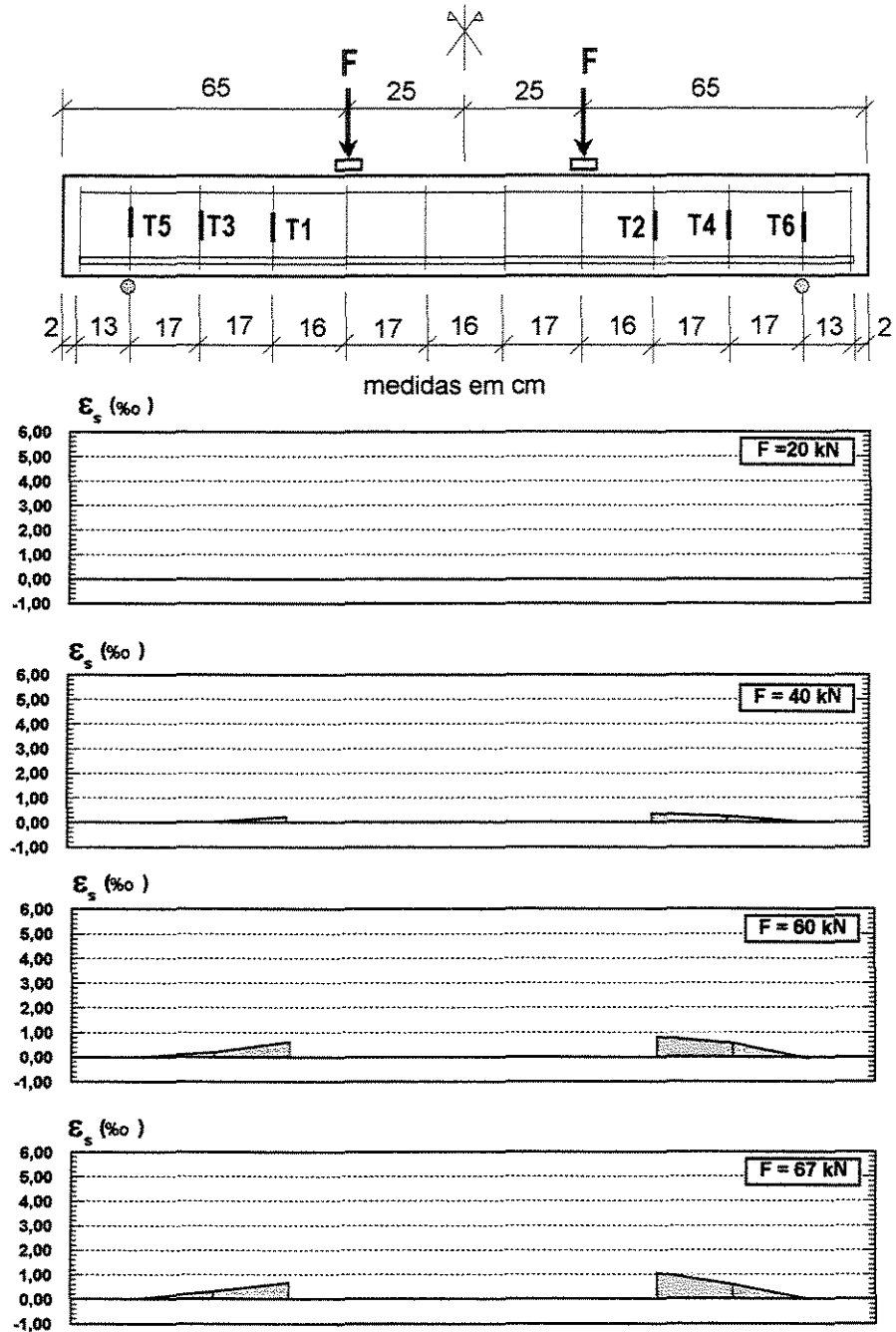


FIGURA 5.13 – Deformações nos estribos da viga V1G1

VIGA V2G1 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

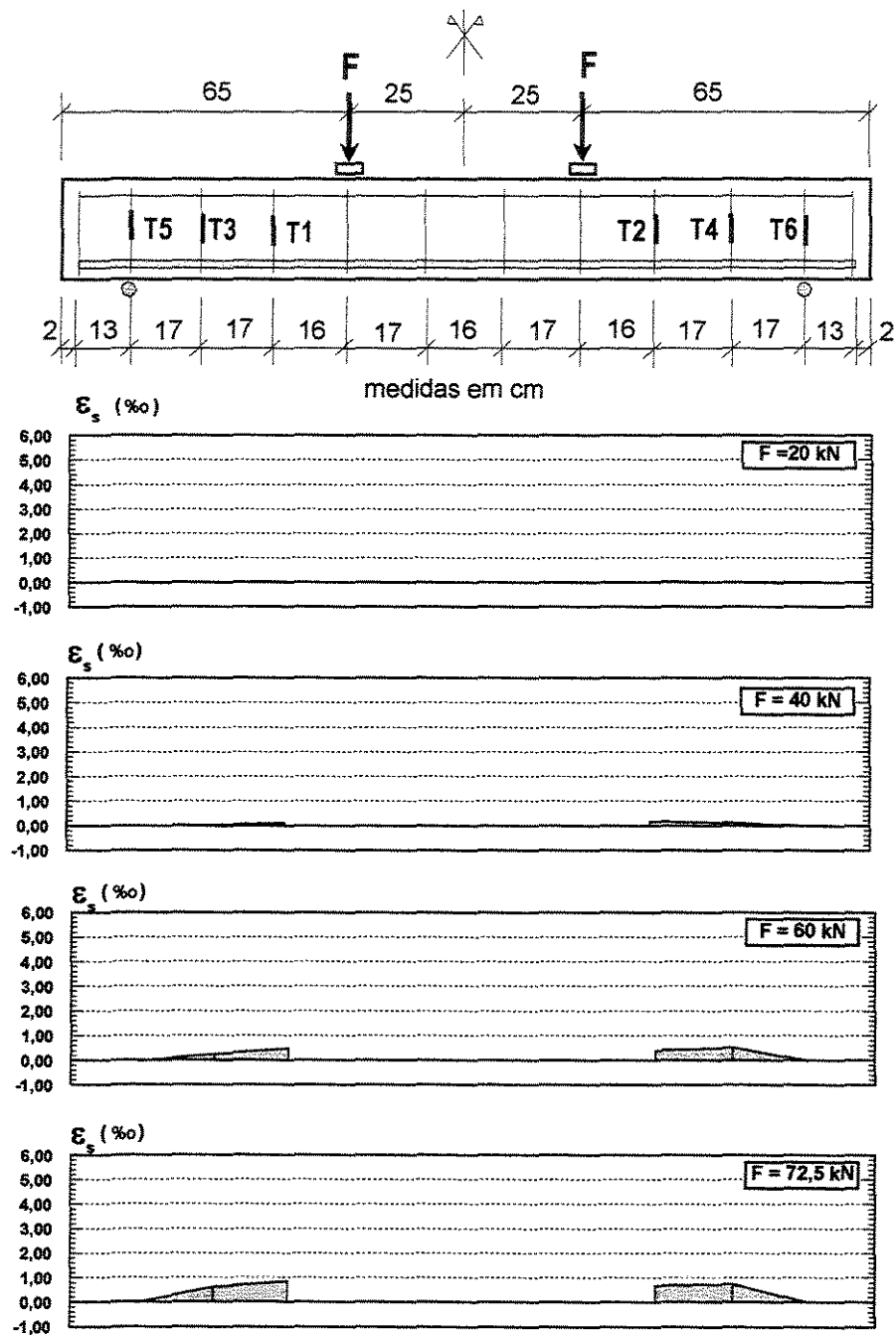


FIGURA 5.14 – Deformações nos estribos da viga V2G1

VIGA VTG2 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

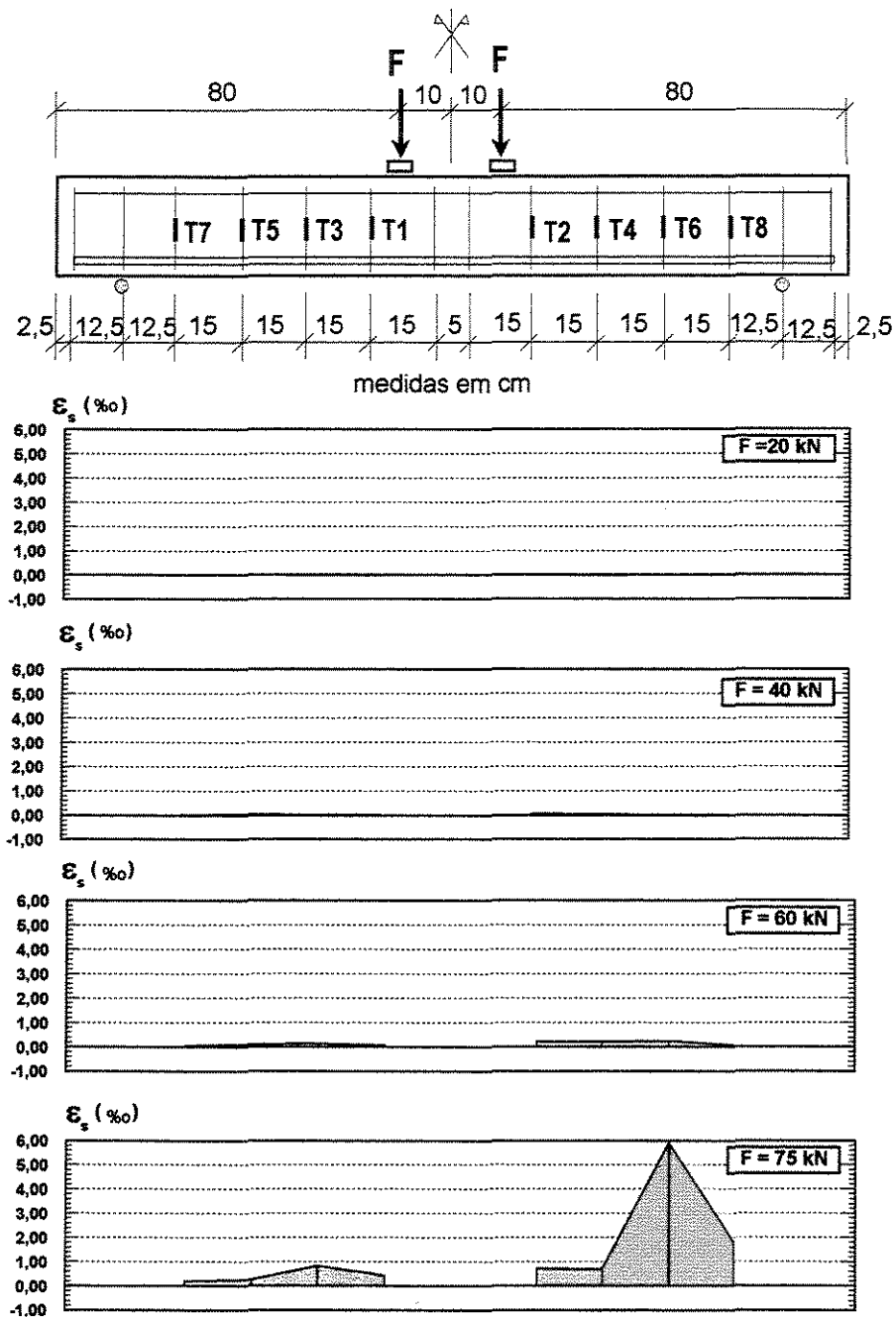


FIGURA 5.15 – Deformações nos estribos da viga VTG2

VIGA V1G2 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

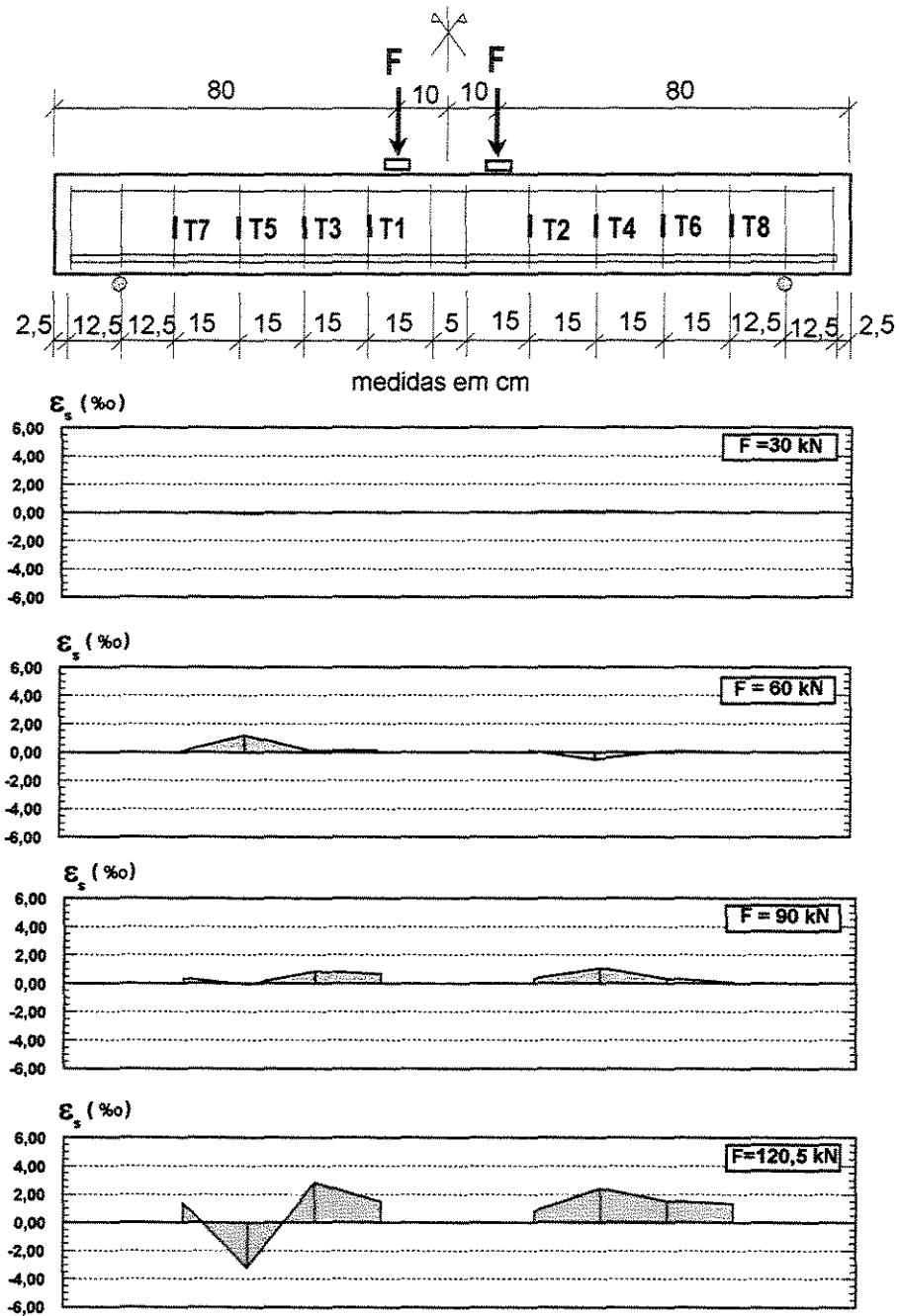


FIGURA 5.16 – Deformações nos estribos da viga V1G2

VIGA V2G2 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

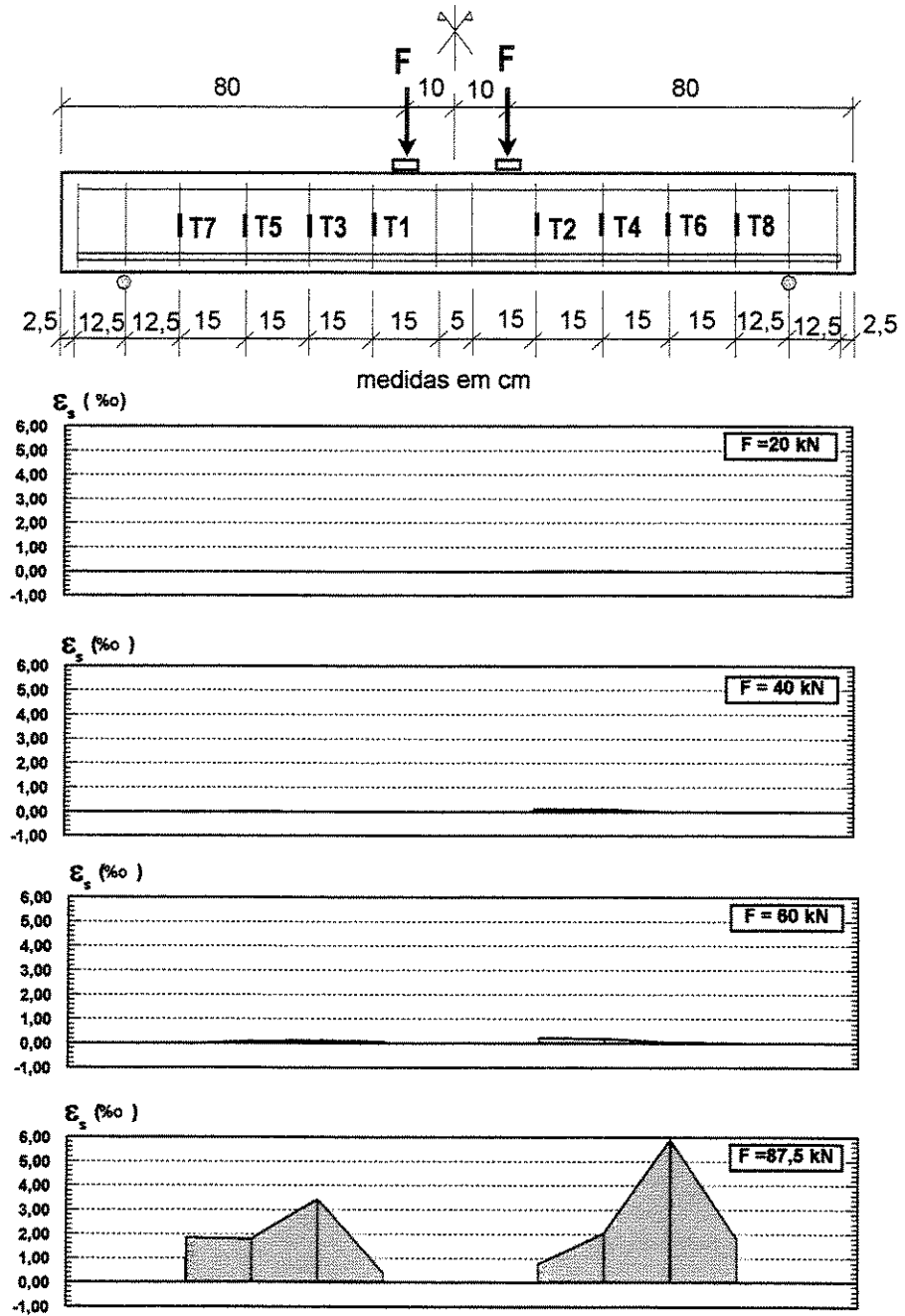


FIGURA 5.17 – Deformações nos estribos da viga V2G2

VIGA V3G2 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS

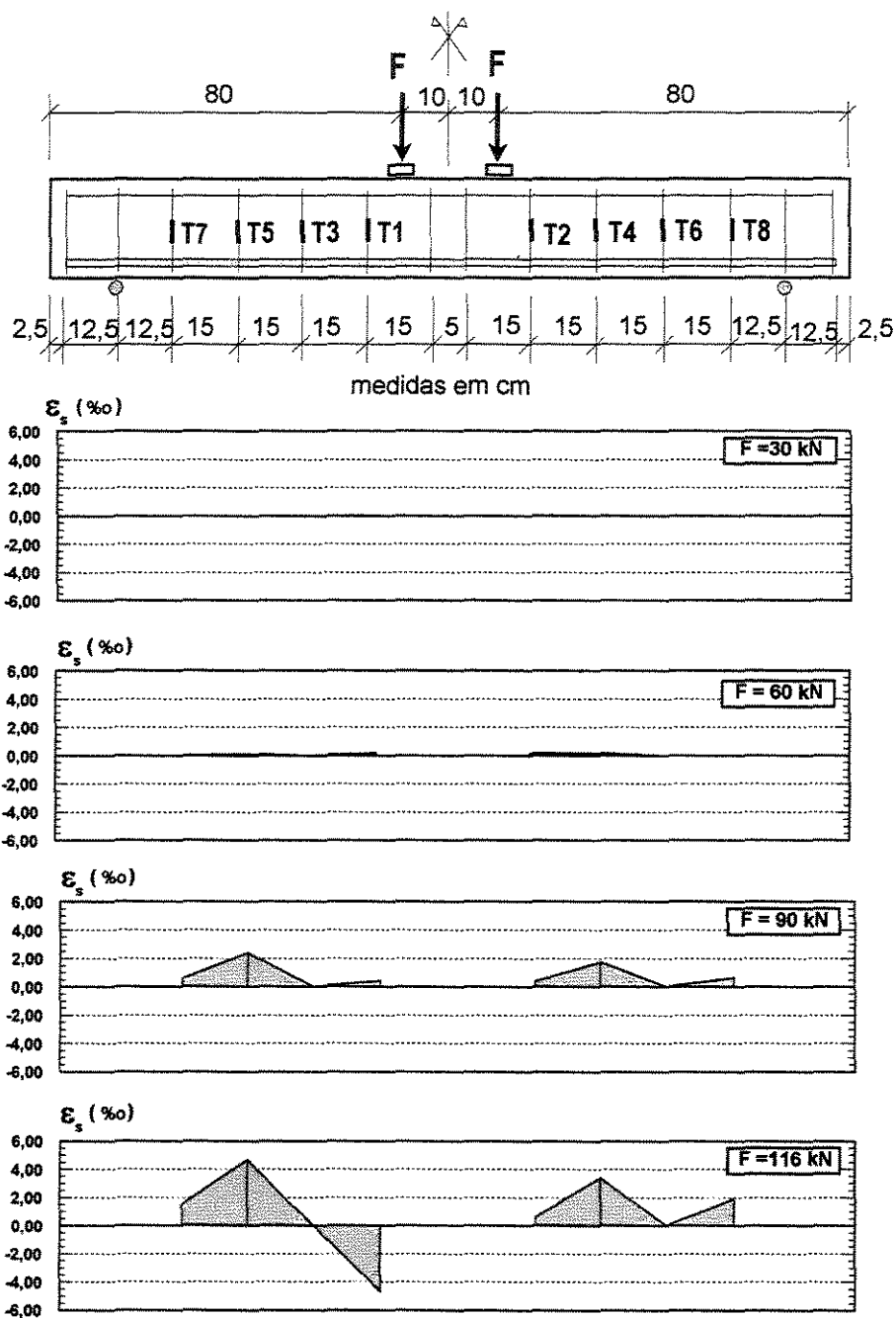


FIGURA 5.18 – Deformações nos estribos da viga V3G2

5.4 DEFORMAÇÕES NAS FIBRAS

A evolução das deformações nas fibras, nos pontos F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7 e F8, indicados na Figura 4.14 para a viga V2G1 do Grupo 1, está representada na Figura 5.19. As medições individuais dos extensômetros encontram-se no anexo deste trabalho.

A evolução das deformações nas fibras, nos pontos F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7 e F8, indicados nas figuras 4.15 e 4.16 para as vigas do Grupo 2, está representada na Figura 5.20 para a viga V1G2 e figuras 5.21 e 5.22 para as vigas V2G2 e V3G2, respectivamente. As medições individuais dos extensômetros encontram-se no anexo deste trabalho.

VIGA V2G1 DEFORMAÇÕES NAS FIBRAS

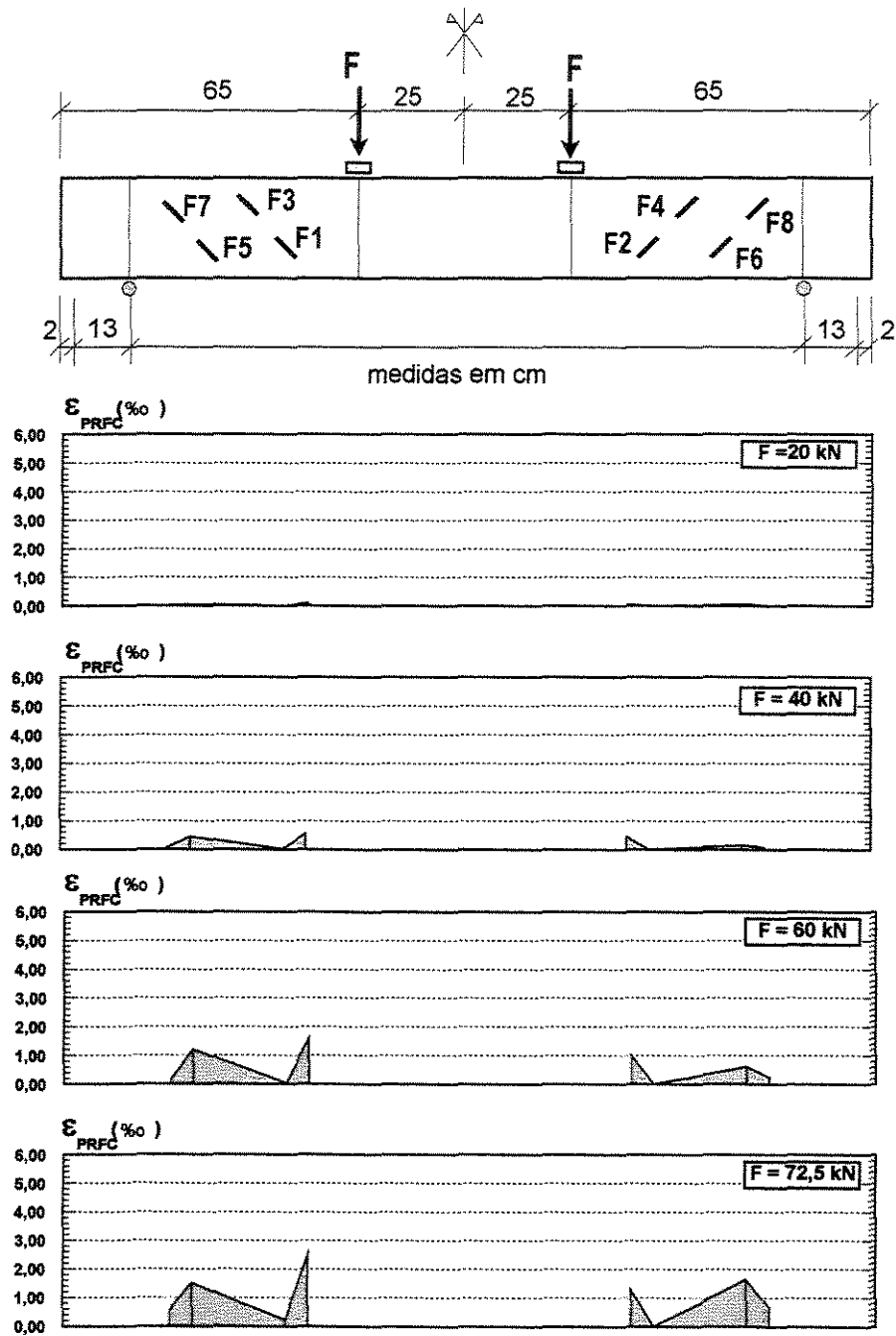


FIGURA 5.19 – Deformações nas fibras da viga V2G1

VIGA V1G2 DEFORMAÇÕES NAS FIBRAS

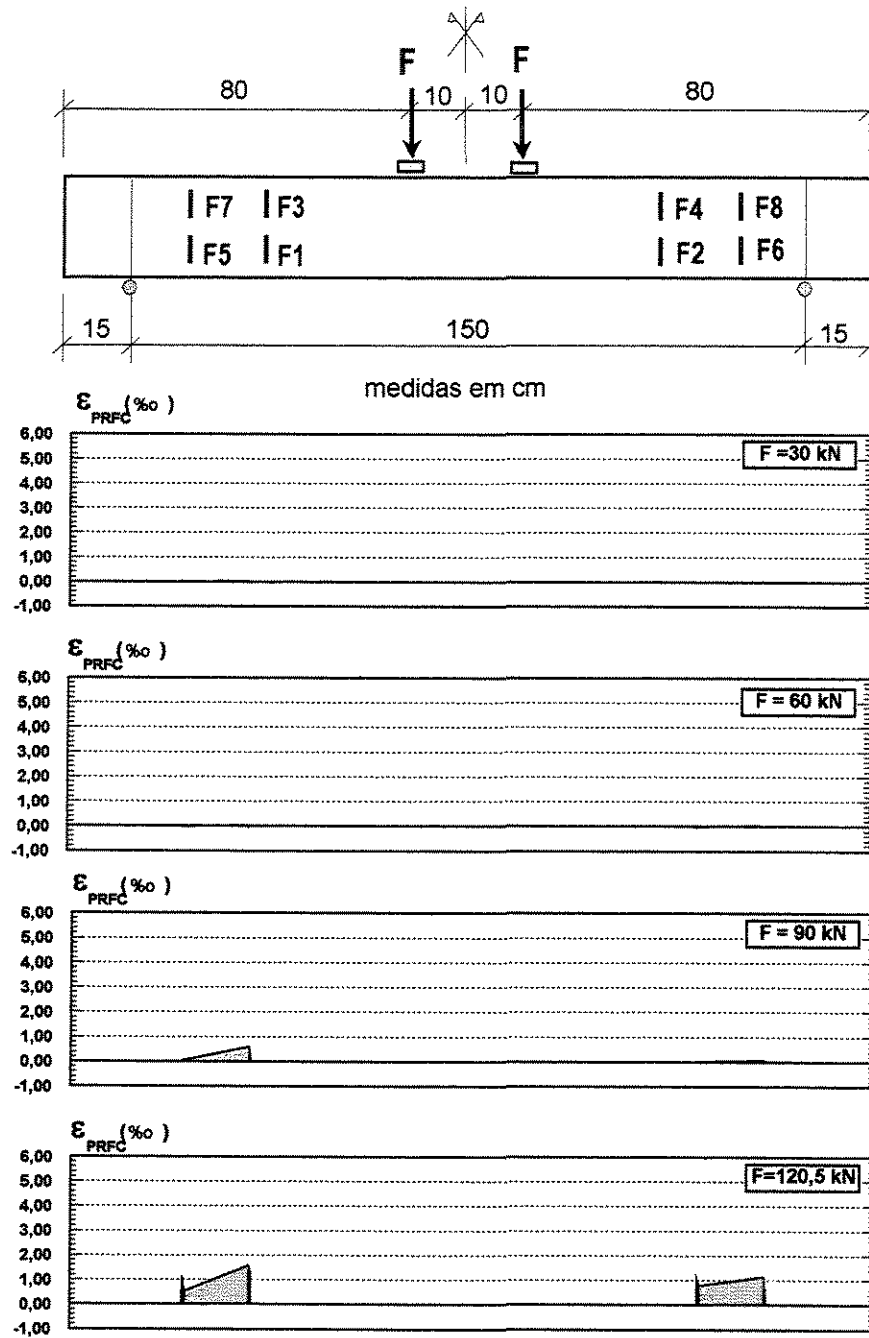


FIGURA 5.20 – Deformações nas fibras da viga V1G2

VIGA V2G2 DEFORMAÇÕES NAS FIBRAS

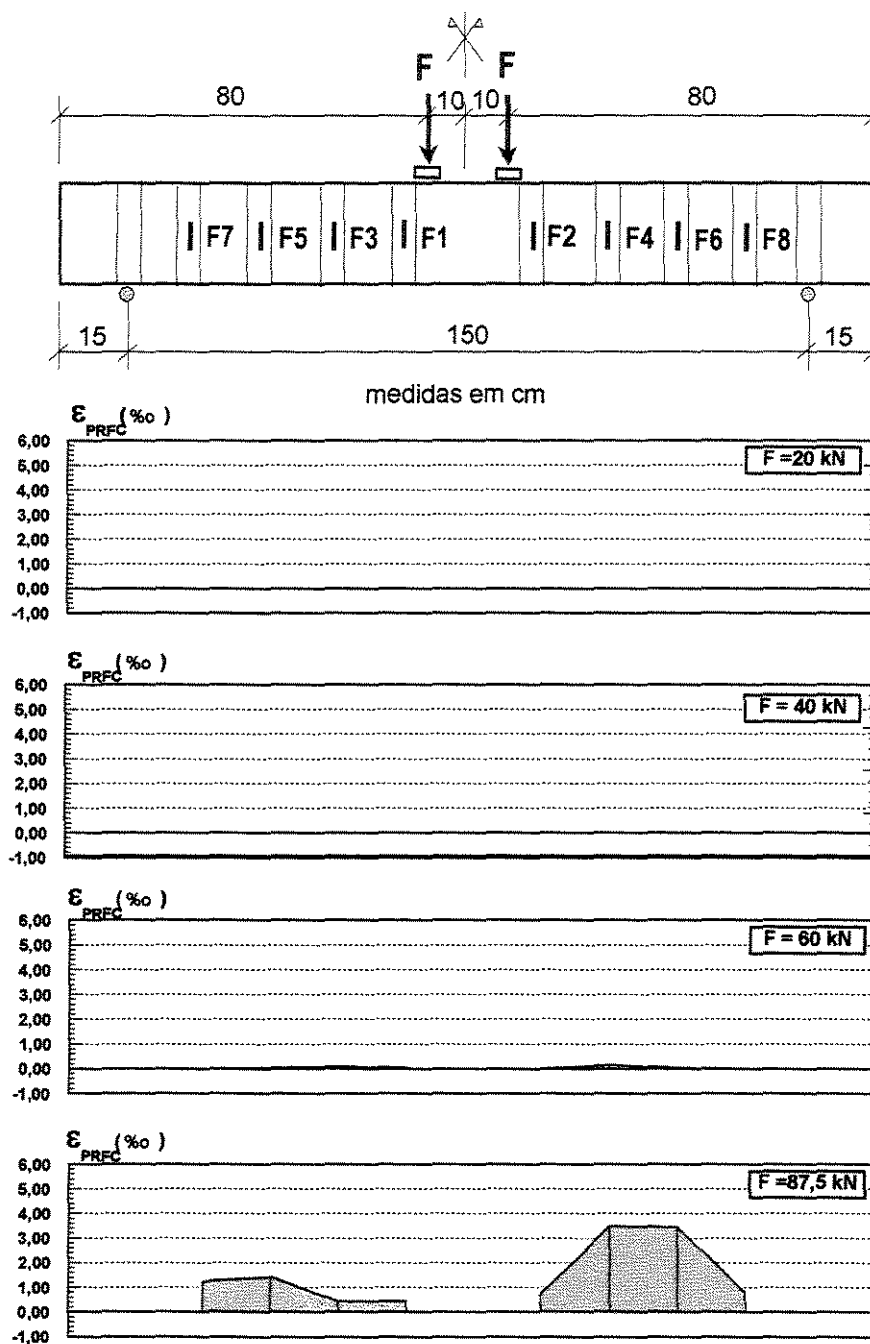


FIGURA 5.21 – Deformações nas fibras da viga V2G2

VIGA V3G2
DEFORMAÇÕES NAS FIBRAS

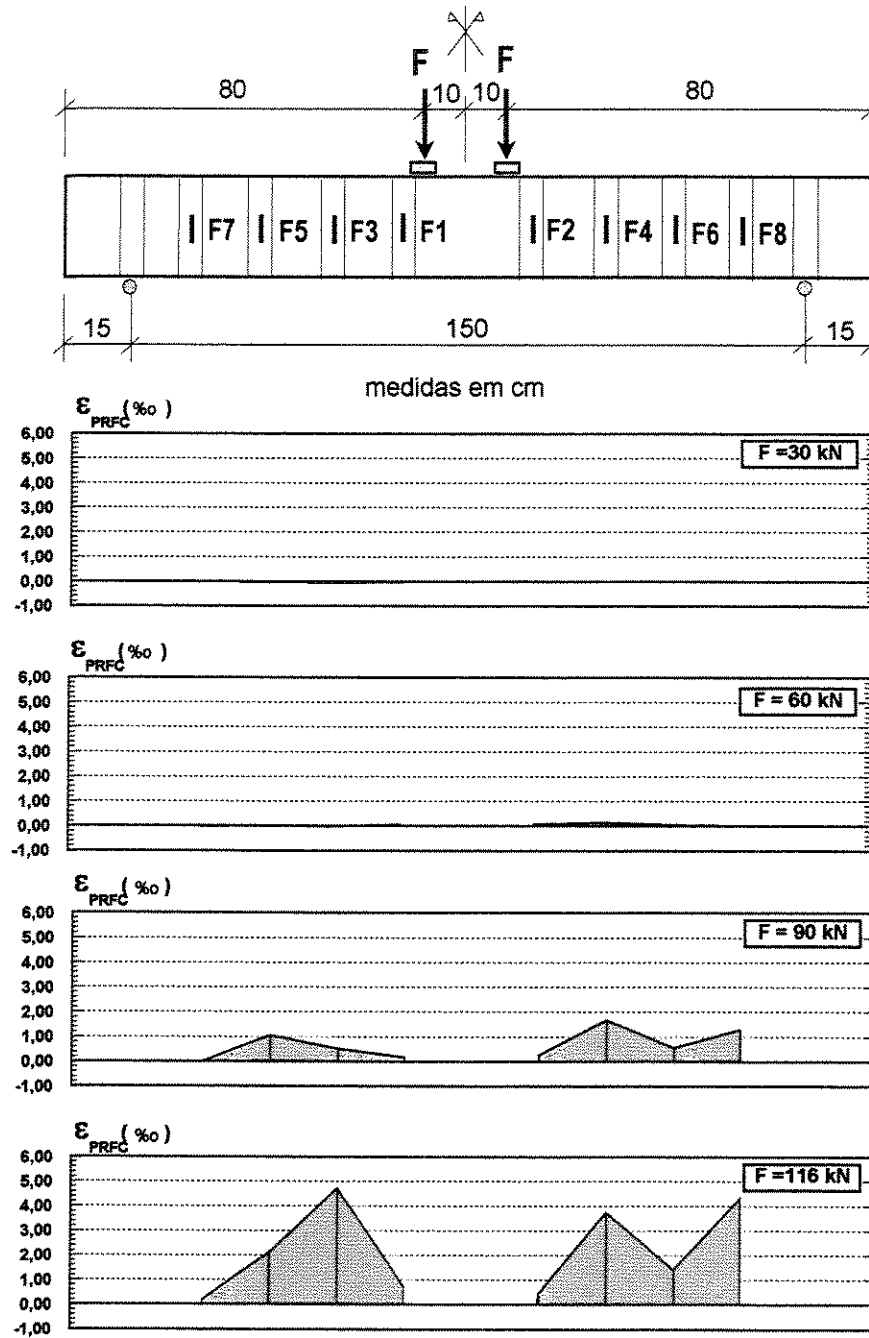


FIGURA 5.22 – Deformações nas fibras da viga V3G2

5.5 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

A evolução das deformações na armadura longitudinal, nos pontos L1, L2, L3 e L4, indicados na Figura 4.11 para as vigas do Grupo 1, está representada nas figuras 5.23, 5.24 e 5.25 para as vigas VTG1, V1G1 e V2G1, respectivamente. As medições individuais dos extensômetros encontram-se no anexo deste trabalho.

A evolução das deformações nos estribos, nos pontos L0, L1 e L2, indicados na Figura 4.12 para as vigas do Grupo 2, está representada nas figuras 5.26, 5.27, 5.28 e 5.29 para as vigas VTG2, V1G2, V2G2 e V3G2, respectivamente. As medições individuais dos extensômetros encontram-se no anexo deste trabalho.

VIGA VTG1
DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

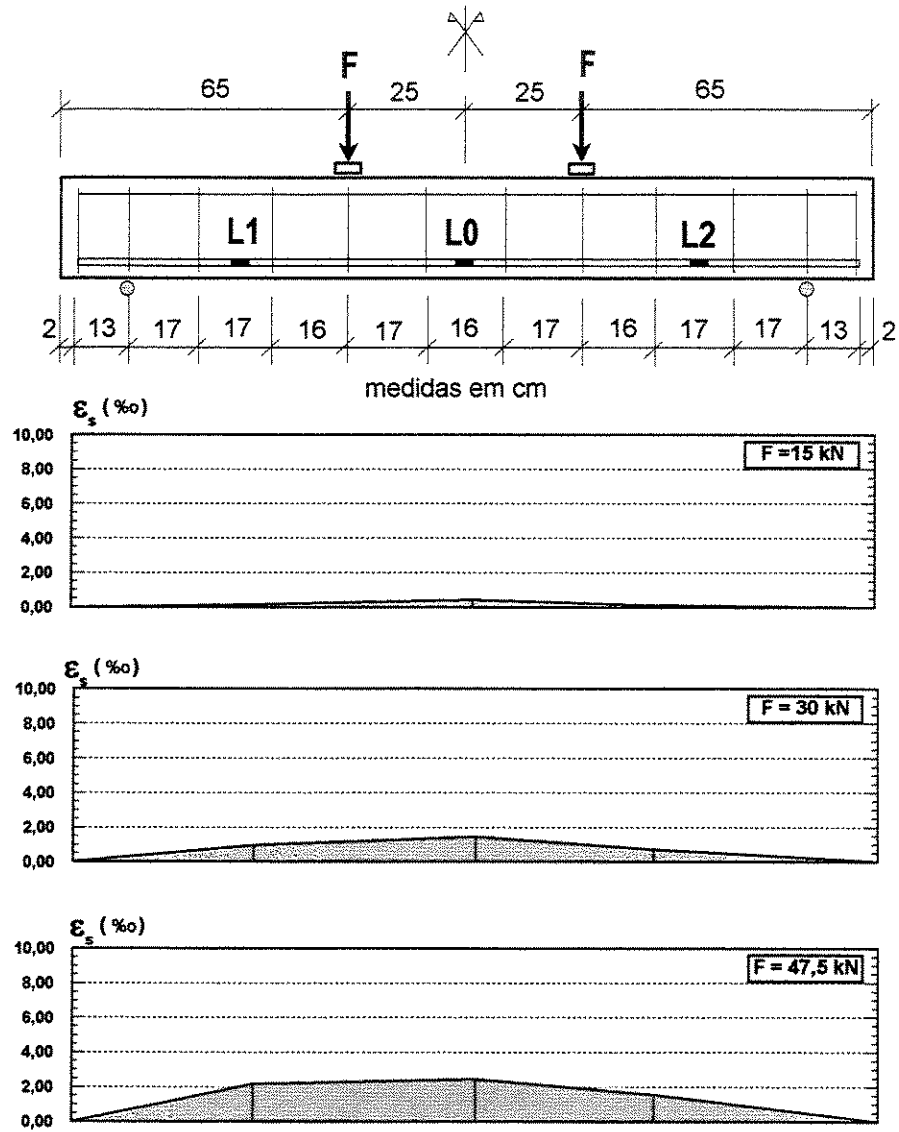


FIGURA 5.23 – Deformações na armadura longitudinal da viga VTG1

VIGA V1G1
DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

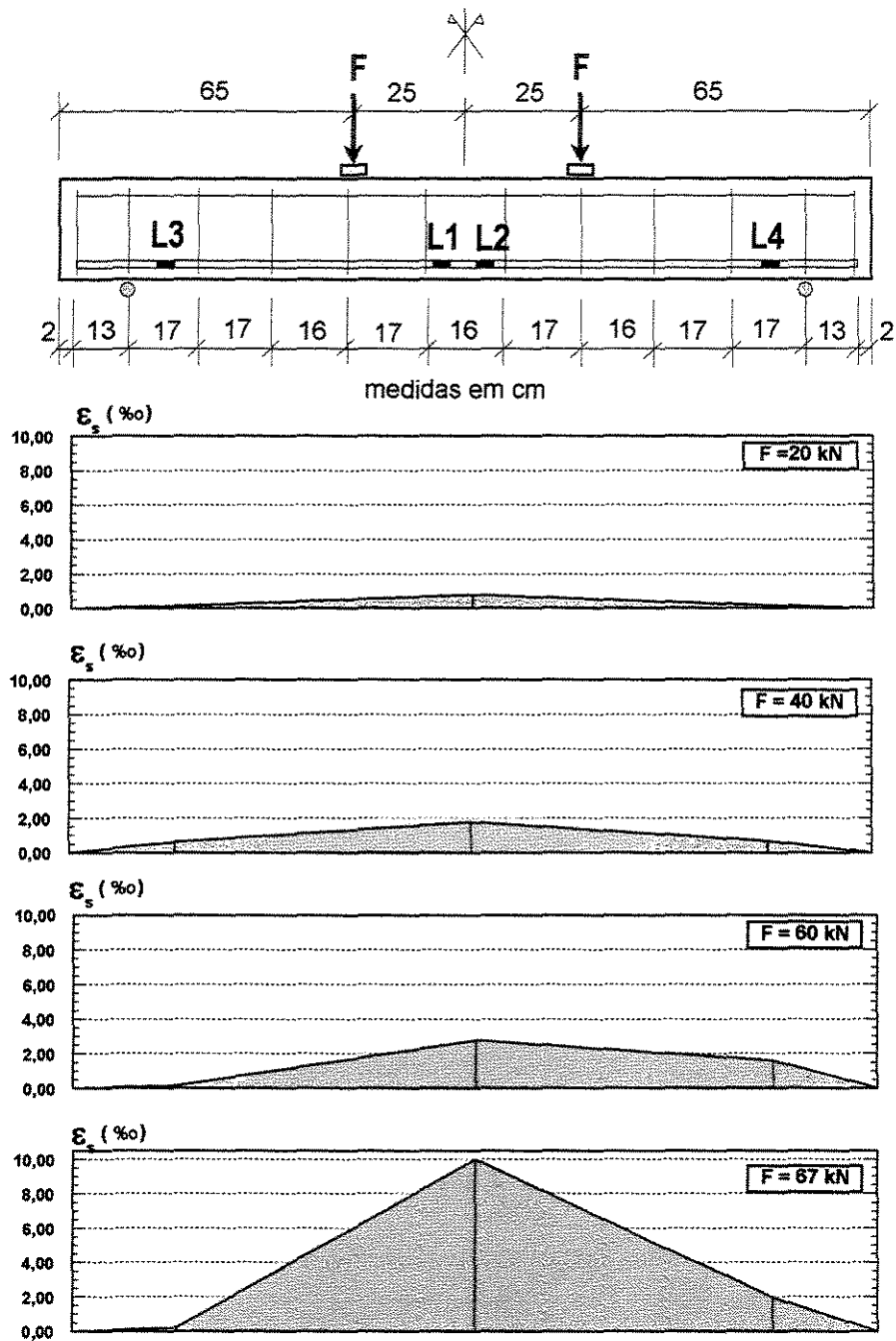


FIGURA 5.24 – Deformações na armadura longitudinal da viga V1G1

VIGA V2G1 **DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL**

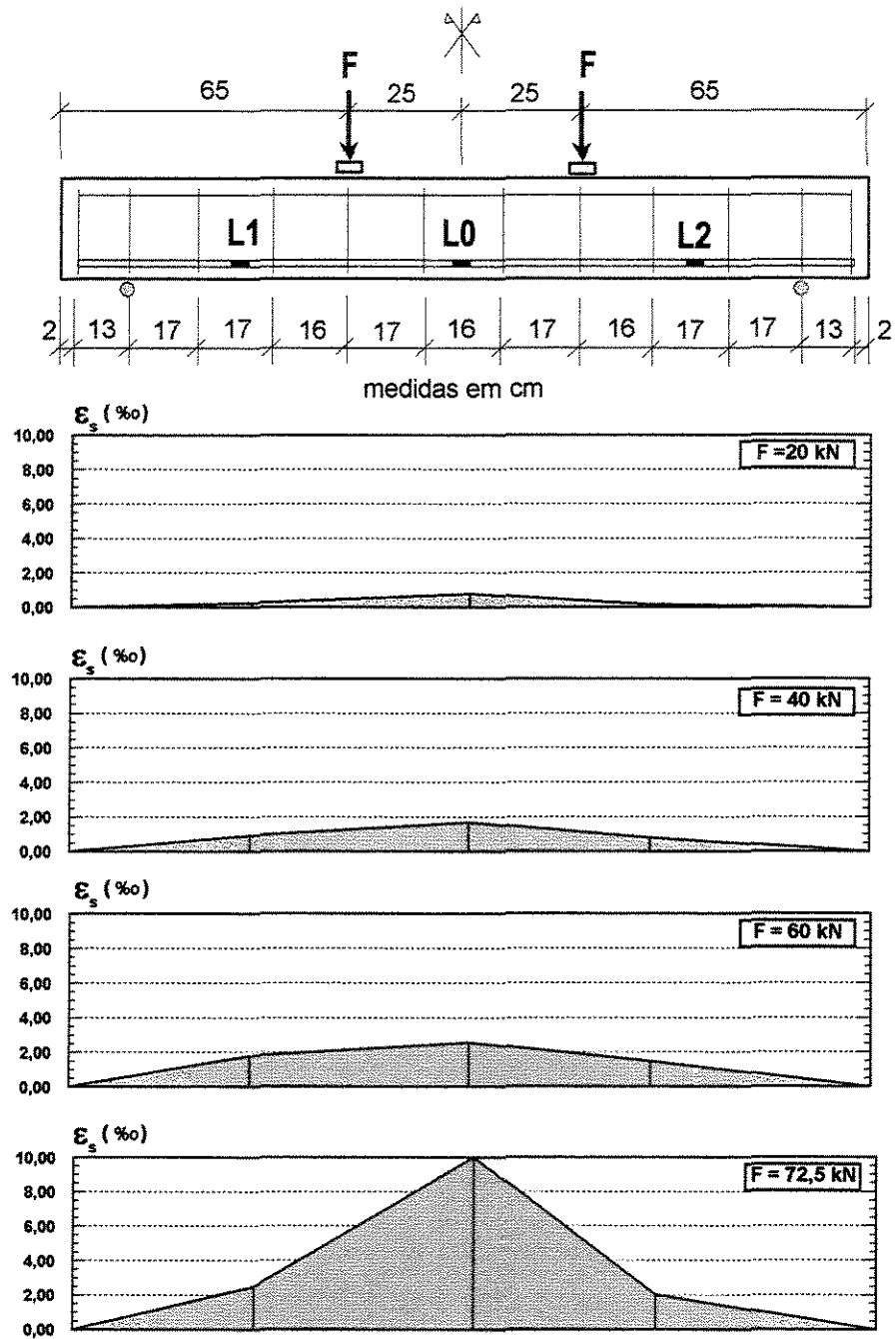


FIGURA 5.25 – Deformações na armadura longitudinal da viga V2G1

VIGA VTG2 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

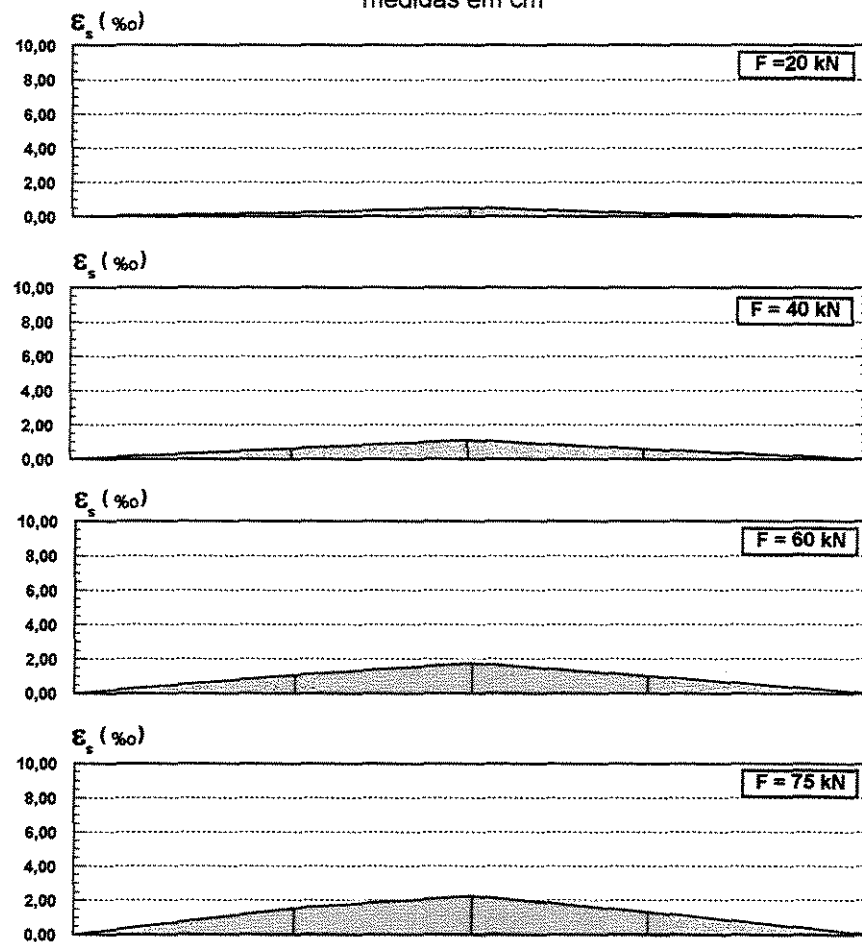
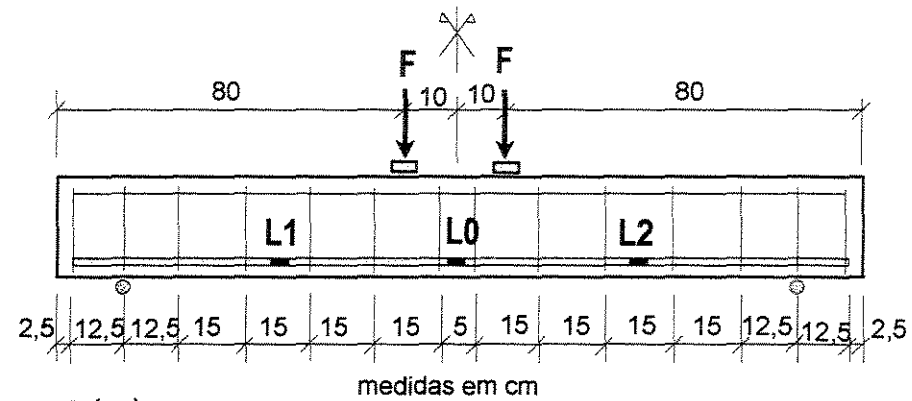


FIGURA 5.26 – Deformações na armadura longitudinal da viga VTG2

VIGA V1G2
DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

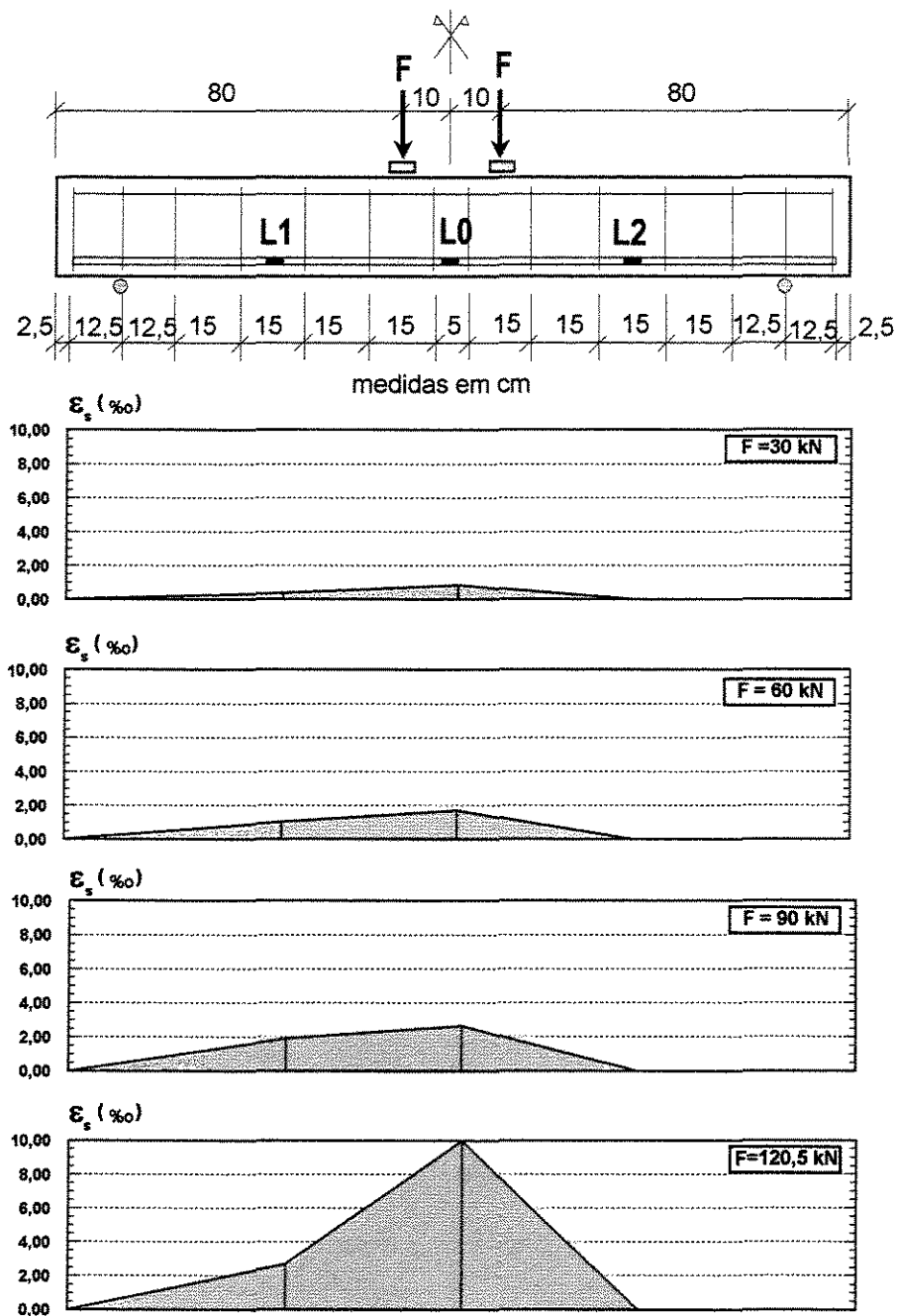


FIGURA 5.27 – Deformações na armadura longitudinal da viga V1G2

VIGA V2G2
DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

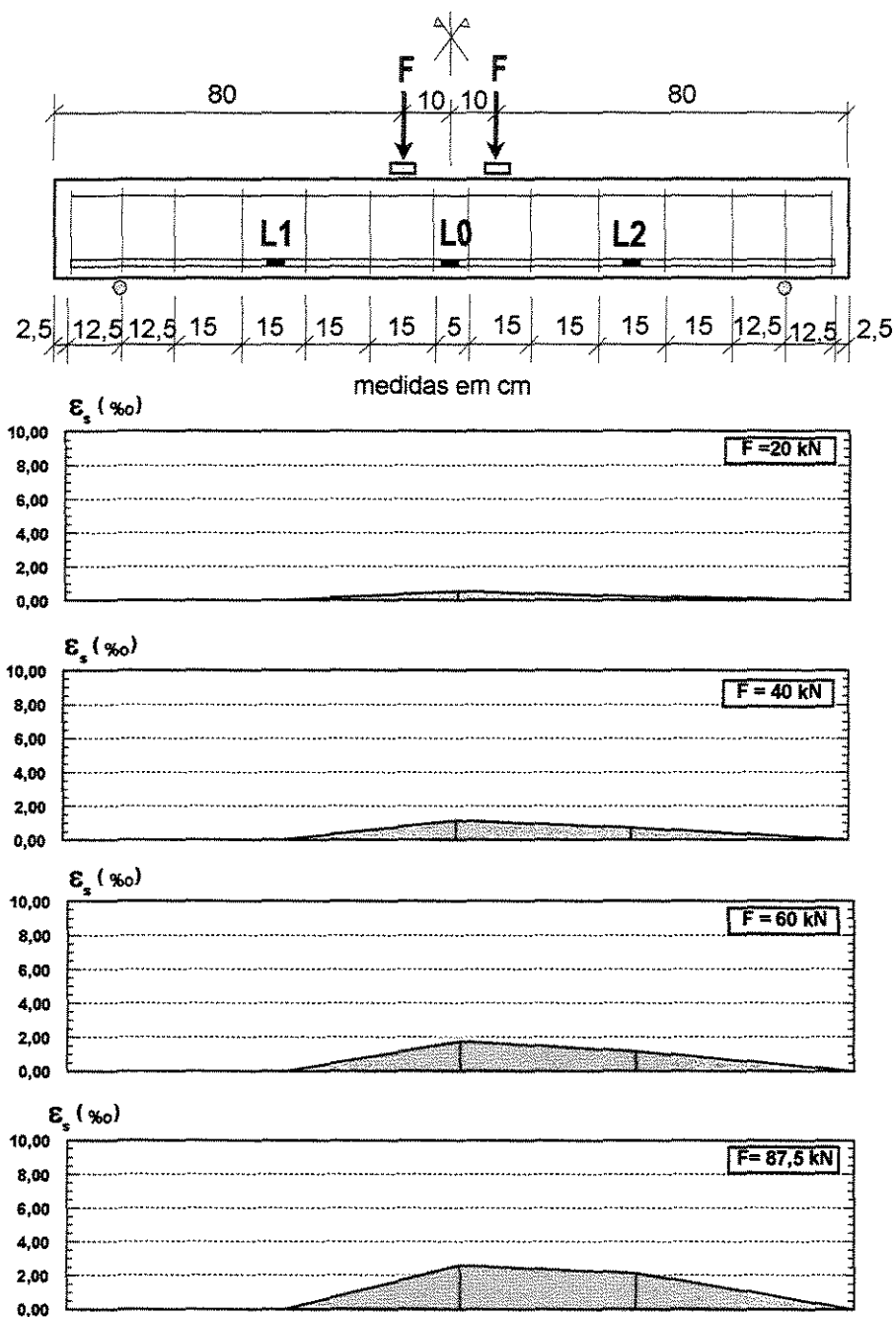


FIGURA 5.28 – Deformações na armadura longitudinal da viga V2G2

VIGA V3G2
DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

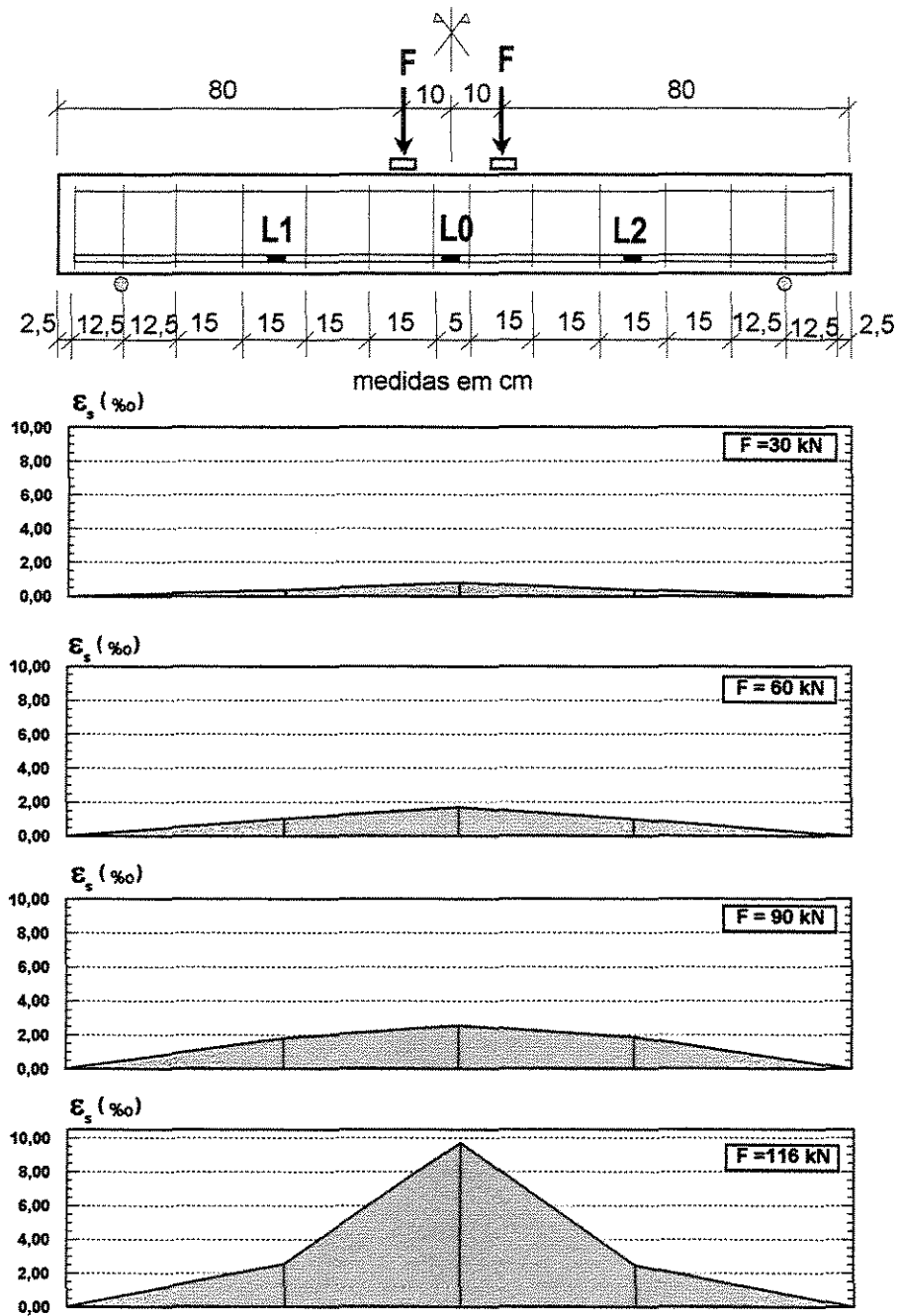


FIGURA 5.29 – Deformações na armadura longitudinal da viga V3G2

5.6 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

A evolução individual dos deslocamentos verticais, medidos no meio do vão, como mostra a Figura 4.13, está representada nas figuras 5.30, 5.31 e 5.32 para as vigas do Grupo 1 e nas figuras 5.33 a 5.36 para as vigas do Grupo 2.

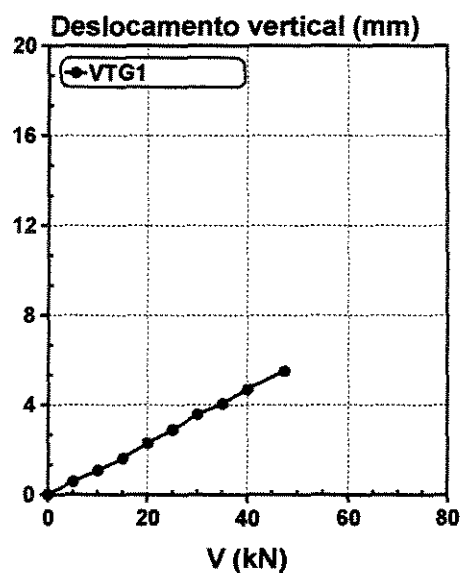


FIGURA 5.30 – Deslocamento vertical da viga VTG1

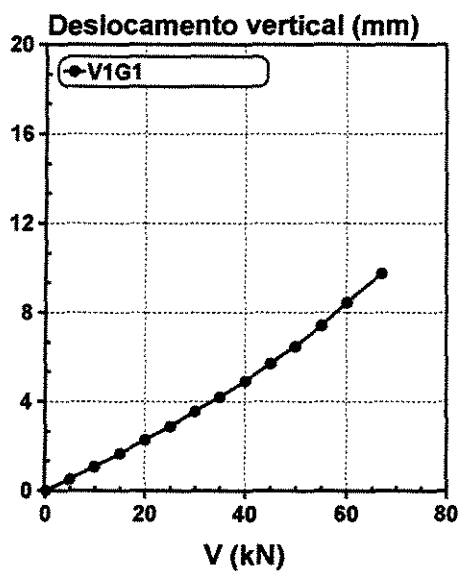


FIGURA 5.31 – Deslocamento vertical da viga V1G1

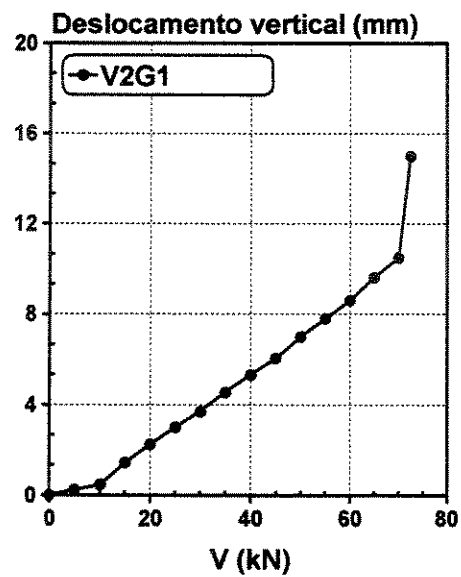


FIGURA 5.32 – Deslocamento vertical da viga V2G1

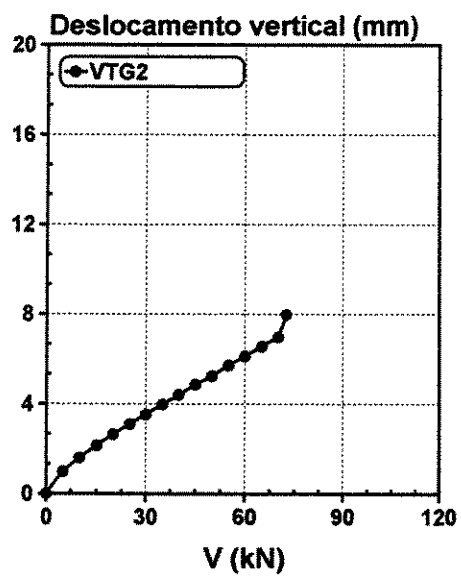


FIGURA 5.33 – Deslocamento vertical da viga VTG2

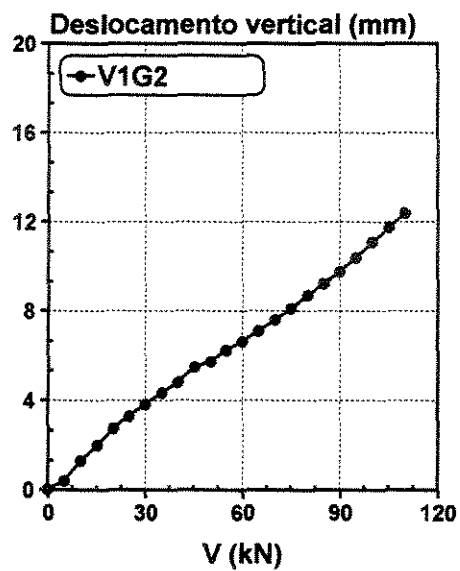


FIGURA 5.34 – Deslocamento vertical da viga V1G2

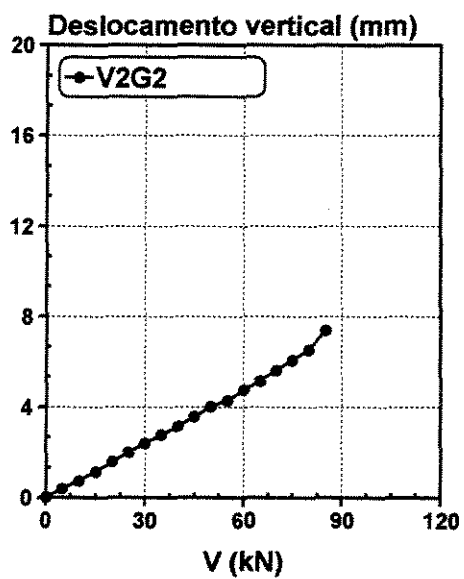


FIGURA 5.35 – Deslocamento vertical da viga V2G2

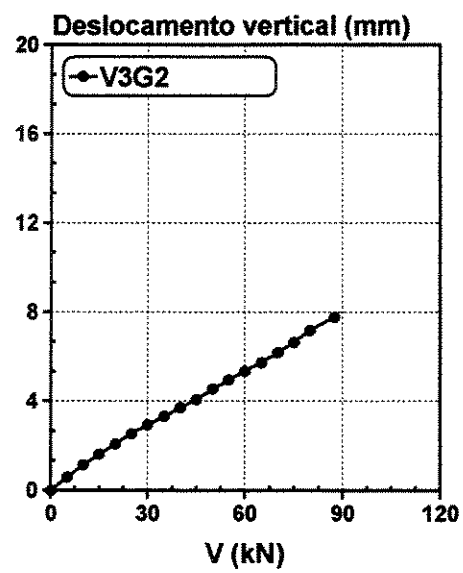


FIGURA 5.36 – Deslocamento vertical da viga V3G2

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam a análise entre os resultados experimentais e os valores teóricos, calculados no item 4.6, segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾ e ACI440-R-00⁽⁴⁾, respectivamente.

A tabela 6.3 apresenta o incremento no valor do esforço cortante último para cada viga reforçada.

TABELA 6.1 – Comparação entre o resultado teórico, segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾, e o experimental

VIGA	Valores teóricos			Valores experimentais						
	V_{PRFC} (kN)	V_u (kN)	Modo de ruína	V_{PRFC} (kN)	V_U (kN)	ϵ_{PRFC} (‰)	$\epsilon_{s,transv}$ (‰)	$\epsilon_{s,longit.}$ (‰)	ϵ_c (‰)	Modo de Ruína
VTG1	-	-	Força cortante	-	47,5	-	5,80	2,47	2,40	Força cortante
V1G1	43,4	90,9	Descolamento	19,5	67,0	(a)	1,08	10,0	1,80	Flexão
V2G1	61,3	108,8	Descolamento	25,0	72,5	2,49	0,85	10,0	1,72	Flexão
VTG2	-	-	Força cortante	-	75,0	-	5,90	2,26	1,13	Força cortante
V1G2	43,4	118,4	Descolamento	35,5	120,5	1,58	2,83	10,0	3,42	Flexão
V2G2	19,0	94,0	Ruína da fibra	12,5	87,5	3,45	3,59	2,61	1,79	Descolamento
V3G2	19,0	94,0	Ruína da fibra	41,0	116,0	4,67	4,58	5,58	2,14	Descolamento

(a) Os extensômetros colados no compósito de PRFC da viga V1G1 apresentaram problemas durante o ensaio

TABELA 6.2 – Comparação entre o resultado teórico, segundo ACI-440R-00⁽⁴⁾, e o experimental

VIGA	Valores teóricos			Valores experimentais						
	V_{PRFC} (kN)	V_u (kN)	Modo de ruína	V_{PRFC} (kN)	V_U (kN)	ε_{PRFC} (‰)	$\varepsilon_{s,trans}$ (‰)	$\varepsilon_{s,longi}$ (‰)	ε_c (‰)	Modo de Ruína
VTG1	-	-	Força cortante	-	47,5	-	5,80	2,47	2,40	Força cortante
V1G1	33,13	75,66	Descolamento	19,5	67,0	(a)	1,08	10,0	1,80	Flexão
V2G1	46,85	87,32	Descolamento	25,0	72,5	2,49	0,85	10,0	1,72	Flexão
VTG2	-	-	Força cortante	-	75,0	-	5,90	2,26	1,13	Força cortante
V1G2	38,20	107,47	Descolamento	35,5	120,5	1,58	2,83	10,0	3,42	Flexão
V2G2	12,78	85,86	Descolamento	12,5	87,5	3,45	3,59	2,61	1,79	Descolamento
V3G2	12,78	87,14	Descolamento	41,0	116,0	4,67	4,58	5,58	2,14	Descolamento

(a) Os extensômetros colados no compósito de PRFC da viga V1G1 apresentaram problemas durante o ensaio

TABELA 6.3 – Acréscimo na força cortante última para cada viga

VIGA	V_u - sem reforço (kN)	V_u (kN)	Incremento (%)
VTG1	47,50	47,50	-
V1G1	47,50	67,00	+41,05
V2G1	47,50	72,50	+52,63
VTG2	75,00	75,00	-
V1G2	75,00	120,50	+60,67
V2G2	75,00	87,50	+16,67
V3G2	75,00	116,00	+54,67

As figuras 6.1 e 6.2 apresentam uma comparação da evolução da deformação dos estribos, entre as vigas dos grupos 1 e 2, respectivamente. As figuras 6.3 e 6.4 apresentam uma comparação da evolução da deformação entre as armaduras longitudinais nas vigas dos grupos 1 e 2, respectivamente.

VIGAS DO GRUPO 1

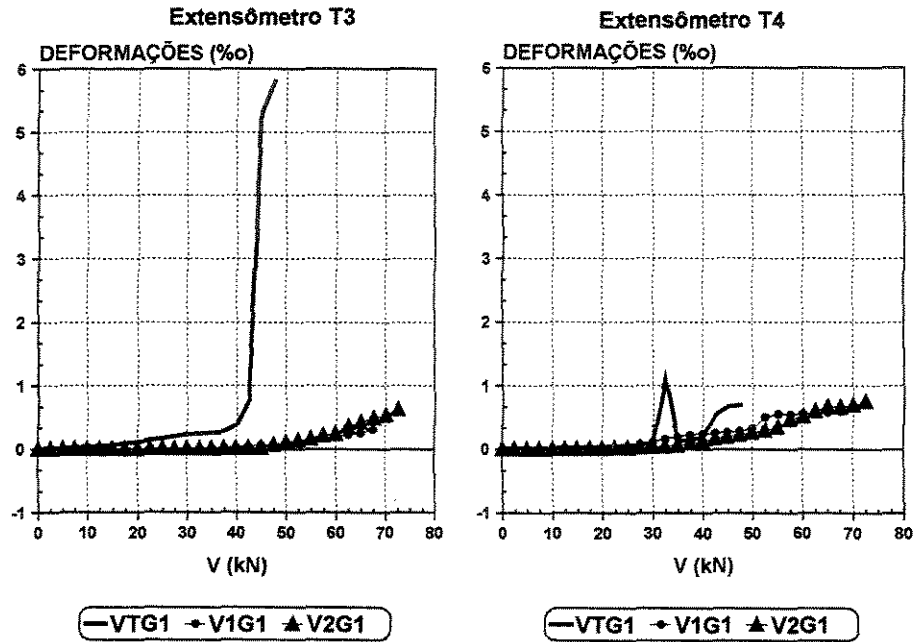


FIGURA 6.1 – Deformações nos estribos

VIGAS DO GRUPO 2

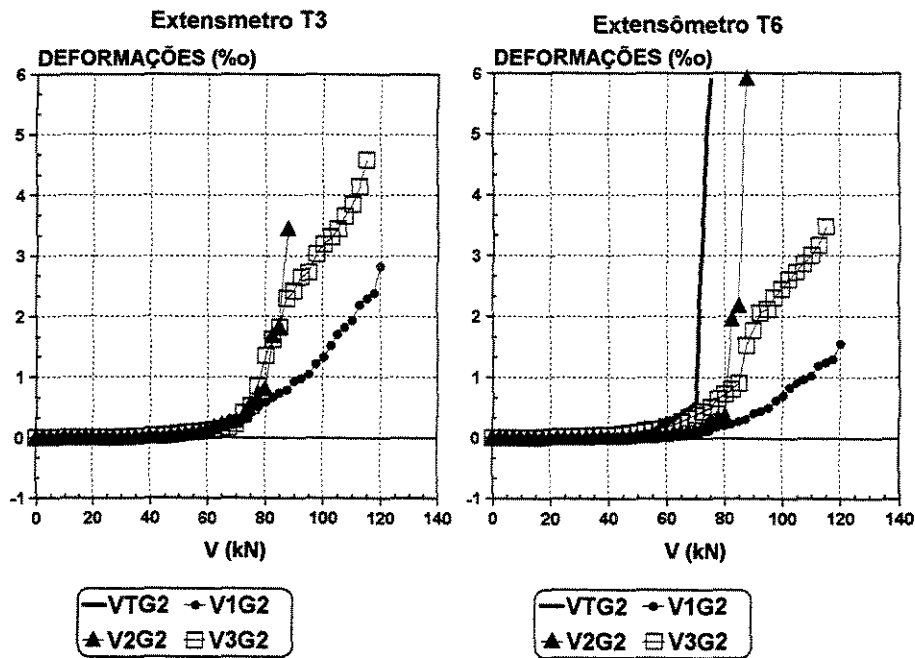


FIGURA 6.2 – Deformações nos estribos

VIGAS DO GRUPO 1

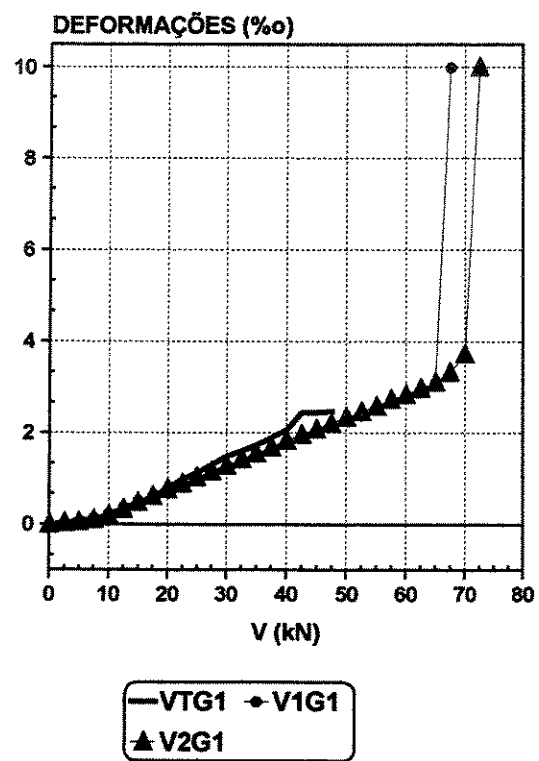


FIGURA 6.3 – Deformações nas armaduras longitudinais – Grupo 1

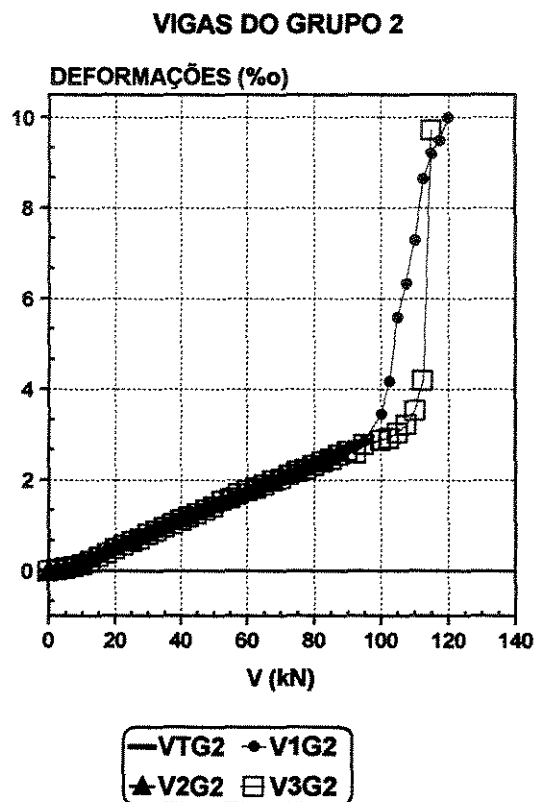


FIGURA 6.4 – Deformações nas armaduras longitudinais – Grupo 2

As figuras 6.5 e 6.6 apresentam uma comparação da deformação no concreto das vigas dos grupos 1 e 2, respectivamente. E as figuras 6.7 e 6.8 apresentam uma comparação dos deslocamentos verticais entre as vigas dos grupos 1 e 2, respectivamente.

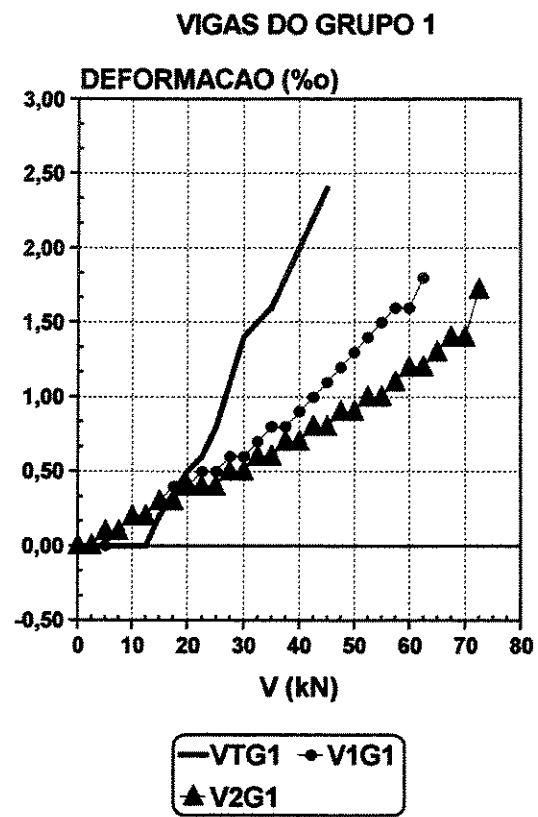


FIGURA 6.5 – Deformações no concreto – Grupo 1

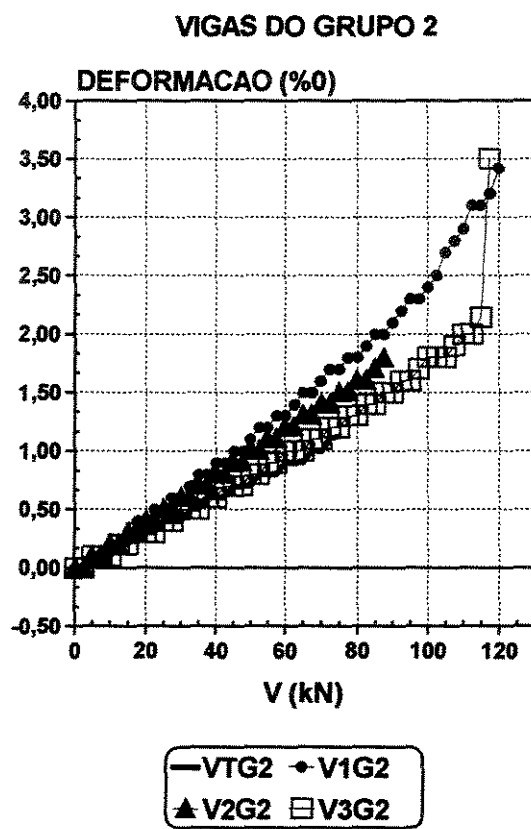


FIGURA 6.6 – Deformações no concreto – Grupo 2

VIGAS DO GRUPO 1

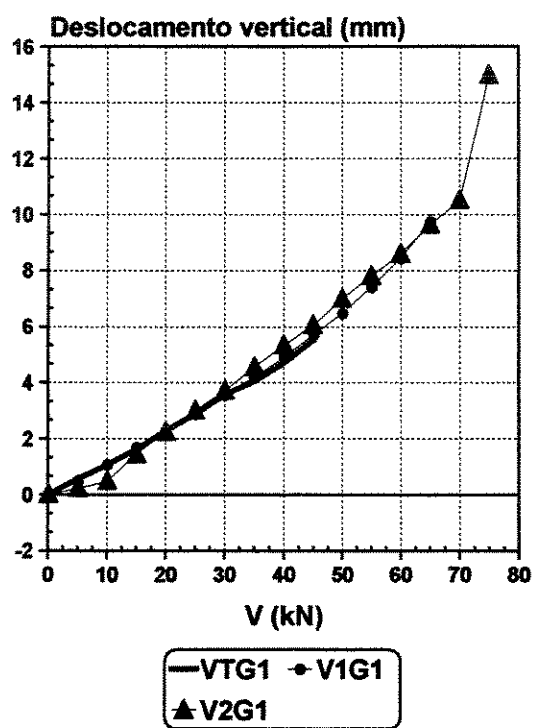


FIGURA 6.7 – Deslocamentos verticais – Grupo 1

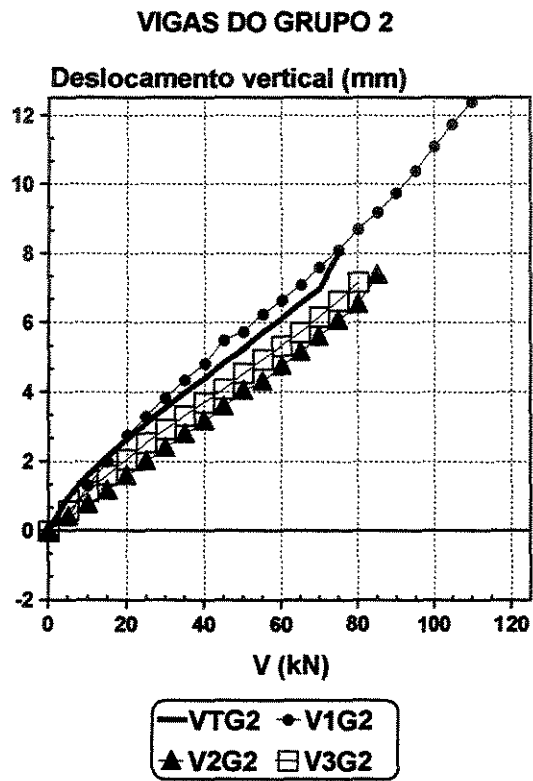
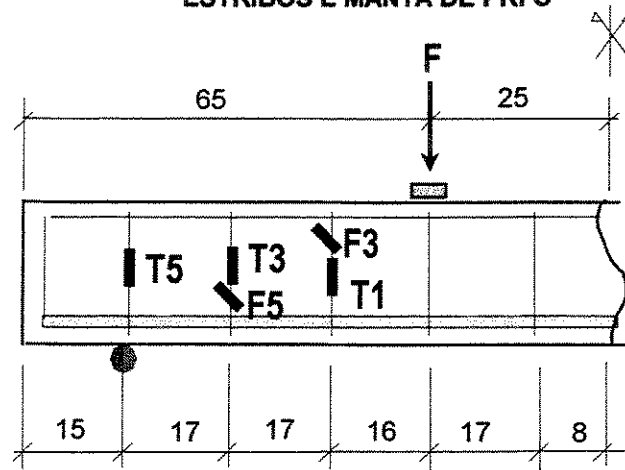


FIGURA 6.8 – Deslocamentos verticais – Grupo 2

As figuras 6.9 a 6.16 apresentam uma comparação entre a evolução da deformação no estribo e na fibra para cada viga dos grupos 1 e 2.

VIGA V2G1

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS E MANTA DE PRFC



medidas em cm

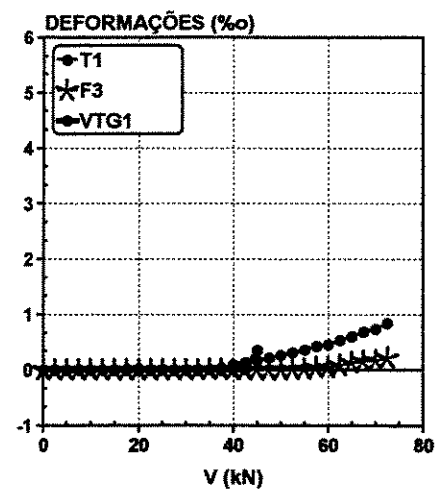
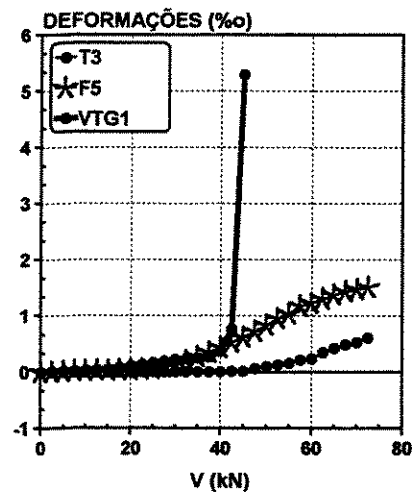


FIGURA 6.9 – Deformações V2G1 – lado esquerdo

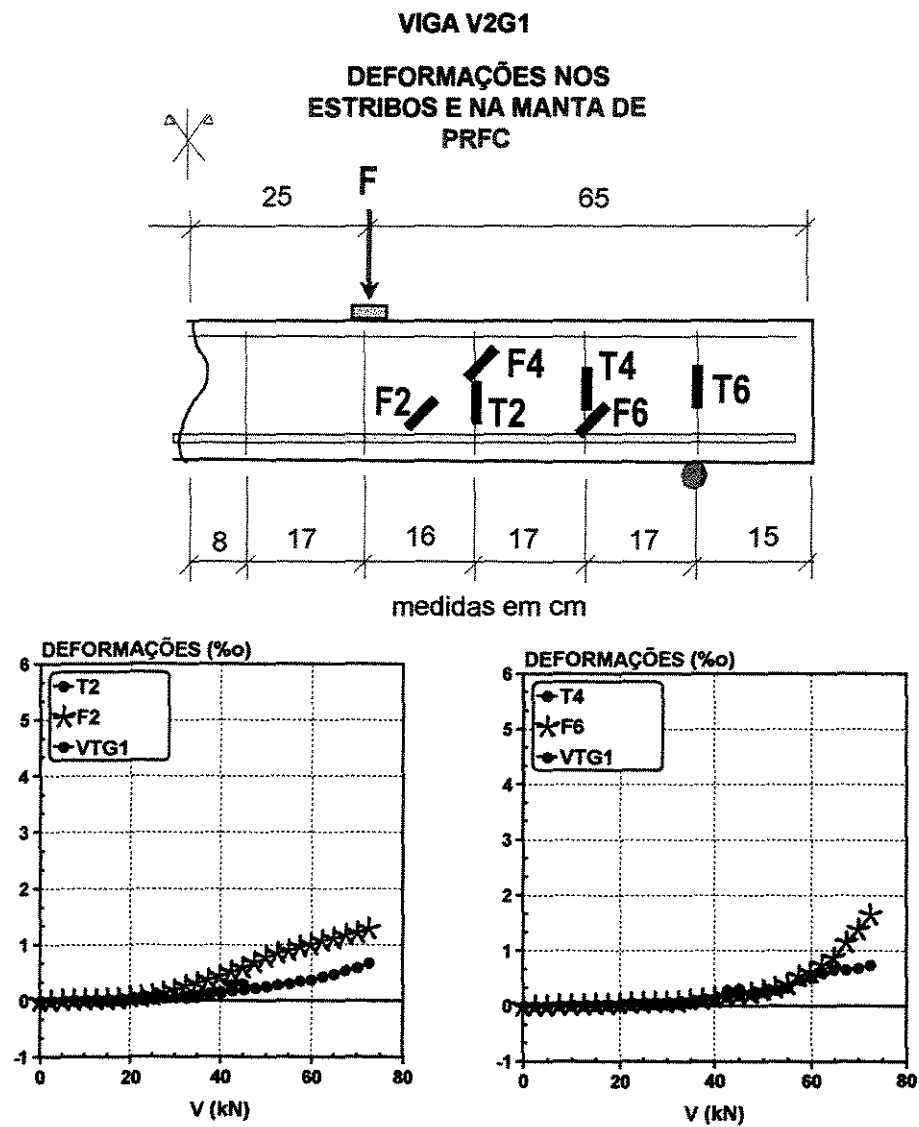


FIGURA 6.10 – Deformações V2G1 – lado direito

VIGA V1G2
DEFORMAÇÕES NOS
ESTRIBOS E MANTA DE PRFC

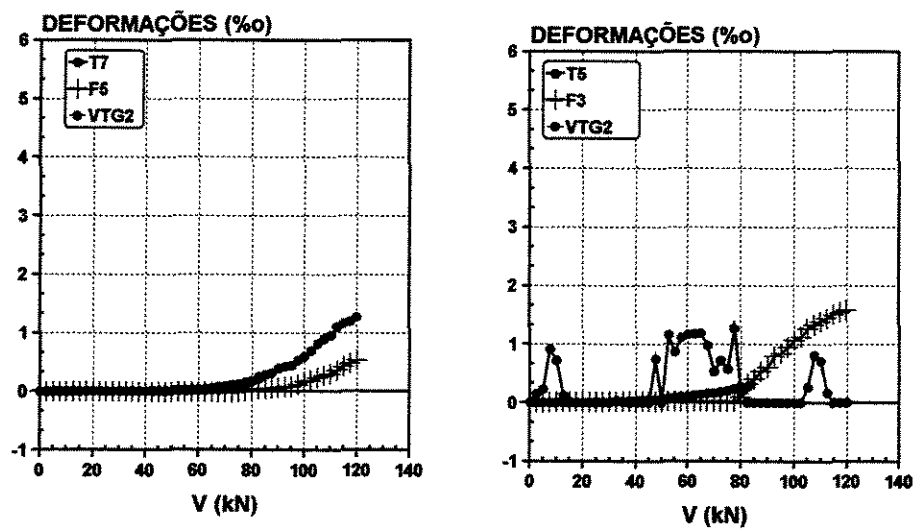
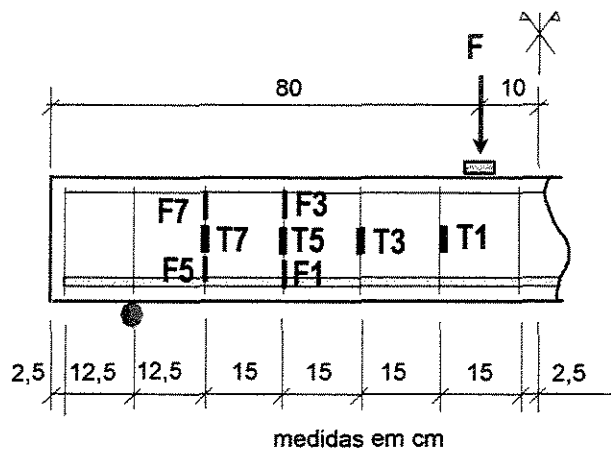


FIGURA 6.11 – Deformações V1G2 – lado esquerdo

VIGA V1G2
DEFORMAÇÕES NOS
ESTRIBOS E MANTA DE PRFC

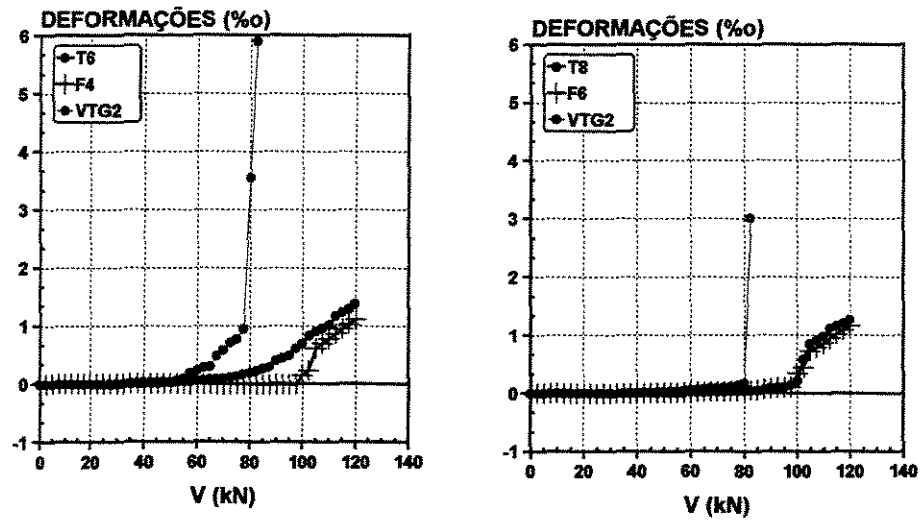
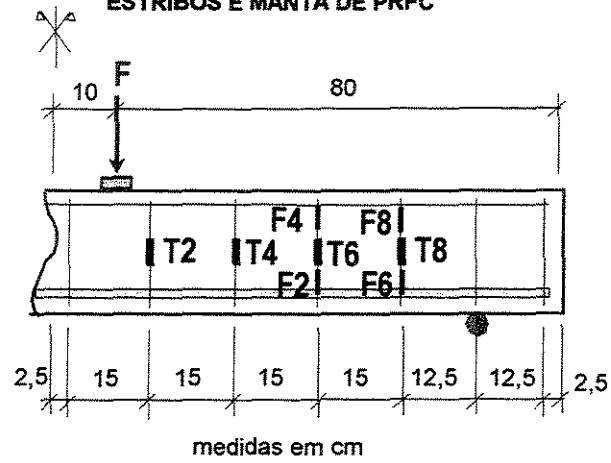
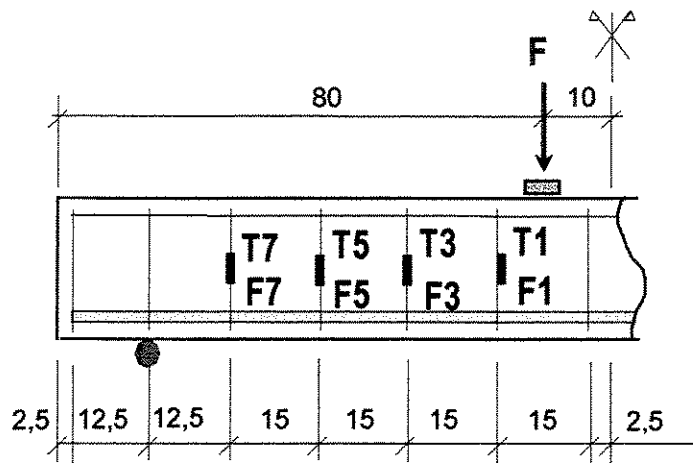


FIGURA 6.12 – Deformações V1G2 – lado direito

VIGA V2G2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS E MANTA DE PRFC



medidas em cm

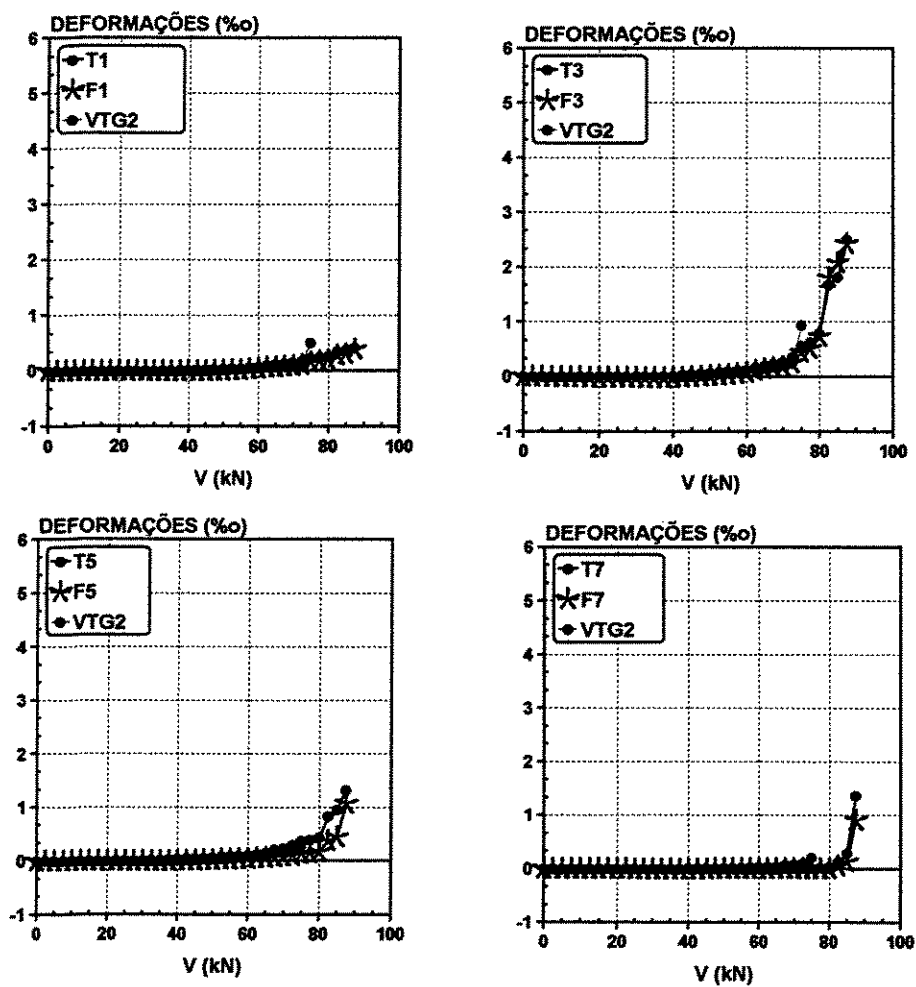
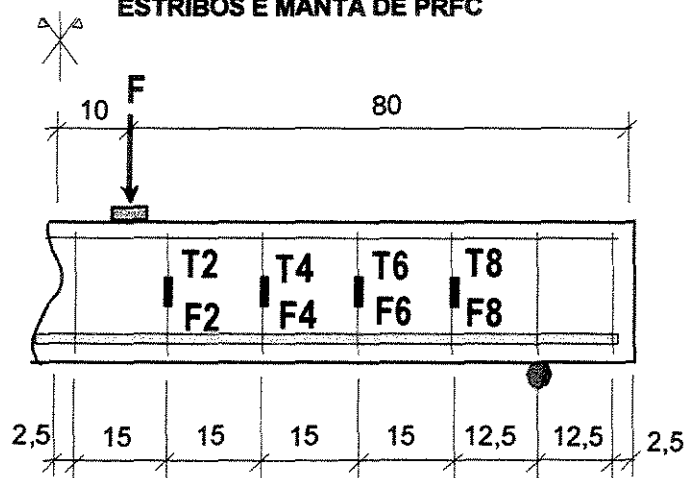


FIGURA 6.13 – Deformações V2G2 – lado esquerdo

VIGA V2G2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS E MANTA DE PRFC



medidas em cm

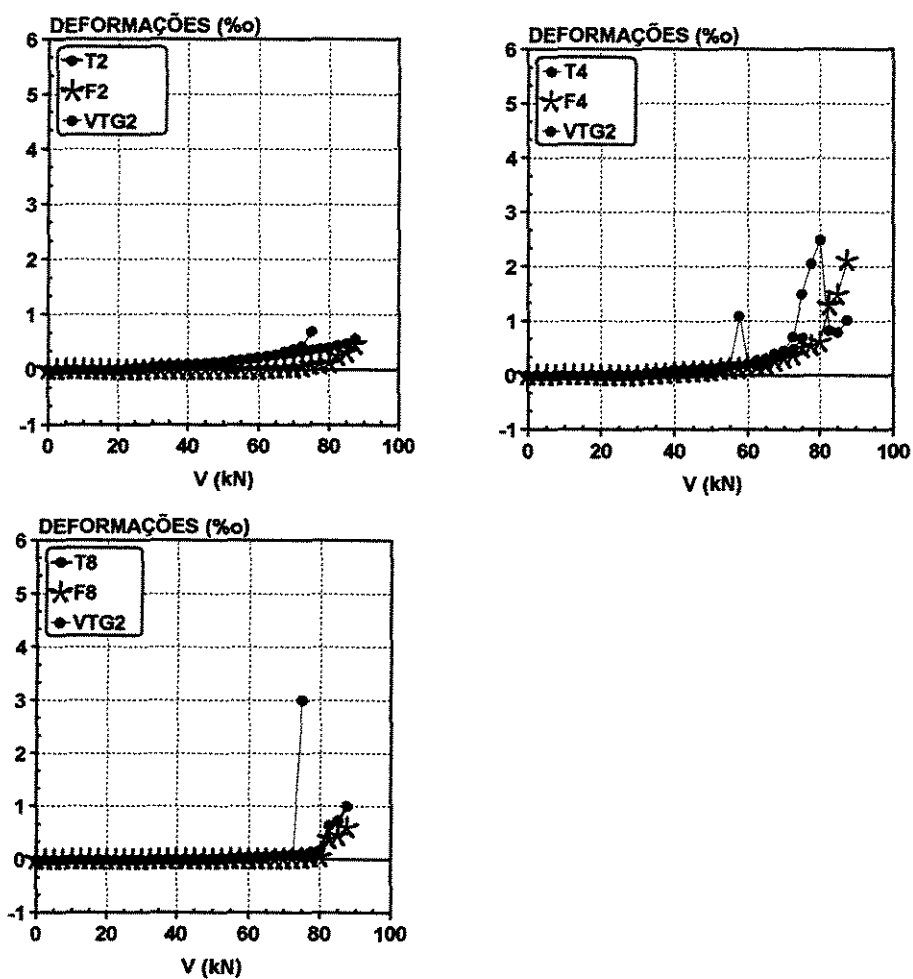
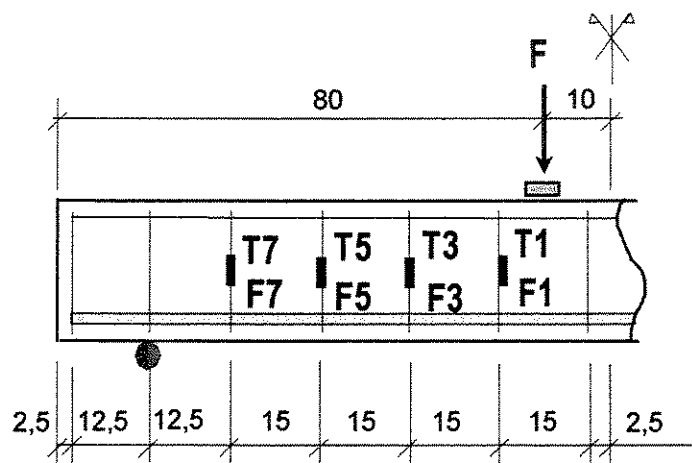


FIGURA 6.14 – Deformações V2G2 – lado direito

VIGA V3G2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS E MANTA DE PRFC



medidas em cm

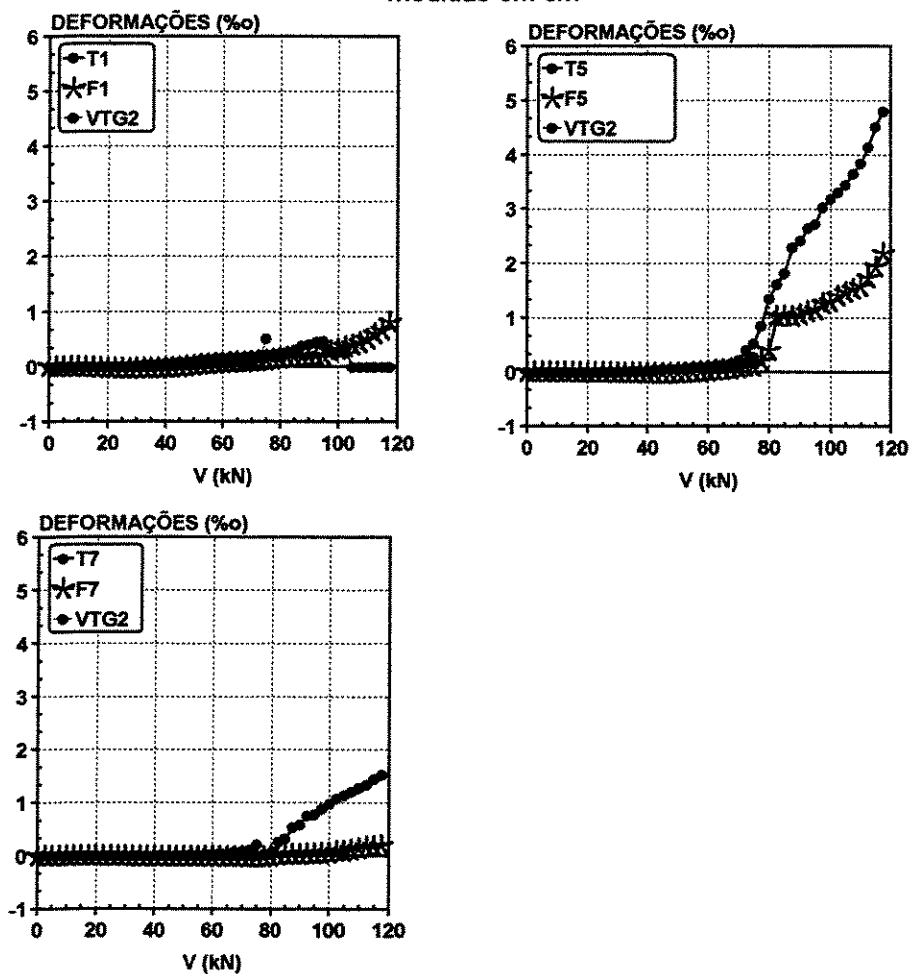
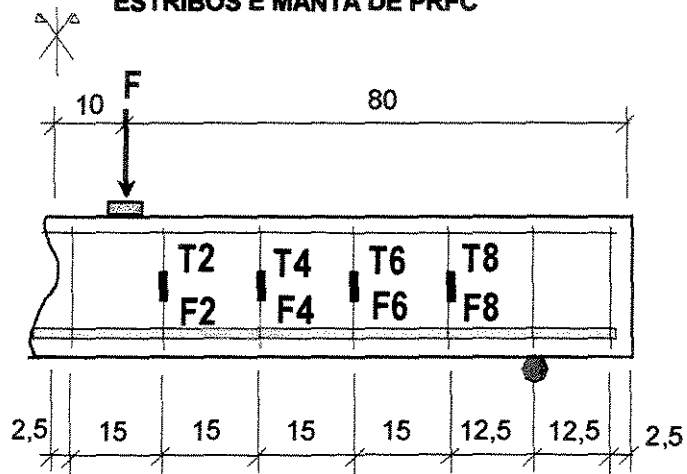


FIGURA 6.15 – Deformações V3G2 – lado esquerdo

VIGA V3G2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS E MANTA DE PRFC



medidas em cm

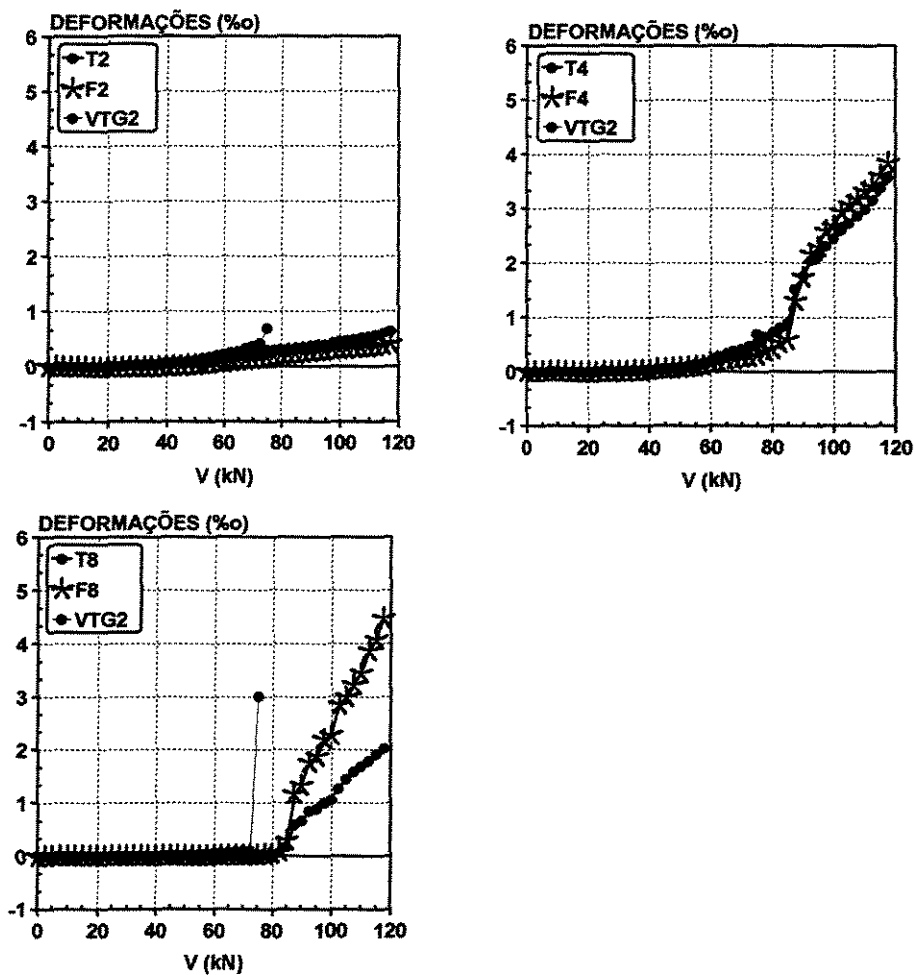


FIGURA 6.16 – Deformações V3G2 – lado direito

Nas vigas de referência, VTG1 e VTG2, o Estado Limite Último foi por escoamento da armadura transversal, como esperado, já que sua armadura transversal foi adotada abaixo do valor encontrado no dimensionamento.

Para as vigas V1G1 e V2G1, reforçadas com a manta de PFRC direcionadas a 90° e a 45°, respectivamente, a ruína ocorreu por flexão, caracterizada pela deformação plástica excessiva da armadura longitudinal, comprovando a eficácia do método de reforço analisado.

De acordo com a Figura 6.1, pode-se observar que não houve diferença significativa na deformação dos estribos quando comparadas as vigas reforçadas com a viga testemunho, e também, quando comparadas as vigas V1G1 e V2G1, tendo praticamente a mesma deformação independente do método de reforço aplicado (fibras direcionadas a 90° ou 45°).

A viga V1G2, do Grupo 2, teve ruína por flexão, caracterizada pela deformação plástica excessiva da armadura longitudinal.

A viga V2G2, do Grupo 2, alcançou a ruína por descolamento do compósito de PRFC, ocorrendo em seguida o escoamento da armadura transversal.

A viga V3G2, do Grupo 2, alcançou a ruína por descolamento do compósito de PRFC e logo em seguida ocorreu o esmagamento do concreto no banzo comprimido. Vale ressaltar que o descolamento ocorreu apesar da ancoragem prevista pelo método de reforço ter sido executada em tiras enlaçando a viga por completo.

Analisando-se a Figura 6.2, pode-se observar que a viga V1G2 apresentou valores de deformação para a armadura transversal inferiores às outras vigas do Grupo 2, já que a fibra não descolou e levou à ruína por flexão.

De acordo com a Figura 6.7, os valores dos deslocamentos verticais, obtidos no meio do vão em função da força cortante nos apoios, para as vigas do Grupo 1, não apresentaram diferenças significativas entre as vigas reforçadas e a viga testemunho.

O mesmo ocorreu para as vigas do Grupo 2, como mostra a Figura 6.8, onde a rigidez da viga reforçada não foi influenciada pelo reforço lateral.

Observa-se também que os métodos de reforço à força cortante aplicado nas vigas dos grupos 1 e 2 não influenciaram na deformação da armadura longitudinal, assim como no incremento da resistência à flexão, de acordo com as figuras 6.3 e 6.4.

Analisando-se a Figura 6.5, pode-se observar que a deformação do concreto apresentou valores menores para as vigas reforçadas quando comparadas com a viga testemunho, sendo que a viga que recebeu o reforço com as fibras de carbono direcionadas a 45° obteve a menor deformação no concreto.

Comparando-se os resultados teóricos, propostos por Chaallal et al.⁽⁸⁾, e os resultados experimentais, indicados na Tabela 6.1, observa-se que as forças últimas das vigas reforçadas do Grupo 1 foram inferiores aos valores teóricos, uma vez que as vigas V1G1 e V2G1 tiveram ruína por flexão antes do descolamento do compósito.

Para a viga V1G2, do Grupo 2, o valor da força última foi superior ao valor esperado, sendo que a viga ruiu por flexão antes do descolamento do compósito esperado no dimensionamento segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾.

A viga V2G2 teve ruína por descolamento do compósito com um valor da força última inferior aos valores teóricos, segundo Chaallal et al.⁽⁸⁾, considerando tanto a ruína da fibra quanto o descolamento do compósito.

De acordo com a Tabela 6.1, a viga V3G2, segundo os valores teóricos esperados por Chaallal et al.⁽⁸⁾, obteve um valor da força última, na ruína por descolamento, superior aos valores teóricos, considerando a ruína da fibra ou o descolamento do compósito.

Quando comparados os resultados dos ensaios com os resultados teóricos propostos pelo ACI-440R-00⁽⁴⁾, indicados na Tabela 6.2, observa-se que para as vigas do Grupo 1 os valores experimentais foram inferiores aos teóricos, uma vez que as vigas reforçadas romperam à flexão antes do descolamento esperado do compósito.

Para a viga V1G2, do Grupo 2, o valor da força última foi superior ao valor teórico esperado, sendo que a viga apresentou ruína por flexão antes do descolamento do compósito esperado no dimensionamento segundo o ACI-440R-00⁽⁴⁾.

De acordo com a Tabela 6.2, as vigas V2G2 e V3G2, do Grupo 2, também apresentaram valores da força última superiores aos valores teóricos esperados considerando a ruína por descolamento do compósito.

7 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais desta pesquisa comprovaram a eficiência do sistema de reforço à força cortante de vigas em concreto armado com a utilização do compósito de PRFC.

O incremento de resistência nas vigas reforçadas foi de até 53% para as vigas do Grupo 1, em comparação às vigas testemunhos, de até 61% para as vigas do Grupo 2. Vale observar que o incremento obtido na resistência à força cortante de ruína, após a execução do reforço, pode ser ainda em muito aumentado se as vigas forem reforçadas, também, com relação às tensões normais.

Nos métodos propostos pelo ACI-440R-00⁽⁴⁾ e por Chaallal et al.⁽⁸⁾, os resultados dos ensaios das vigas reforçadas se aproximaram dos valores teóricos. Para as vigas V2G2 e V3G2, o incremento de resistência nas vigas reforçadas foi efetivo, visto que o modo de ruína observado foi o mesmo que o esperado e com valores superiores aos teóricos.

Apesar de estas vigas apresentarem o mesmo modo de ruína que o esperado, o descolamento do compósito ocorreu antes do valor da deformação última da fibra, calculado pelo método proposto pelo ACI-440R-00⁽⁴⁾. Isto indica que o valor de 4% para a deformação última na fibra pode ser considerado um valor razoável no cálculo da ruína por descolamento.

Em relação à rigidez das vigas, conclui-se que o reforço à força cortante utilizando-se o compósito de PRFC não resultou em grandes incrementos de rigidez para as vigas reforçadas, após análise das figuras 6.7 e 6.8.

Os resultados obtidos neste trabalho, tanto em relação às vigas de concreto com resistência usual quanto às vigas de alta resistência, sugerem que os procedimentos atuais de dimensionamento do reforço ao esforço cortante com PRFC para ruína da fibra são muito conservadores e contra a segurança no dimensionamento para ruína por descolamento, quando comparados aos valores teóricos esperados.

O compósito de PRFC e o aço colocados como armadura transversal, foram muito pouco solicitados, mesmo para intensidades de força muito próximas dos valores teóricos, nas vigas reforçadas. A ruína por flexão, nas vigas reforçadas, impediu análise do comportamento da fibra de carbono até obterem ruína por força cortante, seja por descolamento ou por ruína da fibra.

Os resultados das vigas de concreto usual reforçadas com PRFC sugerem a necessidade de dar continuidade ao trabalho, utilizando-se o reforço em tiras, visto que o compósito de PRFC e a armadura transversal foram pouco exigidos nestes arranjos estudados.

Vale ressaltar a necessidade de aprimorar o método de dimensionamento, principalmente na determinação dos critérios de cálculo para a ancoragem do compósito de PRFC, para evitar a ruína por descolamento, ocorrida nas vigas do Grupo 2.

Resta observar que os resultados aqui apresentados são apenas uma parte de um estudo mais aprofundado sobre o comportamento de vigas de concreto reforçadas com compósito de PRFC, que encontra-se em desenvolvimento no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-SULAIMANI, G. J.; SHARIF, A.; BASUNBUL, I. A.; BALUCH, M. H., AND GHALEB, B. N. "Shear Repair for Reinforced Concrete by Fiberglass Plate Bonding". **ACI Structural Journal**, V. 91, No. 3, p458-464, July-August 1994.
2. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. "Standart Specificantions for Repairing Concrete with Epoxy Mortars". **ACI 5034**. american Concrete Institute. 1979.
3. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI440R-96. "State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures", **ACI 440R-96**, Detroit, Michigan, USA, 1996.
4. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI440R-00. "Guide for the Desing and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", **ACI 440R-00**, USA, 2000.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - **NBR6118**, Rio de Janeiro, 1982.
6. CÁNOVAS, MANUEL FERNÁNDEZ. "Patologia e Terapia do Concreto Armado". **Editora PINI**, 1984.
7. CHAALLAL, O., NOLLET, M. J., AND PERRATON, D. "Shear Strengthening of RC Beams by Externally Bonded Side CFRP Strips". **Journal of Composites for Construction**. Vol. 2, p111-114, May, 1998.
8. CHAALLAL, O., NOLLET, M. J., AND PERRATON, D. "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced-Plastic Plates: Design Guidelines

- for Shear and Flexure”. **Can. J. Civ. Eng.** 25: 692-704, 1998
9. CHAJES, M. J.; JANUSZKA, T. F.; MERTZ, D. R.; THOMSON, T. A.; AND FINCE JR., W. W. “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics”. **ACI Structural Journal**, V. 92, No. 3, May-June 1995.
 10. CUSTÓDIO, V. M. S, RIPPER, T. “Patologia, Recuperação e reforço de Estruturas de Concreto.” **Editora PINI**, São Paulo, 1998.
 11. GALLARDO, G. O.; GALVEZ, L. E. M; MORENO, A. L. J. "Reforço ao Esforço Cortante de Vigas de Concreto Armado através da Colagem Externa de Mantas Flexíveis de Fibras de Carbono (PRFC)". In: **Anais do Instituto Brasileiro de Concreto**, pág. 145 Fortaleza 2000.
 12. GUEDES, S. M. A.; MORENO, A. L. J.; OTTONI, A. B. S. "Reforço à Flexão em Vigas de Concreto de Alta Resistência à Compressão através da colagem externa de Mantas Flexíveis de Fibra de Carbono (PRFC)". In: **Anais do Instituto Brasileiro de Concreto** pág. 76, Fortaleza, 2000.
 13. HELENE, P. R. L. "Manual para Reforço, reparo e Proteção de Estruturas de Concreto" **Editora PINI**, São Paulo, 1992.
 14. KHALIFA, A. e NANNI, A. "Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites". **Cement & Composites**, Vol 22, p165-175, May 1999.
 15. MALEK, A. M., AND SAADATMANESH, H. “Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Web-Bonded Fiber-Reinforced Plastic Plates”. **ACI Structural Journal**, V. 95, No. 4, July-August 1998.
 16. MIYAUCHI, K.; INOUE, S.; NISHIBAYASHI, S.; AND TANAKA, Y. “Shear Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with CFRP Sheet”. **Transactions of the Japan Concrete Institute**, Vol. 19, 1997.
 17. NORRIS, T.; SAADATMANESH, H., AND EHSANI, M. R. “Shear and flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets”. **Journal of Structural Engineering**, Vol. 123, No. 7, July, 1997.
 18. SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T.; "Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de

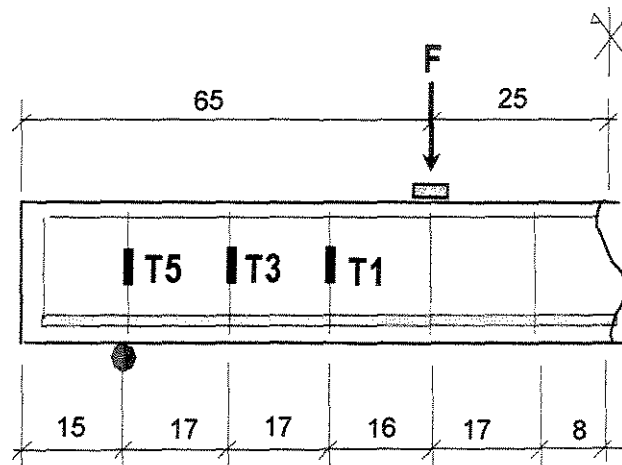
Concreto". **Editora PINI**, São Paulo, 1998.

19. SWAMY, R. N. e MUKHOPADHYAYA, P. "Debonding of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Plate from Concrete Beams". **Proc. Instn. Civ. Engrs. Structs & Bldgs**, 134, p301-317, Nov, 1999.
20. THOMAZ, E. "Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação". **Editora PINI/EPUSP/IPT**, 1989.
21. TRIANTAFILLOU, T. C. "Shear Strengthening of reinforced Concrete Beams using Epoxy-Bonded FRP Composites". **ACI Structural Journal**, V. 95, No. 2, March-April 1998.
22. TRIANTAFILLOU, T. C. e ANTONOPOULOS, C. P. "Desing of Concrete Flexural Strengthened in Shear with FRP". **Journal of Composites for Construction**, November, 2000.

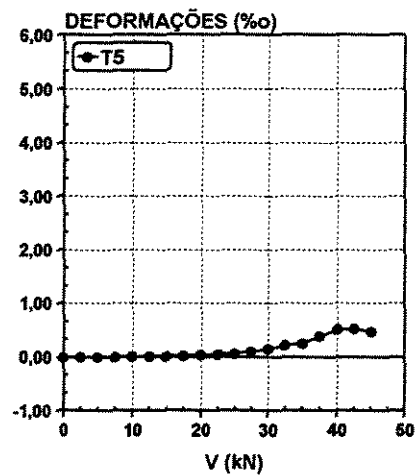
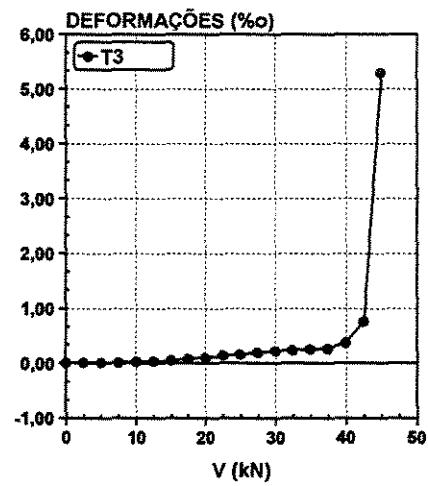
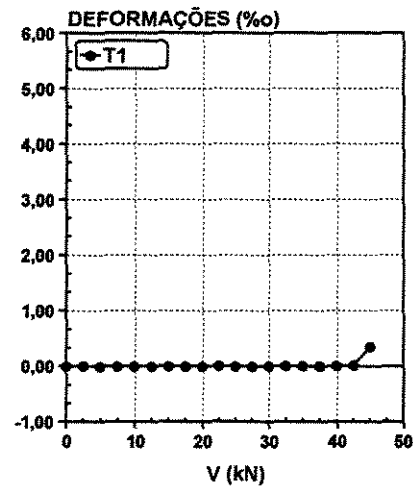
ANEXO - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

VIGA VTG1

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO ESQUERDO

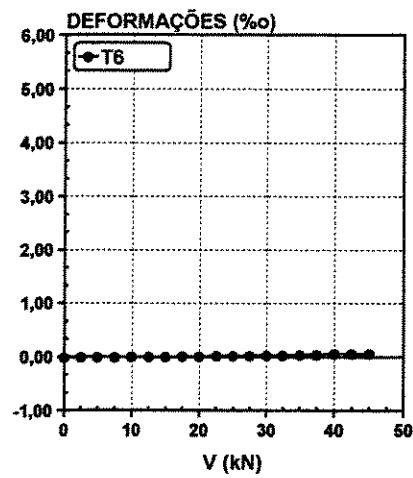
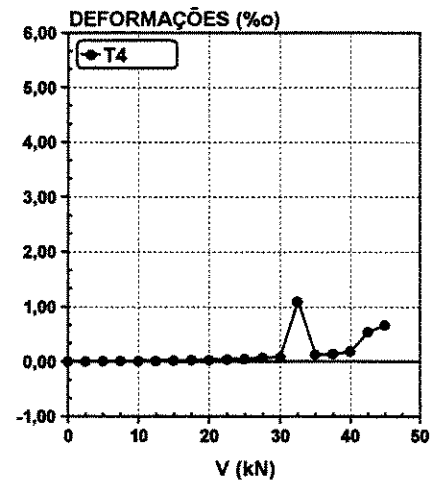
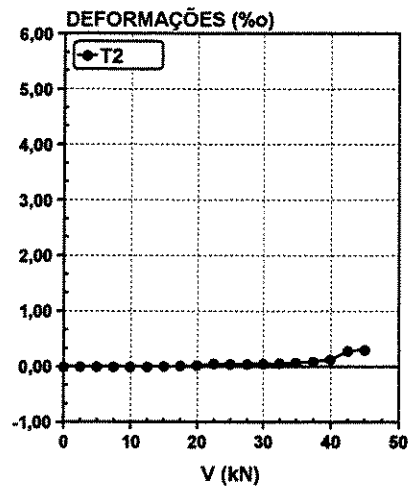
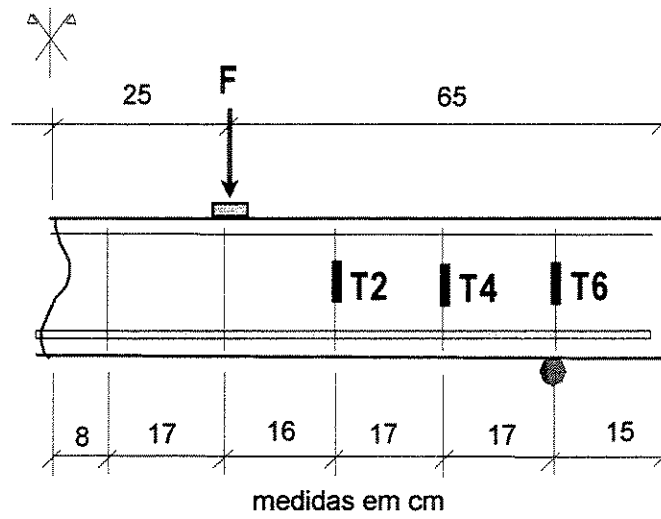


medidas em cm

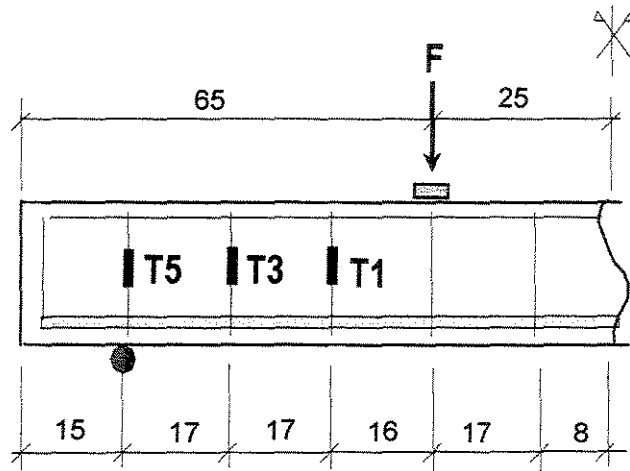


VIGA VTG1

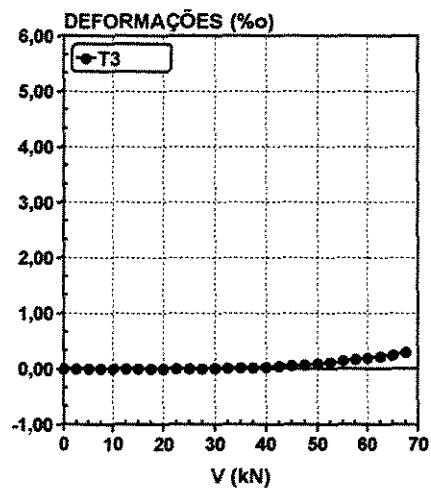
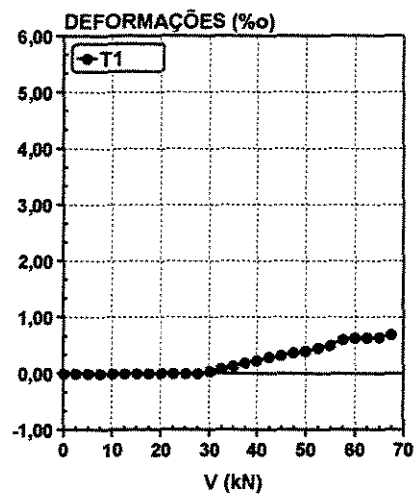
DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO DIREITO



VIGA V1G1 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO ESQUERDO

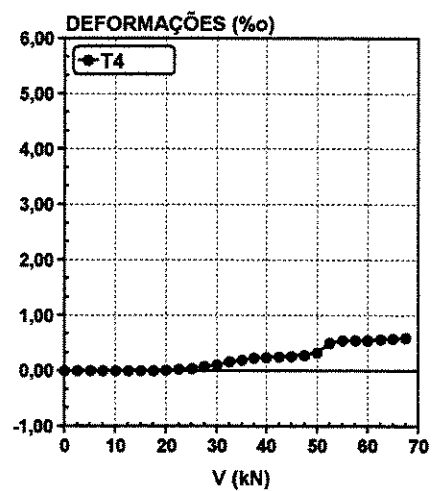
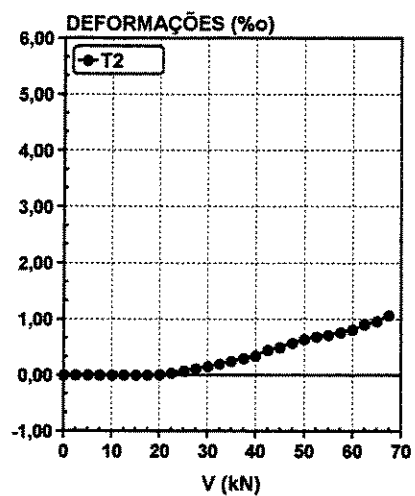
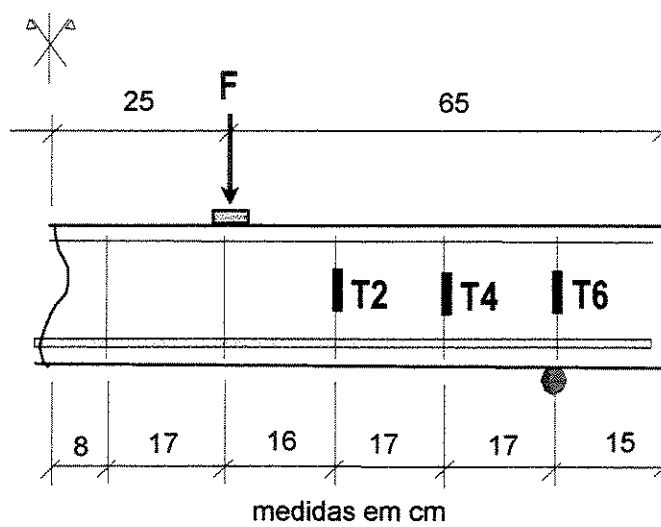


medidas em cm

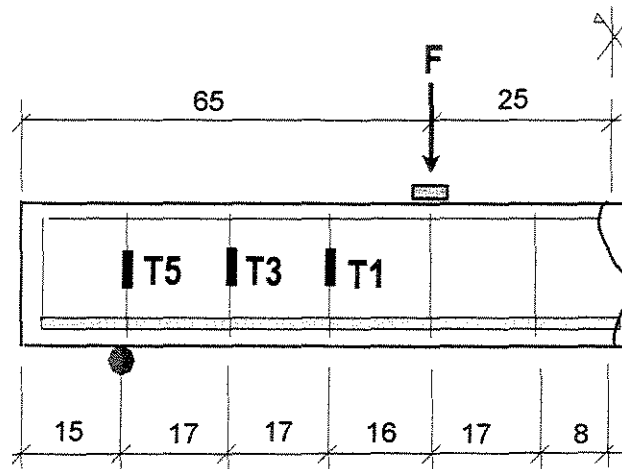


VIGA V1G1

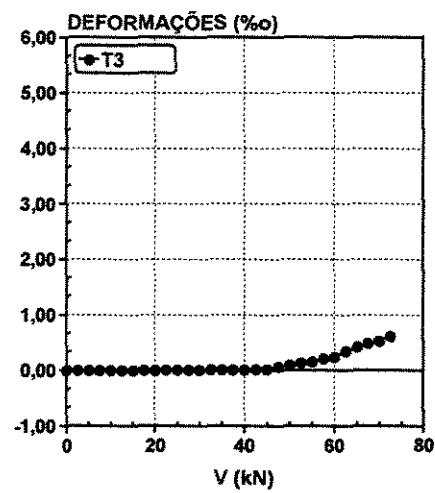
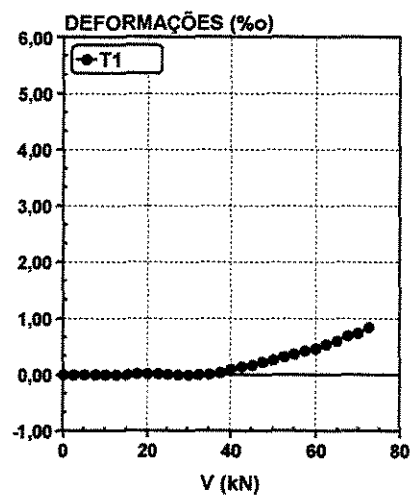
DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO DIREITO



VIGA V2G1 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO ESQUERDO

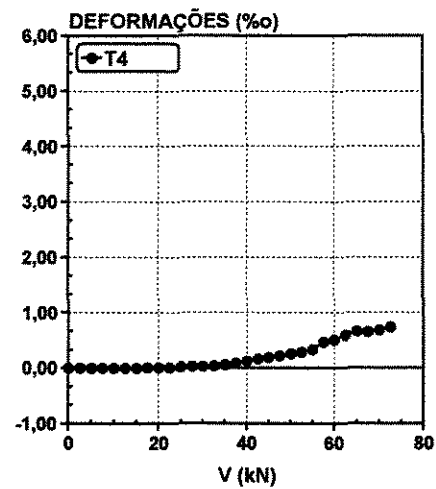
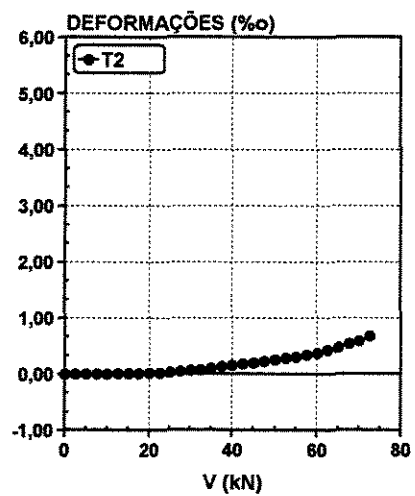
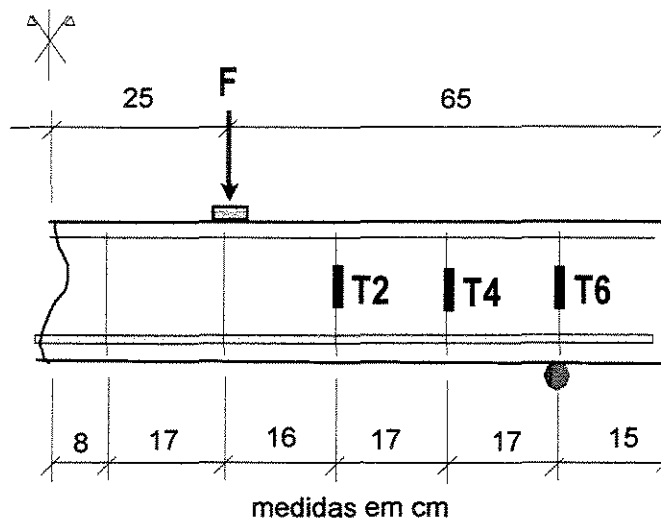


medidas em cm



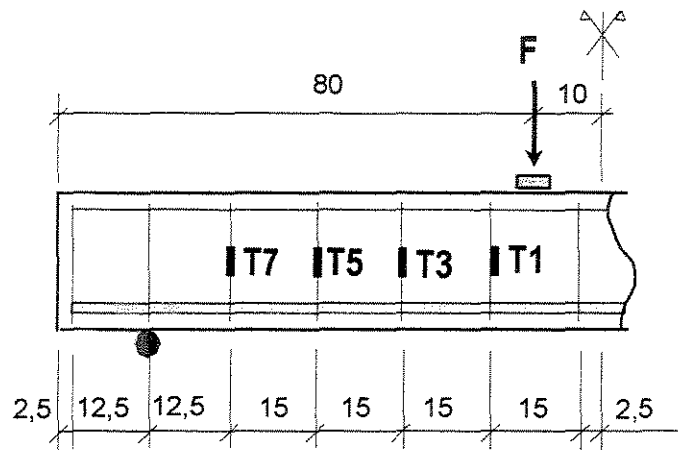
VIGA V2G1

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO DIREITO

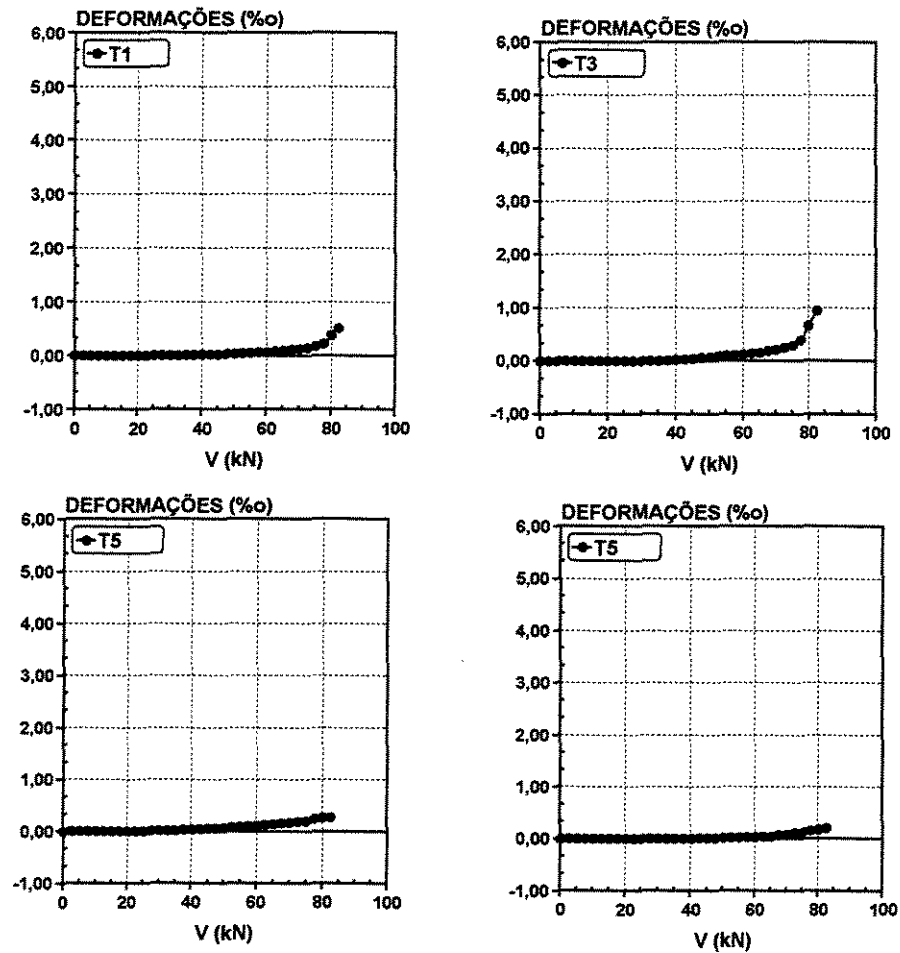


VIGA VTG2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO ESQUERDO

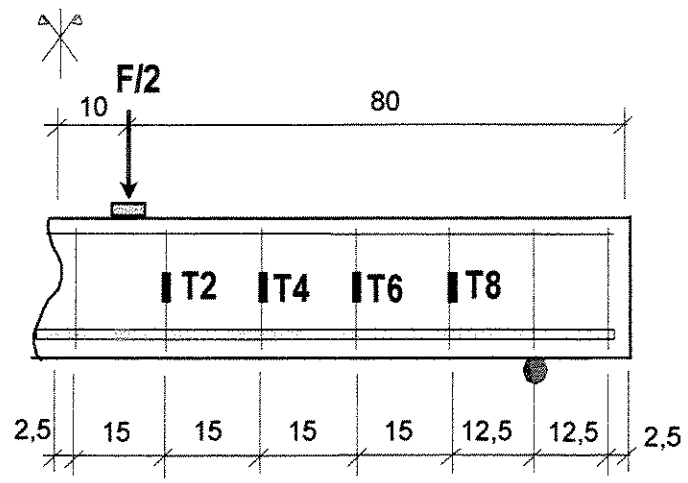


medidas em cm

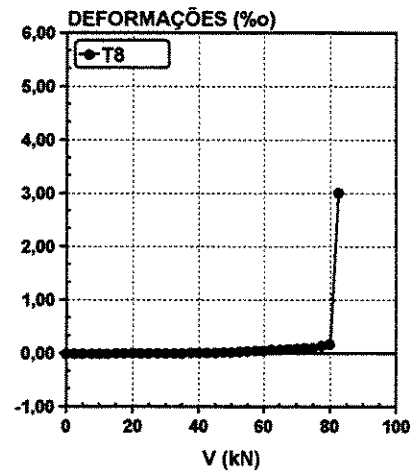
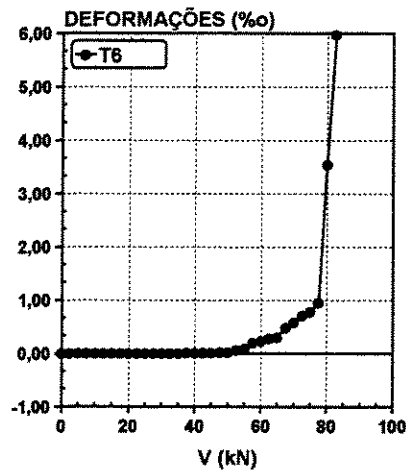
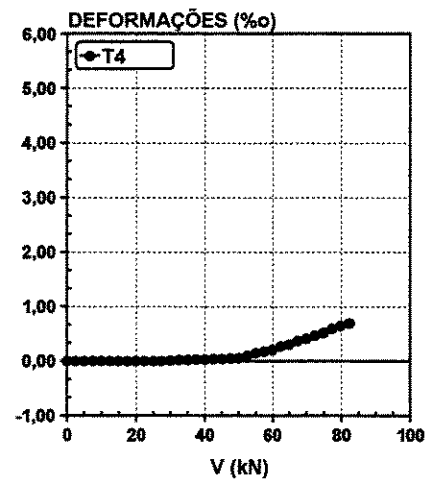
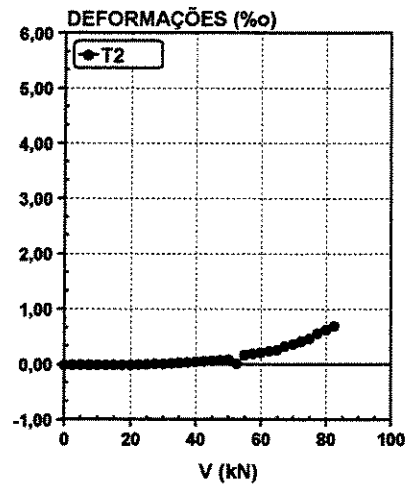


VIGA VTG2

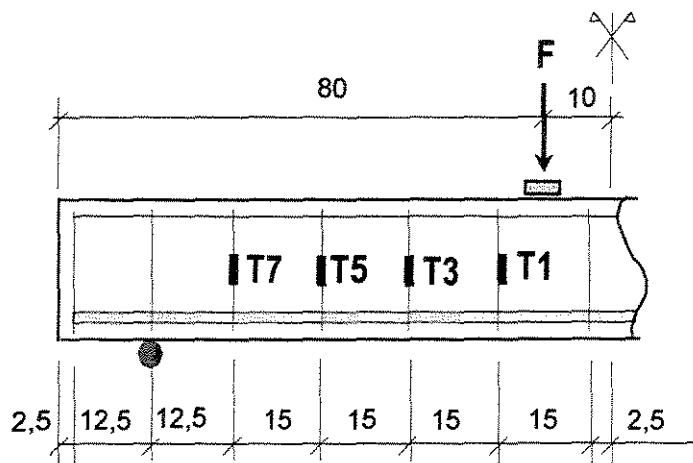
DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO DIREITO



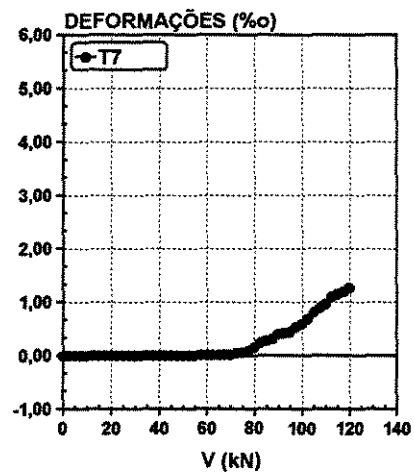
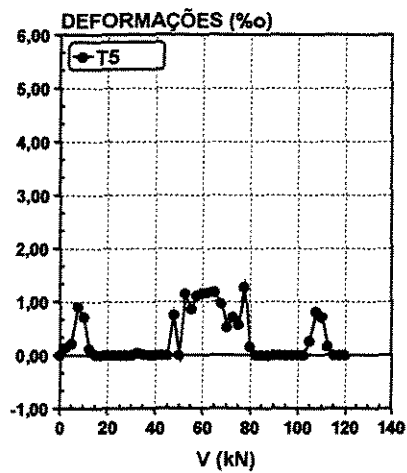
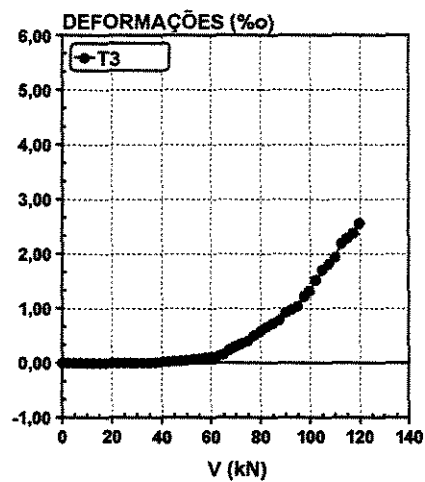
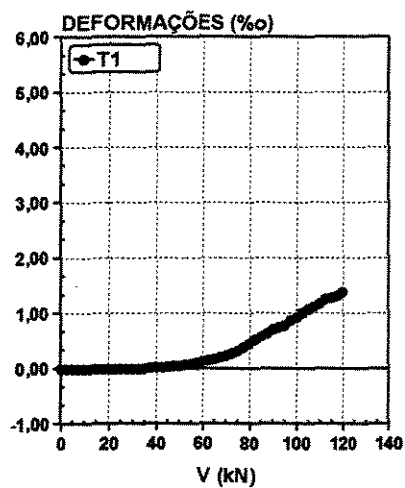
medidas em cm



VIGA V1G2 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO ESQUERDO

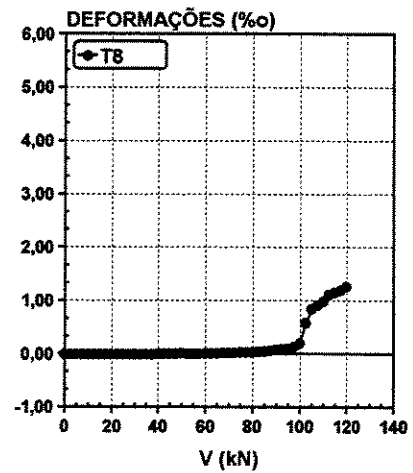
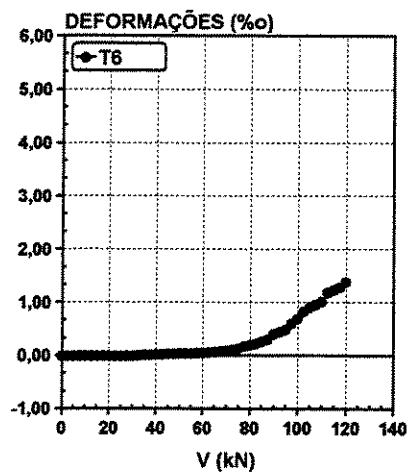
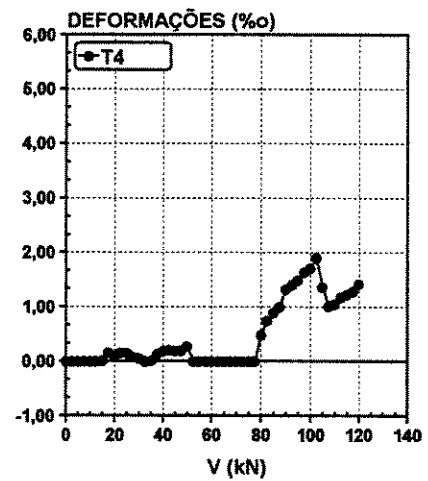
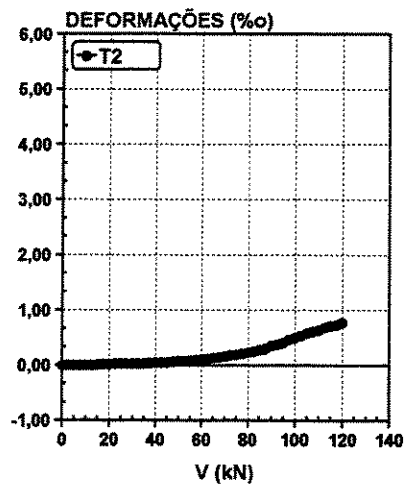
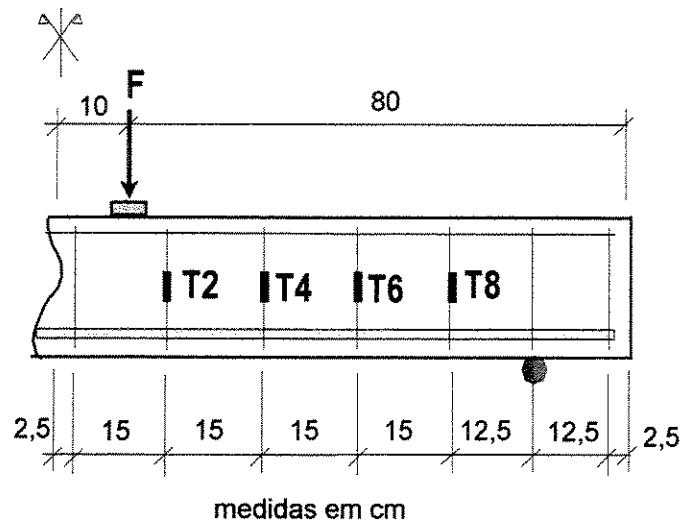


medidas em cm

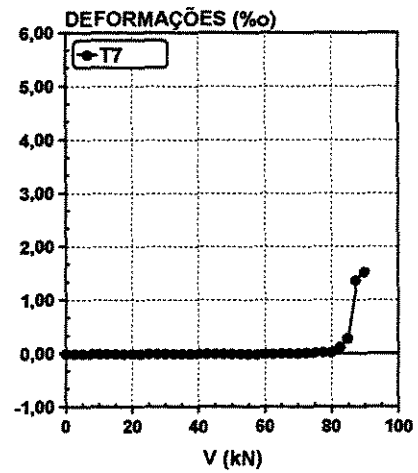
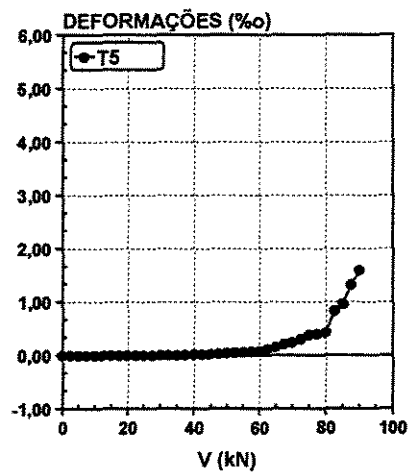
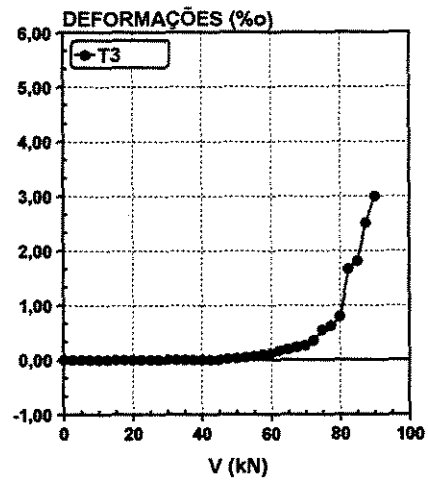
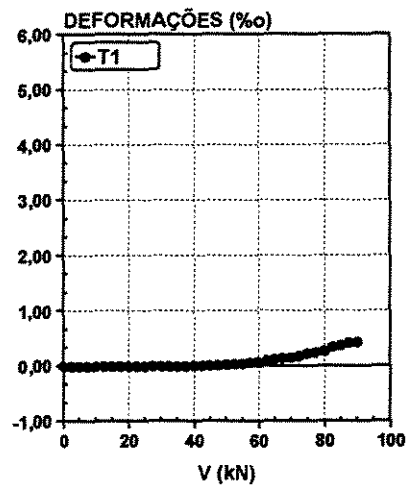
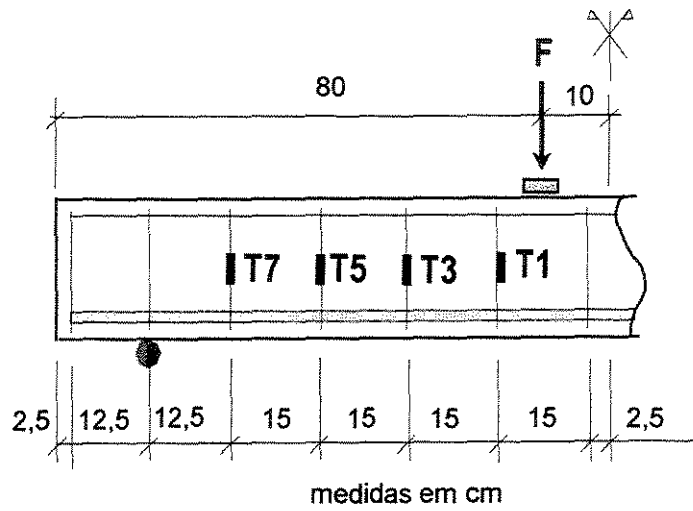


VIGA V1G2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO DIREITO

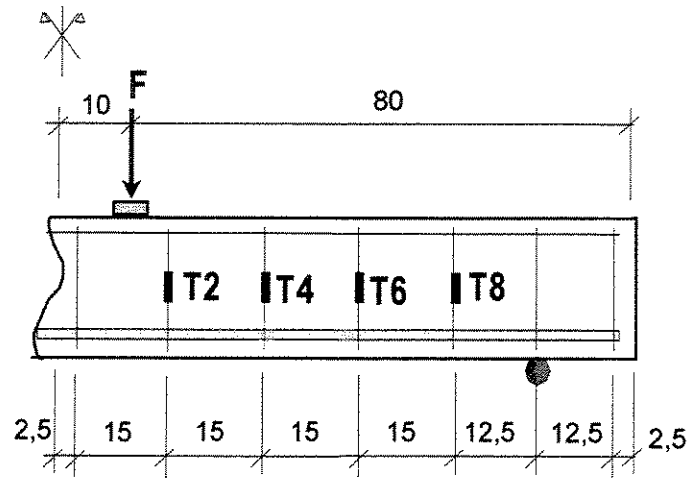


VIGA V2G2 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO ESQUERDO

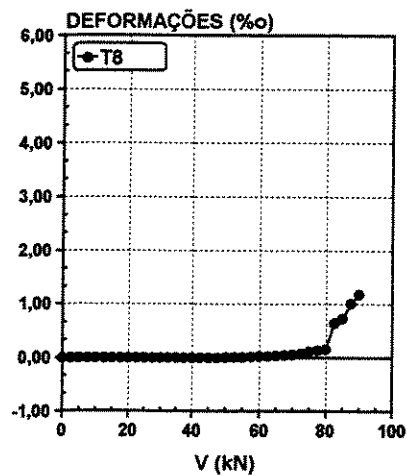
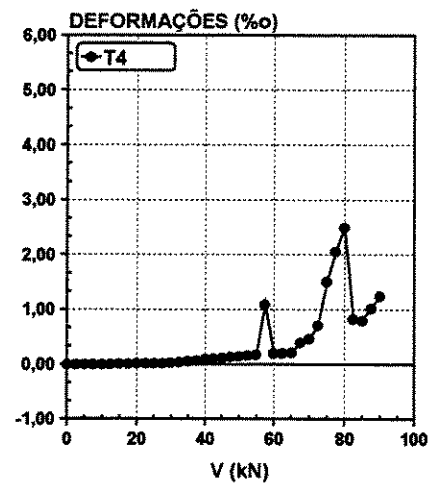
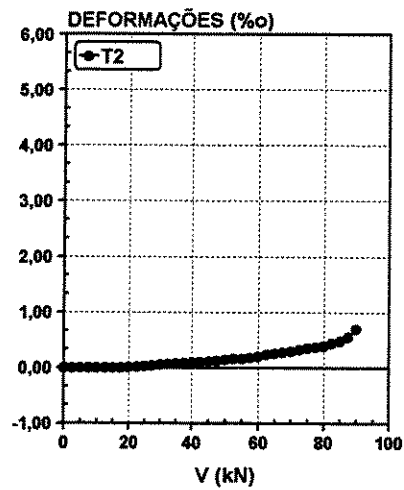


VIGA V2G2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO DIREITO

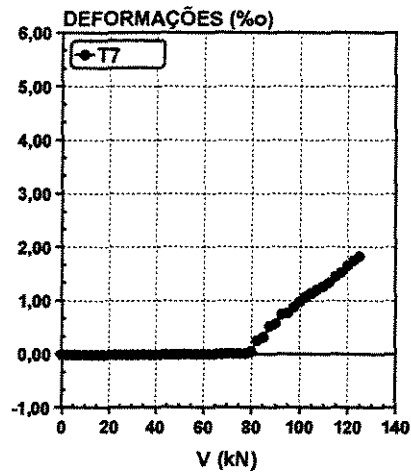
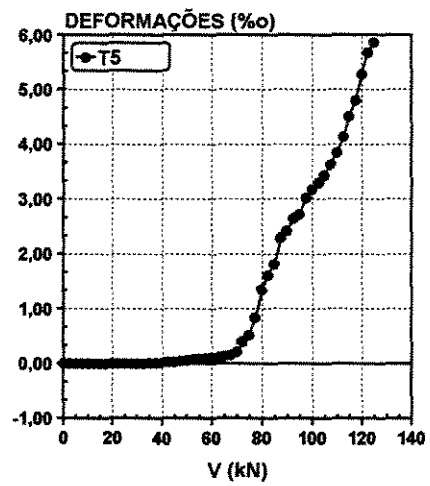
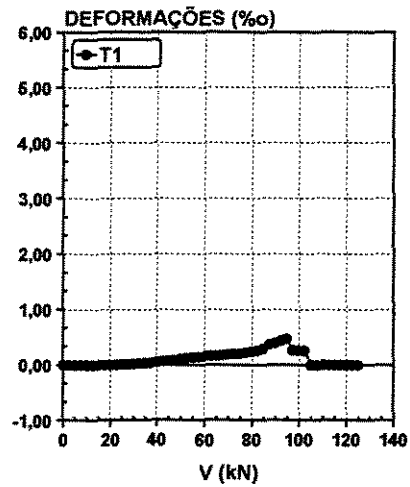
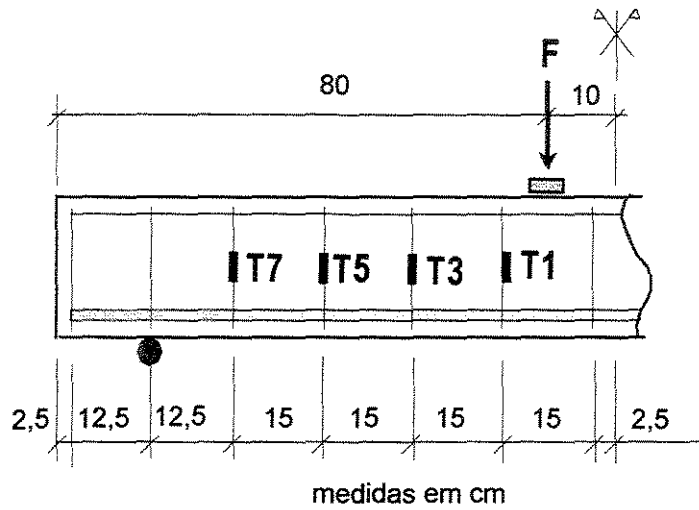


medidas em cm



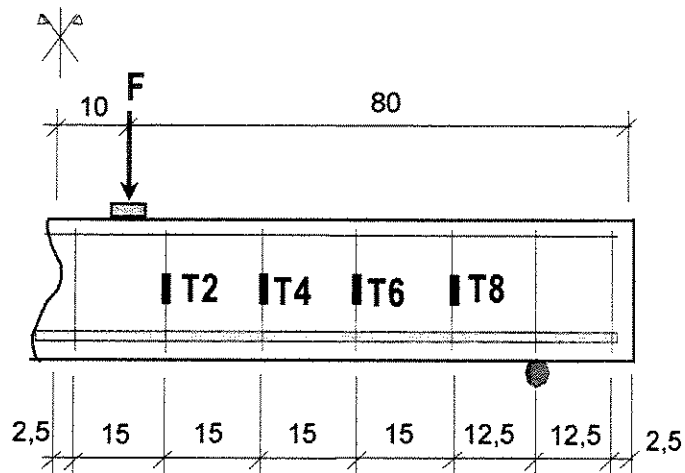
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

VIGA V3G2 DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO ESQUERDO

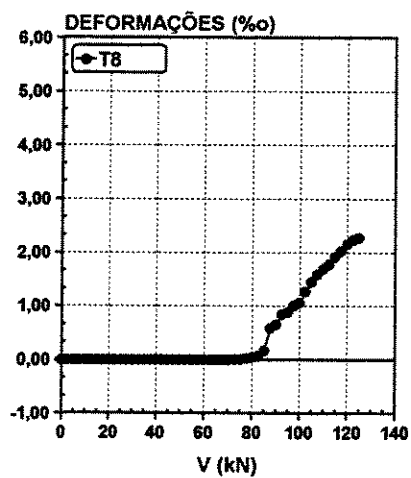
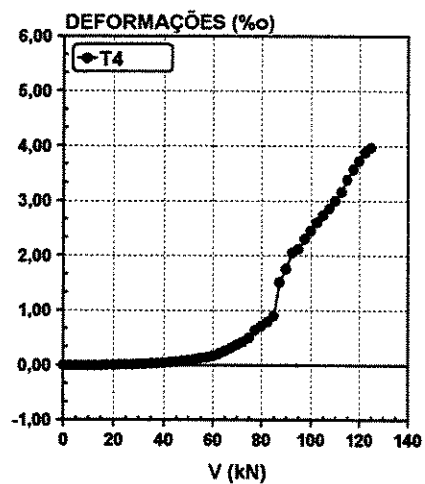
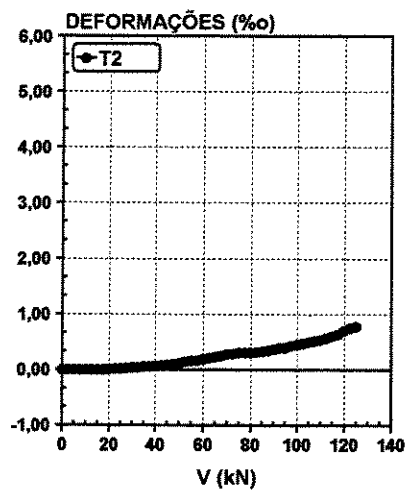


VIGA V3G2

DEFORMAÇÕES NOS ESTRIBOS: LADO DIREITO

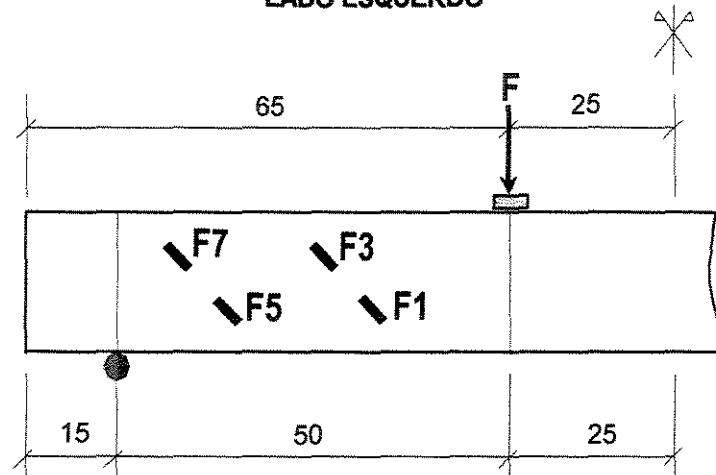


medidas em cm

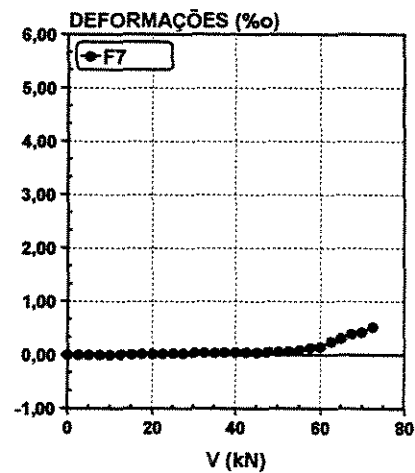
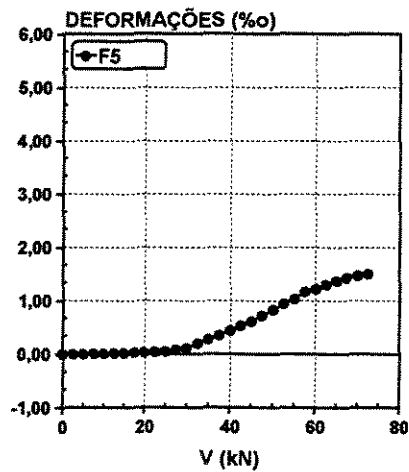
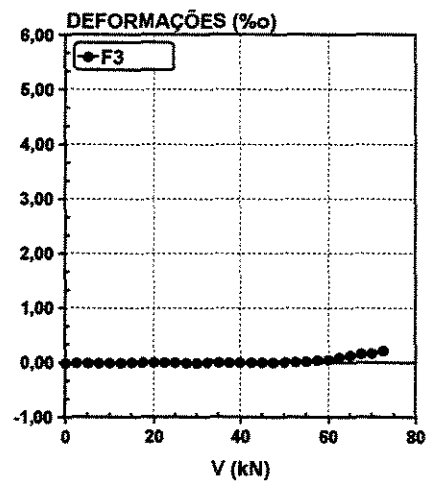
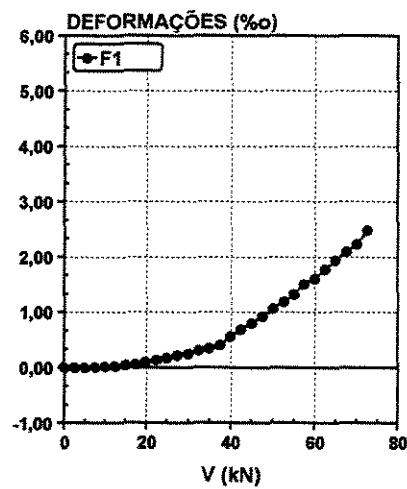


VIGA V2G1

DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC: LADO ESQUERDO

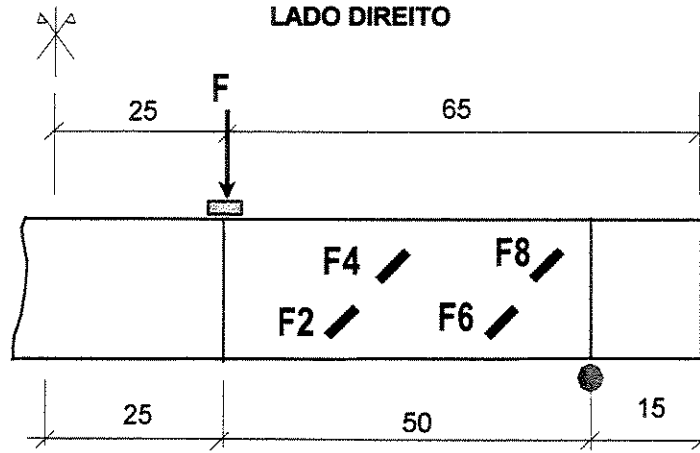


medidas em cm

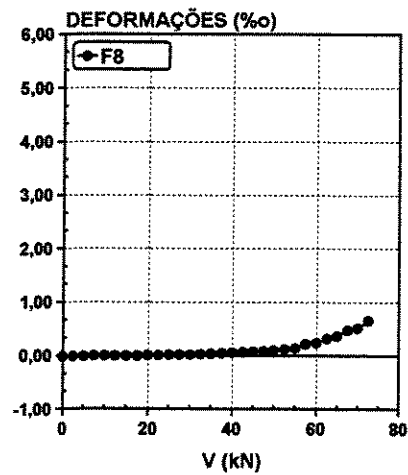
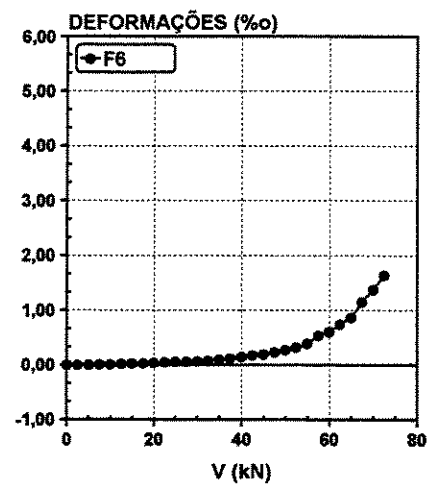
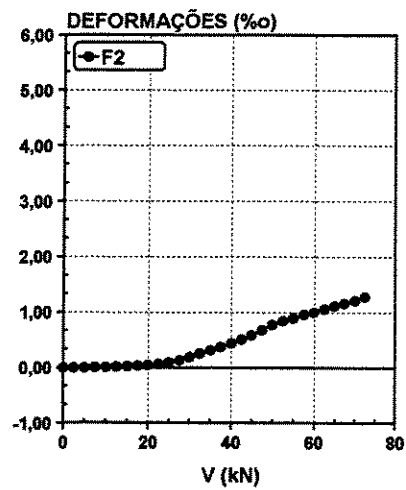


VIGA V2G1

DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC: LADO DIREITO

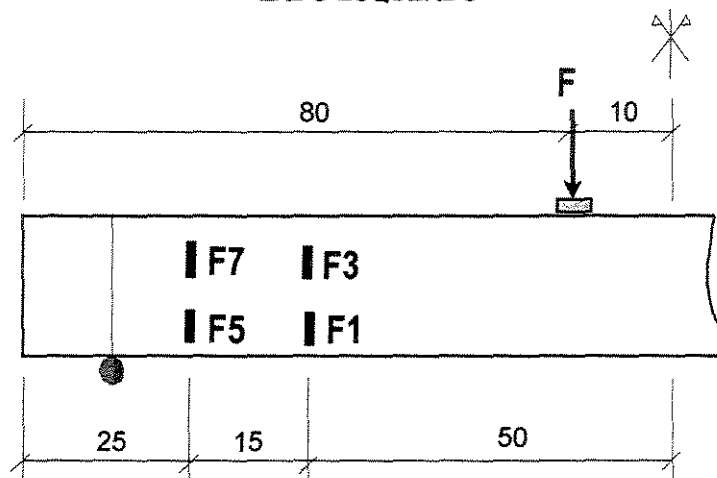


medidas em cm

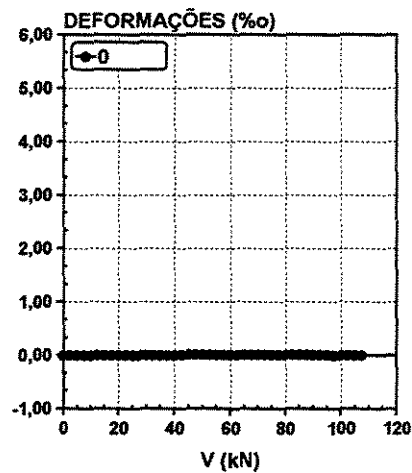
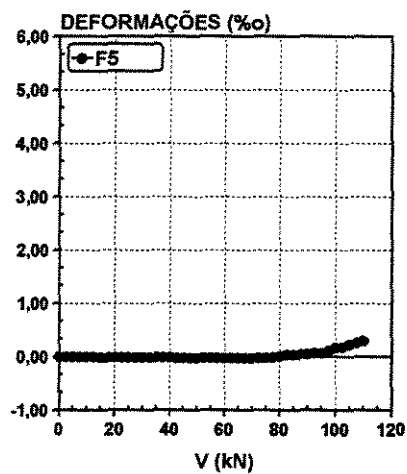
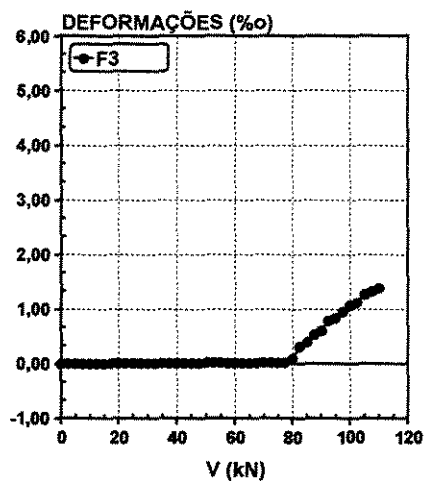
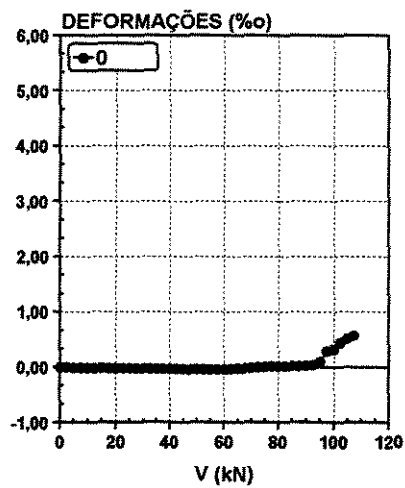


VIGA V1G2

DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC: LADO ESQUERDO

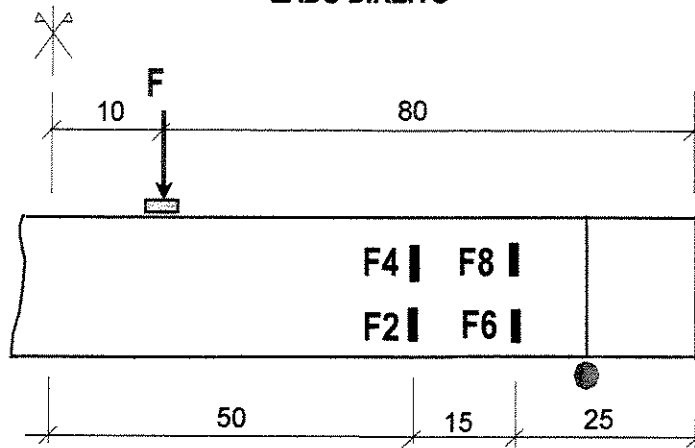


medidas em cm

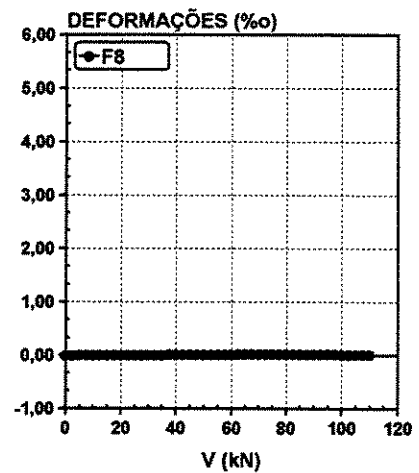
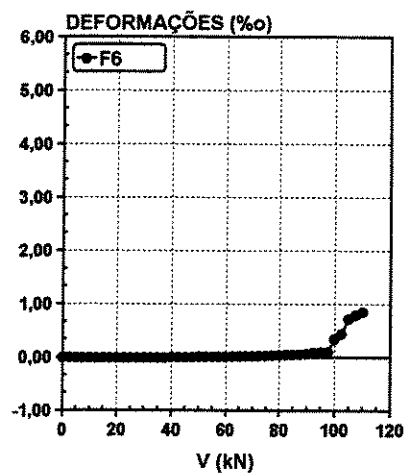
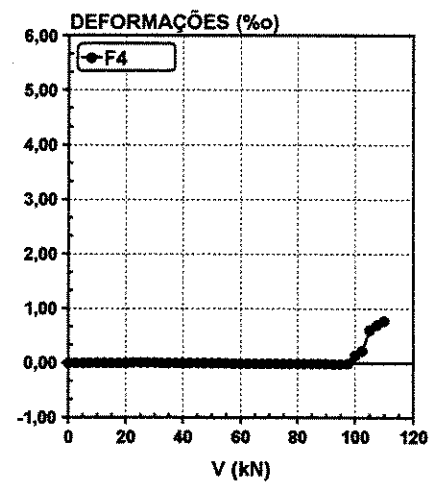
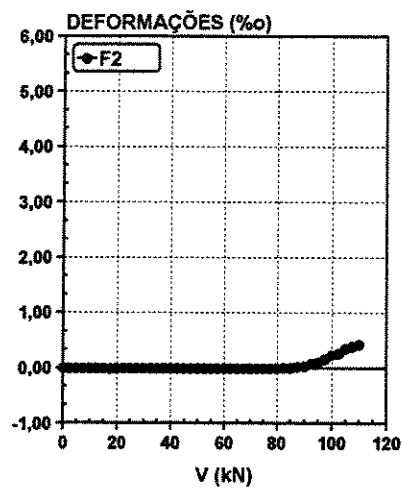


VIGA V1G2

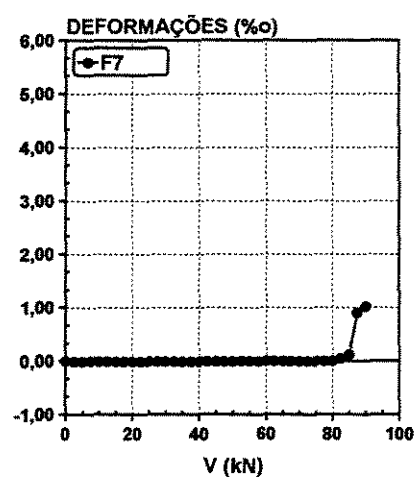
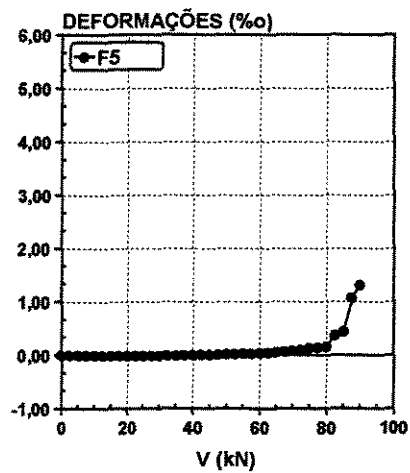
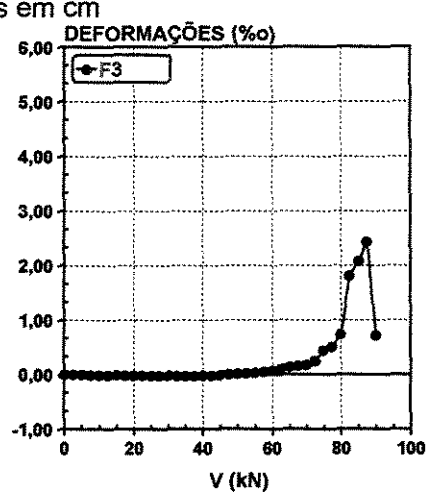
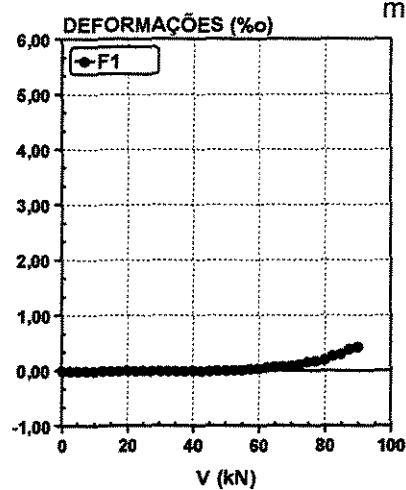
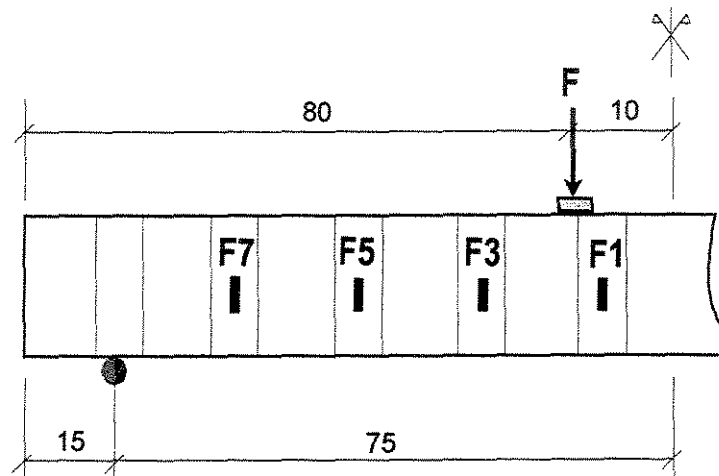
DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC: LADO DIREITO



medidas em cm

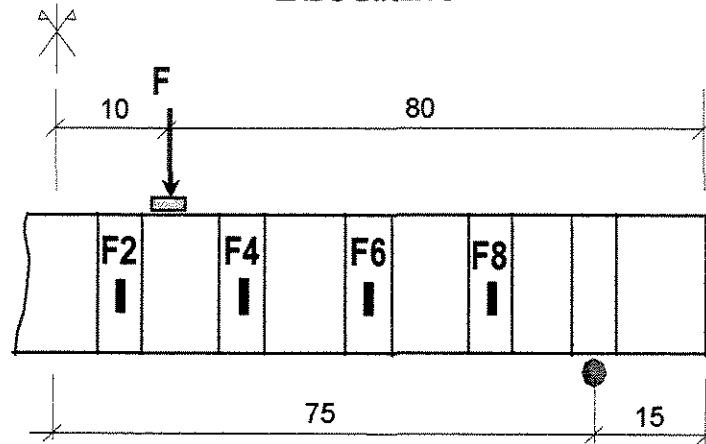


VIGA V2G2 DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC: LADO ESQUERDO

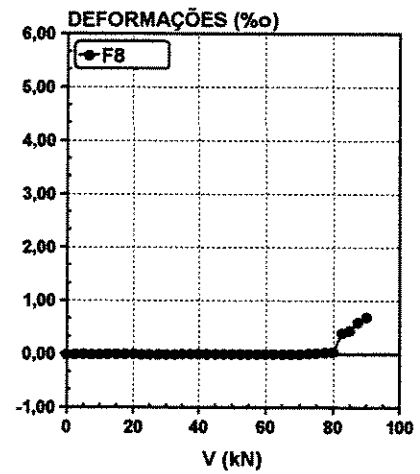
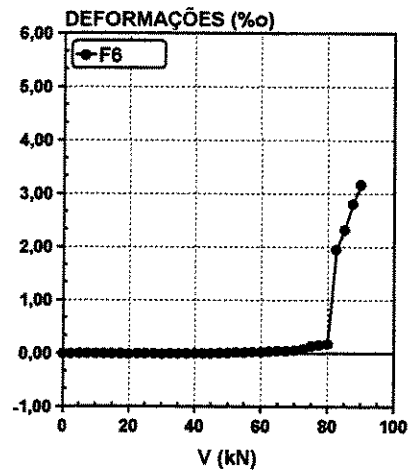
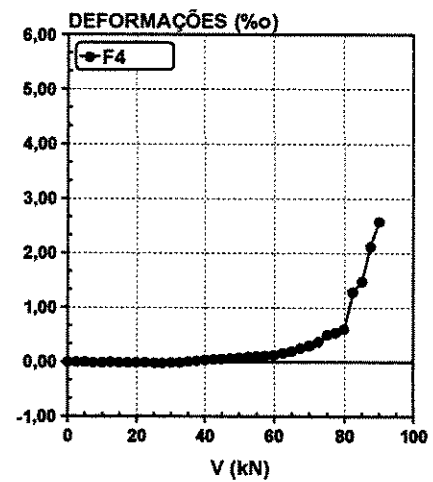
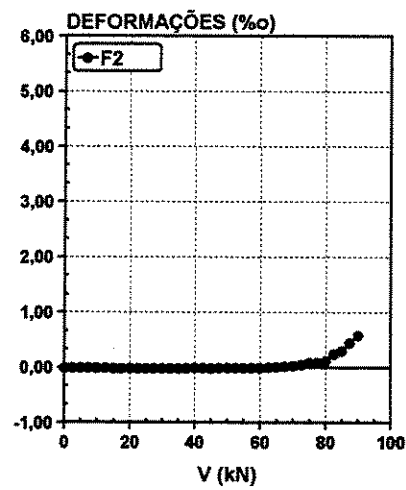


VIGA V2G2

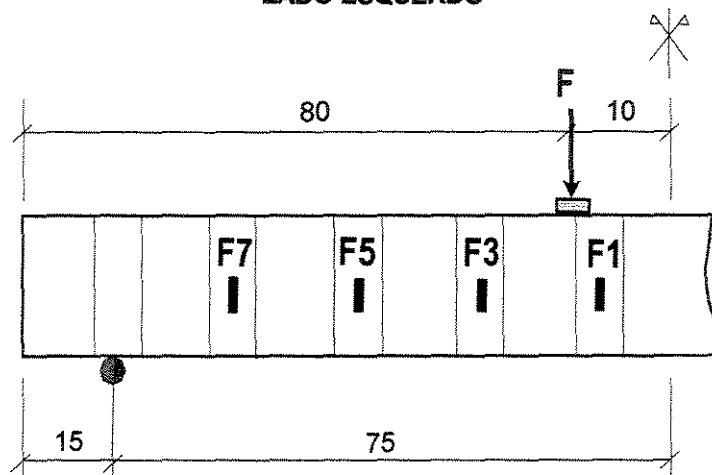
DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC: LADO DIREITO



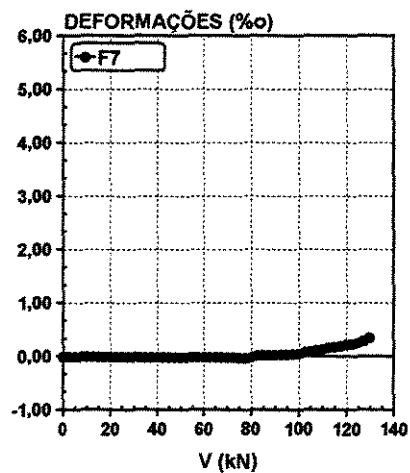
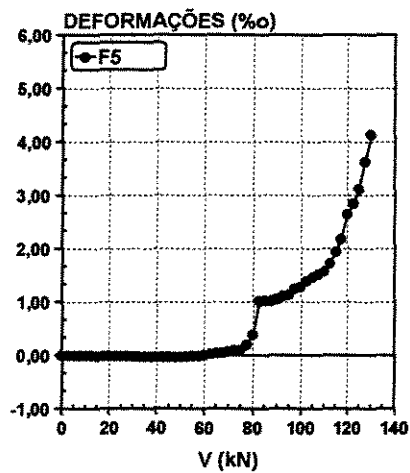
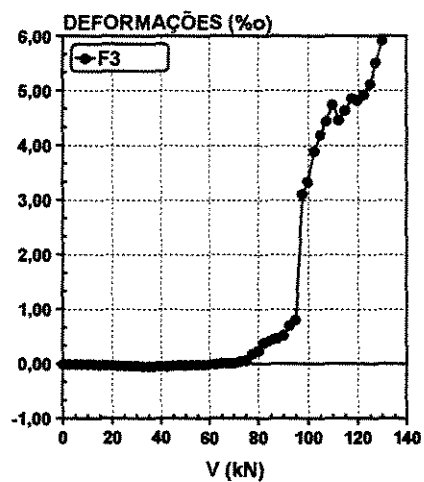
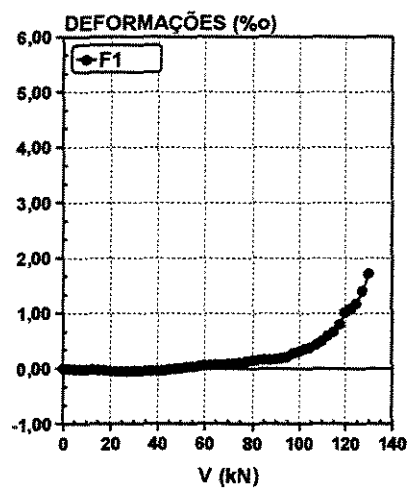
medidas em cm



VIGA V3G2
DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC:
LADO ESQUERDO

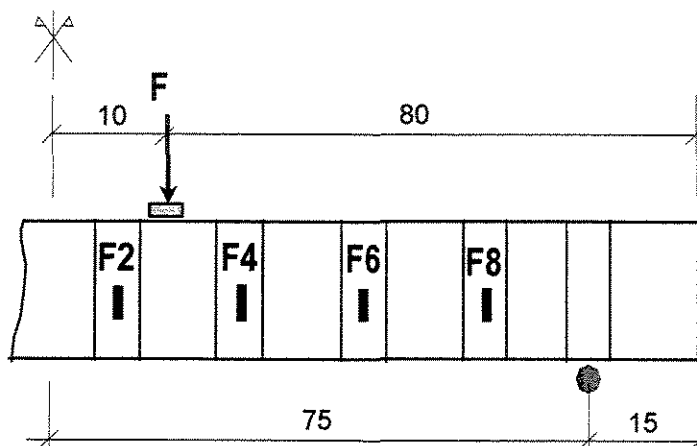


medidas em cm

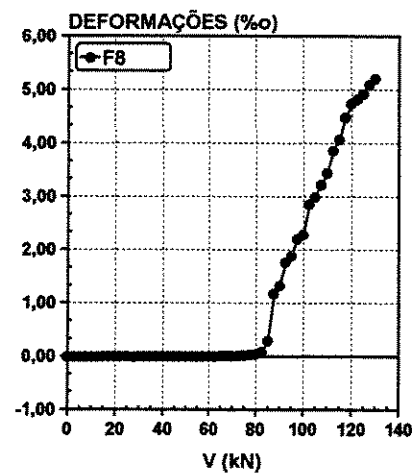
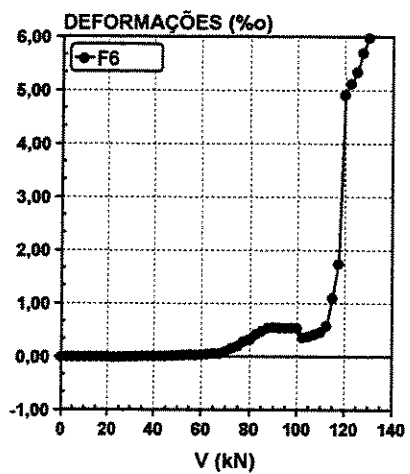
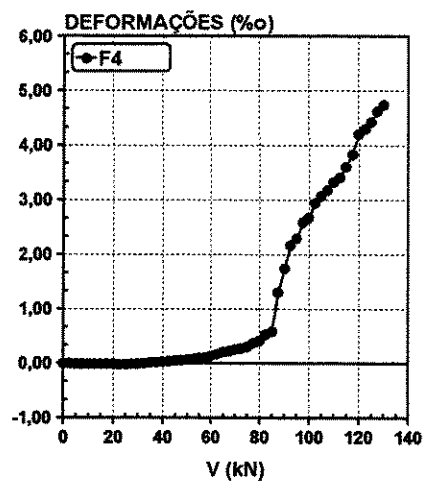
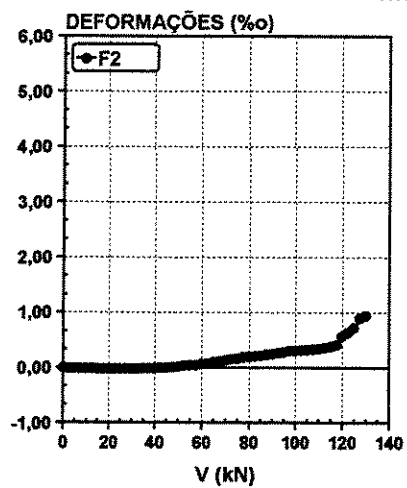


VIGA V3G2

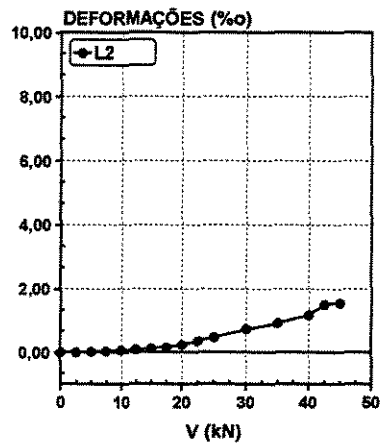
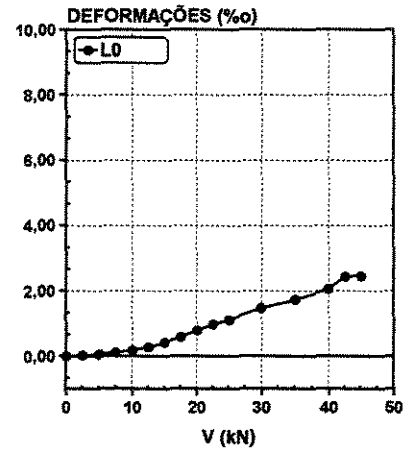
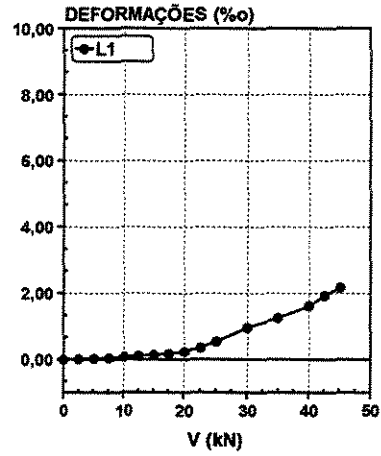
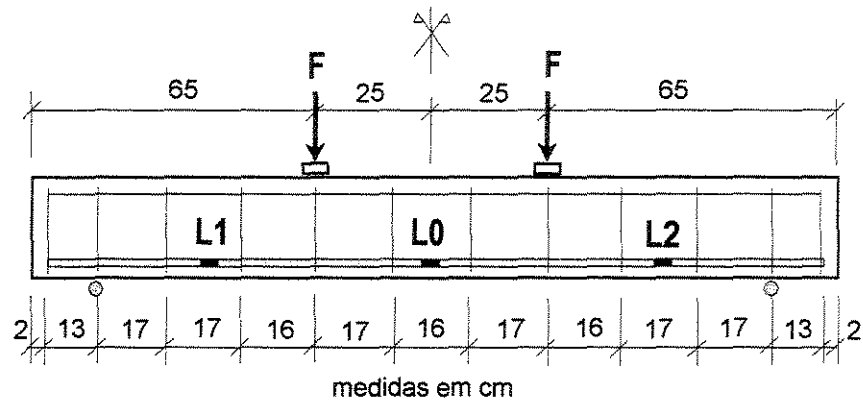
DEFORMAÇÕES NA MANTA DE PRFC: LADO DIREITO



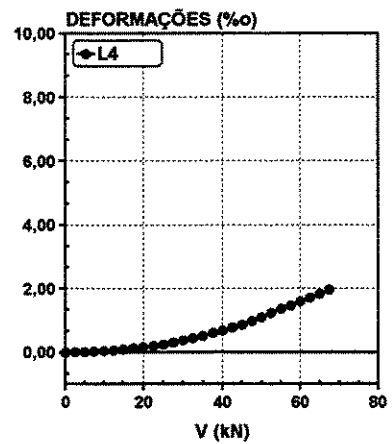
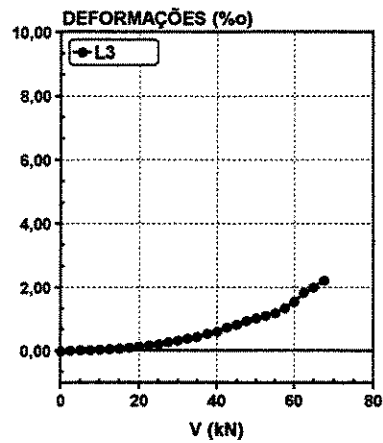
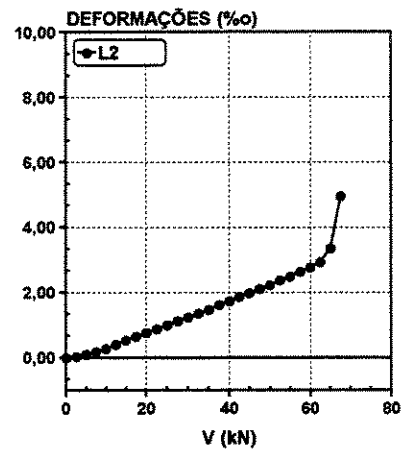
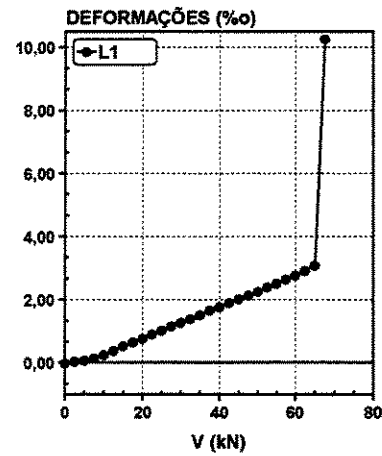
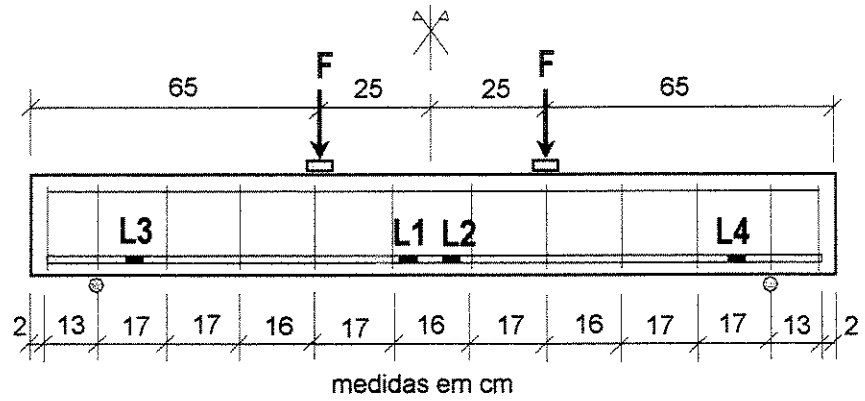
medidas em cm



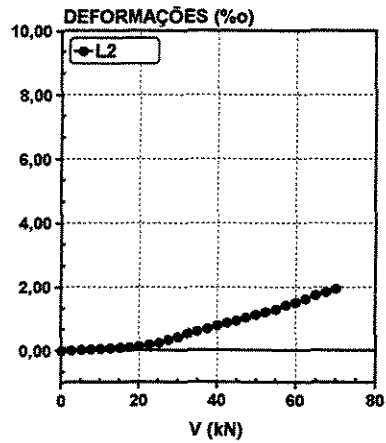
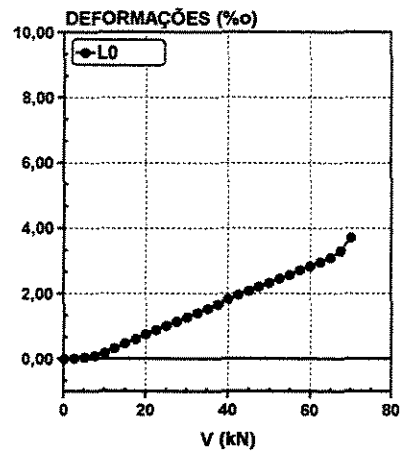
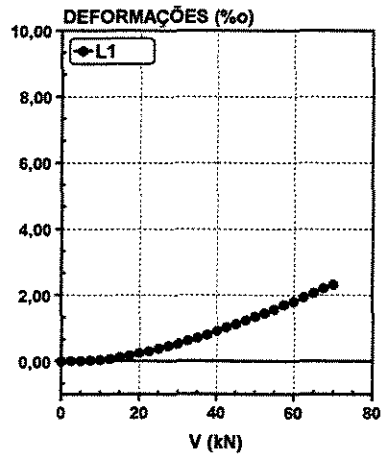
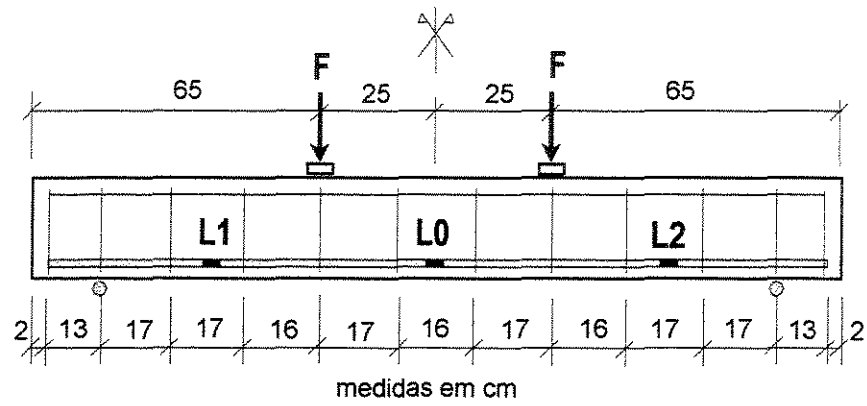
VIGA VTG1 TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL



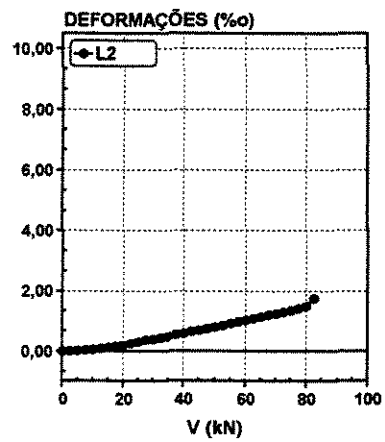
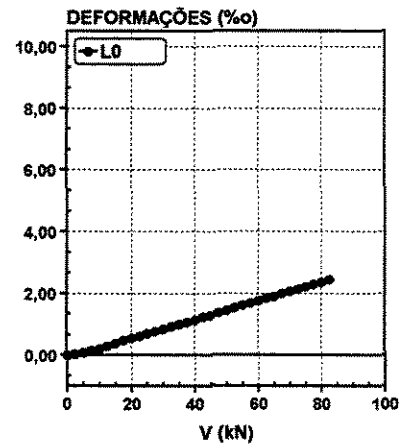
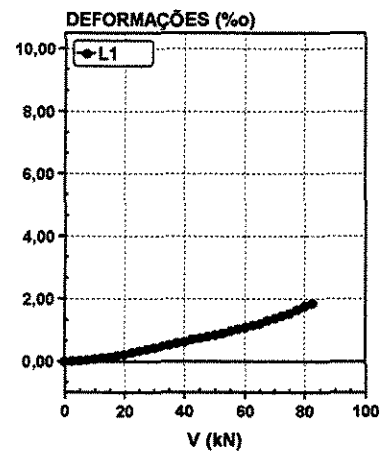
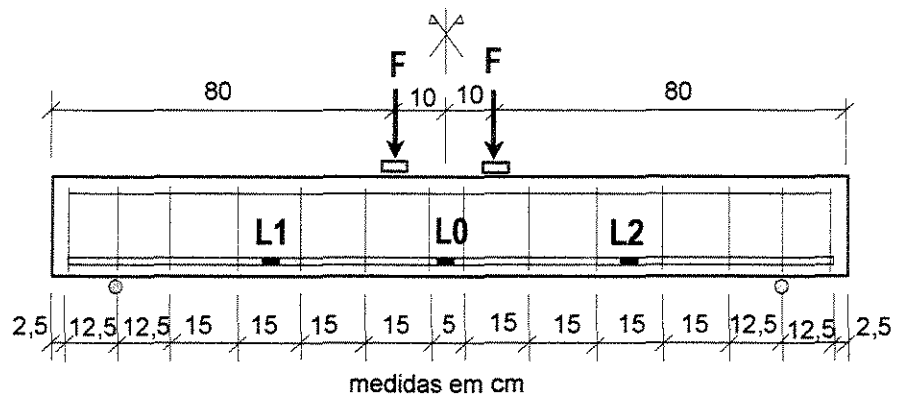
VIGA V1G1 TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL



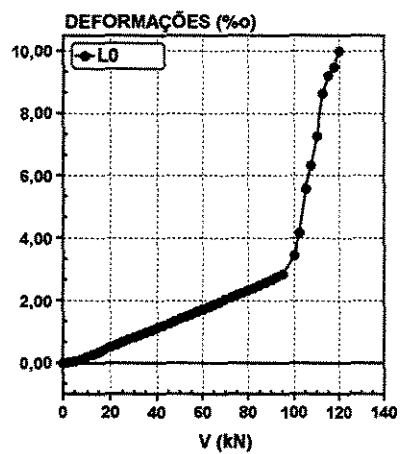
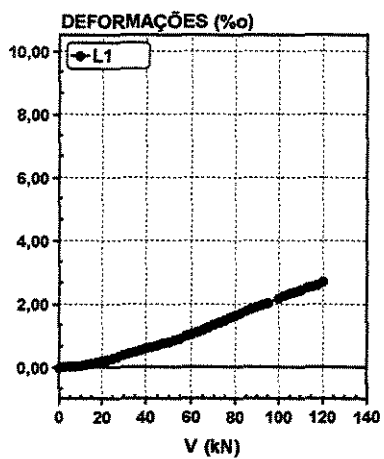
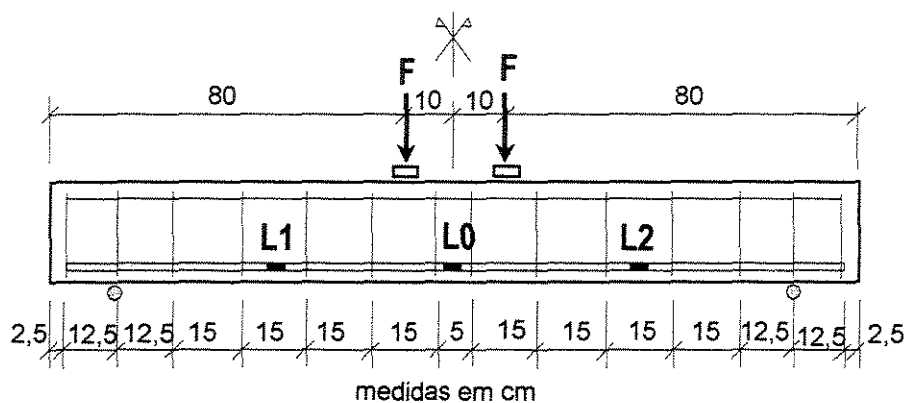
VIGA V2G1 TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL



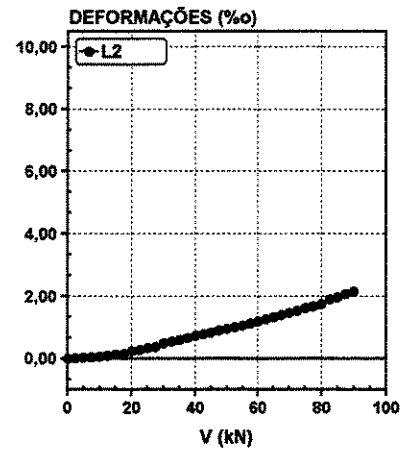
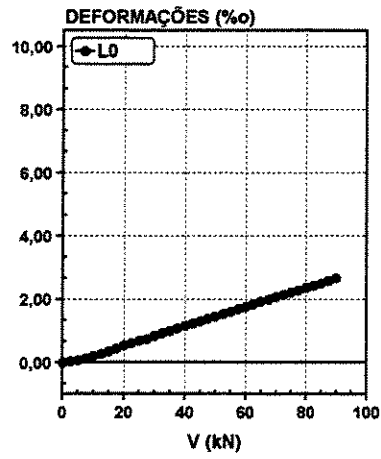
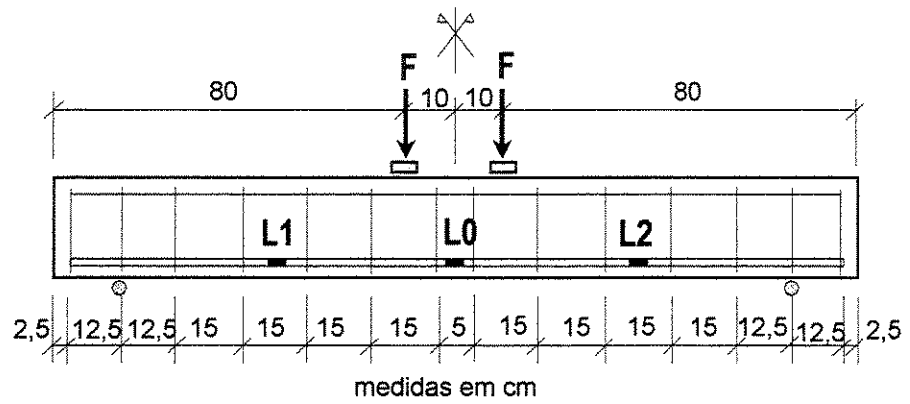
VIGA VTG2 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL



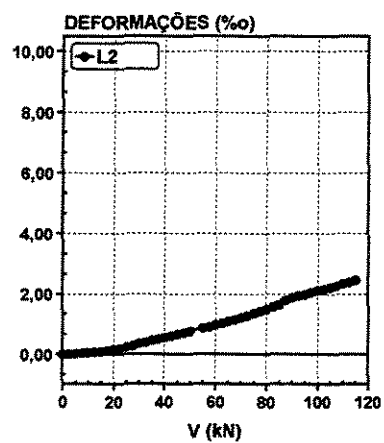
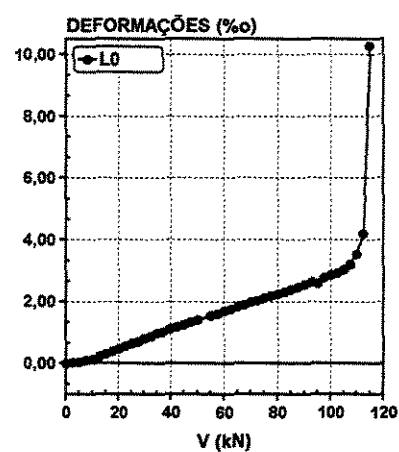
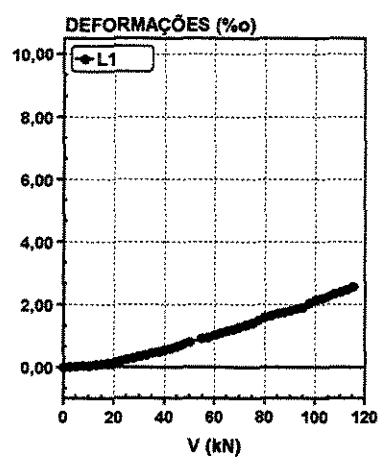
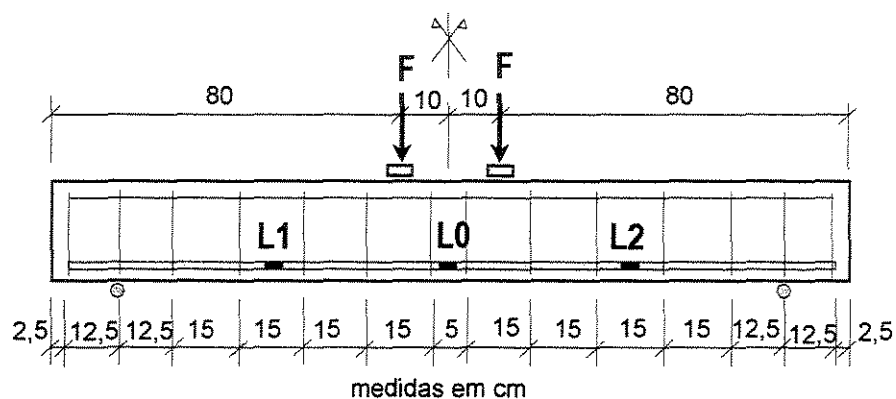
VIGA V1G2 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL



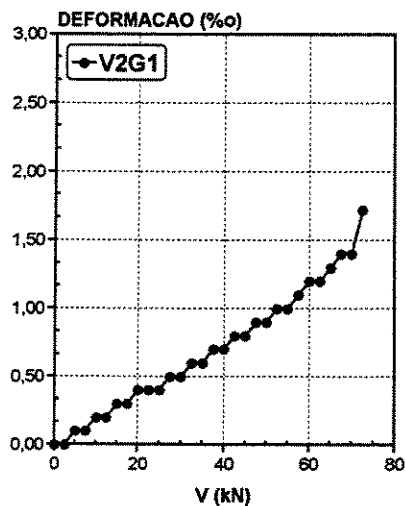
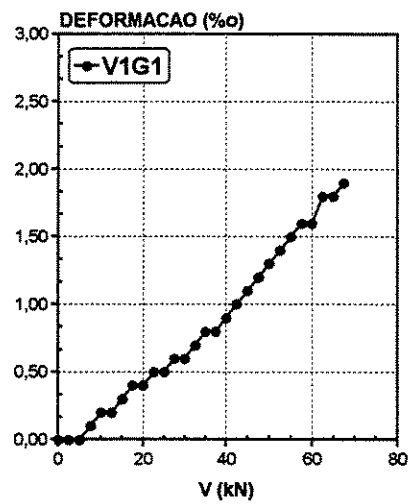
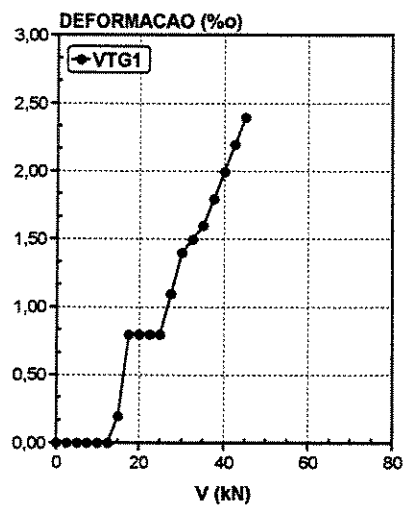
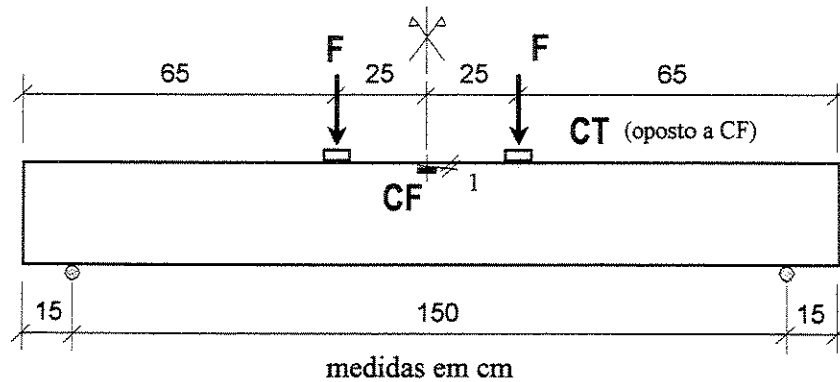
VIGA V2G2 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL



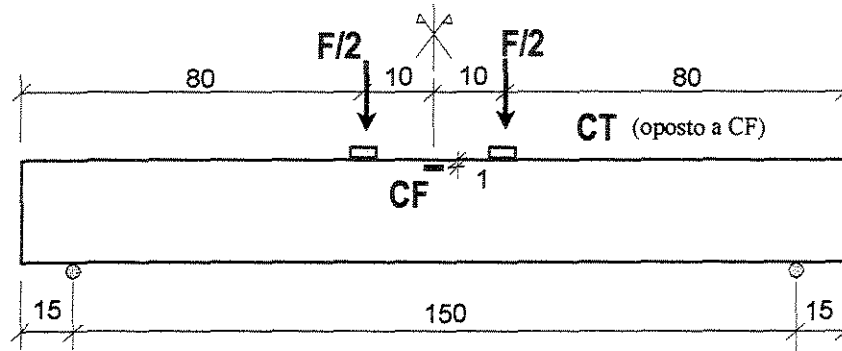
VIGA V3G2 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL



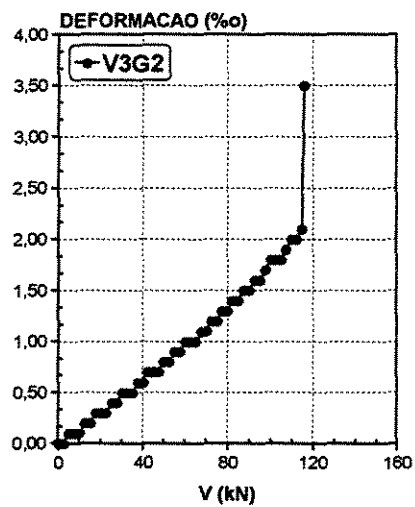
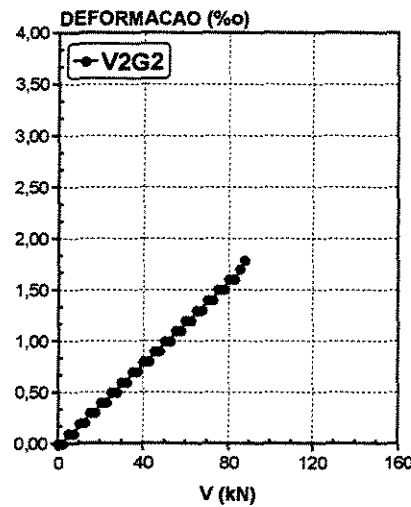
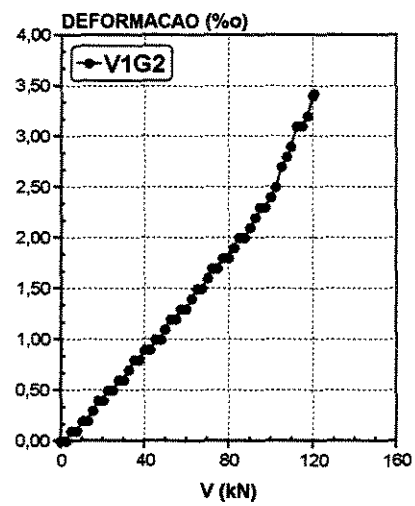
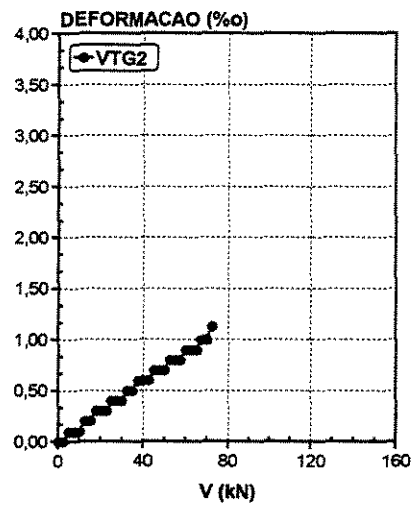
VIGAS VTG1, V1G1 E V2G1 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO



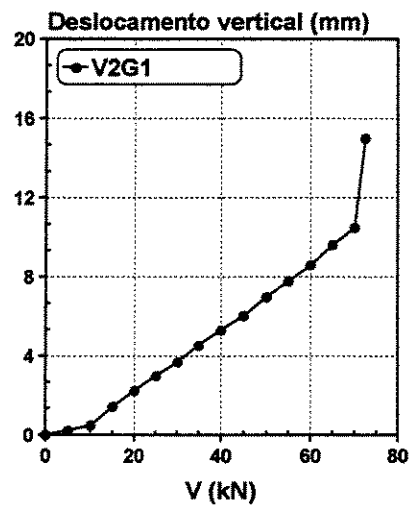
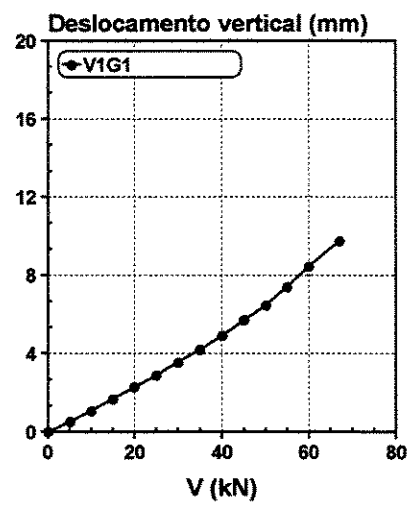
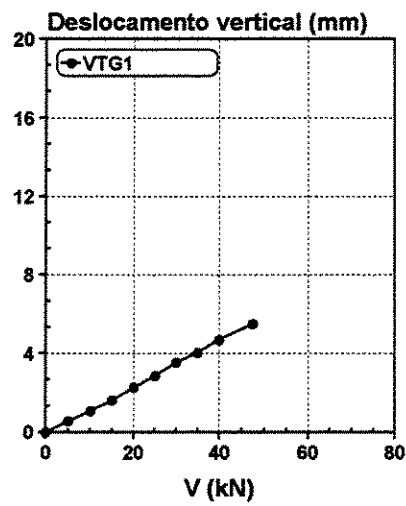
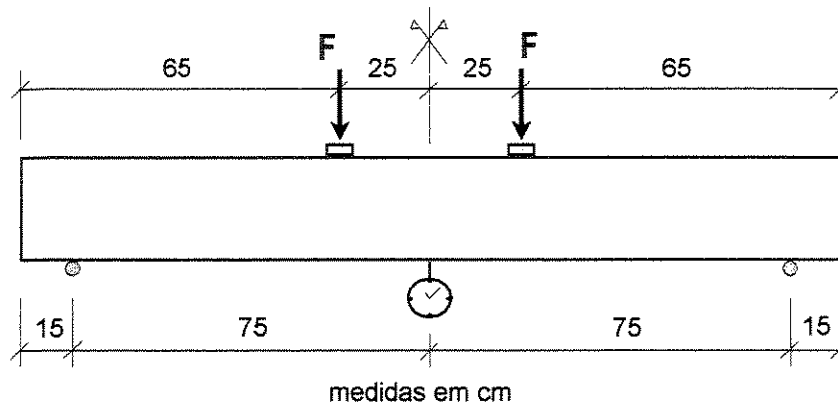
VIGAS VTG2, V1G2, V2G2 E V3G2 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO



medidas em cm



VIGAS VTG1, V1G1 E V2G1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS



VIGAS VTG2, V1G2, V2G2 E V3G2 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

