

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**REFORÇO AO ESFORÇO CORTANTE EM VIGAS DE
CONCRETO APLICANDO-SE FOLHAS FLEXÍVEIS DE
FIBRAS DE CARBONO PRÉ-IMPREGNADAS**

Gustavo de Oliveira Gallardo

1487476867

Campinas
Fevereiro, 2002.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**REFORÇO AO ESFORÇO CORTANTE EM VIGAS DE
CONCRETO APLICANDO-SE FOLHAS FLEXÍVEIS DE
FIBRAS DE CARBONO PRÉ-IMPREGNADAS**

Gustavo de Oliveira Gallardo

Orientador: Armando Lopes Moreno Júnior

Dissertação apresentada à Comissão de
Pós-Graduação da Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade
Estadual de Campinas – UNICAMP,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.

Atesto que esta é a versão definitiva
da dissertação/tese.

Prof. Dr.

Matrícula:

Campinas

Fevereiro, 2002.

UNIDADE	AC
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	G 135r
V	EX
TOMBO BC	52532
PROC.	16-124703
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	13/03/02
Nº CPD	

CM00180695-3

BIB 12 263930

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

G135r

Gallardo, Gustavo de Oliveira

Reforço ao esforço cortante em vigas de concreto aplicando-se folhas flexíveis de fibras de carbono pré-impregnadas / Gustavo de Oliveira Gallardo.-- Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Armando Lopes Moreno Jr.

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

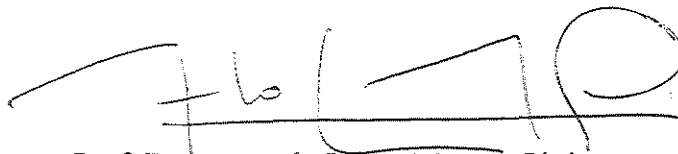
1. Cisalhamento. 2. Carbono. 3. Fibras. 4. Polímeros. I. Moreno Júnior, Armando Lopes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

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

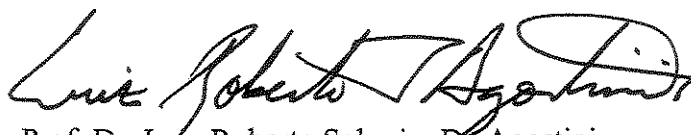
**REFORÇO AO ESFORÇO CORTANTE EM VIGAS DE
CONCRETO APLICANDO-SE FOLHAS FLEXÍVEIS DE
FIBRAS DE CARBONO PRÉ-IMPREGNADAS**

Gustavo de Oliveira Gallardo

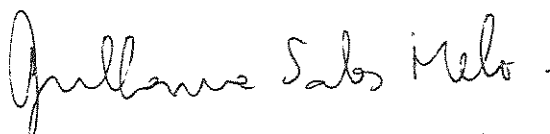
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Júnior
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Luiz Roberto Sobreira De Agostini
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Guilherme S. Soares A. Melo
Universidade de Brasília

Campinas, Fevereiro de 2002.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Sílvia,
Meus Pais,
Minha Família.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo apoio dado durante toda a execução do trabalho e pela compreensão nos momentos difíceis.

À Reax Indústria e Comércio Ltda pelo fornecimento da fibra de carbono utilizada e pelo apoio técnico, fundamental na realização deste trabalho.

Ao grande amigo Leonardo Marques Rezende Tavares, sempre presente e disposto a ajudar.

Ao orientador Armando Lopes Moreno Júnior pelo apoio, compreensão e orientação em todos os momentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE SIMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS.....	5
3.1 REFORÇO AO ESFORÇO CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO.....	8
4 A FIBRA DE CARBONO.....	11
4.1 MATRIZ.....	12
4.2 FIBRAS	13
4.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS.....	17
4.4 APLICAÇÃO DO REFORÇO.....	21
4.5 PROCEDIMENTOS E RECOMENDAÇÕES.....	27
5 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS JÁ REALIZADAS.....	34
5.1 AL-SULAIMANI, et all.....	34

5.2 TRIANTAFILOU, T. C.....	42
5.3 NORRIS, T.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R.....	44
6 METODOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
6.1 DETALHES DAS VIGAS.....	51
6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	57
6.2.1 CONCRETO.....	57
6.2.2 ARMADURAS.....	58
6.2.3 FIBRA DE CARBONO.....	58
6.3 MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTO.....	64
6.3.1 DEFORMAÇÃO NAS ARMADURAS.....	64
6.3.2 DEFORMAÇÃO NA FIBRA DE CARBONO.....	65
6.3.3 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO E DESLOCAMENTO VERTICAL.....	65
6.4 EXECUÇÃO, DESFORMA E CURA DAS VIGAS.....	66
6.5 DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	67
7 DIMENSIONAMENTO E RESULTADOS ESPERADOS.....	68
7.1 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO SEGUNDO NOLLET ET AL.....	68
7.2 PROCEDIMENTOS DO ACI 440R –2000.....	80
7.3 RESULTADOS ESPERADOS.....	82
8 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	84
8.1 TENSÕES NOS ESTRIBOS.....	85
8.2 TENSÕES NAS FIBRAS.....	86
8.3 TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL.....	86
8.4 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO.....	87
8.5 DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	87
8.6 EVOLUÇÃO DAS FISSURAS.....	87
9 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	121

10 CONCLUSÕES.....	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
ANEXO – Resultados Experimentais.....	140
Tensões nos Estribos – leituras individuais dos extensômetros.....	141
Tensões nas Fibras – leituras individuais dos extensômetros.....	153
Tensões nas Armaduras Longitudinais– leituras individuais dos extensômetros.....	163
Deformações no Concreto em cada viga.....	175
Deslocamentos Verticais em cada viga.....	177

LISTA DE FIGURAS

3.1 Reforço de viga de concreto armado mediante a adição de armadura complementar.....	9
3.2 Reforço de viga de concreto armado mediante a adição de chapas de aço.....	10
4.1 Comparação entre o comportamento tensão x deformação das fibras e do aço.....	14
4.2 Variações no arranjo das fibras de carbono em um compósito.....	16
4.3 Formação dos compósitos de fibra de carbono.....	16
4.4 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em lajes.....	17
4.5 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em vigas.....	18
4.6 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em paredes.....	18
4.7 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em pilares e chaminés.....	19
4.8 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em reservatórios.....	19
4.9 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em túneis.....	20
4.10 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em tubos.....	20
4.11 Execução do reforço - 1ª etapa.....	22
4.12 Execução do reforço - 2ª etapa.....	23
4.13 Execução do reforço - 3ª etapa.....	24
4.14 Execução do reforço - 4ª etapa.....	25
4.15 Execução do reforço - 5ª etapa.....	25
4.16 Execução do reforço - 6ª etapa.....	26
4.17 Camadas do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono.....	26
4.18 Arredondamento de arestas.....	33
5.1 Seção transversal e esquema de carregamento.....	35
5.2 Comparação tensão x deformação entre o aço e a fibra.....	35

5.3 Reforço nas vigas do grupo C.....	37
5.4 Reforço nas vigas do grupo S.....	37
5.5 Reforço nas vigas do grupo W.....	38
5.6 Reforço nas vigas do grupo J.....	38
5.7 Seção transversal e esquema de carregamento.....	42
5.8 Seção transversal e esquema de carregamento.....	44
5.9 Esquemas de reforço utilizados nas vigas.....	45
5.10 Carga x Deslocamento - Viga IE.....	47
5.11 Carga x Deslocamento - Viga IIE.....	48
5.12 Carga x Deslocamento - Viga IIIF.....	48
5.13 Carga x Deformação - Viga IIE.....	49
5.14 Carga x Deformação - Viga IIF.....	49
6.1 Geometria da seção.....	52
6.2 Detalhe das armaduras das vigas.....	52
6.3 Esquema de carregamento das vigas.....	53
6.4 Reforço implementado na viga V2.....	54
6.5 Reforço implementado na viga V3.....	55
6.6 Reforço implementado na viga V4.....	55
6.7 Reforço implementado na viga V5.....	56
6.8 Reforço implementado na viga V6.....	56
6.9 Posicionamento dos extensômetros no ensaio da fibra.....	58
6.10 Corpo de prova para o ensaio da fibra.....	58
6.11 Diagrama tensão x deformação da fibra de carbono.....	59
6.12 Ensaio de <i>pull out</i>	62
6.13 Posicionamento dos extensômetros.....	64
6.14 Posicionamento do defletômetro e das pastilhas.....	66
7.1 Distribuição das forças internas em um reforço.....	69
7.2 Reforço com tiras inclinadas.....	70
7.3 Parâmetros do reforço com tiras inclinadas.....	71
7.4 Reforço com tiras.....	73
7.5 Parâmetros do reforço com tiras.....	74

7.6 Reforço com folhas.....	75
7.7 Parâmetros do reforço com folhas.....	76
7.8 Reforço em U.....	78
7.9 Parâmetros do reforço em U.....	78
7.10 Diferentes tipos de arranjo das fibras segundo o ACI-440R-00.....	80
8.1 Tensão nos estribos das vigas ensaiadas.....	88
8.2 Tensão nas fibras das vigas ensaiadas.....	94
8.3 Tensão na armadura longitudinal das vigas ensaiadas.....	99
8.4 Deformações no concreto das vigas ensaiadas.....	105
8.5 Deslocamentos verticais das vigas ensaiadas.....	108
8.6 Evolução das fissuras da viga V1.....	111
8.7 Viga V1 posicionada no pórtico	112
8.8 Panorama de fissuração da viga V1 após o ensaio	112
8.9 Detalhe da ruptura da viga V1.....	113
8.10 Viga V2 reforçada.....	113
8.11 Panorama de fissuração da Viga V2.....	114
8.12 Detalhe do descolamento da fibra Viga V2.....	114
8.13 Viga V3 reforçada e posicionada no pórtico.....	115
8.14 Panorama de fissuração da Viga V3.....	115
8.15 Detalhe do descolamento da fibra Viga V3.....	116
8.16 Viga V4 reforçada.....	116
8.17 Panorama de fissuração da Viga V4.....	117
8.18 Detalhe da ruptura e do descolamento da fibra Viga V4.....	117
8.19 Viga V5 reforçada.....	118
8.20 Panorama de fissuração da Viga V5.....	118
8.21 Detalhe da ruptura da fibra Viga V5.....	119
8.22 Viga V6 reforçada.....	119
8.23 Panorama de fissuração da Viga V6.....	120
8.24 Detalhe da ruptura da fibra Viga V6.....	120
9.1 Tensões nos estribos mais solicitados em cada viga.....	123
9.2 Deformações nos estribos mais solicitados em cada viga.....	123

9.3 Tensões nas fibras mais solicitadas em cada viga.....	124
9.4 Deformações nas fibras mais solicitadas em cada viga.....	124
9.5 Tensões nas armaduras longitudinais mais solicitadas em cada viga.....	125
9.6 Deformações no concreto em cada viga.....	125
9.7 Deslocamentos Verticais em cada viga.....	126

LISTA DE TABELAS

3.1 Origem dos problemas em obras de Engenharia Civil.....	6
4.1 Módulo de elasticidade dos vários tipos de fibra.....	13
4.2 Comparação entre laminados e folhas flexíveis de fibra de carbono.....	15
4.3 Características dos produtos envolvidos na aplicação do reforço.....	21
4.4 Coeficientes de expansão térmica dos sistemas PRF.....	29
4.5 Fator de redução ambiental dos sistemas PRF.....	31
5.1 Divisão das vigas experimentadas.....	36
5.2 Resultados teóricos e experimentais.....	41
5.3 Características e resultados das vigas.....	43
5.4 Características da resina epóxi utilizada.....	46
5.5 Características do sistema PRF utilizado.....	46
6.1 Composição do concreto utilizado.....	57
6.2 Características dos aços utilizados nas vigas.....	58
6.3 Características da folha flexível de fibra de carbono utilizada.....	60
6.4 Resultados do ensaio de <i>pull out</i>	63
7.1 Resultados teóricos esperados segundo Nollet et al ⁽⁴⁰⁾	83
7.2 Resultados teóricos esperados segundo ACI 440R-00.....	83
8.1 Características do concreto das vigas ensaiadas.....	84
8.2 Resultados dos ensaios das vigas	85
9.1 Comparação entre o resultado teórico, segundo Nollet et al, e o experimental.....	121
9.2 Comparação entre o resultado teórico, segundo ACI440R-00, e o experimental.....	122
9.3 Acréscimo na cortante última para cada uma das vigas reforçadas.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS

α_L	Coeficiente de expansão térmica longitudinal.
α_T	Coeficiente de expansão térmica transversal.
β	Ângulo de inclinação das fibras.
ϵ_c	Deformação de encurtamento no concreto.
ϵ_{fe}	Deformação efetiva da fibra de carbono.
ϵ_{PRF}	Deformação na fibra.
ϵ_s	Deformação na armadura longitudinal.
ϵ_{su}	Deformação última na armadura longitudinal.
ϵ_y	Deformação de escoamento do aço.
ϕ	Fator de redução parcial do arranjo utilizado.
θ	Ângulo de ruptura ao cisalhamento.
σ_{sl}	Tensão na armadura longitudinal.
σ_{st}	Tensão na armadura transversal.
τ_{ave}	Tensão de cisalhamento máxima adotada para o reforço.
$\tau_{máx}$	Tensão de cisalhamento máxima entre o concreto e a resina.
$\tau_{últ}$	Tensão de cisalhamento máxima suportada pela resina.
ρ_{PRF}	Taxa de fibra no reforço.
ρ_s	Taxa de armadura da viga.
A	Teor de argamassa seca.
b	Largura da viga.
b_a	Largura de aplicação da resina.
b_{PRF}	Largura de aplicação da fibra.

C	Consumo de cimento
d	Distância do C.G. da armadura longitudinal ao extremo comprimido da viga.
d_{PRF}	Distância entre o CG da armadura longitudinal à extremidade da tira.
e	Espessura do corpo de prova da fibra.
E_a	Módulo de Young da resina.
E_c	Módulo de deformação do concreto.
E_{PRF}	Módulo de deformação da fibra.
E_s	Módulo de deformação do aço.
f_c	Resistência à compressão do concreto.
f_{uPRF}	Tensão última da fibra de carbono.
f_y	Tensão de escoamento do aço.
G_a	Módulo de cisalhamento do adesivo.
h_j	Comprimento das chapas da fibra utilizada para envelopar a viga.
h_s	Comprimento das tiras da fibra utilizada.
h_w	Comprimento das chapas da fibra utilizada.
I_{PRF}	Momento de inércia da folha de fibra de carbono.
PRF	Polímeros reforçados com fibras.
PRFC	Polímeros reforçados com fibras de carbono.
s	Coeficiente de viscosidade.
s_p	Espaçamento entre as tiras da fibra utilizada.
t_a	Espessura de aplicação da resina.
T_g	Temperatura de transição vítrea.
t_{PRF}	Espessura da fibra utilizada no reforço.
t_s	Largura das tiras da fibra utilizada.
w	Largura do corpo de prova no ensaio da fibra.
V_c	Contribuição do concreto em relação ao esforço cortante.
V_{PRF}	Contribuição da fibra em relação ao esforço cortante.
V_s	Contribuição do aço em relação ao esforço cortante.
V_u	Capacidade última da viga em relação ao esforço cortante.

RESUMO

Gallardo, Gustavo de Oliveira. Reforço ao Esforço Cortante em Vigas de Concreto Utilizando-se Folhas Flexíveis de Fibras de Carbono Pré-Impreganadas. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 194 páginas. Dissertação de Mestrado.

O crescente número de problemas verificados em estruturas de concreto armado, como deficiências de projeto ou de construção, falta de manutenção, deterioração dos materiais utilizados ou deficiência em suas propriedades; tem favorecido o atual crescimento da área de patologia das estruturas. O sistema de reforço pela adição de folhas flexíveis de fibra de carbono foi introduzido recentemente no mercado Brasileiro e colocado como um sistema inovador, de fácil execução e com resultados que impressionam. Este trabalho investigou comportamento de vigas de concreto armado com seção transversal em “T”, reforçadas ao cisalhamento com esse sistema, procurando comprovar sua eficácia e estabelecer parâmetros, para o seu uso e dimensionamento, ainda não definidos.

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

ABSTRACT

The problems verified in concrete reinforced structures like design or construction deficiencies, no maintenance, deterioration of their component materials or deficiencies on their properties; has been increased the structures pathology area.

The strengthening system by the use of flexible carbon fiber sheets was introduced recently in Brazil and has been seen as an innovative technique, with easy application and good acceptance among researchers and engineers in many parts of the world. This study investigated the behavior of reinforced concrete beams with “T” section, shear strengthened with this system; trying to prove your effectiveness and stabilish parameters, for its use and design guidelines, not yet defined.

Keywords: shear, carbon fibers, repair, retrofit.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor de recuperação estrutural tem se colocado como de grande importância na indústria da construção, não apenas devido ao grande volume de trabalhos na área, mas também aos custos envolvidos em serviços de restauração ou de incremento na capacidade portante de uma estrutura como um todo ou de um elemento estrutural em particular. Nosso atual panorama econômico colabora para que se evite refazer uma estrutura, dando maior ênfase à recuperação e ao reforço das estruturas existentes.

A necessidade de reparos surge não somente em estruturas antigas ou danificadas por acidente, mas também está presente em grande número de estruturas recentes. No caso de vigas em concreto armado, as mesmas podem apresentar falhas, que exijam providências para recuperá-las ou podem, simplesmente, ser reforçadas de forma a suportarem um carregamento maior do que aquele inicialmente definido em projeto.

Em relação ao material empregado, as diversas técnicas de reforço de vigas em concreto, podem ser classificadas em:

- reforços utilizando-se argamassa ou concreto;
- reforços empregando-se chapas de aço;
- reforços empregando-se polímeros reforçados com fibras (**PRF**).

A tecnologia para reforço de estruturas de concreto com polímeros reforçados com fibras, principalmente com fibras de carbono, pode ser colocada como mais um passo evolutivo da indústria da Construção Civil em sua constante busca por novas tecnologias que sejam cada vez mais simples, resistentes e duráveis, dando seqüência a um ciclo que já passou pelo recurso a metodologias tão distintas quanto às do aumento das seções pela aplicação de concreto e/ou

argamassas e pelo reforço através da adição de chapas de aço coladas e/ou aparafusadas ao concreto.

2 OBJETIVO

A pesquisa, aqui exposta, tem como principal objetivo a investigação do comportamento ao esforço cortante de vigas de concreto reforçadas por meio de folhas flexíveis de fibras de carbono pré-impregnadas. O trabalho parte, inicialmente, de uma investigação bibliográfica sobre a técnica de reforço de estruturas em concreto com compósitos de fibras de carbono, onde se procura esclarecer alguns aspectos ainda não totalmente definidos sobre esta técnica de reparo/reforço.

A técnica em questão, englobando tecnologia de aplicação e modelos de dimensionamento existentes, é avaliada pela análise experimental de 6 vigas de concreto armado com seção transversal em “T” e resistência à compressão do concreto em torno de 45 MPa. Todas as vigas possuem a mesma armadura, transversal e longitudinal, sendo a armadura transversal subdimensionada de maneira que a ruptura das vigas seja caracterizada por escoamento da armadura transversal.

A primeira viga, viga V1, foi ensaiada sem reforço algum ao esforço cortante, de modo a ser utilizada como viga testemunho, as outras 5 vigas foram diferentemente reforçadas ao esforço cortante por meio de folhas flexíveis de fibra de carbono pré-impregnadas, da seguinte maneira:

- **Viga V2** : viga idêntica à viga V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 1 camada, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionada nas duas faces laterais da viga.

- **Viga V3** : viga idêntica à V2, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 1 camada, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas nas duas faces laterais da viga, observa-se que foi repetido o esquema de reforço utilizado na viga V2 devido a uma falha no procedimento de colagem das fibras, ponto que será abordado no decorrer deste trabalho.
- **Viga V4**: viga idêntica à V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 1 camada, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas em "U", envelopando a viga;
- **Viga V5**: viga idêntica à V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 2 camadas, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas em "U", envelopando a viga, e com prolongamento da tira até a face inferior da mesa para proporcionar a ancoragem na parte superior do reforço.
- **Viga V6**: viga idêntica à V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 2 camadas, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas em "U", envelopando a viga, com prolongamento da tira até a face inferior da mesa e com a adição de uma tira horizontal na parte superior da alma para proporcionar a ancoragem na parte superior do reforço.

O objetivo foi obter um ganho de resistência última das vigas reforçadas, através de um aumento da resistência ao esforço cortante, proporcionado pelo emprego do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono pré-impregnadas.

Os resultados obtidos neste trabalho fazem parte de uma série de estudos sobre o comportamento de vigas de concreto reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibras em desenvolvimento no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

3 RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS

Atualmente, o setor de recuperação estrutural tem se colocado como de grande importância na indústria da construção.

A necessidade de reparos surge não somente em estruturas antigas ou danificadas por acidente, mas também está presente em grande número de estruturas recentes.

Pode-se definir duas partes da Engenharia no que se refere à recuperação de estruturas: a Patologia e a Terapia.

A Patologia é a parte responsável pelo diagnóstico dos sintomas, causas e origens dos defeitos que levam a necessidade de recuperação de uma estrutura. Um diagnóstico correto é o primeiro e um dos principais passos para a perfeita solução do problema, de forma econômica e definitiva.

Os sintomas patológicos em obras de concreto armado apresentam, com raras exceções, características externas bem visíveis. Os principais e mais comuns destes sintomas são:

- Manchas superficiais;
- Fissuras ativas e passivas;
- Degradação química;
- Flechas excessivas;
- Ninhos de concretagem;
- Corrosão da armadura.

Existem várias causas que podem levar a estrutura, ou parte dela, a apresentar algum tipo de problema que caracterize a necessidade de recuperação ou reforço. Dentre eles pode-se citar: falhas de projeto, erros de execução, cargas de serviço não previstas em projeto, variações de umidade, agentes biológicos, incompatibilidade de materiais e muitas outras. Cada causa deve ser identificada, uma vez que a cada causa caberá um tipo de tratamento mais adequado, econômico e duradouro.

Na tabela 3.1 abaixo, apresentada por Souza & Ripper ⁽⁵²⁾, pode-se observar que a maior parte das falhas em estruturas é originada de falhas de projeto.

TABELA 3.1 Origem dos problemas em obras de Engenharia Civil. Fonte: Souza & Ripper ⁽⁵²⁾

CAUSAS DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Fonte de Pesquisa	Concepção e Projeto	Materiais	Execução	Utilização e Outras
Edward Grunau (Paulo Helene 1992)	44	18	28	10
D.E. Allen (Canadá 1979)	55			49
C.S.T.C. (Bélgica) Verçoza (1991)	46	15	22	17
C.E.B. Boletim 157 (1992)	50		40	10
F.A.A.P. Verçoza (1991)	18	6	52	24
B.R.E.A.S. Reino Unido (1972)	58	12	35	11
Bureau Securitas (1972)		88		12
E.N.R. (U.S.A.) (1968-1978)	9	6	78	10
S.I.A. (Suíça) (1979)	46	-	44	10
Dov Kaminetzky (1991)	51		40	16
Jean Blévot (França) (1974)	35		65	
L.E.M.I.T. (Venezuela) (1965-1975)	19	5	57	19

Um bom diagnóstico se completa com algumas considerações sobre as conseqüências do problema encontrado no comportamento futuro da estrutura. Deve-se verificar se a estrutura, ou parte dela, está com sua segurança comprometida (estado limite último) ou se há apenas um comprometimento das condições estéticas, por exemplo.

Em geral, um problema patológico apresenta um caráter evolutivo, ou seja, tende a se agravar com o tempo provocando, inclusive, outros problemas. Assim sendo, a recuperação de uma estrutura será tão eficiente e durável quanto antes realizada.

É nesse contexto, de ação rápida contra o problema diagnosticado que se encaixa a Terapia das estruturas. As medidas terapêuticas tanto podem ser generalizadas como concentradas em uma pequena região da estrutura, variando conforme características intrínsecas a cada elemento estrutural afetado (laje, viga, pilar).

Essa área da Engenharia Civil voltada para escolha de materiais e técnicas de recuperação e reforço de estruturas, é uma área de desenvolvimento recente que está sendo alvo de vários trabalhos experimentais, todos eles voltados para a definição de métodos eficazes de reforço e recuperação de estruturas. Entretanto, não resta dúvida de que a falta de uma normalização nacional sobre o assunto e o número ainda insuficiente de trabalhos experimentais desenvolvidos, gera uma situação de dúvida em relação à eficiência e a utilidade de muitos dos métodos hoje utilizados.

Na prática, nas obras correntes no país, não há um procedimento padrão para a recuperação e reforço das estruturas, e não há, menos ainda, suficiente conhecimento técnico de como se executar um reforço por parte da grande maioria dos profissionais da área. Sendo assim, o desperdício e a falta de critério são comuns em muitas das obras atuais de reforço e recuperação de estruturas.

3.1 REFORÇO AO ESFORÇO CORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO

No caso de vigas em concreto armado, as mesmas podem apresentar patologias que caracterizam a necessidade de intervenção, no sentido de recuperação de sua capacidade resistente (recuperação estrutural) ou até mesmo de incremento de resistência (reforço estrutural).

São dois os casos típicos que se apresentam no reforço de uma viga: o reforço frente à flexão e o reforço frente ao esforço cortante. Os procedimentos terapêuticos em cada um destes reforços são diferentes.

No caso do reforço ao esforço cortante, as falhas podem produzir-se fundamentalmente por insuficiência ou posicionamento incorreto da armadura transversal. Estas falhas podem ter sua origem num erro de cálculo, num erro de execução, ou ainda na ocorrência de carregamentos diferentes dos inicialmente previstos no projeto.

As diversas técnicas de reforço ao esforço cortante de vigas, podem ser classificadas em:

- **Reforço pelo acréscimo de armadura transversal na viga.**

Neste caso a armadura pode ser posicionada dentro de um acréscimo da altura e/ou da largura da viga ou em sulcos abertos em todo o contorno da viga.

No preenchimento dos sulcos ou dos acréscimos de altura e/ou largura das vigas pode ser utilizado concreto normal ou projetado, microconcreto fluído, argamassas de cimento de alta resistência, argamassa epóxi, etc. A escolha de um ou outro material, geralmente, se fará de acordo com a facilidade de execução do reforço.

Na figura 3.1 observa-se a aplicação desta técnica em uma viga de seção transversal em “T”.

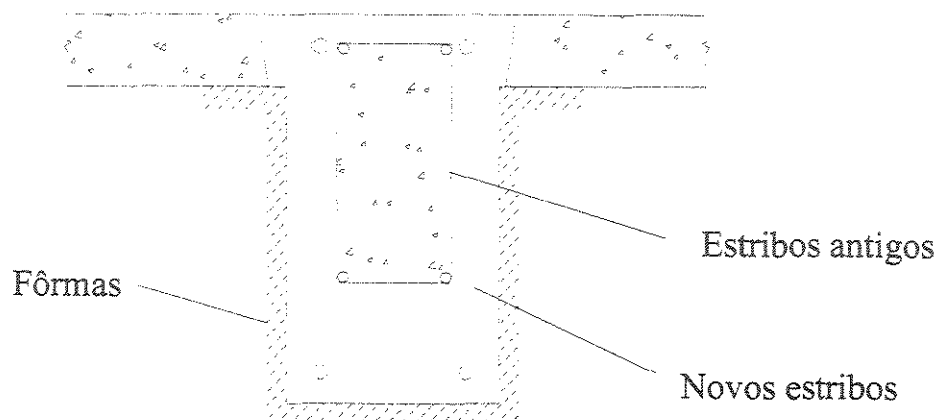


FIGURA 3.1 Reforço de viga de concreto armado mediante a adição de armadura complementar.

▪ **Reforço com chapas metálicas aderidas com epóxi e/ou parafusos auto-fixantes.**

Mediante a colagem com resinas epóxi, a armadura suplementar é introduzida na viga na forma de chapa de aço colada ao concreto em local adequado, não repercutindo, portanto, de forma sensível nas dimensões finais da seção e não criando, por conseguinte, preocupações quanto à redistribuição de esforços no resto da estrutura.

Neste tipo de reforço, os procedimentos adotados devem garantir que a chapa, uma vez colada, ofereça resistência aos esforços previstos e continue trabalhando sob estes esforços ao longo da vida útil do elemento reforçado. Neste aspecto em muito influencia a qualidade da resina epóxi, o estado das superfícies e características físicas e mecânicas dos dois materiais a unir.

Para fixar a chapa de aço ao concreto, em situações reais, o método corrente consiste em empregar tanto resina epóxi quanto parafusos auto-fixantes. Durante a instalação do reforço, os

parafusos constituem-se numa solução adequada ao problema de manutenção da chapa de aço na posição correta, e sob pressão, até o endurecimento da formulação epóxi.

O reforço por intermédio de chapas de aço coladas à viga é de custo baixo e de fácil execução, se comparado ao reforço com acréscimo de armadura transversal, mas constatou-se nas últimas pesquisas realizadas um grande número de problemas com o descolamento destas chapas. Na figura 3.2 observa-se a aplicação do método em uma viga de concreto armado.

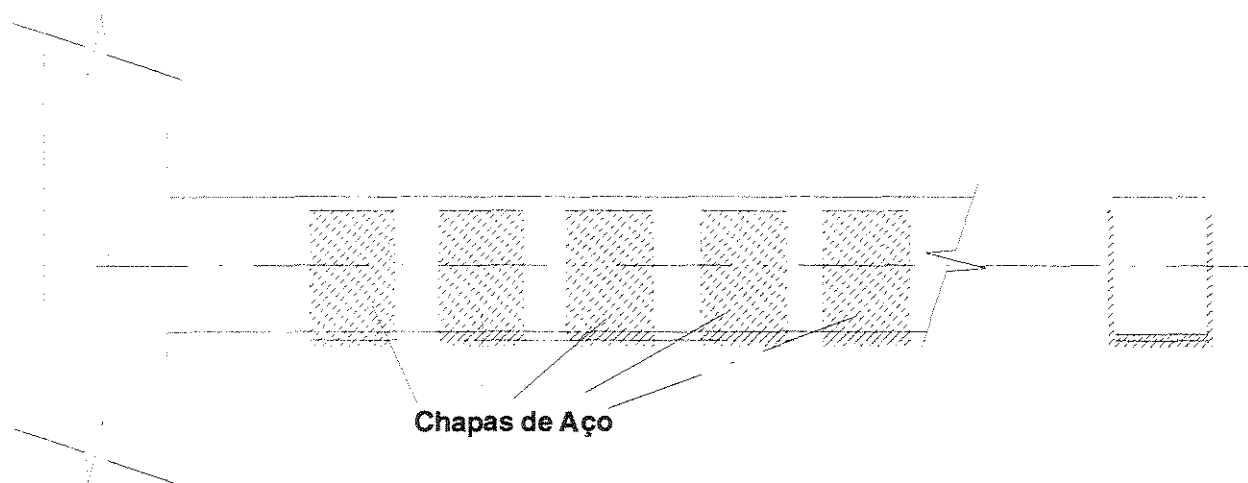


FIGURA 3.2 Reforço de viga de concreto armado mediante a adição de chapas de aço.

▪ **Reforço com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF)**

Esse moderno tipo de reforço, objeto deste estudo, tem como principais vantagens em relação aos métodos anteriormente citados: peso reduzido, baixa espessura, facilidade de aplicação, elevada resistência, resistência à fadiga, alcalinidade e corrosão. No capítulo seguinte serão mostrados todo o seu histórico, as suas características e aplicações.

4 A 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 1000 graus centígrados), face as quais a grande maioria das fibras sintéticas se derrete ou se evapora. Isto não acontece, no entanto, com certas fibras, como o acrílico, por exemplo, 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 milhar destes filamentos, que adquire a espessura de um cabelo, apresenta excepcionais características mecânicas, que, a depender do arranjo micro-estrutural das fibras, podem ser traduzidas 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 frequentemente com compósitos de fibras de carbono de elevada resistência à tração e com módulo de elasticidade semelhante ao do aço de construção.

A forma comercial mais empregada das fibras é a chamada “folha flexível pré-impregnada”, sistema em que os feixes de filamentos de fibras de carbono são agrupados de forma contínua e aderidos a uma folha de suporte impregnada com quantidades muito pequenas de resina epoxídica, assumindo espessuras da ordem de décimos de milímetro. 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 fibras também podem ser empregadas na forma de laminados, que possuem uma maior espessura, em média 1,5 mm, e uma maior porcentagem de fibras em sua composição, cerca de 70%, contra cerca de 30% em média nas folhas flexíveis.

4.1 MATRIZ

O componente responsável pela união das fibras e conseqüentemente por transferir os esforços entre as mesmas é denominado matriz. A matriz é formada por um material polimérico, que é produzido através de um processo químico de associação molecular, produzido e controlado por catalisadores, responsáveis pelo início do processo; pelos inibidores, que controlam a velocidade do processo, impedindo a polimerização prematura durante o armazenamento do produto; e pelos aceleradores, que aceleram o processo.

As matrizes mais utilizadas atualmente são à base de resinas epoxídicas derivadas do petróleo, resultantes da combinação de epocloridina e de bifenol. A proporção entre esses dois componentes será responsável pelas propriedades finais da matriz. No início do processo, durante a catalisação, esse polímero apresenta uma baixa viscosidade o que permite uma fácil modelagem e um completo envolvimento das fibras no compósito.

As resinas epoxídicas podem ser curadas em temperaturas que vão da temperatura ambiente até a temperatura de 175° C, podendo ser utilizado ou não um endurecedor. Dependendo do uso do endurecedor e da temperatura de cura pode-se produzir um compósito com diferentes propriedades, desde uma folha flexível até um laminado.

A resina epóxi apresenta características importantes que possibilitam a sua aplicação em sistemas de reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono, tais como a grande variedade de

propriedades mecânicas e físicas, não emissão de monômeros voláteis durante a cura e o processamento, ausência de retração durante a cura e uma ótima adesão às fibras.

No que se refere ao papel da matriz na resistência final do compósito, a resina epóxi será especialmente importante na resistência à compressão e ao corte, não influenciando na resistência à tração do compósito final.

4.2 FIBRAS

O comportamento e todas as propriedades de sistema compósito de reforço com fibras dependem do tipo de fibra utilizado, da porcentagem de fibras presentes no compósito final e do arranjo dessas fibras no compósito.

Quanto ao tipo de fibra utilizado, tem-se o emprego, na área de reforço estrutural em Engenharia Civil, principalmente de fibras de carbono e, em uma quantidade bem menor, da fibra de vidro. Além dessas duas fibras mais comumente utilizadas, as fibras de aramida e as fibras de poliéster também podem ser utilizadas em alguns casos específicos. Na tabela 4.1 estão indicados os módulos de elasticidade de cada uma dessas fibras.

Tabela 4.1 Módulo de elasticidade dos vários tipos de fibra.

Módulo de elasticidade (GPa)	
Fibra de Carbono	240 – 640
Fibra de Aramida	80 - 124
Fibra de Vidro	65 – 70
Fibra de Poliéster	12 - 15

Na figura 4.1 estão representados os comportamentos tensão x deformação de cada uma das fibras e também o comportamento de um aço usualmente utilizado em estruturas de concreto armado. Observa-se o comportamento linear das fibras até a sua ruptura.

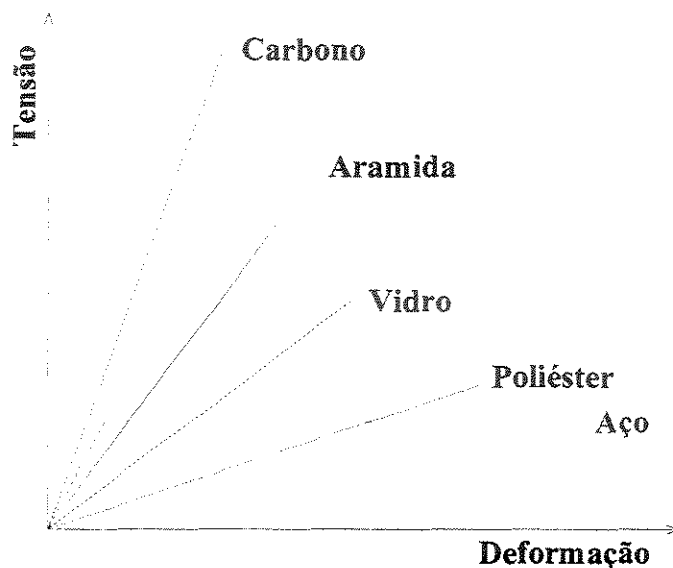


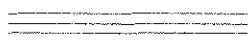
FIGURA 4.1 Comparação entre o comportamento tensão x deformação das fibras e do aço.

Basicamente, o tratamento teórico dado no dimensionamento do reforço com compósitos de fibras é o mesmo, independente da fibra utilizada, variando apenas o seu módulo de elasticidade e a sua deformação máxima, para a determinação do reforço. Desta maneira, em grande parte dos trabalhos internacionais publicados, como Nollet et al ⁽⁴⁰⁾, é dado um tratamento geral ao assunto independente do tipo de fibra utilizado.

Não há dúvida também que a quase totalidade de trabalhos experimentais e aplicações práticas observadas na atualidade gira em torno da fibra de carbono, e por isso esse estudo se baseia especificamente em suas propriedades e desse ponto em diante se tratará especificamente de suas propriedades, lembrando da sua aplicação para os outros tipos de fibras.

No que se refere à quantidade de fibras utilizadas na fabricação do compósito pode-se conseguir materiais com diferentes propriedades e aplicações. Com uma menor porcentagem de fibras é obtida a folha flexível e com uma porcentagem maior o laminado, na tabela 4.2 são mostradas as principais diferenças existentes entre os dois tipos de compósitos.

TABELA 4.2 Comparação entre laminados e folhas flexíveis de fibra de carbono.

Tipo de Compósito	Folha Flexível	Laminado
Módulo de Elasticidade (GPa)	240-640	150-200
Deformação Última (%)	1 a 1,5%	0,6 a 0,8%
Espessura (mm)	0,117 a 0,235	1 a 1,5
Proporção de fibras no plástico	25 a 40%	65 a 75%
Disposição das fibras		

Observa-se, da tabela 4.2, que no caso dos laminados as fibras ficam mais bem alinhadas, isso se deve ao processo industrial de sua fabricação. Já no caso das folhas flexíveis a parte final de sua composição é feita na hora da aplicação do reforço (o método de aplicação será visto com detalhes no item 4.4) o que gera um arranjo menos eficiente, valorizando nesse caso a perícia dos encarregados da sua aplicação.

Outro fator que influencia no desempenho do compósito é o arranjo das fibras na matriz, quando as fibras estão dispostas em apenas uma direção elas conferem ao compósito um comportamento anisotrópico, as fibras podem ser ainda dispostas em duas direções perpendiculares entre si. Um arranjo menos usual é formado com as fibras posicionadas em todas as direções tentando simular um comportamento isotrópico para o compósito, esse arranjo é

denominado pseudo-isotrópico e está ilustrado na figura 4.2 juntamente com os outros arranjos possíveis.

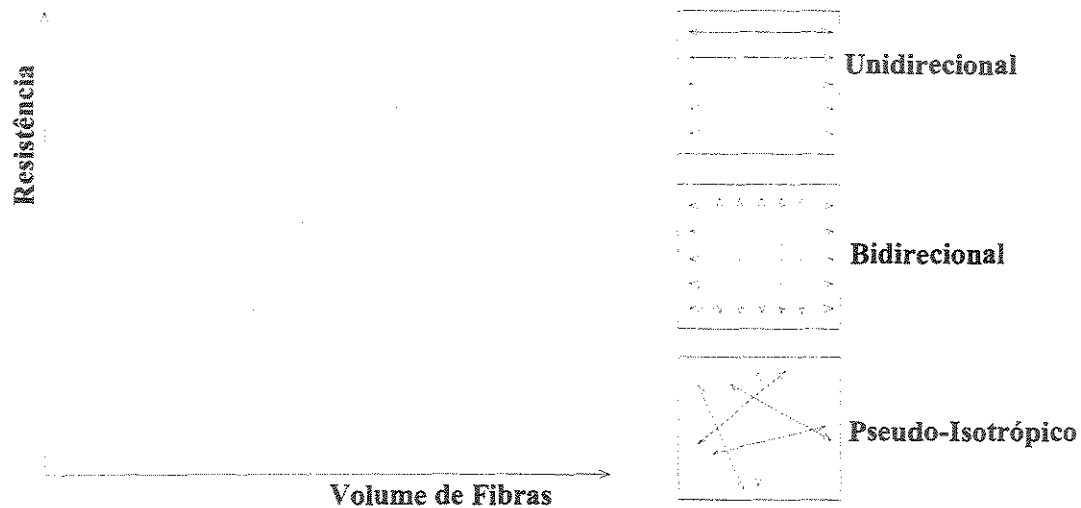


FIGURA 4.2 Variações no arranjo das fibras de carbono em um compósito. Fonte: ACI 440R-96⁽³⁾

Esses arranjos são conseguidos através da sobreposição de várias camadas de fibras de carbono, como mostrado na figura 4.3.

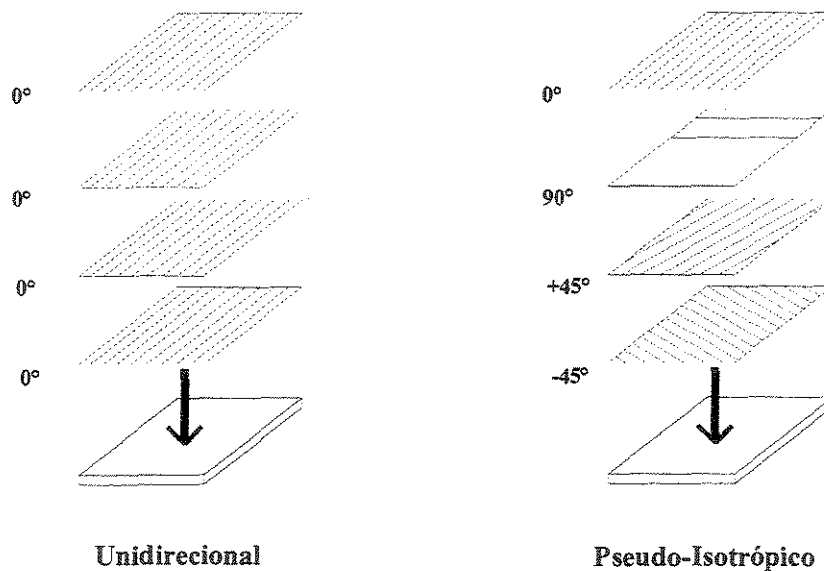


FIGURA 4.3 Formação dos compósitos de fibra de carbono. Fonte: ACI 440R-96⁽³⁾

4.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS

As folhas flexíveis de fibra de carbono possuem um vasto campo de aplicação como reforço de estruturas de concreto armado, a sua utilização pode contribuir com a estrutura em vários aspectos, entre eles:

- Aumento da resistência à flexão;
- Aumento da resistência ao cisalhamento;
- Aumento da resistência à compressão por confinamento;
- Aumento da resistência à explosão;
- Redução da fadiga;
- Aumento da rigidez;
- Aumento da durabilidade.

O sistema de reforço também se aplica a vários elementos estruturais, nas figuras 4.4 a 4.10 estão ilustradas algumas de suas aplicações.

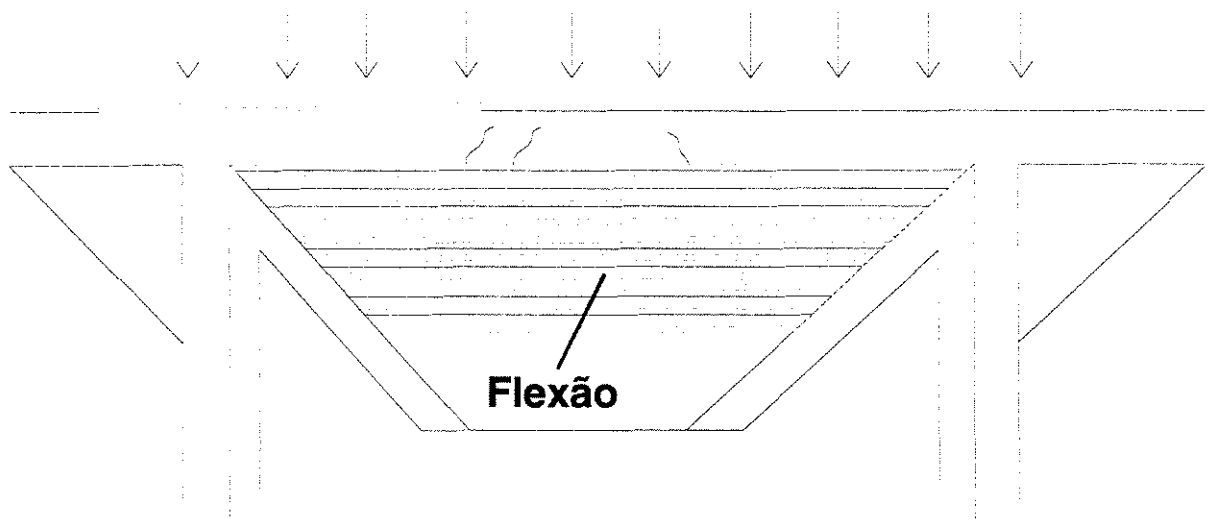


FIGURA 4.4 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em lajes.

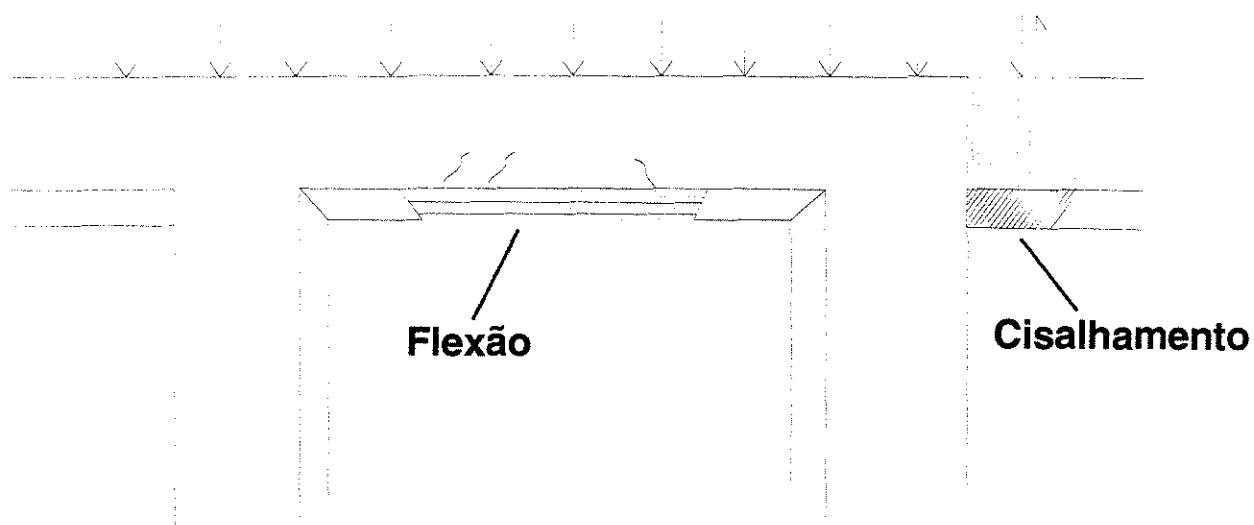


FIGURA 4.5 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em vigas.

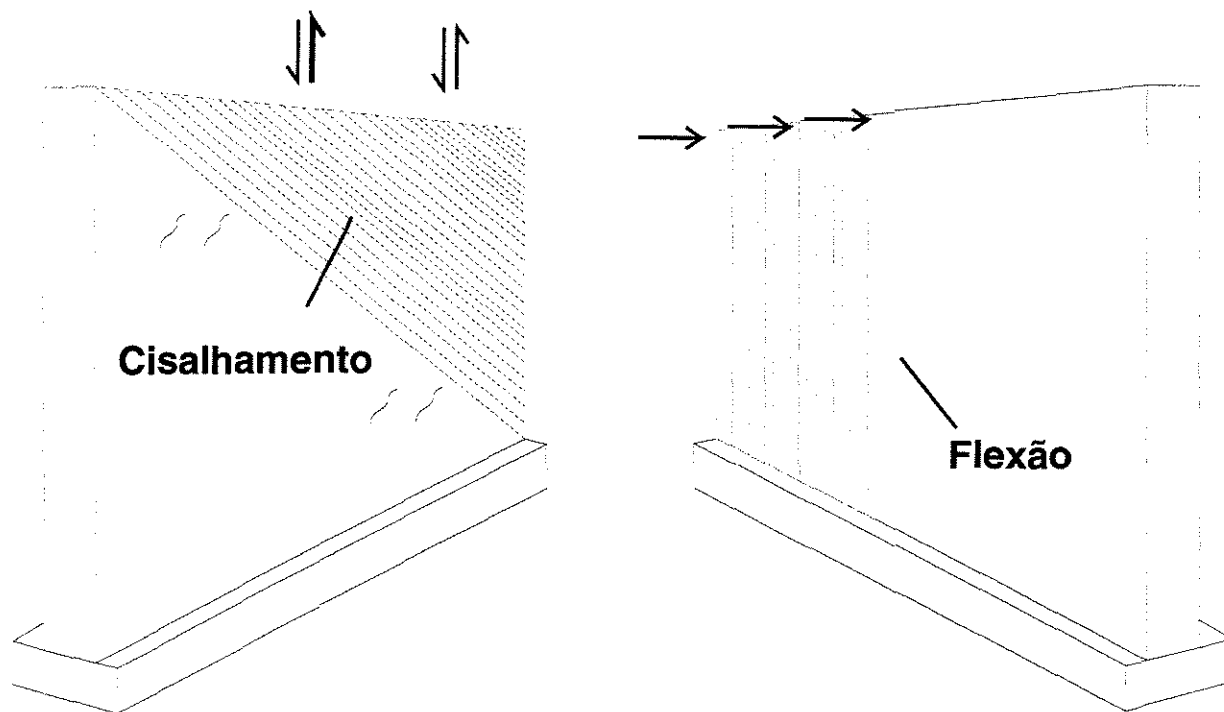


FIGURA 4.6 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em paredes.

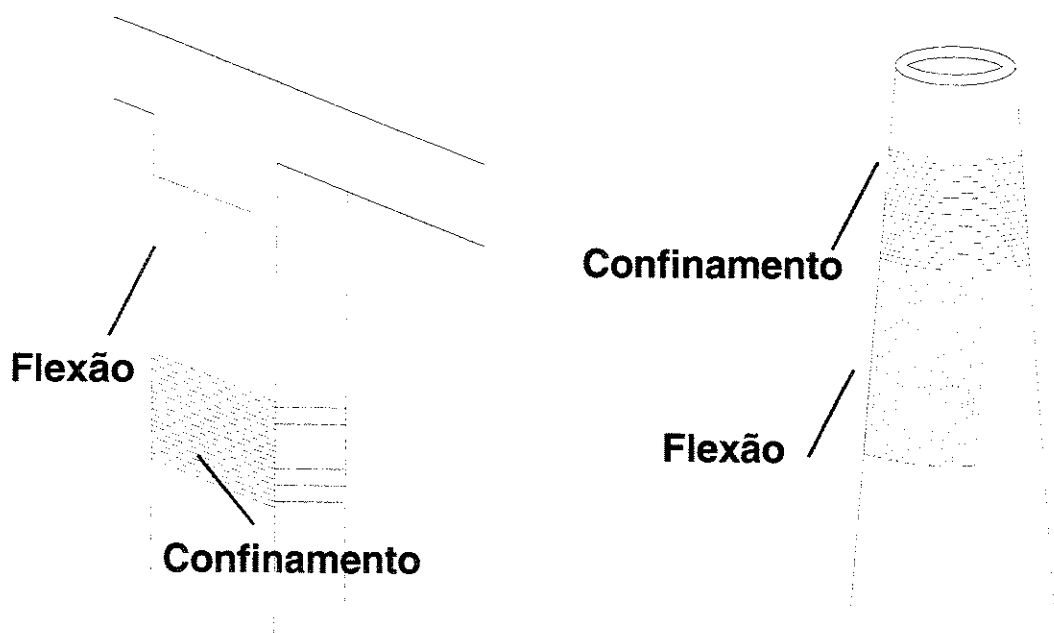


FIGURA 4.7 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em pilares e chaminés.

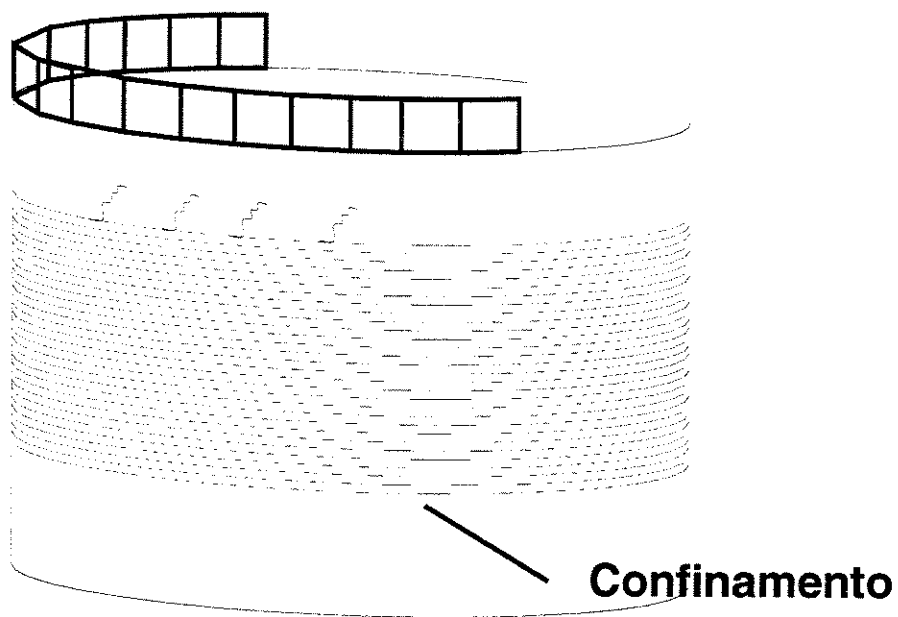


FIGURA 4.8 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em reservatórios.

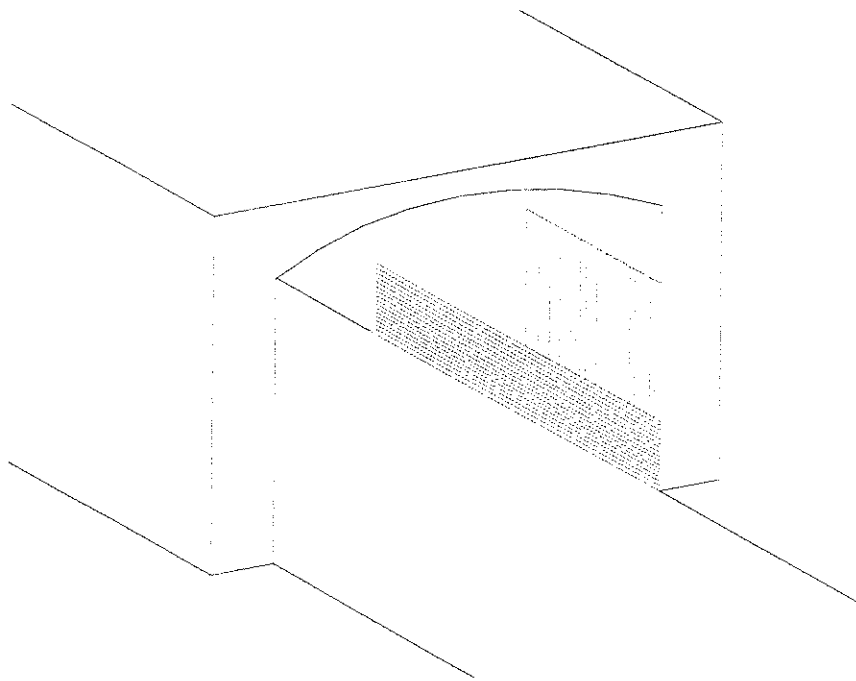


FIGURA 4.9 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em túneis.

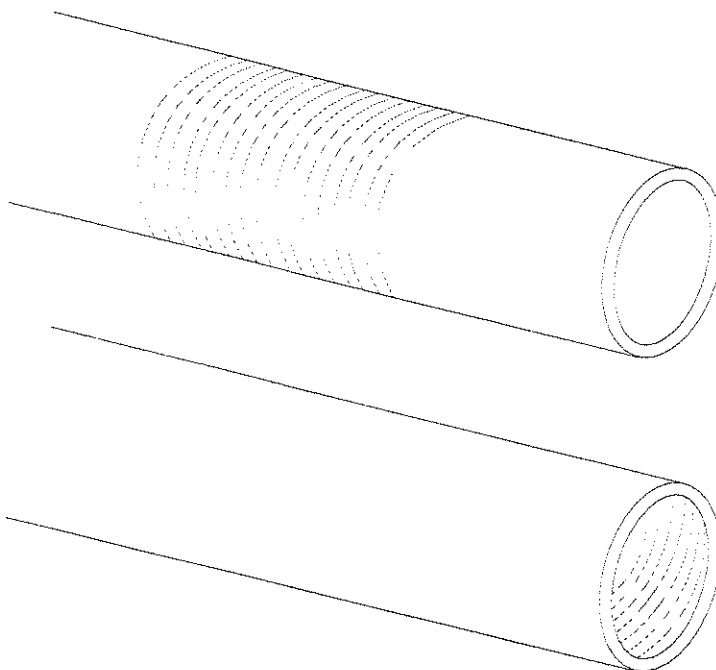


FIGURA 4.10 Aplicação do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono em tubos.

4.4 APLICAÇÃO DO REFORÇO

Pode-se dividir o processo de aplicação das folhas flexíveis de fibra de carbono pré-impregnadas, para qualquer uma de suas aplicações em elementos estruturais de concreto armado, em seis partes. Na tabela 4.3 estão indicadas as principais características dos produtos envolvidos no processo de aplicação.

TABELA 4.3 Características dos produtos envolvidos na aplicação do reforço.(Dados fornecidos pelo fabricante)

Característica \ Produto		Resina Epóxi	Massa Epóxi	Saturante Epóxi	Protetor
Cor		Âmbar claro	Cinza	Azul	Variada
Massa específica (g/m ³)		1,050	1,800	1,050	1,250
Sólidos por volume (%)		100	98	100	38
Vida útil da mistura (min)		25	60	20	-
Secagem (horas)	Toque	06	2/3	06	03
	Manuseio	08	01	08	08
	Retoque	12	12	12	24
Cura total (dias)		7	7	-	-
Aplicação à (horas)	10°C	0,5 a 01	-	-	-
	20°C	01	-	-	-
	30°C	1 / 4	-	-	-
Espessura (mm)		-	1 a 2	-	-
Decaimento (mm)		-	3 (máximo)	-	-
Ponto de Fulgor (°C)		-	93	72	26
Viscosidade (s)		65	-	60	-
Módulo de Elasticidade (MPa)		-	-	724,80	-
Módulo de Cisalhamento(MPa)		-	-	278,77	-
Resistência Compressão (MPa)		44,00	-	45,00	-
Mistura		0,7A/0,3B	0,75A/0,25B	0,7A/0,3B	-

Antes de se iniciar o procedimento de reforço é necessário que a superfície esteja limpa, para isso lixa-se e depois se limpa a superfície com um pano umedecido em um solvente de secagem rápida. É necessário também o arredondamento de arestas vivas, com um raio mínimo de 1cm.

Com a superfície preparada restam seis etapas a serem realizadas:

▪ **1ª Etapa :**

A primeira etapa consiste na aplicação da resina epóxi, que é um produto à base de epóxi poliamina, de baixa viscosidade e sem solventes que tem a função de tamponar os microporos existentes no concreto, além de possuir excelente resistência química a bases, ácidos, sais, óleos, carburantes e minerais.

A mistura é feita manualmente, levando em torno de 5 minutos, e a aplicação é feita com rolo de lã de carneiro, como mostrado na figura 4.11. Após a aplicação da resina epóxi é necessário se esperar 8 horas para se iniciar a próxima etapa, sendo que esse intervalo não pode ser superior a 24 horas, tempo esse que pode fazer com que a resina epóxi se vitrifique.

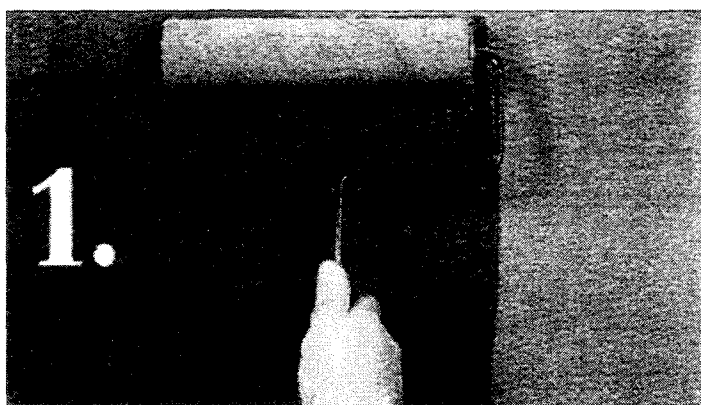


FIGURA 4.11 Execução do reforço - 1ª etapa

▪ 2ª Etapa:

O próximo passo é aplicação da massa epóxi, um produto de dois componentes, sem solventes, e especialmente formulado para a utilização em reparos de concreto, na aplicação de sistemas de reforço com fibras de carbono.

A principal função desta etapa é a regularização da superfície, sendo assim ela não é obrigatória, sendo usada apenas quando a superfície contiver poros ou pequenas irregularidades.

A mistura é feita manualmente e a aplicação é feita sobre a camada de resina epóxi, com auxílio de uma espátula, e atentando para a formação de uma camada com a menor espessura possível, suficiente apenas para a regularização da superfície. A figura 4.12 ilustra essa etapa do processo, e depois de terminada esta etapa é necessário se esperar 8 horas para continuar o procedimento de reforço.



FIGURA 4.12 Execução do reforço - 2ª etapa

▪ 3ª Etapa:

O próximo passo é a aplicação da primeira camada de saturante epóxi, esta camada de impregnação será aplicada sobre a camada de massa epóxi ou sobre a camada de resina epóxi quando não for preciso regularizar a superfície.

O saturante epóxi é um produto de dois componentes, sem solventes, formulado com endurecedor de amina, transparente e livre de solventes. O saturante possui uma excelente resistência a bases, ácidos, sais, óleos minerais, além de ótima resistência ao intemperismo.

A mistura é feita manualmente, durante aproximadamente 5 minutos, e a aplicação é feita com um rolo de lã de carneiro, como mostrado na figura 4.13.

Após a mistura a aplicação deve ser feita em até 40 minutos, já que o saturante epóxi começa a reagir e se torna viscoso, ponto esse onde deve ser iniciada a próxima etapa. Sendo assim é muito importante dosar as quantidades a serem misturadas de cada vez e dividir as áreas a serem aplicadas de acordo com o tempo de aplicação de cada uma das misturas.

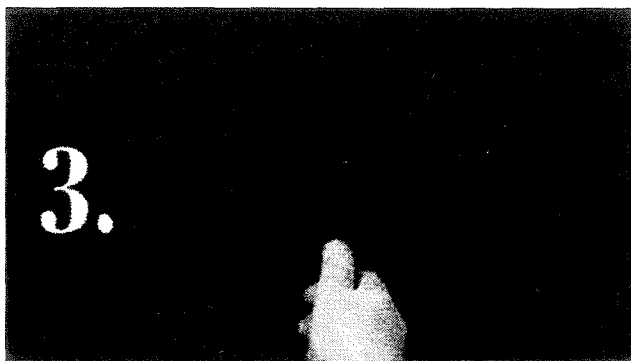


FIGURA 4.13 Execução do reforço - 3ª etapa

▪ **4ª Etapa:**

Cerca de 40 minutos após a mistura do saturante epóxi, quando este começa a se tornar viscoso deve-se aplicar a folha flexível de fibra de carbono, isso é feito tirando-se um dos plásticos que envolvem a fibra, e com a ajuda de um rolo pesado aderir a folha à superfície evitando a formação de bolhas de ar. Na figura 4.14 é mostrada a 4ª etapa da aplicação.

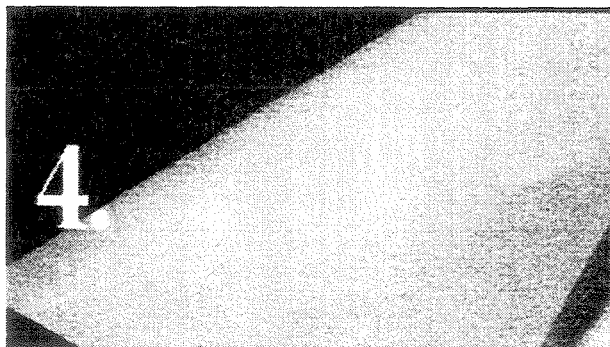


FIGURA 4.14 Execução do reforço - 4ª etapa.

▪ 5ª Etapa:

Sobre a folha flexível de fibra de carbono deve ser aplicada mais uma camada de saturante epóxi, essa camada deve saturar a fibra. Na figura 4.15 observa-se essa aplicação, e deve-se retirar o excesso do saturante com o auxílio de um rodo de borracha, cuidando para que a quantidade de saturante epóxi seja apenas a suficiente para saturar a fibra.



FIGURA 4.15 Execução do reforço - 5ª etapa

Se houver a necessidade da utilização de mais de uma camada de folhas flexíveis de fibra de carbono deve-se repetir a partir deste ponto à 3ª, a 4ª e a 5ª etapa. Em Beber⁽¹¹⁾ foram estudadas vigas com até 10 camadas de folhas flexíveis de fibra de carbono.

▪ 6ª Etapa:

Esta última etapa também é opcional e consiste na aplicação de uma tinta de acabamento acrílica, que possui excelente resistência a intempéries, à corrosão e ótima retenção de cor. A figura 4.16 ilustra esta etapa que tem como função a formação de uma camada externa protetora e de efeito estético.

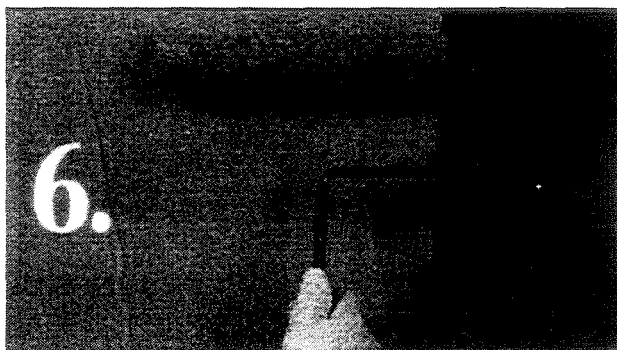


FIGURA 4.16 Execução do reforço - 6ª etapa

Finalmente é ilustrada na figura 4.17 a disposição final do elemento reforçado, com todas as suas camadas.

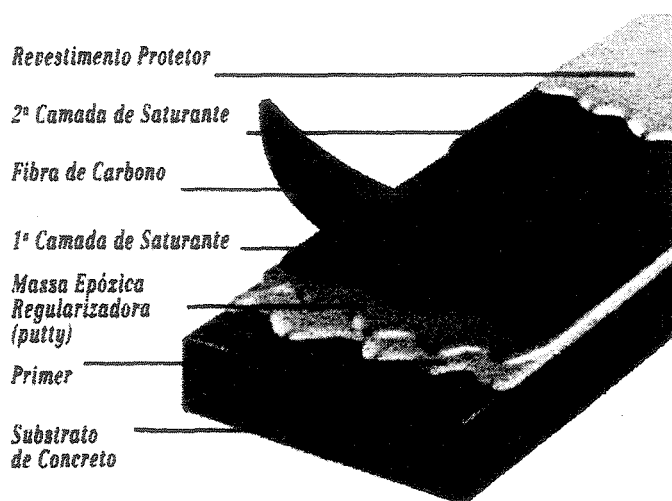


FIGURA 4.17 Camadas do reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono

4.5 PROCEDIMENTOS E RECOMENDAÇÕES

Nesse item são apresentados os procedimentos e recomendações internacionais mais recentes a respeito de reforços externos com polímeros reforçados com fibras, são aspectos importantes apresentados no ACI-440R-2000 ⁽⁴⁾ e que representam o atual entendimento deste novo método de reforço.

▪ **Aplicação:**

Os sistemas PRF podem ser usados tanto para a recuperação de uma estrutura danificada, como para o reforço de uma estrutura que teve o seu uso modificado ou uma falha de projeto. Para um bom desempenho do sistema de reforço o projetista deve verificar:

- As dimensões existentes da estrutura a ser reforçada;
- Localização, causa e dimensões das fissuras existentes;
- Localização e quantificação da armadura existente;
- Localização e intensidade de corrosão nas armaduras;
- Resistência à compressão do concreto da estrutura;
- Resistência à tração da superfície do concreto;
- Condições do recobrimento de concreto da estrutura.

Com isso deve-se determinar a exata capacidade resistente da estrutura antes de ser reforçada e a parcela a ser acrescida pelo reforço, além de tornar a superfície apta para receber o reforço. Nos próximos itens todos esses elementos são detalhados.

▪ **Resistência mínima do concreto:**

A aplicação dos sistemas de reforço PRF pode ser dividida em duas importantes partes no que se refere ao tipo de estrutura em que o reforço será aplicado.

No primeiro grupo estão as estruturas onde o problema de descolamento do reforço não é crítico, como em pilares e paredes.

Já na aplicação do sistema de reforço em lajes e principalmente em vigas (tanto no reforço à flexão como no reforço ao cisalhamento) o problema de descolamento do reforço é crítico. Nesses casos recomenda-se uma resistência à compressão mínima do concreto de 14MPa.

▪ **Temperatura máxima de serviço:**

Altas temperaturas provocam a perda de várias características da resina epóxi utilizada nos sistemas de reforço com PRF, a temperatura em que a resina epóxi é afetada é chamada de ponto de transição vítrea (T_g).

Para as resinas epóxi comumente usadas nos sistemas de reforço com PRF o valor da T_g varia de 90°C a 150°C, apesar de as fibras resistirem a temperaturas muito mais elevadas (a fibra de carbono resiste até 1650°C) o reforço fica inteiramente comprometido devido ao amolecimento da resina epóxi que compromete a transferência de tensões para o reforço, provocando o descolamento do mesmo.

▪ **Variações de temperatura:**

Para os sistemas de reforço PRF unidirecionais, que são os mais utilizados, o coeficiente de expansão térmica varia nas direções longitudinal e transversal, dependendo ainda do tipo de fibra, do tipo da resina e da porcentagem do volume de fibras no reforço.

Os coeficientes de expansão térmica dos sistemas de reforço são diferentes dos do aço e do concreto normalmente utilizados em estruturas de concreto armado, na tabela 4.4 estão apresentados esses valores, notando que o valor negativo para o sistema com fibra de carbono

mostra que esse sistema de reforço se expande com a diminuição da temperatura e se retrai com o seu aumento.

TABELA 4.4 Coeficientes de Expansão Térmica dos sistemas PRF. Fonte ACI 440-R-00⁽⁴⁾

Direção	Fibra de Vidro	Fibra de Carbono	Fibra de Aramida
Longitudinal, α_L	6 a 10 x 10 ⁻⁶ /°C	-1 a 0 x 10 ⁻⁶ /°C	-6 a -2 x 10 ⁻⁶ /°C
Transversal, α_T	21 a 23 x 10 ⁻⁶ /°C	22 a 23 x 10 ⁻⁶ /°C	60 a 80 x 10 ⁻⁶ /°C

Para efeito de comparação os valores usuais do concreto e do aço utilizados em estruturas de concreto armado são de 8 x 10⁻⁶/°C e 12 x 10⁻⁶/°C, respectivamente.

▪ Efeito do fogo:

O desempenho do sistema de reforço com PRF é limitado pela resistência da estrutura à ação do fogo. Devido à baixa resistência a altas temperaturas das resinas epóxi utilizadas em todos os sistemas de reforço, quando submetido à ação do fogo o reforço é completamente perdido.

Vários métodos de proteção do sistema de reforço ao fogo estão sendo testados, mas enquanto não for definido um procedimento de proteção ao fogo eficiente e seguro deve-se prever que no caso de incêndio o sistema de reforço será perdido e a estrutura existente deverá suprir a solicitação sozinha.

▪ Filosofia de projeto:

As recomendações de projeto do ACI-440R-00⁽⁴⁾ para sistemas PRF de reforço, são baseadas na teoria dos Estados Limites.

A Estrutura deve estar dimensionada para suportar os Estados Limites de Serviço (fissuração e flecha excessiva) e os Estados Limites Últimos (deformação excessiva, ruptura e fadiga).

Sendo assim, para evitar a ocorrência desses Estados Limites deve-se utilizar coeficientes segurança no dimensionamento do reforço. No próximo item são mostrados os coeficientes de minoração das propriedades do sistema de reforço indicados pelo ACI.

▪ **Efeito Ambiental:**

Estudos recentes indicam que as condições ambientais afetam o desempenho do reforço em PRF durante a sua vida útil. Entre os fatores principais estão:

- Alcalinidade/Acidez : A performance de um sistema PRF em ambiente alcalino ou ácido depende do material da matriz e da fibra utilizada. A fibra de carbono é resistente a esses ambientes, mas as fibras de vidro podem se degradar, sendo importante nesse caso o uso de uma matriz resistente que possa proteger as fibras de vidro, retardando a degradação.
- Expansão Térmica: As propriedades de expansão térmica dos sistemas PRF são diferentes das do concreto, e variam de acordo com o seu tipo de fibra e de matriz, além de possuírem valores diferentes nas direções longitudinal e transversal às fibras.

Para aplicações do sistema de reforço em ambientes sujeitos a grandes variações de temperatura as fibras de vidro são mais indicadas que as fibras de carbono por possuírem um coeficiente de expansão térmica mais próximo ao do concreto (tabela 4.4). De qualquer forma estudos recentes constataram que variações de temperatura de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ não afetam os sistemas de reforço PRF.

- **Condutividade Elétrica:** Os sistemas PRF com fibras de vidro e de aramida são isolantes elétricos, não causando dano algum à estrutura reforçada. Já os sistemas PRF com fibra de carbono são condutores elétricos, e por isso não devem ser colocados em contato direto com a armadura para evitar a sua corrosão.

Com base nisso foi definida uma série de coeficientes de redução a serem aplicados às propriedades do sistema de PRF de acordo com o tipo de ambiente ao qual será exposto e o tipo de fibra utilizado, na tabela 4.5 estes valores são apresentados.

TABELA 4.5 Fator de redução ambiental dos sistemas PRF. Fonte ACI 440-R-00⁽⁴⁾

Condição de Exposição	Tipo de Fibra	Coefficiente de Redução
Ambiente Fechado	Carbono / Epóxi	0,95
	Vidro / Epóxi	0,75
	Aramida / Epóxi	0,85
Ambiente Não-Agressivo	Carbono / Epóxi	0,85
	Vidro / Epóxi	0,65
	Aramida / Epóxi	0,75
Ambiente Agressivo	Carbono / Epóxi	0,85
	Vidro / Epóxi	0,50
	Aramida / Epóxi	0,70

- **Impacto, Fadiga e Creep Rupture:**

Os sistemas PRF com fibras de vidro e de aramida se mostram mais resistentes ao impacto do que os sistemas com fibra de carbono.

Por outro lado os sistemas PRF com fibra de carbono são os que apresentam melhor desempenho em relação à fadiga, quando submetidos a carregamentos cíclicos. As fibras de carbono perdem cerca de 5% de sua resistência inicial após uma década de sua vida logarítmica

na curva S-N de números de ciclos de carregamento até a ruptura, enquanto que as fibras de aramida perdem 6% e as de vidro 10%.

Creep Rupture é o nome dado à ruptura do sistema de reforço PRF após um tempo de carregamento constante da estrutura. Também nesse caso os sistemas PRF com fibra de carbono apresentam um melhor desempenho, ensaios feitos com barras de fibra de carbono, de aramida e de vidro, mostram que após 50 anos os valores da resistência das barras foi de 91%, 47% e 30% da resistência inicial, respectivamente.

▪ Descolamento:

Depois de executado o reforço podem surgir pequenos descolamentos, segundo o mesmo ACI-440R-00⁽⁴⁾, descolamentos de até 1300 mm² são permissíveis, desde que não correspondam a mais do que 5% da área de compósito empregada e que não existam mais do que 10 descolamentos / m².

Descolamentos maiores do que 16000 mm² podem afetar a performance do compósito e devem ser reparados através do corte da área afetada com a posterior colagem de um outro pedaço do material. Descolamentos menores podem ser corrigidos pela injeção de resinas epóxi.

▪ Aplicação:

Deve-se evitar superfícies úmidas, frias ou geladas o que pode comprometer a saturação das fibras e a cura adequada da resina. Além disso, o compósito não deve ser aplicado em concreto armado em que o aço esteja sofrendo processo de corrosão ou que apresente qualquer tipo de deterioração como reações álcali-sílica, carbonatação, fissuração excessiva, etc.

O ACI 440R-2000 sugere que as fissuras com abertura superior a 0,3 mm sejam seladas com o uso de uma resina epóxi adequada. A colocação do compósito deve ser cuidadosa também quanto ao seu posicionamento, pois desvios de apenas 5° já podem afetar seu desempenho.

No caso de estruturas com arestas vivas recomenda-se o seu arredondamento com o raio mínimo de 1 cm, como mostrado na figura 4.18

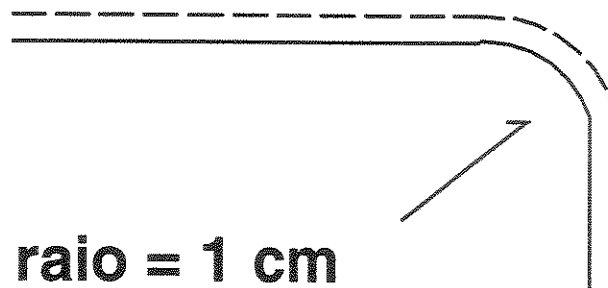


FIGURA 4.18 Arredondamento de arestas.

▪ Cura:

Os sistemas PRF são afetados pela presença, durante o seu processo de cura, de temperaturas adversas, de poeira ou sujeira no ambiente, contato direto do material com a chuva, insolação excessiva, alta umidade ou mesmo pelo vandalismo.

Por isso, a instalação de uma proteção temporária pode ser necessária tanto durante o processo de execução do reforço quanto durante a cura da resina. Esse tipo de proteção pode ser feito com lonas plásticas.

Recomenda-se, ainda, que o sistema de escoramento utilizado não seja retirado até a cura total da resina, que normalmente é de 7 dias. Antes desse período também não se deve expor a estrutura à ação de carregamentos adicionais.

5 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS JÁ REALIZADAS

A seguir são apresentadas pesquisas experimentais já realizadas que contribuem para um melhor entendimento da técnica de reforço estudada neste trabalho.

5.1 AL-SULAIMANI, G. J., SHARIF, A., BASUNBUL, I.A.,BALUCH, M. H. GHALEB, B. N. ⁽¹⁾

Neste trabalho foram analisadas 16 vigas de seção transversal quadrada de 150x150mm igualmente armadas tanto à flexão quanto ao cisalhamento, o vão da viga foi de 1,25m e todas as vigas foram sub-armadas em relação ao cisalhamento para provocar a ruptura por esforço cortante. Na figura 5.1 estão ilustradas as características geométricas e o esquema de carregamento destas vigas.

O objetivo deste trabalho foi a avaliação de diferentes procedimentos para o reforço ao esforço cortante em vigas de concreto armado com o uso de folhas flexíveis de fibras, nesse caso o tipo de fibra utilizado foi a fibra de vidro. As folhas utilizadas possuíam 3mm de espessura e um comportamento linear até a ruptura com uma tensão última de 200 MPa , na figura 5.2 pode-se observar a comparação entre a curva tensão x deformação do aço e da fibra de vidro utilizada.

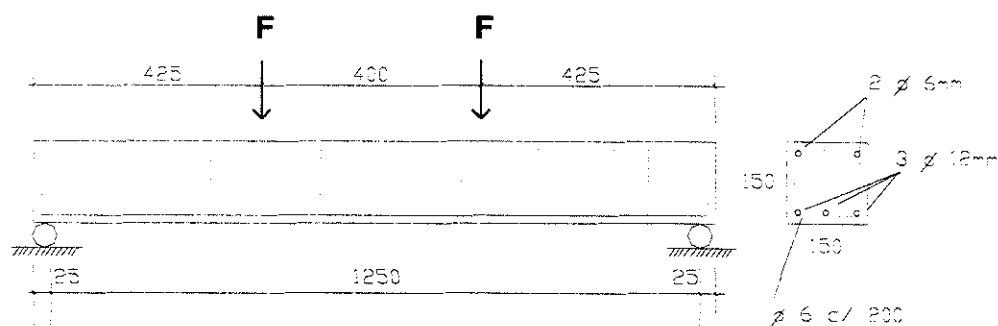


FIGURA 5.1 – Seção transversal e esquema de carregamento

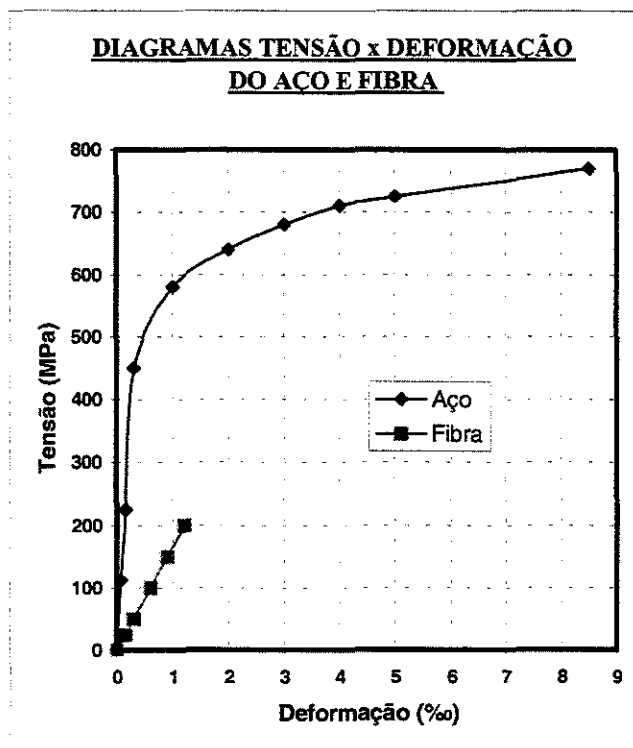


FIGURA 5.2 – Comparação tensão x deformação entre o aço e a fibra

A resina utilizada na adesão entre o concreto e as folhas de fibra de vidro foi ensaiada e foi constatada uma resistência ao cisalhamento na interface concreto/fibra de 3,5 MPa.

As 16 vigas foram divididas em 4 grupos e em cada um dos grupos foram subdivididas em outros dois grupos conforme mostrado na tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Divisão das vigas experimentadas

Grupo	Subgrupo	Nº de vigas	Descrição
C	CO	2	Viga testemunho
	CP	2	Viga testemunho com reforço à flexão
S	SO	2	Tiras de fibra
	SP	2	Tiras de fibra mais reforço à flexão
W	WO	2	Chapa lateral
	WP	2	Chapa lateral mais reforço a flexão
J	JO	2	Reforço envolvendo a viga
	JP	2	Reforço envolvendo a viga mais reforço à flexão

Nas figuras 5.3 a 5.6 estão representados cada um dos grupos mostrados, com as respectivas dimensões de seus reforços.

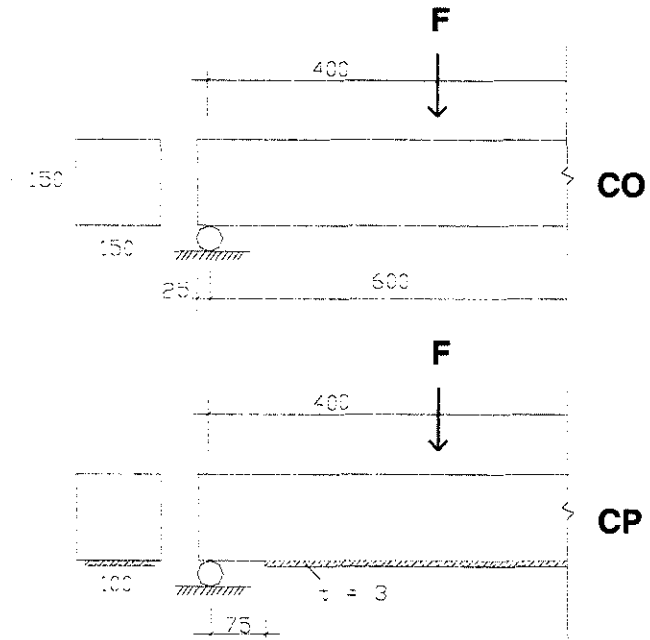


FIGURA 5.3 – Reforço nas vigas do grupo C

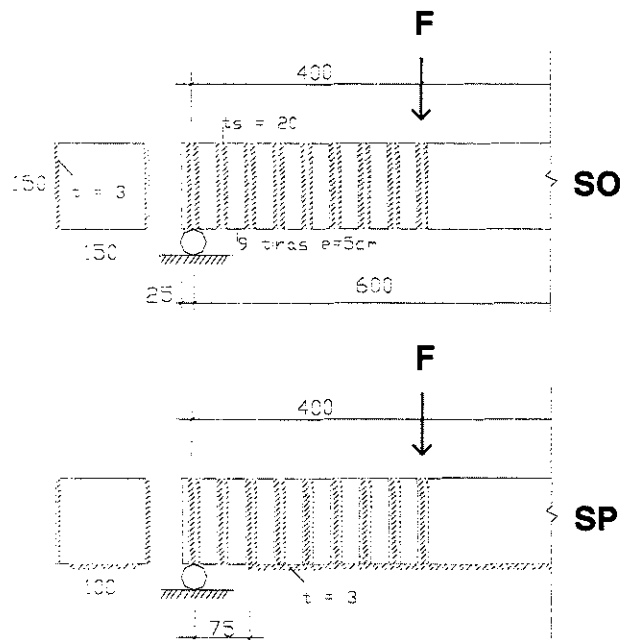


FIGURA 5.4 – Reforço nas vigas do grupo S

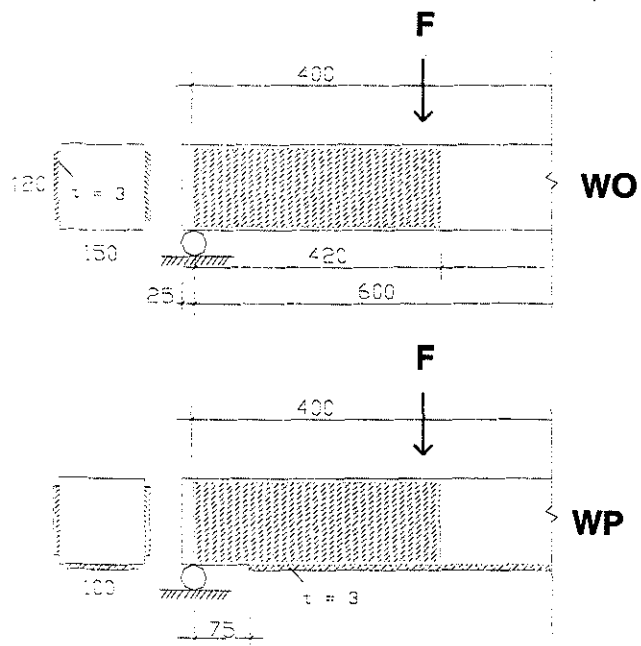


FIGURA 5.5 – Reforço nas vigas do grupo W

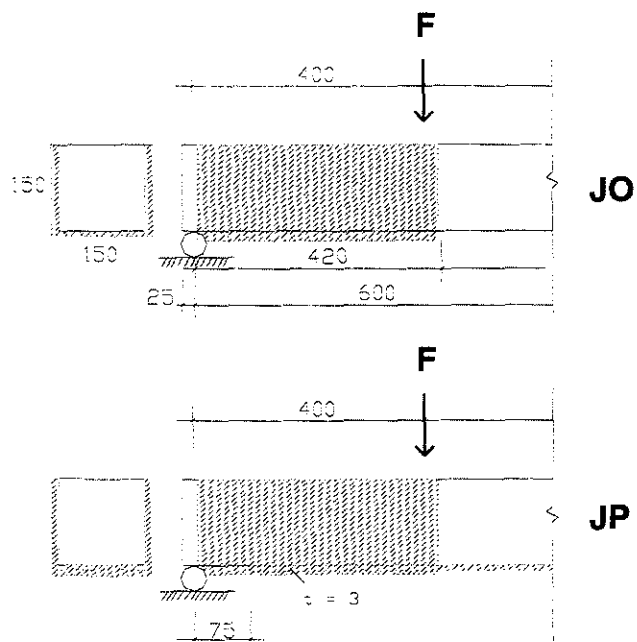


FIGURA 5.6 – Reforço nas vigas do grupo J

Os resultados teóricos, a serem comparados com os resultados experimentais, abrangiam dois tipos possíveis de ruptura, a ruptura por flexão (FF) e a ruptura por cisalhamento (SF), no caso da ruptura a flexão o valor último foi calculado pelo procedimento normal adotado pelo ACI.

No caso do esforço cortante último a capacidade teórica da viga é dada por:

$$V_u(SF) = V_c + V_s + V_{PRF} \quad (5.1)$$

Onde V_c representa a contribuição do concreto, V_s a contribuição do aço e V_{PRF} a contribuição da fibra de vidro. Os valores de V_c e V_s foram calculados com os procedimentos usuais do ACI e os valores de V_{PRF} de acordo com o tipo de reforço de cada viga, da seguinte maneira:

- Grupo S : O valor de V_{PRF} é calculado assumindo que o descolamento das tiras irá ocorrer quando o valor máximo da tensão de cisalhamento ($\tau_{máx}$) na borda inferior da viga chegar a um valor denominado τ_{ave} , que foi estimado experimentalmente em uma parcela do valor máximo suportado pela resina $\tau_{últ} = 3,5$ MPa . No caso da colagem em tiras foi adotado o valor de $\tau_{ave} = 1,2$ MPa. Com esse valor obtém-se V_{PRF} dado pela seguinte fórmula:

$$V_{PRF} = \frac{2 F_{pd}}{S_p} = \frac{2 \times [\tau_{ave} \times (t_s \times h_s)] \times d}{S_p} \quad (5.2)$$

Onde:

t_s = largura das tiras = 20mm.

h_s = comprimento das tiras = 150mm.

d = distância do C.G. da armadura longitudinal ao extremo comprimido da fibra = 113mm.

S_p = espaçamento entre as tiras = 50mm.

- Grupo W : O valor de τ_{ave} para esse grupo de vigas é estimado pelo mesmo processo descrito para as vigas do grupo C, sendo nesse caso $\tau_{ave} = 0,8$ MPa. E o valor de V_{PRF} dado pela seguinte fórmula:

$$V_{PRF} = 2F_p = 2 \times \left[\hat{\sigma}_{ave} \left(\frac{d \times h_w}{2} \right) \right] \quad (5.3)$$

Onde:

h_w = comprimento das chapas = 120mm.

- Grupo J : Para as vigas do grupo J, devido à ancoragem proporcionada pelo enlaçamento da viga com a fibra de vidro, o valor de τ_{ave} é tomado como sendo igual ao valor máximo suportado pela resina, ou seja, $\tau_{ave} = \tau_{ult} = 3,5$ MPa. Nesse caso o valor de V_{PRF} é dado pela seguinte fórmula:

$$V_{PRF} = 2F_p = 2 \times \left[\hat{\sigma}_{ult} \times \left(\frac{d \times h_j}{2} \right) \right] \quad (5.4)$$

Onde:

h_j = comprimento das chapas = 150mm.

Na tabela 5.2 estão representados os valores teóricos esperados para cada um dos grupos bem como os valores experimentais medidos e os modos de ruptura alcançados por cada uma das vigas analisadas.

TABELA 5.2 – Resultados teóricos e experimentais

Grupo	Subgrupo	V_u (kN)	ε_{su} (%)	V_u teórico (kN)		Modo de ruptura
				SF	FF	
C	CO	34,5	0,213	30,6	46,9	Cisalhamento
	CP	32,2	0,155	30,6	60,0	Cisalhamento
S	SO	41,5	0,317	38,7	46,9	Cisalhamento
	SP	41,2	0,087	38,7	60,0	Cisalhamento
W	WO	42,0	0,282	41,4	46,9	Cisalhamento
	WP	45,2	0,124	41,4	60,0	Cisalhamento
J	JO	50,1	0,557	89,9	46,9	Flexão
	JP	62,3	0,463	89,9	60,0	Flexão

As principais conclusões a partir deste trabalho foram:

- O incremento na resistência ao esforço cortante foi praticamente o mesmo para o reforço com tiras (grupo S) ou chapas laterais (grupo W).
- A ruptura para as vigas reforçadas com tiras (grupo S) ou chapas laterais (grupo W) ocorreu devido ao descolamento da fibra.
- As vigas do grupo J, reforçadas com a fibra de vidro "embrulhando" a viga, apresentaram um desempenho sensivelmente maior em relação às outras vigas. Devido à melhor ancoragem da fibra nessas vigas a sua ruptura se deu por esforço de flexão com escoamento da armadura longitudinal.
- Todos os métodos de reforço estudados nesse trabalho aumentaram a capacidade resistente ao esforço cortante das vigas e os valores teóricos se mostraram bem próximos aos obtidos experimentalmente.

5.2 TRIANTAFILOU, T. C. ⁽⁵⁶⁾

Neste trabalho foram analisadas 11 vigas subdimensionadas ao cisalhamento. As vigas eram retangulares com seção de 70 x 110mm, sua armadura longitudinal era composta de duas barras de aço de 8mm e não foi usado nenhum tipo de armadura transversal. Na figura 5.7 estão ilustradas todas as dimensões bem como o reforço com fibra de carbono executado.

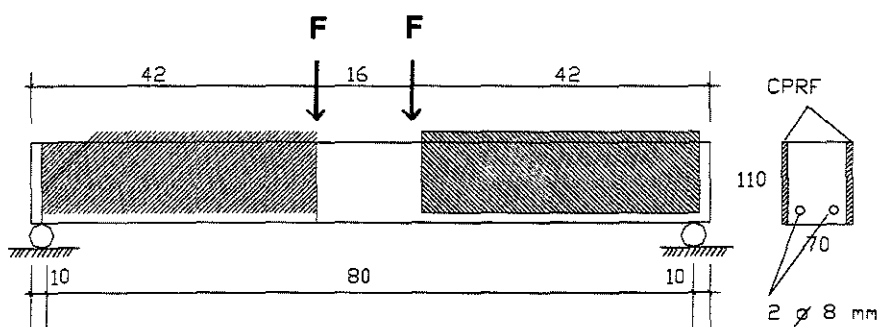


FIGURA 5.7- Seção transversal e esquema de carregamento.

Como reforço ao esforço cortante foram colocadas folhas de fibra de carbono sobre as duas faces laterais cobrindo todo o vão de cisalhamento. A fibra de carbono utilizada possuía um módulo de deformação de 235 GPa e uma tensão última de 3.300 MPa.

Das onze vigas confeccionadas, duas não foram reforçadas, de modo a servirem de vigas testemunho para as outras nove vigas que foram reforçadas com diferentes quantidades de fibra de carbono e com posicionamento variado dessas fibras.

Quanto ao posicionamento, foram estudadas vigas reforçadas com fibras a 90° e vigas reforçadas com fibras a 45°. No que diz respeito às quantidades de fibra, o fator que foi variado foi a taxa de fibra existente, chamado de ρ_{PRF} e que representa a relação entre a área transversal do reforço e a área da seção transversal da viga. Na tabela 5.3 estão representados todos esse parâmetros e os resultados de cada uma das vigas.

TABELA 5.3 Características e resultados das vigas

Viga	ρ_{PRF} (%)	β (°)	ϵ_{PRF} (%)	V_u (kN)	V_{PRF} (kN)	Modo de ruptura
Ca	-	-	-	15,5	-	Cisalhamento
Cb	-	-	-	17,3	-	Cisalhamento
S1a	0,0022	90	0,41	43,5	13,55	Cisalhamento (descolamento)
S1b	0,0022	90	0,34	38,9	11,25	Cisalhamento (descolamento)
S1	0,0022	45	0,30	44,5	14,05	Cisalhamento (descolamento)
S2a	0,0033	90	0,32	48,1	15,85	Cisalhamento (descolamento)
S2b	0,0033	90	0,26	42,2	12,90	Cisalhamento (descolamento)
S2	0,0033	45	0,22	47,3	15,45	Cisalhamento (descolamento)
S3a	0,0044	90	0,20	42,8	13,20	Cisalhamento (descolamento)
S3b	0,0044	90	0,16	37,5	10,55	Cisalhamento (descolamento)
S3	0,0044	45	0,13	40,7	12,15	Cisalhamento (descolamento)

Importantes conclusões podem ser feitas após a análise deste trabalho, ao observar os resultados obtidos verifica-se que para um aumento na taxa de fibra, ρ_{PRF} , ocorreu uma diminuição na deformação das fibras, ϵ_{PRF} , isso para vigas reforçadas com fibras de mesmo módulo de deformação, E_{PRF} .

Também foi verificada a eficácia do método de reforço com fibra de carbono e um melhor desempenho do reforço executado com as fibras orientadas a 45° em relação ao eixo longitudinal da viga.

5.3 NORRIS, T.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. ⁽⁴¹⁾

Neste trabalho foram analisadas 6 vigas de seção transversal retangular de 127x 203mm igualmente armadas tanto à flexão quanto ao cisalhamento, o vão da viga foi de 1,22m e todas as vigas foram sub-armadas em relação ao cisalhamento para provocar a ruptura por esforço cortante. Na figura 5.8 estão ilustradas as características geométricas e o esquema de carregamento destas vigas.

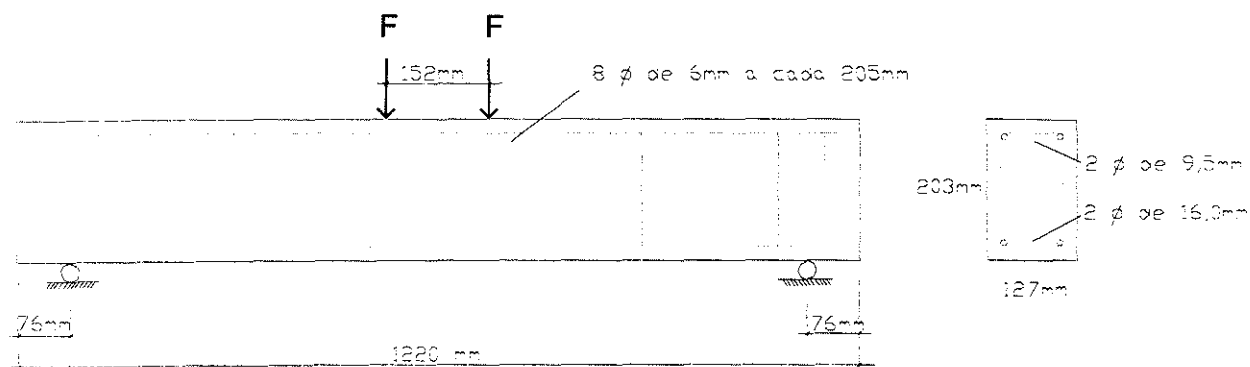


FIGURA 5.8 Seção transversal e esquema de carregamento

O concreto das 6 vigas ensaiadas apresentou no dia do ensaio uma resistência à compressão de 36,5 MPa , enquanto que o aço utilizado na execução das armaduras apresentou uma tensão de escoamento de 420 MPa.

Das 6 vigas confeccionadas, uma não foi reforçada com PRF para servir de viga testemunho, enquanto que as outras 5 vigas foram reforçadas ao esforço cortante com PRF, com arranjos diferentes do reforço.

Das 5 vigas reforçadas, duas foram reforçadas com as fibras dispostas a 90° em relação ao eixo longitudinal da viga (Grupo E) e as outras três foram reforçadas com as fibras dispostas em duas direções perpendiculares entre si, ambas fazendo um ângulo de 45° em relação ao eixo longitudinal da viga (Grupo F), esses dois arranjos estão representados na figura 5.9.

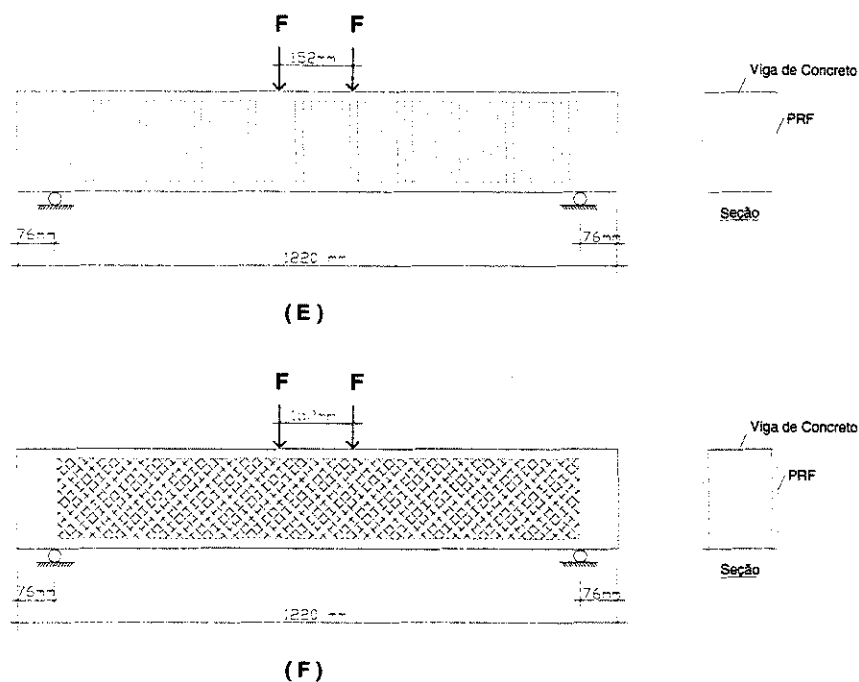


FIGURA 5.9 Esquemas de reforço utilizados nas vigas.

Nas vigas do Grupo E o sistema de reforço era composto por duas camadas de folhas flexíveis de fibra de carbono com uma espessura final de 1mm, enquanto que nas vigas do Grupo F o sistema de reforço era composto de uma camada de laminado de fibra de carbono com espessura final de 1,5mm.

Além da variação no posicionamento das folhas de fibra de carbono também foram utilizados dois diferentes tipos de resinas epóxi. As características das fibras e resinas epóxi utilizadas no reforço de cada uma das cinco vigas reforçadas estão representadas nas tabelas 5.4. e 5.5.

TABELA 5.4 Características das resinas utilizadas

Viga	Epóxi	Tensão Última (MPa)	Módulo de Deformação (GPa)
IE	A	28,9	4,5
IIE	B	28,3	2,9
IF	A	28,9	4,5
IIF	B	28,3	2,9
IIIF	B	28,3	2,9

TABELA 5.5 Características do sistema PRF utilizado

Viga	Orientação das Fibras	Tensão Última (MPa)	Módulo de Deformação (GPa)
IE	0°	389,7	34,1
IIE	0°	245,7	28,3
IF	± 45°	67,8	34,1
IIF	± 45°	104,7	28,3
IIIF	± 45°	104,7	28,3

O valor teórico esperado foi estabelecido com base na formulação proposta pelo ACI, onde o esforço cortante final suportado pela viga reforçada é dado pela soma das contribuições do concreto, do aço e da fibra de carbono, assim:

$$V_u = V_c + V_s + V_{PRF} \quad (5.5)$$

Com:

$$V_{PRF} = F_u \times t_{PRF} \times d \quad (5.6)$$

Onde:

- t_{PRF} é a espessura do laminado ou da folha flexível de fibra de carbono utilizada,
- F_u é a tensão última suportada pelo sistema de reforço,
- d é a distância da extremidade comprimida até o centróide da armadura de tração da viga.

A viga testemunho apresentou ruptura por esforço cortante e nas figuras 5.10 a 5.12 pode-se notar o ganho de resistência de cada uma das vigas reforçadas.

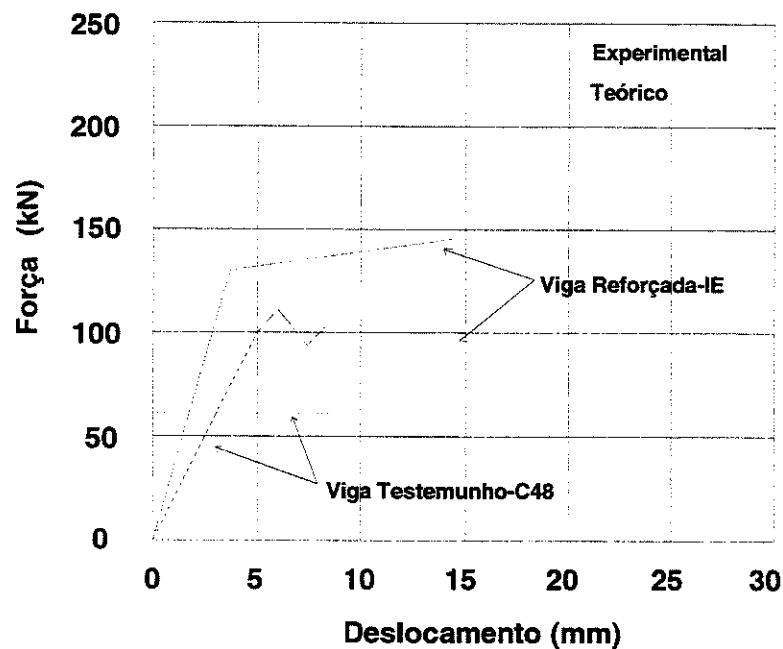


FIGURA 5.10 Carga x Deslocamento - Viga IE

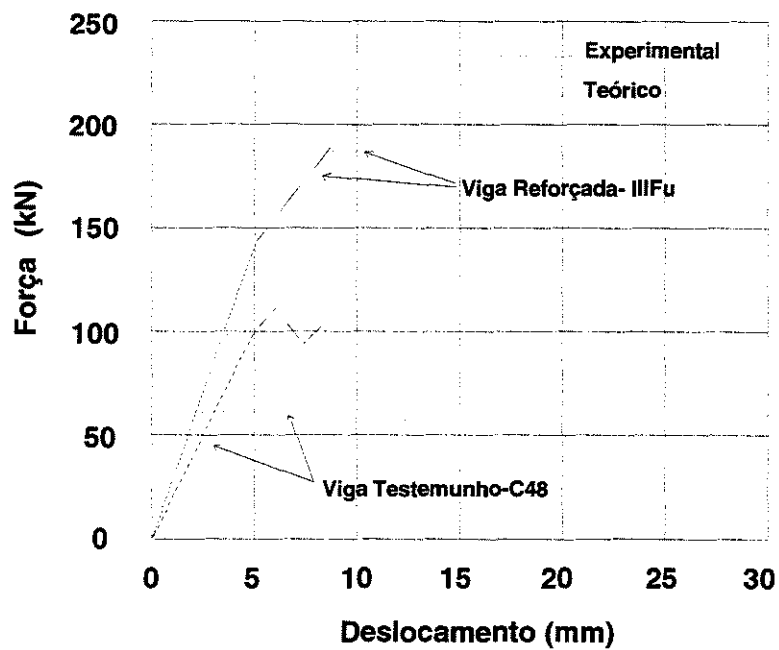


FIGURA 5.11 Carga x Deslocamento - Viga IIE

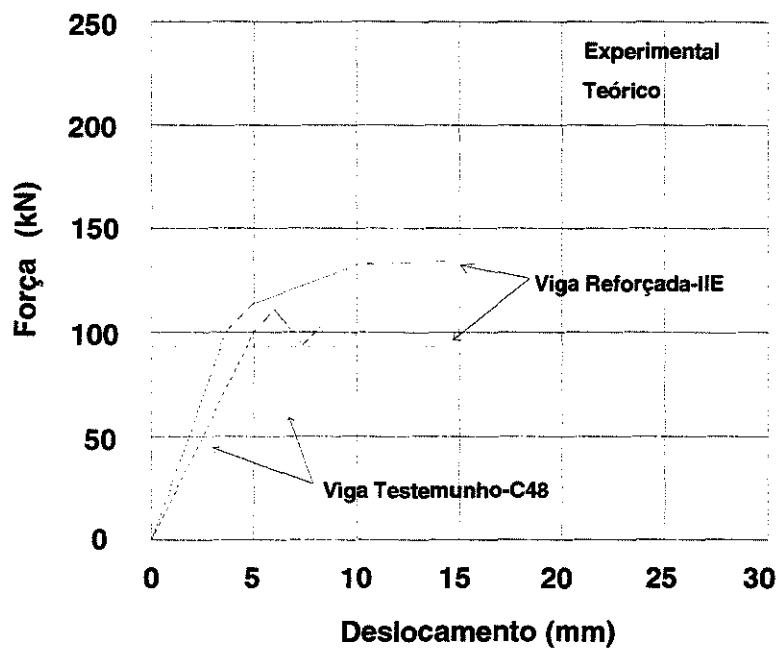


FIGURA 5.12 Carga x Deslocamento - Viga IIIF

Foram colocados extensômetros sobre o reforço, nas figuras 5.13 e 5.14 pode-se observar a deformação ocorrida na fibra de carbono nas vigas IIE e IIF.

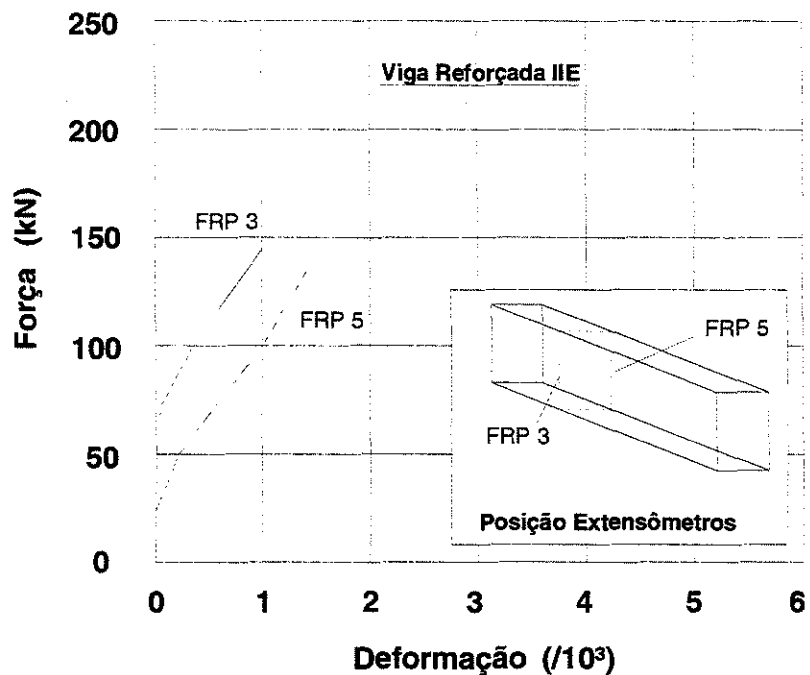


FIGURA 5.13 Carga x Deformação - Viga IIE.

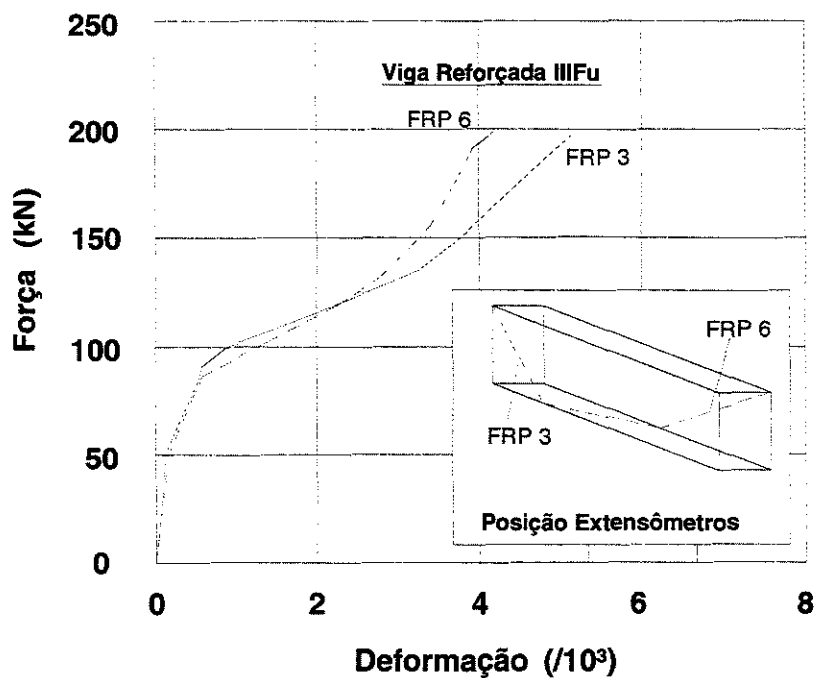


FIGURA 5.14 Carga x Deformação - Viga IIF.

Nas vigas do Grupo E a armadura transversal atingiu o escoamento, já nas vigas do Grupo F ocorreu um descolamento prematuro do reforço, na interface concreto/reforço, hipótese que não foi prevista no cálculo.

Para os dois grupos as vigas reforçadas apresentaram um grande aumento em sua resistência ao esforço cortante, evidenciando o bom desempenho do sistema PRFC para reforços ao esforço cortante.

Segundo os autores, o descolamento ocorrido nas vigas do Grupo F deixa claro a necessidade de novos estudos para se estabelecer métodos de cálculo considerando o descolamento do reforço como um possível modo de ruptura.

6 METODOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL

A investigação experimental aqui descrita teve sua motivação em dúvidas levantadas quanto à eficiência do método de reforço de vigas de concreto armado ao esforço cortante com a utilização de folhas flexíveis de fibra de carbono pré-impregnadas.

São analisadas experimentalmente 6 vigas com seção transversal em “T” e resistência à compressão em torno de 45 MPa, igualmente armadas e instrumentadas. A primeira viga, V1, não foi reforçada e seus resultados servem para avaliar o desempenho de cada uma das formas de reforço utilizadas.

6.1 DETALHES DAS VIGAS

As vigas ensaiadas possuem seção transversal em “T” , com as respectivas dimensões mostradas na figura 6.1.

As armaduras longitudinal e transversal de todas as vigas são idênticas e dimensionadas de acordo com a NBR 6118 ⁽¹⁰⁾, sendo que a armadura transversal foi subdimensionada com o intuito de que o estado limite último para a viga sem reforço fosse atingido por escoamento da armadura transversal. Desse modo os diferentes arranjos de reforço podem ser comparados e a fibra de carbono é melhor avaliada, na figura 6.2 são mostradas a armadura das vigas.

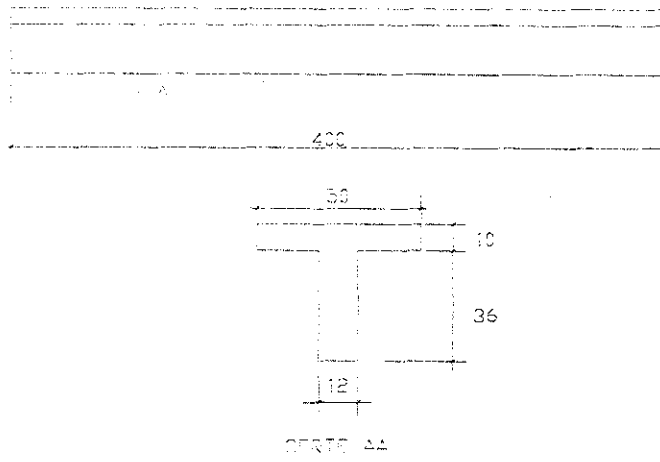


FIGURA 6.1 Geometria da seção.

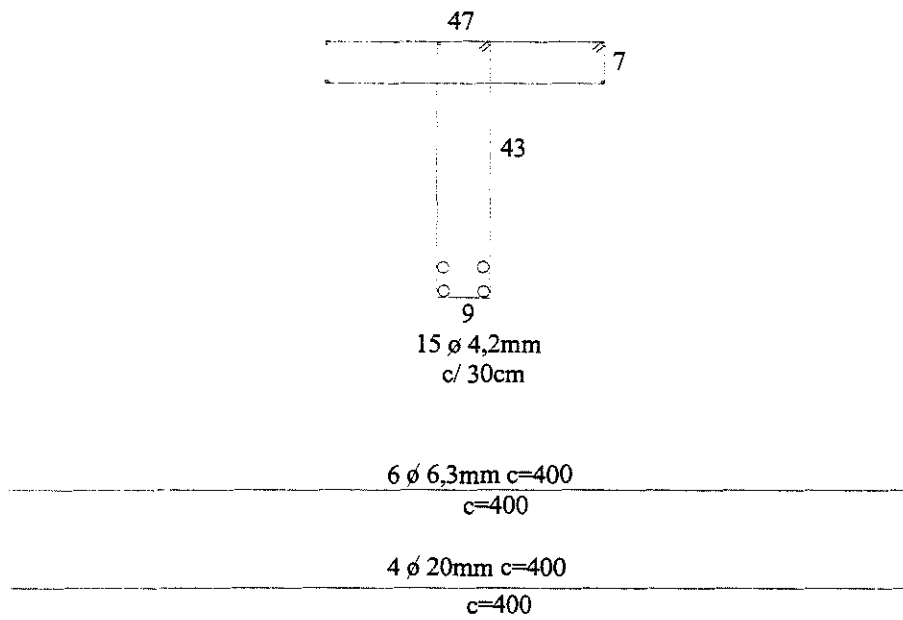


FIGURA 6.2 Detalhe das armaduras das vigas

O carregamento foi aplicado em dois pontos, conforme figura 6.3.

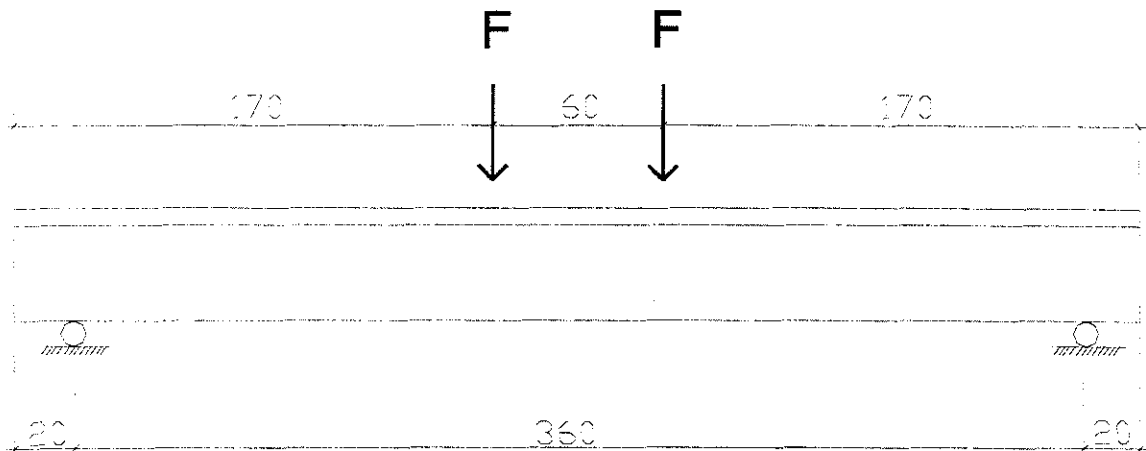


FIGURA 6.3 Esquema de carregamento das vigas

A primeira viga, viga V1, foi ensaiada sem reforço algum ao esforço cortante, de modo a ser utilizada como viga testemunho, as outras 5 vigas foram diferentemente reforçadas ao esforço cortante por meio de folhas flexíveis de fibra de carbono pré-impregnadas, da seguinte maneira:

- **Viga V2** : viga idêntica à viga V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 1 camada, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionada nas duas faces laterais da viga.
- **Viga V3** : viga idêntica à V2, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 1 camada, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas nas duas faces laterais da viga, observa-se que foi repetido o esquema de reforço utilizado na viga V2 devido a uma falha no procedimento de colagem das fibras, ponto que será abordado no decorrer deste trabalho.

- **Viga V4:** viga idêntica à V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 1 camada, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas em "U", envelopando a viga;
- **Viga V5:** viga idêntica à V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 2 camadas, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas em "U", envelopando a viga, e com prolongamento da tira até a face inferior da mesa para proporcionar a ancoragem na parte superior do reforço.
- **Viga V6:** viga idêntica à V1, reforçada com tiras verticais de folhas flexíveis de fibra de carbono, em 2 camadas, com espessura de 50mm e espaçamento entre tiras igual a 150mm, posicionadas em "U", envelopando a viga, com prolongamento da tira até a face inferior da mesa e com a adição de uma tira horizontal na parte superior da alma para proporcionar a ancoragem na parte superior do reforço.

Nas figuras 6.4 a 6.8 estão representados os métodos de reforço utilizados.

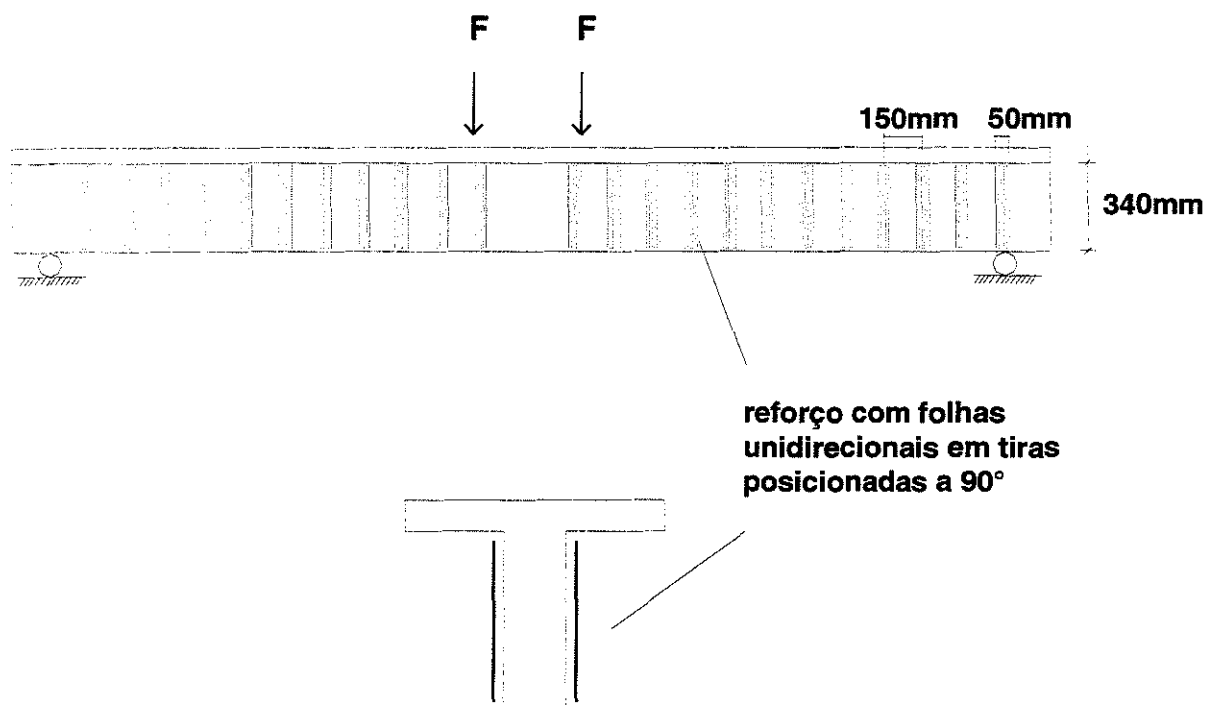


FIGURA 6.4 Reforço implementado na viga V2

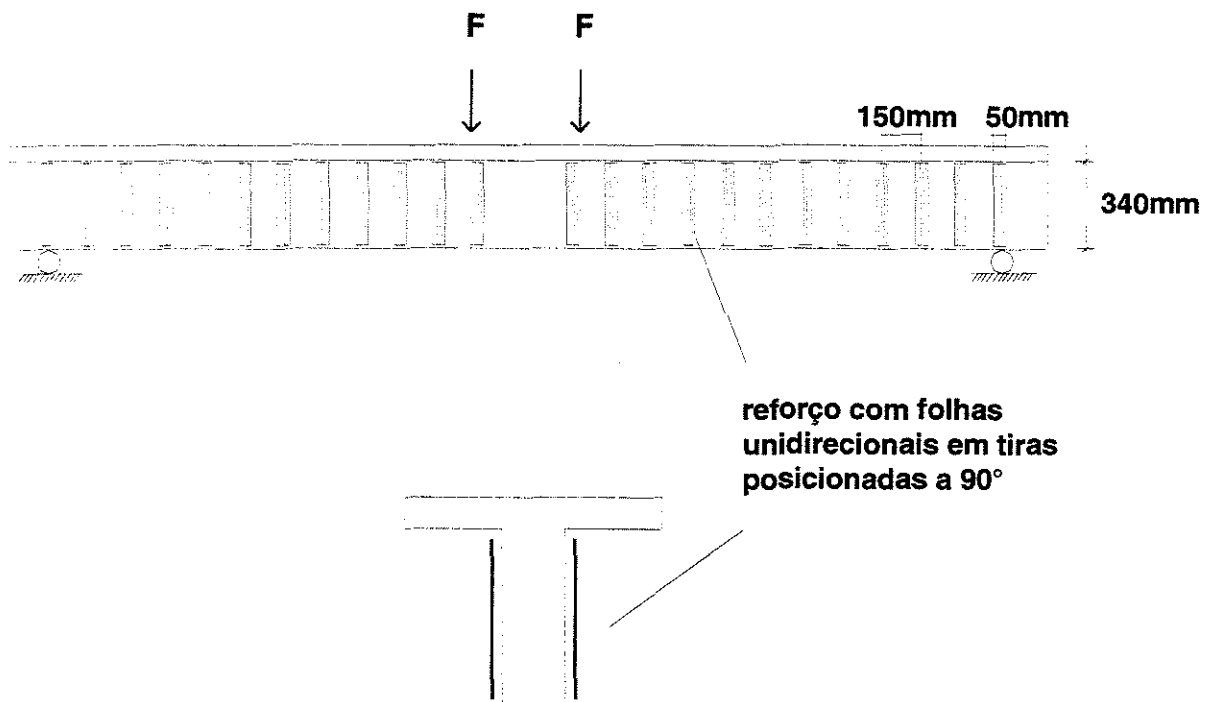


FIGURA 6.5 Reforço implementado na viga V3

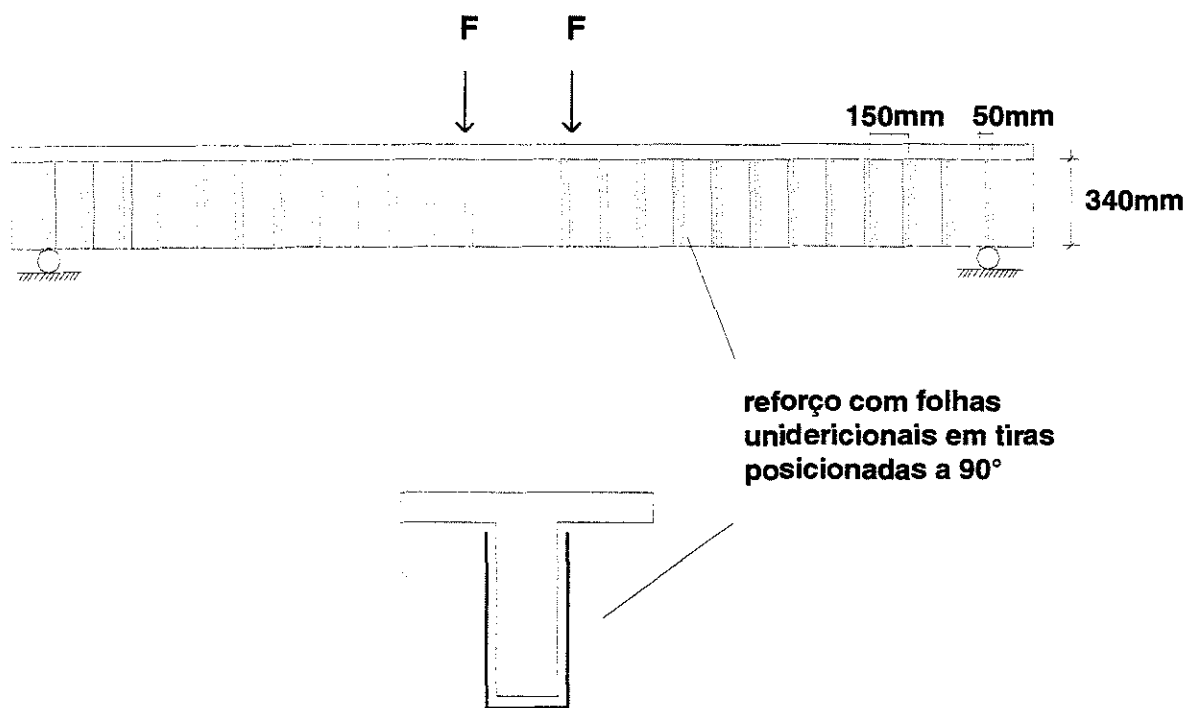


FIGURA 6.6 Reforço implementado na viga V4

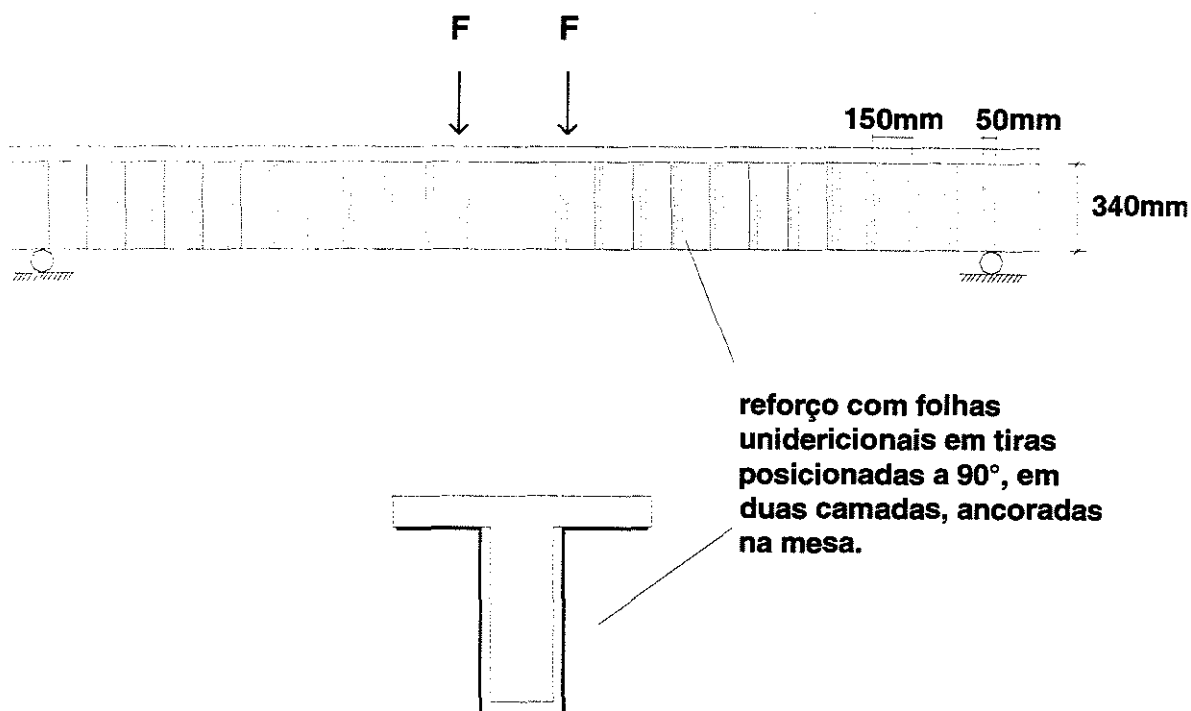


FIGURA 6.7 Reforço implementado na viga V5.

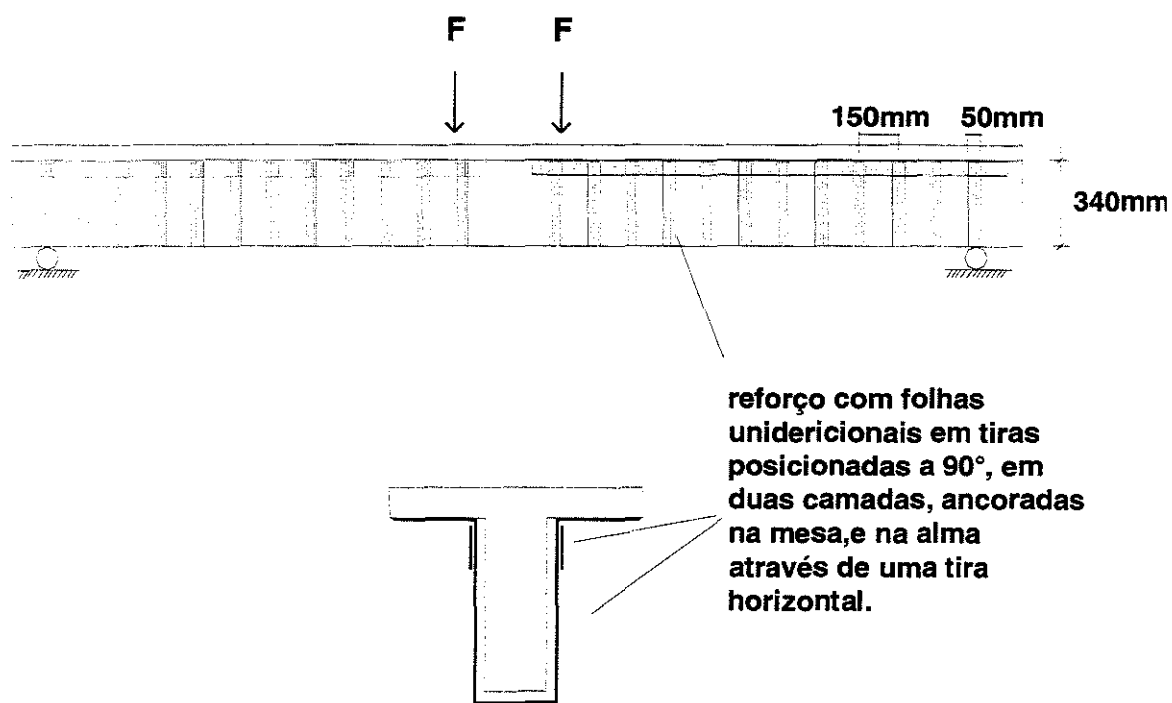


FIGURA 6.8 Reforço implementado na viga V6.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesse item estão apresentados ensaios preliminares que objetivaram a caracterização dos materiais que foram utilizados na pesquisa.

6.2.1 CONCRETO

O concreto a ser utilizado nas vigas deveria ter uma resistência à compressão de 45 MPa na época do ensaio, e devido ao grande volume que envolve a concretagem de duas vigas no mesmo dia o concreto utilizado foi comprado de uma usina de concreto.

Na tabela 6.1 estão mostradas as quantidades de cada um dos componentes do concreto utilizado, com esses componentes foi conseguido um slump de 50,00 +/- 10mm.

TABELA 6.1 Composição do concreto utilizado.

Componente	Quantidade
Cimento	348,00 kg
Areia	0,70 m ³
Brita 1	0,90 m ³
Aditivo	640,00 l

6.2.2 ARMADURAS

As barras de aço, tanto da armadura longitudinal como a da armadura transversal, que foram utilizadas nos ensaios tiveram amostras de seu lote ensaiadas à tração no laboratório. Na tabela 6.2 estão indicadas as suas características, sendo a armadura longitudinal composta por barras de aço de 20mm de diâmetro e a armadura transversal por barras de aço de 4,2mm de diâmetro.

TABELA 6.2 Características dos aços utilizados nas vigas.

Bitola	Tipo do aço	ϵ_y (‰)	f_y (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)
4,2 mm	CA-60B	4,2	681,9	162.357
20,0 mm	CA-50A	3,2	630,8	197.700

6.2.3 FIBRA DE CARBONO

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 ⁽⁵⁾ e ASTM/D 3039 ⁽⁶⁾.

Nas figuras 6.9 e 6.10 estão representados os corpos de prova e o posicionamento dos extensômetros para o ensaio de tração simples, definidos nestas normas para a caracterização de propriedades da fibra de carbono, propriedades como o seu módulo de elasticidade, a sua tensão última de ruptura e o seu alongamento máximo.

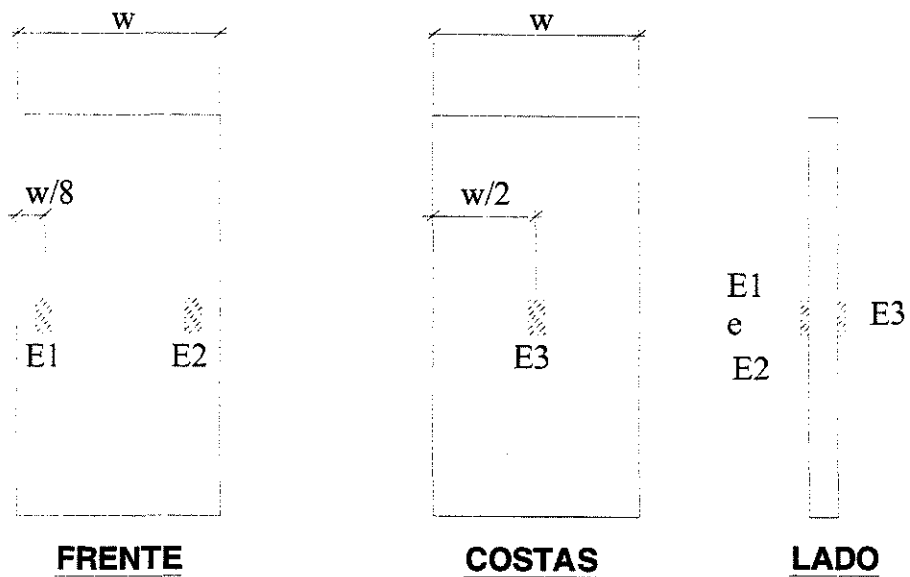


FIGURA 6.9 Posicionamento dos extensômetros no ensaio da fibra.

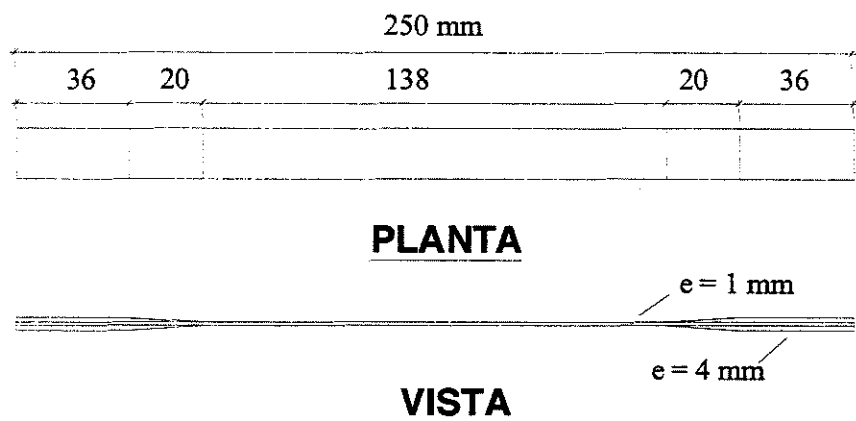


FIGURA 6.10 Corpo de prova para o ensaio da fibra.

A deformação final a ser considerada após a leitura dos extensômetros E1, E2 e E3 mostrados na figura 6.9 é:

$$\hat{a} = \frac{\frac{(\hat{a}_1 + \hat{a}_2)}{2} + \hat{a}_3}{2} \quad (6.1)$$

Na figura 6.11 é mostrado o diagrama tensão x deformação para a fibra ensaiada, enquanto que na tabela 6.3 estão indicados todos os valores obtidos.

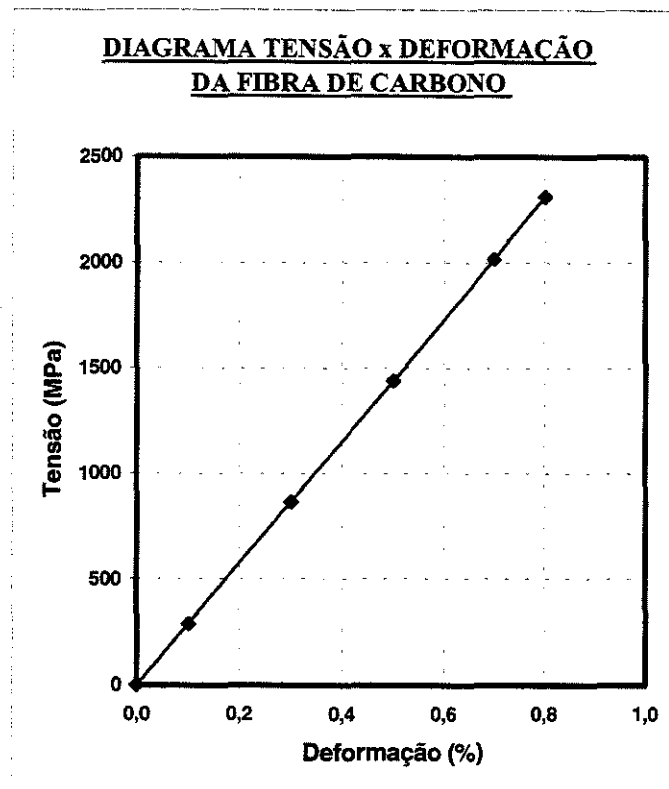


FIGURA 6.11 Diagrama tensão x deformação da fibra de carbono

TABELA 6.3 Características da folha flexível de fibra de carbono ensaiada.

Fibra	Peso(g/m ²)	Densidade(g/cm ³)	Espessura (mm)	E (N/mm ²)	ε _u (%)	f _{últ} (N/mm ²)
C-240	200 ^(a)	1,70 ^(a)	0,117 ^(a)	288.000 ^(b)	0,802 ^(b)	2310,9 ^(b)

(a) dados fornecidos pelo fabricante; (b) dados obtidos através de ensaios no laboratório

Outro fator importante a ser observado é o valor da tensão de cisalhamento máxima na interface do reforço com o concreto, valor esse denominado $\tau_{\text{últ}}$. Para a determinação do valor de $\tau_{\text{últ}}$ se têm dois procedimentos mais usuais, em Al-Sulaimani et al ⁽¹⁾ foram feitos ensaios prévios de cisalhamento na interface concreto/reforço para a determinação deste valor.

Já em Nollet et al ⁽⁴⁰⁾ é apresentado um método de cálculo de $\tau_{\text{últ}}$ que envolve propriedades da resina e da fibra utilizada, segundo a seguinte equação:

$$\delta_{\text{últ}} = \frac{5,4}{1 + k_1 \times \tan 33^\circ} \quad (6.2)$$

Com:

$$k_1 = t_{PRF} \times \left[\frac{k_n}{4 \times E_{PRF} \times I_{PRF}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6.3)$$

e

$$k_n = E_a \times \frac{b_a}{t_a} \quad (6.4)$$

Onde:

t_{PRF} é a espessura da fibra utilizada no reforço.

E_{PRF} é o módulo de elasticidade da fibra utilizada no reforço.

I_{PRF} é o momento de inércia da folha de fibra de carbono.

E_a é o módulo de Young da resina utilizado no reforço.

b_a é a largura onde foi aplicada a resina.

t_a é a espessura de aplicação da resina.

Outro fator importante na execução do sistema de reforço com fibra de carbono é a verificação da resistência mínima de aderência da superfície de concreto preparada, o ensaio usual para a verificação deste valor consiste na colagem de pinos de alumínio sobre o reforço que são posteriormente arrancados por um aparelho especial que determina a tensão de arrancamento, este ensaio é conhecido como *pull out* e pode ser observado na figura 6.12.

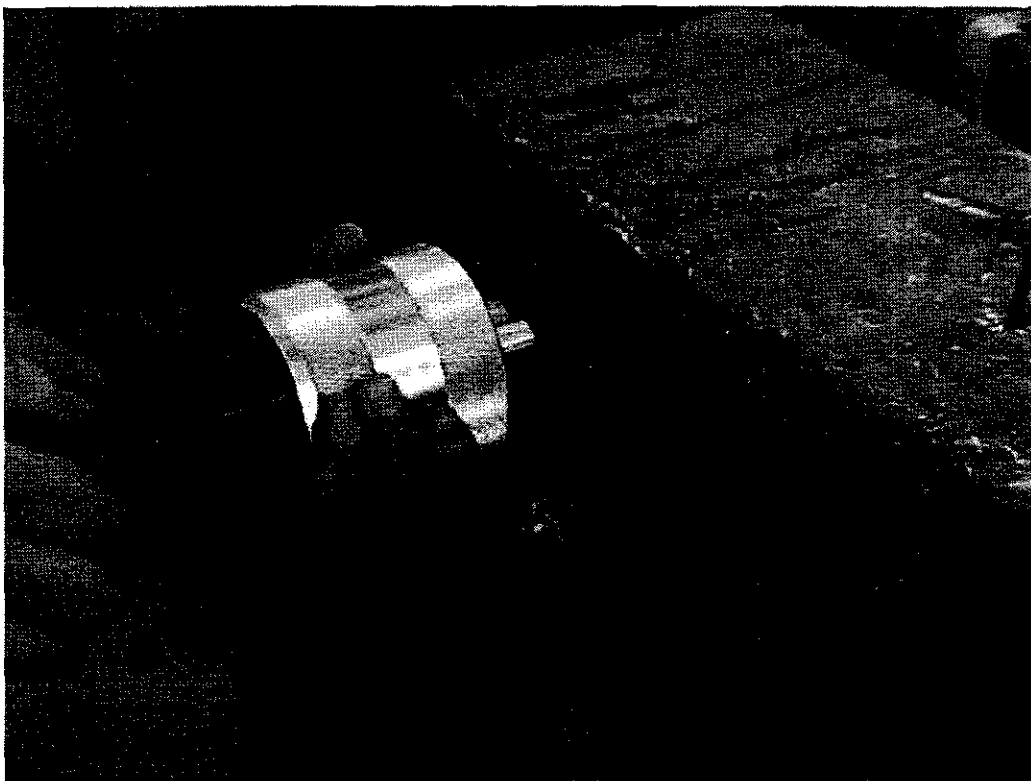


FIGURA 6.12 Ensaio de *pull out*.

Foram feitos dois tipos de ensaio, no primeiro, denominado Ensaio A, a fibra de carbono foi cortada ao redor do pino de alumínio objetivando a ruptura com arrancamento do concreto.

Segundo grande parte dos pesquisadores, como Nollet et al ⁽⁴⁰⁾, o valor mínimo, que deve ser obtido para o Ensaio A, para que se possa utilizar o sistema de reforço com fibra de carbono é de 1,5 MPa. Foram realizados ensaios com todos os componentes do sistema, de acordo com os procedimentos descritos no item 4.4, e os resultados foram superiores ao mínimo exigido e estão relacionados na tabela 6.4.

Também na tabela 6.4 estão apresentados resultados de um segundo ensaio realizado, denominado Ensaio B, nesse ensaio a fibra não foi cortada ao redor do pino e procurava-se constatar a aderência da massa epóxi com a folha de fibra de carbono, nesse caso o valor mínimo esperado é de 2,5 MPa.

TABELA 6.4 Resultados do ensaio de *pull out*

Ensaio	Composição do reforço	Tensão de Arrancamento
		(N/mm ²)
A	Massa epóxi + saturante epóxi	3,50
A	Saturante epóxi	3,00
A	Resina epóxi + massa epóxi + saturante epóxi	3,75
A	Resina epóxi + saturante epóxi	3,25
B	Resina epóxi + massa epóxi + saturante epóxi	3,00
B	Resina epóxi + massa epóxi + saturante epóxi	3,00

6.3 MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTO

Neste item é apresentada toda a instrumentação das vigas, instrumentações essas que serviram para medir a deformação nas armaduras longitudinais e transversais, nas folhas de fibra de carbono e no concreto no banzo superior das vigas, além de medir os deslocamentos verticais no meio do vão de cada uma das vigas.

6.3.1 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA

Foram colocados vinte extensômetros elétricos em cada uma das vigas com a finalidade de medir as deformações nas armaduras, tanto na longitudinal quanto na transversal. Estes extensômetros foram ligados a um aquisitor automático de dados. A figura 6.13 ilustra a instrumentação utilizada para as vigas desta pesquisa.

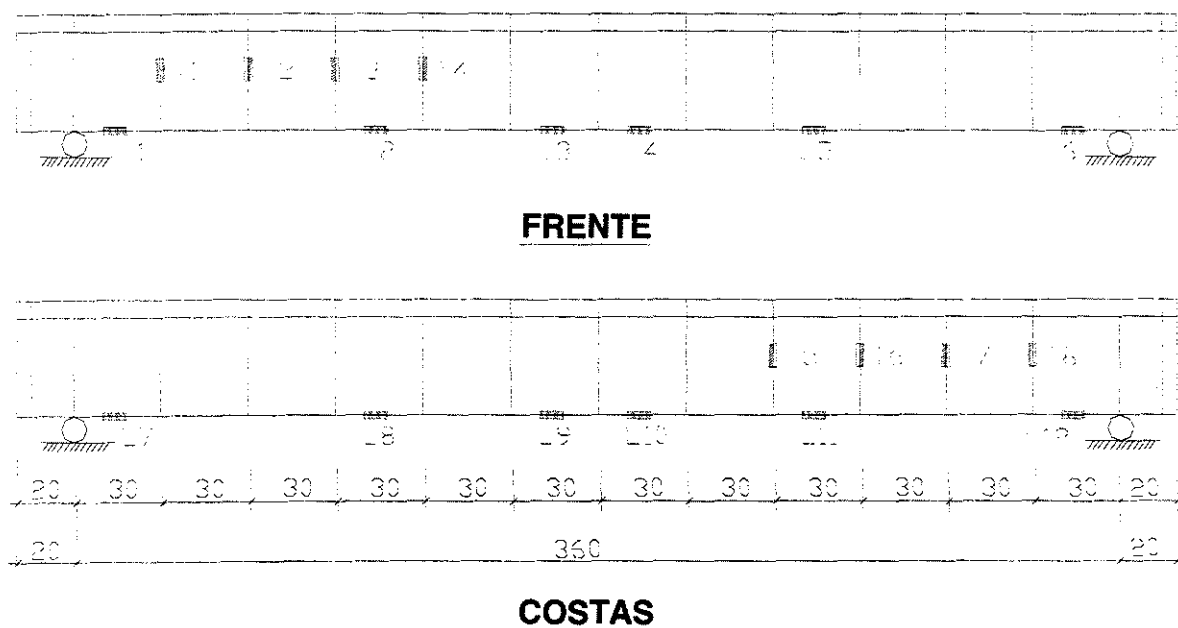


FIGURA 6.13 Posicionamento dos extensômetros

Depois de preparada a superfície das armaduras, lixamento e limpeza, foram colados oito extensômetros para medir deformações nas armaduras transversais, e outros doze para medir as deformações na armadura longitudinal; sendo os extensômetros das armaduras longitudinais indicados pela letra L e os extensômetros das armaduras transversais indicados pela letra T, como ilustrado na figura 6.13.

6.3.2 DEFORMAÇÕES NA FIBRA

Nas vigas V2 a V6, depois de ter sido executado o reforço, foram colocados oito extensômetros sobre as folhas de fibra de carbono de modo a verificar a sua deformação. Esses extensômetros foram colocados na mesma posição dos extensômetros T1 a T8 posicionados na armadura transversal das vigas conforme mostrado na figura 6.13.

6.3.3 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO E DESLOCAMENTO VERTICAL

As deformações no concreto foram medidas na parte superior das faces laterais da viga, pontos esses denominados pela letra H. Essas deformações foram medidas com o auxílio de extensômetro mecânico TENSOTAST-HUGGERNBERGER com sensibilidade de 0,001 milímetros, usando como base de medida 50 milímetros de comprimento. Essa base de 50 milímetros foi criada através da colagem de pastilhas de aço na superfície da viga, e a referência zero tomada com a viga sem carregamento, submetida apenas ao peso próprio.

Já os deslocamentos verticais foram medidos com o auxílio de um defletômetro mecânico KAEFER, com curso de 50 milímetros e sensibilidade de 0,01 milímetros, com o defletômetro instalado na parte inferior da viga, na seção do meio do vão. O posicionamento das pastilhas e do defletômetro pode ser observado na figura 6.14.

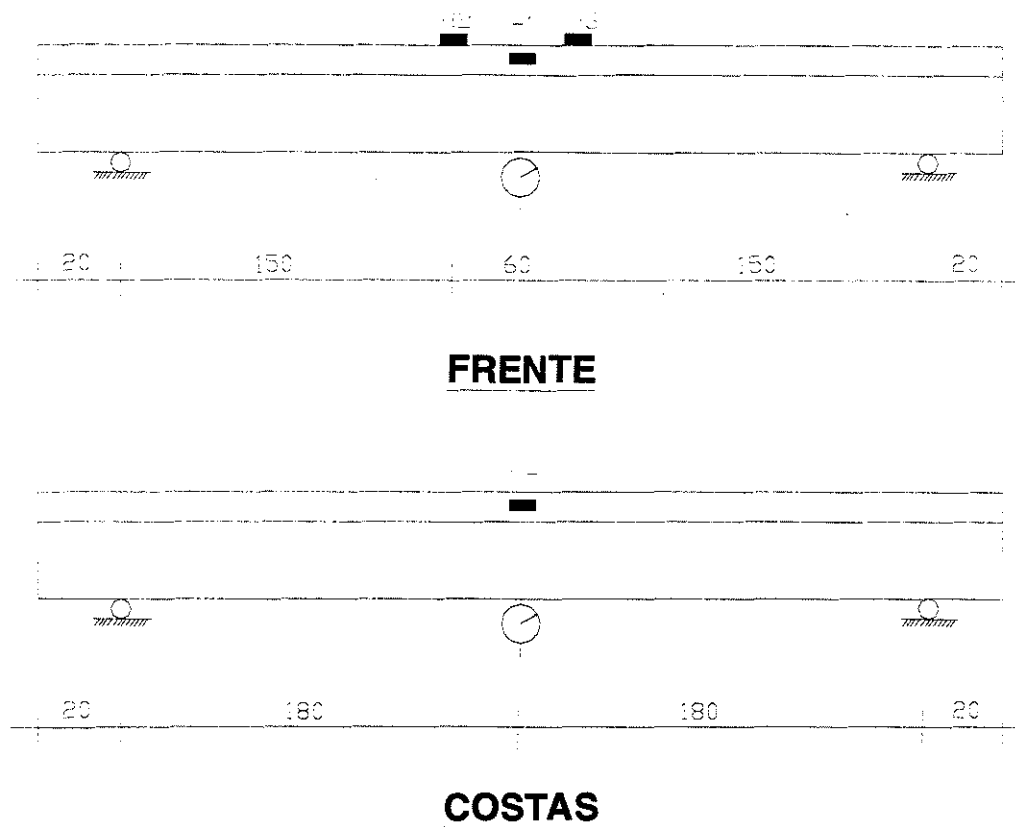


FIGURA 6.14 Posicionamento do defletômetro e das pastilhas

6.4 EXECUÇÃO, DESFORMA E CURA DAS VIGAS

O concreto foi preparado com o traço descrito no item 6.2.1, o volume de concreto foi tal que foram moldados a viga e os 15 corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para o controle das características do concreto.

No adensamento do concreto das vigas foram utilizados vibradores elétricos de diâmetro 2 cm, visando uma melhor qualidade da peça, impossibilitando a formação de vazios e concentração excessiva de agregados em determinados pontos da viga. Os corpos de prova foram moldados juntamente com cada viga concretada.

Imediatamente após a moldagem, tanto as vigas quanto os corpos de prova foram cobertos com lona plástica.

A desmoldagem das vigas e dos corpos de prova foi realizada três dias após a moldagem. Depois de desmoldados os corpos de prova e as vigas ficaram no laboratório até o dia dos ensaios.

6.5 DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

Descreve-se a seguir todo o procedimento para a realização do experimento.

Três dias antes do ensaio as vigas foram inteiramente pintadas de branco, com o objetivo de melhor identificar o quadro de fissuração das vigas durante o ensaio. No dia seguinte foram coladas as pastilhas, conforme o esquematizado na figura 6.14.

No dia do ensaio as vigas foram posicionadas no pórtico, os extensômetros elétricos conectados ao aquisitor de dados e as leituras iniciais nas pastilhas e no defletômetro, ainda sem a aplicação de nenhuma carga, foram feitas.

A partir desse momento foi iniciada a aplicação das cargas, as cargas foram aplicadas com incrementos de 10 kN, e a cada incremento medidas as deformações no concreto e o deslocamento vertical das vigas, além da marcação, nas faces da viga, da evolução do panorama de fissuração.

No dia do ensaio de cada viga foram rompidos quatro corpos de prova para a determinação da resistência média à compressão do concreto, e mais dois corpos de prova, instrumentados, de forma a determinar o diagrama tensão-deformação do concreto utilizado.

7 DIMENSIONAMENTO E RESULTADOS ESPERADOS

São apresentadas nesse capítulo duas metodologias para o dimensionamento do reforço, no item 7.1 está o procedimento sugerido em Nollet et al ⁽⁴⁰⁾ e utilizado em grande parte dos trabalhos já realizados. No item 7.2 é apresentado o dimensionamento segundo o ACI 440R-00⁽⁴⁾, com o intuito de confrontar os dois métodos com os resultados obtidos nos ensaios.

7.1 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO SEGUNDO NOLLET ET AL ⁽⁴⁰⁾

O valor da capacidade última, V_u , em relação ao esforço cortante, de uma viga reforçada com folhas flexíveis de fibra de carbono, é dado pela somatória das contribuições do concreto, V_c , da armadura transversal, V_s , e do reforço utilizado, V_{PRF} , sendo assim:

$$V_u = V_c + V_s + V_{PRF} \quad (7.1)$$

Desta equação obtém-se o valor necessário da contribuição do reforço para um caso específico, em função da nova capacidade ao esforço cortante desejada para a viga:

$$V_{PRF} = V_u - V_c - V_s \quad (7.2)$$

Os valores de V_c e V_s são obtidos através do procedimento normal de cálculo de uma viga de concreto armado, indicados pela NBR 6118 ⁽¹⁰⁾. Os valores de V_c e V_s , bem como os valores de V_{PRF} para cada uma das vigas são indicados no item 7.2 a seguir.

O valor de V_{PRF} é calculado a partir de duas hipóteses de ruptura do reforço. O primeiro modo de ruptura é o rompimento da fibra (na figura 7.1 é mostrado um exemplo de distribuição das forças internas em um reforço com tiras inclinadas) e o segundo é o descolamento do reforço.

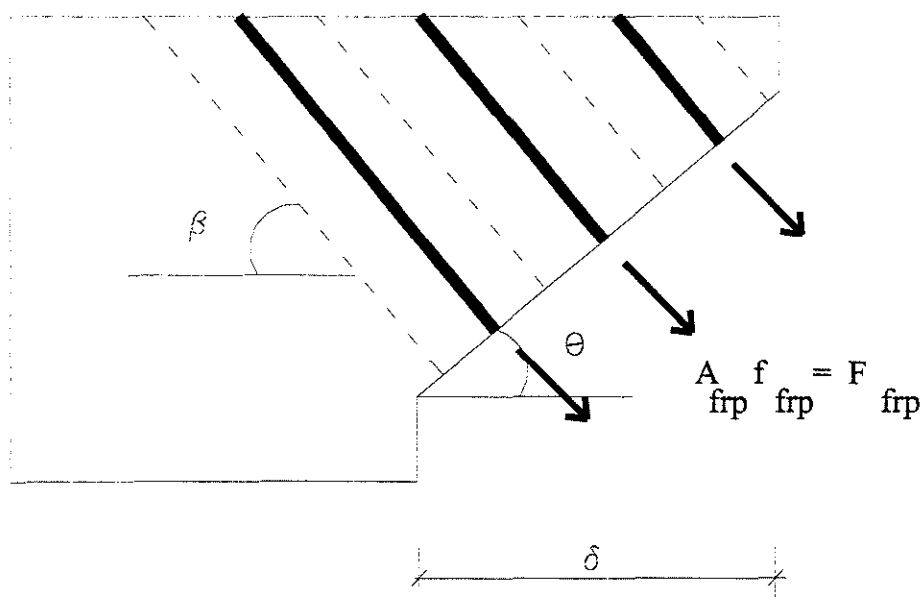


FIGURA 7.1 Distribuição das forças internas em um reforço.

Onde:

A_{PRF} é a área de fibra utilizada no reforço.

f_{PRF} é a resistência máxima de tração da fibra de carbono utilizada no reforço.

F_{PRF} é a força resultante na fibra de carbono.

β é o ângulo de inclinação das fibras de carbono em relação ao eixo longitudinal da fibra.

θ é o ângulo de ruptura, tomado como 45° .

O valor de V_{PRF} para cada caso depende do modo de disposição do reforço e será analisado a seguir para cada uma das possibilidades de execução do reforço.

- **Arranjo em tiras inclinadas:**

Nesse tipo de arranjo do reforço as folhas flexíveis de fibra de carbono são cortadas em tiras e posicionadas nas faces laterais das vigas inclinadas de um ângulo β em relação ao eixo longitudinal da viga. Em geral esse ângulo β é de 45 graus, o que possibilita um melhor desempenho do reforço utilizado.

Nas figuras 7.2 e 7.3 esse tipo de arranjo de reforço e os parâmetros envolvidos em seu dimensionamento estão indicados.

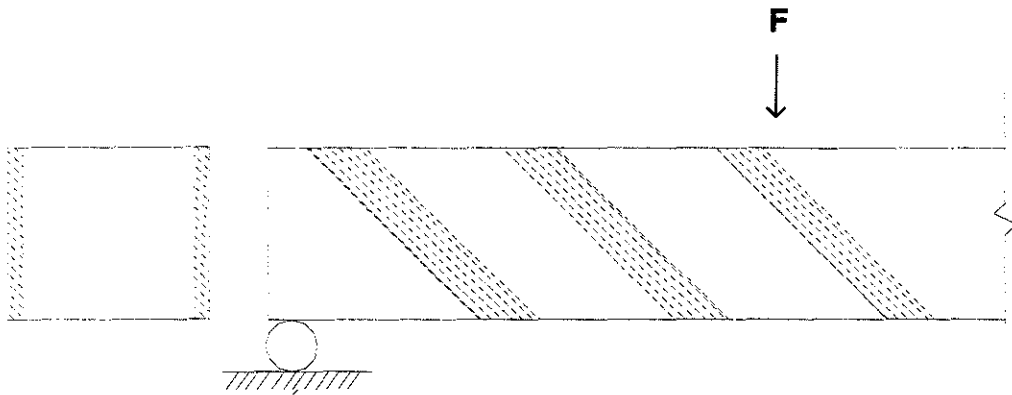


FIGURA 7.2 Reforço com tiras de PRFC inclinadas.

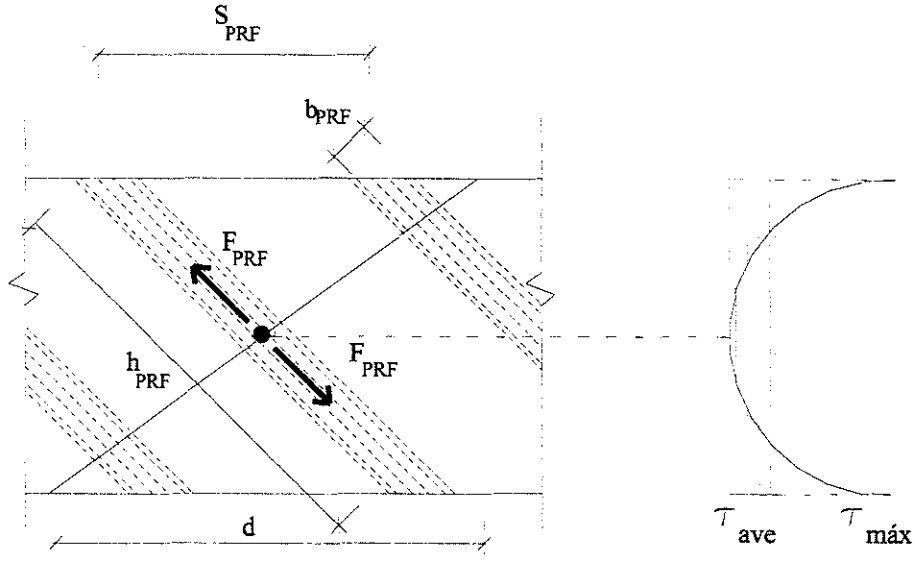


FIGURA 7.3 Parâmetros do reforço com tiras de PRFC inclinadas.

Observa-se na figura 7.1 a indicação do ângulo θ de ruptura de uma viga de concreto armado ao cisalhamento, para o dimensionamento do sistema de reforço com folhas flexíveis de fibra de carbono é adotado $\theta = 45^\circ$ [Nollet et al ⁽⁴⁰⁾] o que nos dá um valor de $\delta = d$ (altura útil da viga).

O valor da contribuição do reforço V_{PRF} , na resistência ao esforço cortante em uma viga de concreto armado, considerando a ruptura ao cisalhamento da fibra é dado pela equação 7.3:

$$V_{PRF} = A_{PRF} \times f_{uPRF} \times \frac{d}{S_{PRF}} \times (\text{sen} \hat{a} + \text{cos} \hat{a}) \quad (7.3)$$

O valor de f_{uPRF} é tomado como o produto do módulo de elasticidade da fibra de carbono (E_{PRF}) pela deformação última a ser considerada para a fibra no cálculo (ϵ_{uPRF}), já que a fibra apresenta um comportamento tensão x deformação linear até a ruptura.

Para a consideração da ruptura pelo descolamento da fibra de carbono, é necessário o conhecimento da tensão máxima de cisalhamento suportada pela resina, $\tau_{\text{últ}}$, apresentada no item 6.2.3. Conhecendo o valor de $\tau_{\text{últ}}$ define-se um outro valor denominado τ_{ave} , segundo Nolle et al⁽⁴⁰⁾ deve-se tomar:

$$\hat{\sigma}_{\text{ave}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{últ}}}{2} \quad (7.4)$$

Na estimativa dos resultados dos ensaios foi considerado o valor de $\tau_{\text{últ}} = 3,0 \text{ MPa}$, de acordo com os ensaios previamente feitos. Segundo Nolle et al⁽⁴⁰⁾, deve-se adotar o valor de $\tau_{\text{últ}}$ para a tensão máxima de cisalhamento, quando a fibra envolver a parte inferior da viga (reforço em "U"), enquanto que para os arranjos em que a fibra está disposta apenas nas laterais das vigas deve-se adotar o valor τ_{ave} .

A utilização dos valores $\tau_{\text{últ}}$ e τ_{ave} são justificadas pela ancoragem da fibra na viga. No caso em que a fibra está disposta apenas nas faces laterais da viga o descolamento do reforço ocorrerá no banzo inferior da viga, onde ocorre um maior número de fissuras. Com o arranjo em "U" soluciona-se o problema da ancoragem no banzo inferior e o descolamento se dará no banzo superior para um valor maior da tensão de cisalhamento.

Os arranjos utilizados nas vigas V5 e V6, com a fibra disposta em "U" e a presença da tira até a parte inferior da mesa para a ancoragem no banzo superior da viga pretendia evitar completamente o problema de descolamento da fibra.

Definidas essas grandezas obtém-se como valor de V_{PRF} para a hipótese de ruptura por descolamento da fibra de carbono no reforço disposto em tiras inclinadas :

$$V_{PRF} = 2 \times \left[\hat{\sigma}_{ave} \times \left(\frac{b_{PRF} \times h_{PRF}}{2} \right) \times \frac{d}{s_{PRF}} \times (\sin \hat{\alpha} + \cos \hat{\alpha}) \right] \quad (7.5)$$

O valor para V_{PRF} a adotar no dimensionamento é o menor obtido entre as equações 7.3 e 7.5.

▪ **Arranjo em tiras a 90° :**

Nesse tipo de arranjo as folhas flexíveis de fibra de carbono são cortadas em tiras e posicionadas nas faces laterais das vigas na vertical. Nas figuras 7.4 e 7.5 estão indicados esse tipo de arranjo de reforço e os parâmetros envolvidos em seu dimensionamento.

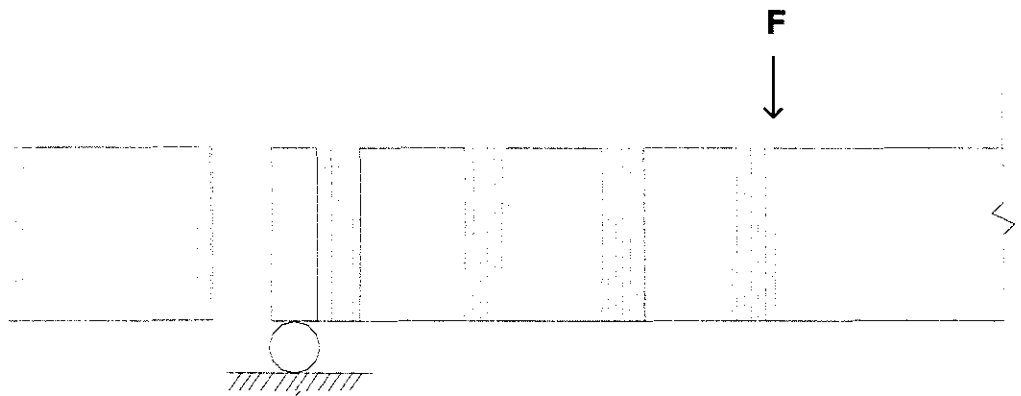


FIGURA 7.4 Reforço com tiras verticais de PRFC.

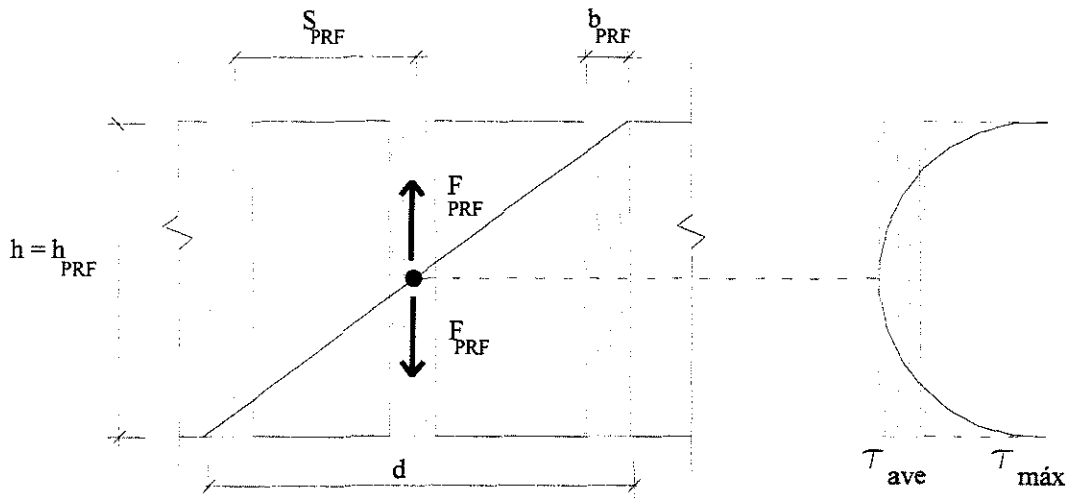


FIGURA 7.5 Parâmetros do reforço com tiras verticais de PRFC.

Basicamente os valores de contribuição ao esforço cortante do reforço, V_{PRF} , são os mesmos do que os encontrados para o reforço com tiras inclinadas, mostrado no item anterior. As diferenças são a ausência da parcela $(\sin\beta + \cos\beta)$ e a diminuição do valor do comprimento das tiras h_{PRF} (figuras 7.3 e 7.5).

Para a ruptura da fibra tem-se:

$$V_{PRF} = A_{PRF} \times f_{uPRF} \times \frac{d}{s_{PRF}} \quad (7.6)$$

Enquanto que para a ruptura por descolamento da fibra:

$$V_{PRF} = 2 \times \left[\hat{\sigma}_{ave} \times \left(\frac{b_{PRF} \times h_{PRF}}{2} \right) \times \frac{d}{s_{PRF}} \right] \quad (7.7)$$

▪ **Arranjo com folhas contínuas :**

Nesse tipo de arranjo as folhas flexíveis de fibra de carbono são cortadas em folhas e posicionadas continuamente nas faces laterais das vigas na vertical ou inclinadas em relação ao eixo longitudinal da viga. Nas figuras 7.6 e 7.7 estão indicados esse tipo de arranjo de reforço e os parâmetros envolvidos em seu dimensionamento.

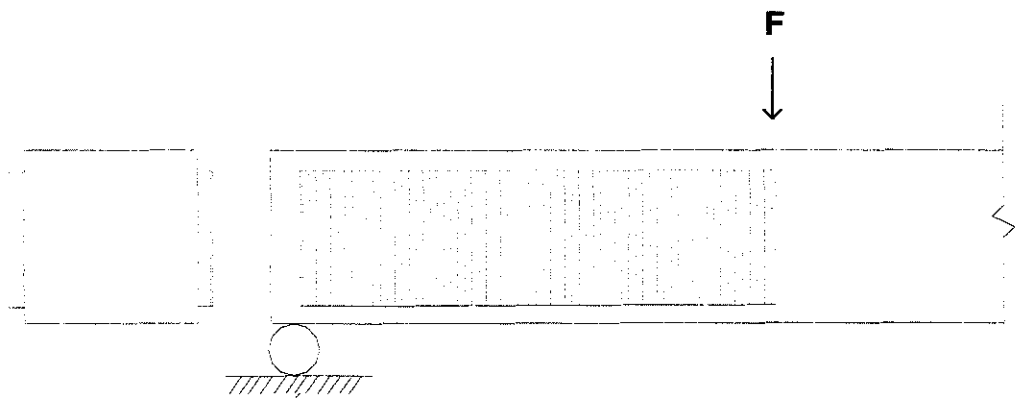


FIGURA 7.6 Reforço com folhas contínuas de PRFC.

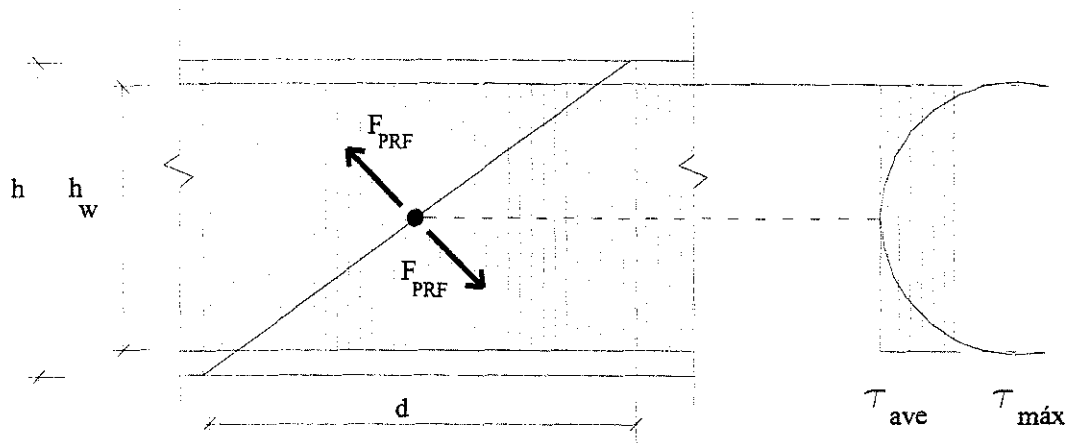


FIGURA 7.7 Parâmetros do reforço com folhas contínuas de PRFC.

Com a folha cobrindo todo o vão de cisalhamento da viga o parâmetro principal no dimensionamento deste arranjo é a altura da folha h_w em relação à altura da viga h .

Para a ruptura da fibra, o valor de V_{PRF} com as folhas posicionadas com suas fibras na vertical é:

$$V_{PRF} = A_{PRF} \times f_{PRF} \quad (7.8)$$

E no caso da folha posicionada com suas fibras inclinadas de um ângulo β em relação ao eixo longitudinal da viga:

$$V_{PRF} = A_{PRF} \times f_{uPRF} \times (\text{sen} \hat{\alpha} + \text{cos} \hat{\alpha}) \quad (7.9)$$

Observa-se que, teoricamente, existe um incremento de cerca de 41% no desempenho do reforço quando posicionado com as fibras inclinadas a 45° em relação ao eixo longitudinal da viga.

No caso do valor de V_{PRF} , considerando a ruptura por descolamento da folha, a inclinação das fibras não irá influenciar como é visto na equação 7.10, já que a cortante última de descolamento da fibra não depende de sua orientação e sim da área de contato entre a fibra e o concreto:

$$V_{PRF} = 2 \times \left[\hat{\sigma}_{ave} \times \left(\frac{d \times h_w}{2} \right) \right] \quad (7.10)$$

▪ **Arranjo em laços ("U") :**

Nesse tipo de arranjo do reforço as folhas flexíveis de fibra de carbono são cortadas em folhas e posicionadas em forma de "U", envolvendo as faces laterais e a face inferior da viga. Nas figuras 7.8 e 7.9 estão indicados esse tipo de arranjo de reforço e os parâmetros envolvidos em seu dimensionamento.

As folhas flexíveis podem ser posicionadas com suas fibras alinhadas na vertical ou inclinadas em relação ao eixo longitudinal da viga. Devido ao envelopamento da viga com a folha em "U" existe um incremento na sua resistência ao descolamento da fibra o que faz com que nesse caso possa ser considerado o valor de τ_{ult} para a resistência ao cisalhamento da resina ao invés do valor τ_{ave} utilizado nos outros arranjos mostrados anteriormente.

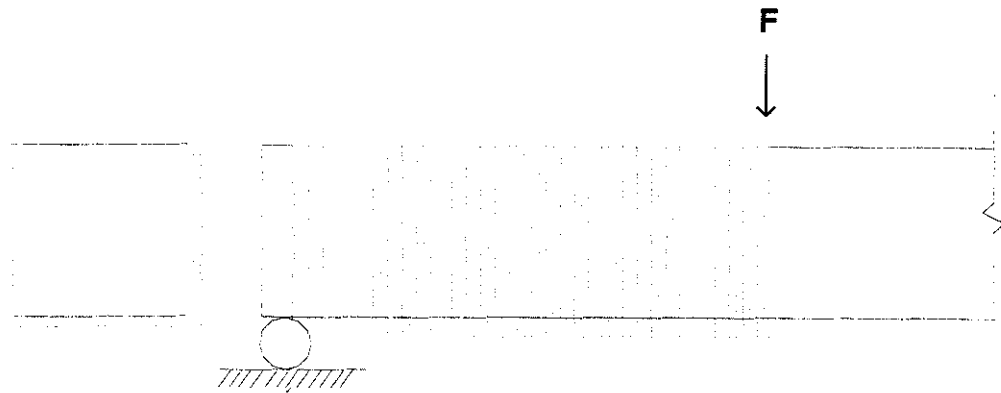


FIGURA 7.8 Reforço em "U".

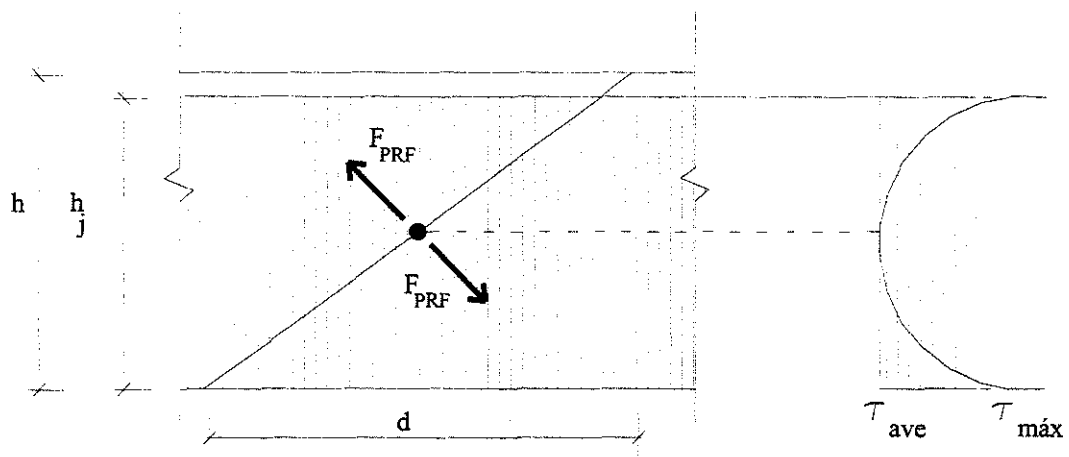


FIGURA 7.9 Parâmetros do reforço em "U".

Para a ruptura da fibra, o valor de V_{PRF} com as folhas posicionadas em forma de "U" com suas fibras na vertical é:

$$V_{PRF} = A_{PRF} \times f_{UPRF} \quad (7.11)$$

E no caso da folha posicionada com suas fibras inclinadas de um ângulo β em relação ao eixo longitudinal da viga:

$$V_{PRF} = A_{PRF} \times f_{uPRF} \times (\text{sen}\hat{\alpha} + \text{cos}\hat{\alpha}) \quad (7.12)$$

Com a fibra cobrindo todo o vão de cisalhamento da viga o parâmetro principal no dimensionamento deste arranjo do reforço é a altura da folha h_j em relação à altura da viga h . Para a ruptura por descolamento da fibra, a inclinação das fibras também não irá influenciar, como no caso do reforço com folhas laterais contínuas. Sendo que nesse caso pode-se considerar o valor de τ_{ult} e a altura h_j .

$$V_{PRF} = 2 \times \left[\hat{\sigma}_{ult} \times \left(\frac{d \times h_j}{2} \right) \right] \quad (7.13)$$

7.2 PROCEDIMENTOS DO ACI 440R-2000⁽⁴⁾

O ACI-440R-00 ⁽⁴⁾ em seu capítulo 10 apresenta procedimentos a serem utilizados no dimensionamento de reforço ao cisalhamento com folhas flexíveis de fibra de carbono para vigas, que diferem do apresentado no item anterior apenas no que se refere ao descolamento do reforço.

Segundo o ACI os fatores que influenciam a capacidade ao cisalhamento adicional oferecida com a adição da fibra de carbono são a geometria do elemento, o arranjo da fibra e a resistência do concreto. Na figura 7.10 estão os três tipos diferentes de arranjos considerados pelo ACI.

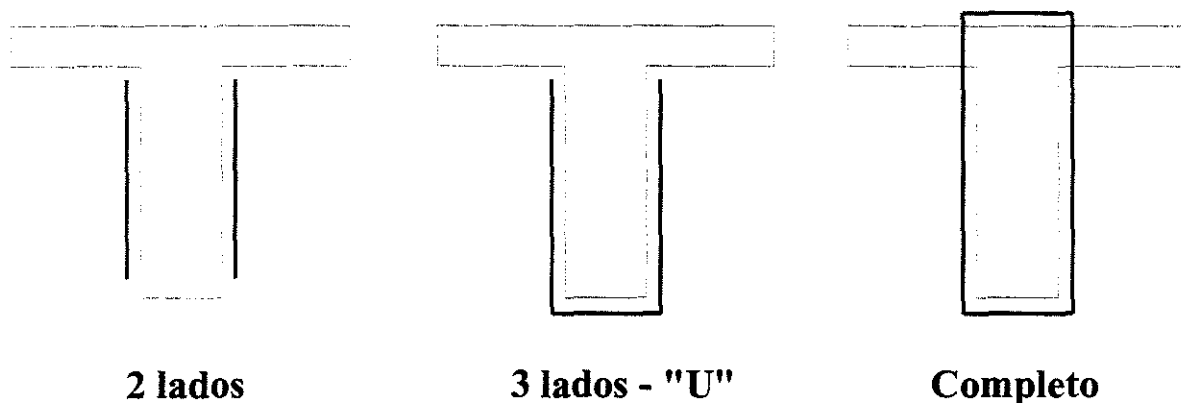


FIGURA 7.10 Diferentes tipos de arranjo das fibras segundo o ACI-440R-2000⁽⁴⁾

A partir da definição do arranjo utilizado a norma estabelece um fator de redução parcial ϕ , que é :

- igual a 0,95 para o arranjo completo;
- igual a 0,85 nos demais casos.

Além disso, é fixada uma deformação efetiva, ϵ_{fe} , que é limitada em 0,004 para os arranjos completos e obtida, segundo Khalifa⁽²⁷⁾ da seguinte equação:

$$\epsilon_{fe} = \frac{k_1 \times k_2 \times L_e}{468} \quad (7.14)$$

onde,

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{4000} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (7.15)$$

$$k_2 = \left(\frac{d_{frp} - L_e}{d_{frp}} \right) \quad (7.16)$$

$$L_e = \left(\frac{2500}{(n \times t_{frp} \times E_{frp})^{0.58}} \right) \quad (7.17)$$

Onde:

d_{PRF} = distância entre o CG da armadura longitudinal e a tira, em polegadas.

f_c = resistência do concreto em psi.

Sendo assim o valor da deformação máxima admitida para a fibra, segundo a recomendação do ACI-440R-00⁽⁴⁾, é igual ao valor de ϵ_{fe} .

7.3 RESULTADOS ESPERADOS

Com base na formulação teórica desenvolvida nos itens 7.1 e 7.2, e nos esquemas de reforço para cada uma das vigas apresentados no item 6.1, estão apresentados na tabela 7.1 os valores teóricos esperados para o ensaio de cada uma das vigas.

Os valores de V_{PRF} são calculados de acordo com o tipo de reforço executado segundo as equações apresentadas nos itens 7.1 e 7.2. No caso da viga sem reforço, a viga V1, o seu V_u é representado apenas pela soma da contribuição do concreto e do aço, V_c e V_s dados, segundo o procedimento da norma NBR 6118⁽¹⁰⁾, por:

$$V_c = 0,15 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \quad (7.18)$$

$$V_s = \frac{\left[\frac{A_{sw}}{s} \right] \times f_y \times d}{50} \quad (7.19)$$

Com:

f_c = resistência do concreto à compressão, em N/mm^2 .

b = largura da base da viga, em mm.

d = altura útil da viga, em mm.

$\left[\frac{A_{sw}}{s} \right]$ = área de armadura transversal em cm^2/m /face da viga.

f_y = resistência de escoamento do aço da armadura transversal, em N/mm^2 .

Das equações 7.18 e 7.19, obtém-se $V_c + V_s = 81,85 \text{ kN}$.

Nas tabelas abaixo são mostrados os valores teóricos esperados segundo o dimensionamento proposto por Nollet et al ⁽⁴⁰⁾ e segundo o ACI-440R-00⁽⁴⁾, mostrados nos itens 7.1 e 7.2.

TABELA 7.1 Resultados teóricos esperados segundo Nollet et al ⁽⁴⁰⁾

Viga	Tipo de Reforço	ρ_{PRF} %	V_c+V_s (kN)	$V_{PRF,rp}$ (kN)	τ_{ave} (MPa)	$V_{PRF,des}$ (kN)	V_u (kN)	Modo de Ruptura
V1	sem reforço	-	81,85	-	-	-	81,85	Esforço cortante
V2	tiras	0,017	81,85	73,68	1,50	69,70	151,55	Descolamento
V3	tiras	0,017	81,85	73,68	1,50	69,70	151,55	Descolamento
V4	tiras -"U"	0,017	81,85	73,68	3,00	139,40	155,53	Ruptura da fibra
V5	tiras -"U"+ mesa	0,034	81,85	147,36	- ^b	- ^b	229,21	Ruptura da fibra ^a
V6	tiras -"U"+ tira	0,034	81,85	147,36	- ^b	- ^b	229,21	Ruptura da fibra ^a

^a imaginando-se que o sistema proposto de ancoragem das tiras seja eficiente.

^b o valor não se aplica por se considerar que não haverá descolamento nesse tipo de arranjo.

TABELA 7.2 Resultados teóricos esperados segundo o ACI-440R-2000 ⁽⁴⁾

Viga	Tipo de Reforço	ρ_{PRF} %	V_c+V_s (kN)	$V_{PRF,rp}$ (kN)	ϵ_{fe} (%)	ϕ	V_u (kN)	Modo de Ruptura
V1	sem reforço	-	81,85	-	-	-	81,85	Esforço cortante
V2	tiras	0,017	81,85	31,32	0,52 ^b	0,85	113,16	Descolamento
V3	tiras	0,017	81,85	31,32	0,52 ^b	0,85	113,16	Descolamento
V4	tiras -"U"	0,017	81,85	31,32	0,52 ^b	0,85	113,16	Descolamento
V5	tiras -"U"+ mesa	0,034	81,85	69,67	0,40	0,95	151,52	Ruptura da fibra ^a
V6	tiras -"U"+ tira	0,034	81,85	69,67	0,40	0,95	151,52	Ruptura da fibra ^a

^a imaginando-se que o sistema proposto de ancoragem das tiras seja eficiente.

^b valor calculado, mas foi adotado o valor de 0,40% no cálculo, que é o valor máximo fixado pelo ACI-440-R-00⁽⁴⁾

8 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Na tabela 8.1, são apresentados os resultados do concreto das vigas ensaiadas.

TABELA 8.1 Características do concreto das vigas ensaiadas.

VIGA	f_{cj} (N/mm ²)	f_{tj} (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
Viga V1	45,33	3,67	25.704
Viga V2	45,84	3,88	27.311
Viga V3	46,23	4,01	27.413
Viga V4	46,80	4,08	27.509
Viga V5	45,12	3,58	25.614
Viga V6	44,83	3,81	25.369

A resistência à compressão, f_{cj} , indicada na tabela acima, foi obtida através da média da resistência à compressão de 4 corpos de prova de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura, ensaiados à compressão no dia do ensaio. Enquanto que a resistência à tração, f_{tj} , foi obtida através da média da resistência à tração de 2 corpos de prova de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura, ensaiados também no dia do ensaio.

O valor de E_c , apresentado na tabela acima, refere-se ao módulo de deformação longitudinal do concreto tangente na origem.

Na tabela 8.2 apresentam-se alguns resultados referentes ao comportamento das vigas durante o ensaio.

TABELA 8.2 – Resultados dos ensaios das vigas .

	VIGA V1	VIGA V2	VIGA V3	VIGA V4	VIGA V5	VIGA V6
f_c (N/mm ²)	45,33	45,84	46,23	46,80	45,12	44,83
f_t (N/mm ²)	3,67	3,88	4,01	4,08	3,58	3,81
E_c (N/mm ²)	25.704	27.311	27.413	27.509	25.614	25.369
$V_{\text{última}}$ (kN) *	89,17	94,03	125,70	131,45	155,8	124,63
$V_{\text{máxima}}$ (kN)	117,03	106,24	128,58	138,50	161,5	149,23
ϵ_c máxima (‰)	1,04	0,93	0,29	0,56	1,08	0,48
ϵ_s , longitudinal, máx (‰)	2,12	1,76	2,47	2,45	2,77	2,62
ϵ_{PRF} , máx (‰)	-	3,69	4,84	5,73	2,61	3,62
ϵ_s , transversal, máx (‰)	14,53	13,87	10,50	10,80	11,01	10,85
Flecha máxima (mm)	10,82	10,26	14,20	14,59	13,26	15,40
Ruptura Observada	Esforço cortante	Descolamento	Descolamento	Descolamento	Descolamento	Descolamento

* valores correspondentes ao início do escoamento da armadura transversal, $\epsilon_s = 4,2\%$, ocorrido em todas as vigas.

8.1 TENSÕES NOS ESTRIBOS

A evolução das tensões nos estribos, nos pontos T1, T2, T3, T4 ,T5, T6, T7 e T8 indicados na figura 6.12, para todas as vigas ensaiadas, está representadas nas figuras 8.1. Enquanto que todas as medições individuais encontram-se no anexo desta dissertação.

Nestas figuras, a ausência de representação de evolução das tensões, em algum dos pontos instrumentados, significa que o extensômetro posicionado nesse ponto teve algum tipo de problema, provavelmente durante a moldagem da viga, que impossibilitou o seu funcionamento.

8.2 TENSÕES NAS FIBRAS

A evolução das tensões nas fibras, nos pontos F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7 e F8, localizados na mesma posição dos extensômetros colocados nos estribos de acordo com o indicado na figura 6.12, para todas as vigas ensaiadas, está representadas nas figuras 8.2. Enquanto que todas as medições individuais encontram-se no anexo desta dissertação.

Nestas figuras, a ausência de representação de evolução das tensões, em algum dos pontos instrumentados, significa que o extensômetro posicionado nesse ponto teve algum tipo de problema, provavelmente durante a moldagem da viga, que impossibilitou o seu funcionamento.

8.3 TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

A evolução das tensões na armadura longitudinal, nos pontos L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11 e L12 indicados na figura 6.12, para todas as vigas ensaiadas, está representadas nas figuras 8.3. Enquanto que todas as medições individuais encontram-se no anexo desta dissertação.

Nestas figuras, a ausência de representação de evolução das tensões, em algum dos pontos instrumentados, significa que o extensômetro posicionado nesse ponto teve algum tipo de problema, provavelmente durante a moldagem da viga, que impossibilitou o seu funcionamento.

8.4 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

A evolução individual da deformação no concreto, nos pontos H1, H2, H3 e H4 indicados na figura 6.13, para todas as vigas ensaiadas, estão representadas nas figuras 8.4.

8.5 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

A evolução individual dos deslocamentos verticais, medidos no meio do vão de acordo com o esquema mostrado na figura 6.13, para todas as vigas ensaiadas, estão representados na figura 8.5.

8.6 EVOLUÇÃO DAS FISSURAS

A evolução das fissuras durante o ensaio da viga V1 está representada na figura 8.6.

VIGA V1 - TENSÕES NOS ESTRIBOS

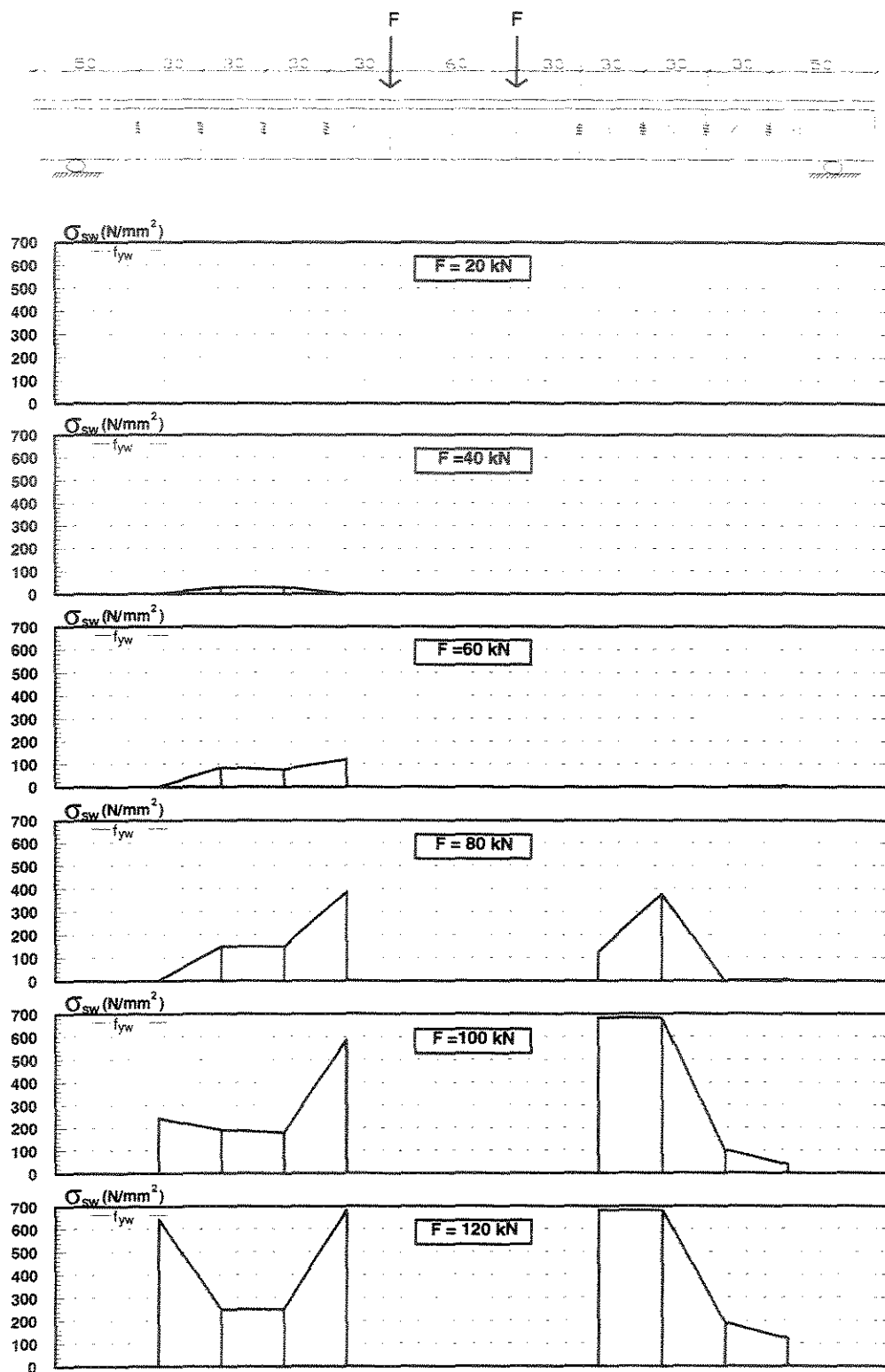


FIGURA 8.1A Tensões nos estribos da viga V1.

VIGA V2 - TENSÕES NOS ESTRIBOS

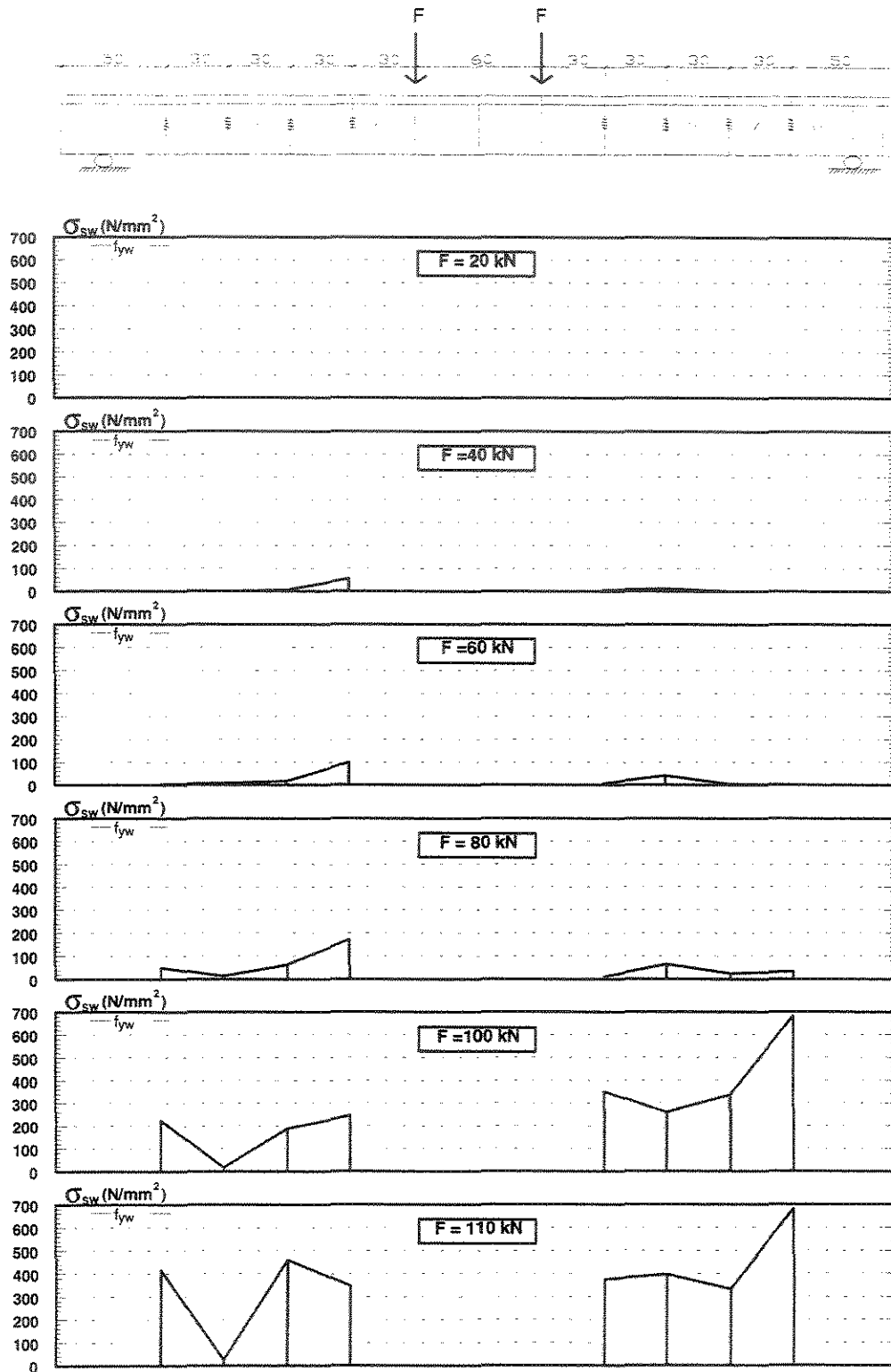


FIGURA 8.1B Tensões nos estribos da viga V2.

VIGA V3 - TENSÕES NOS ESTRIBOS

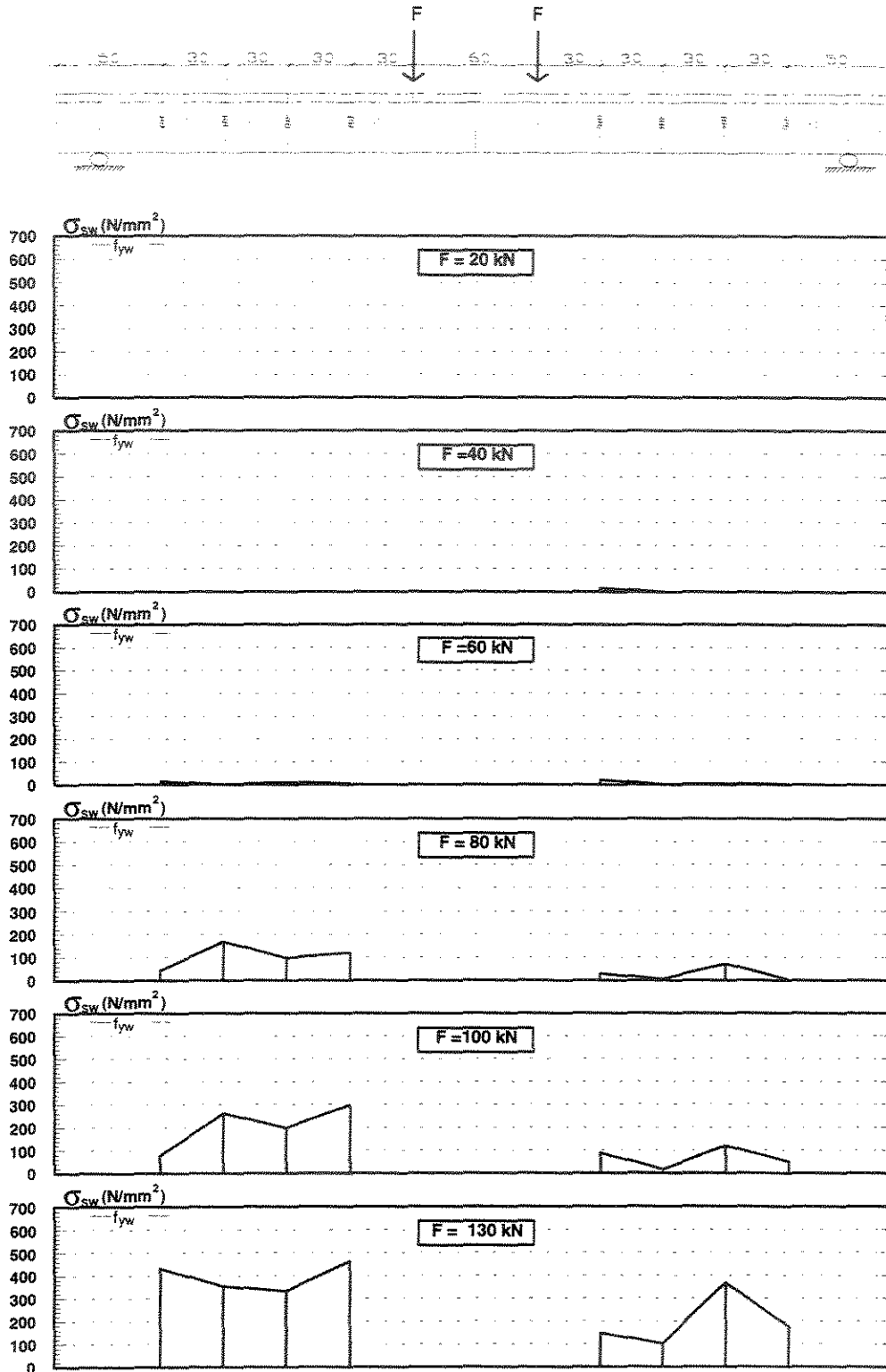


FIGURA 8.1C Tensões nos estribos da viga V3.

VIGA V4 - TENSÕES NOS ESTRIBOS

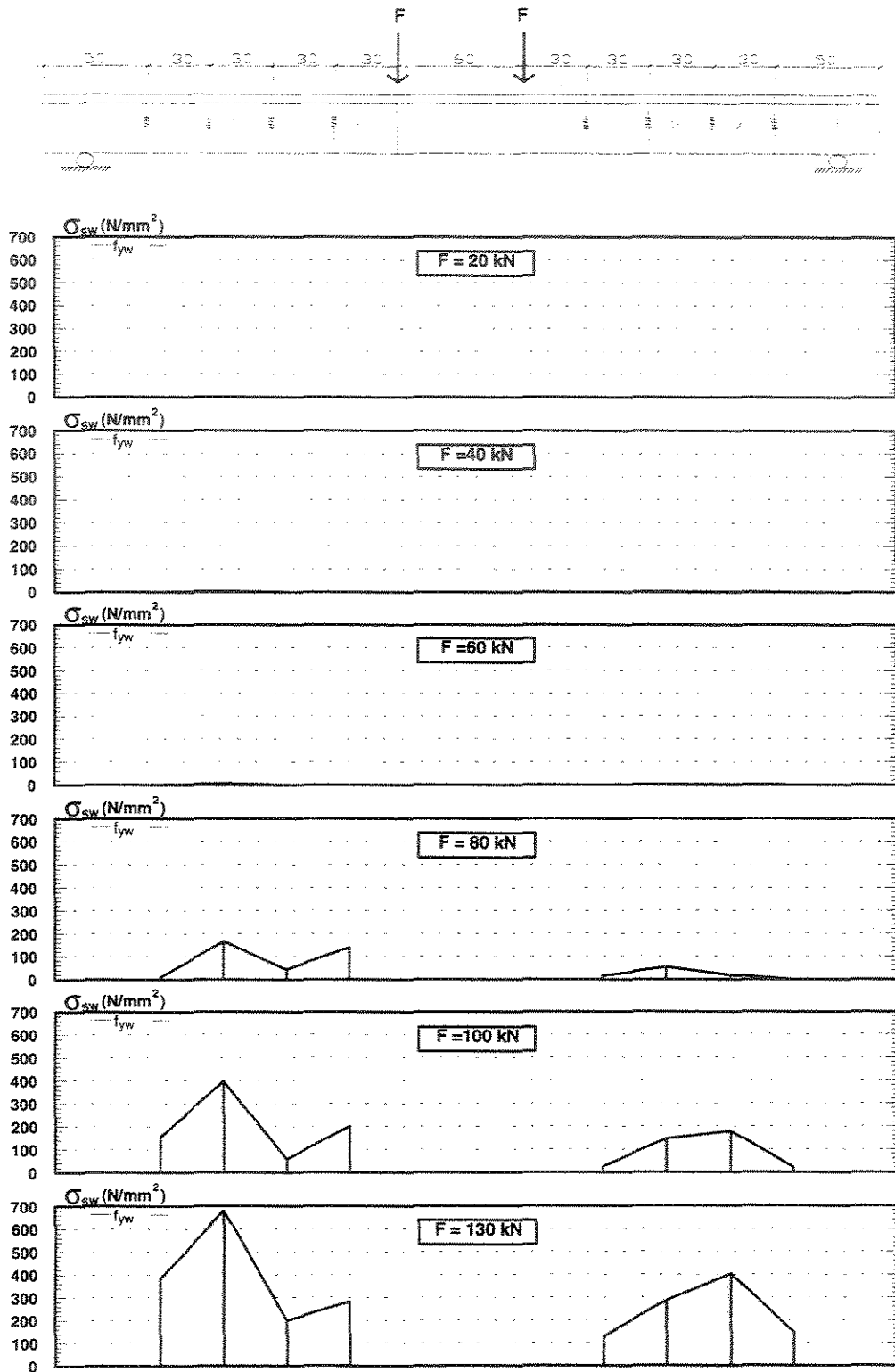


FIGURA 8.1D Tensões nos estribos da viga V4.

VIGA V5 - TENSÕES NOS ESTRIBOS

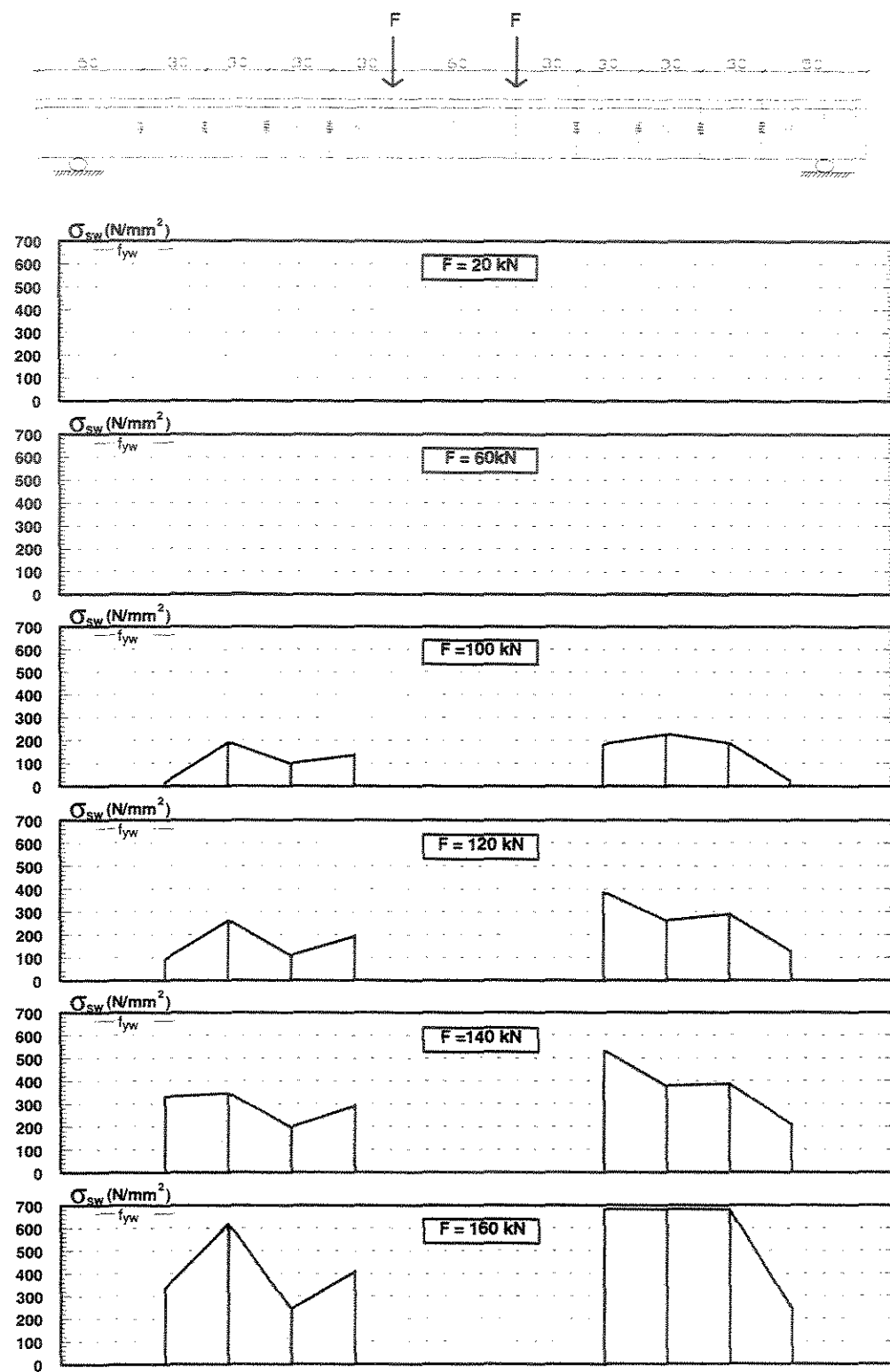


FIGURA 8.1E Tensões nos estribos da viga V5.

VIGA V6 - TENSÕES NOS ESTRIBOS

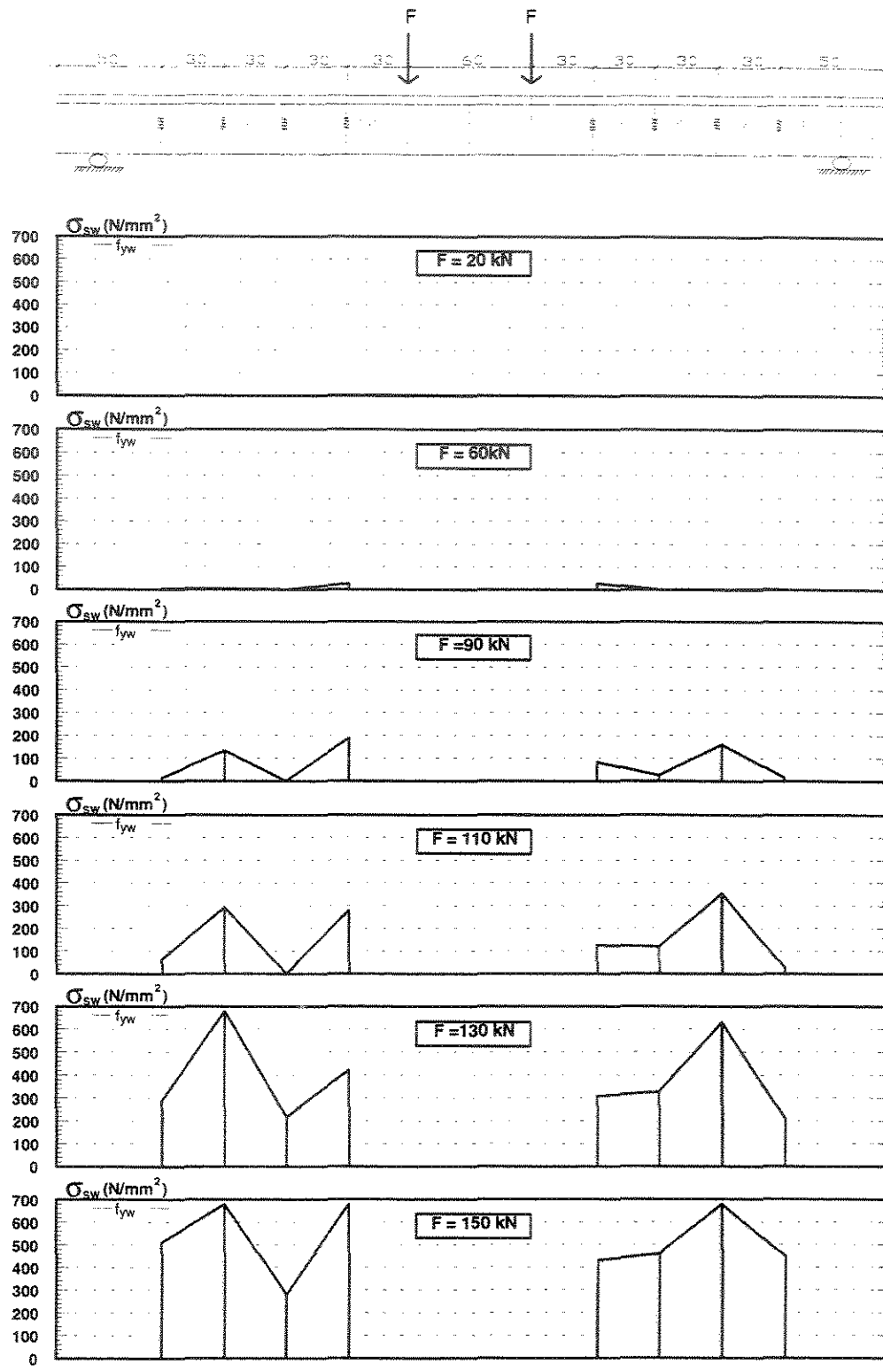


FIGURA 8.1F Tensões nos estribos da viga V6.

VIGA V2 - TENSÕES NAS FIBRAS

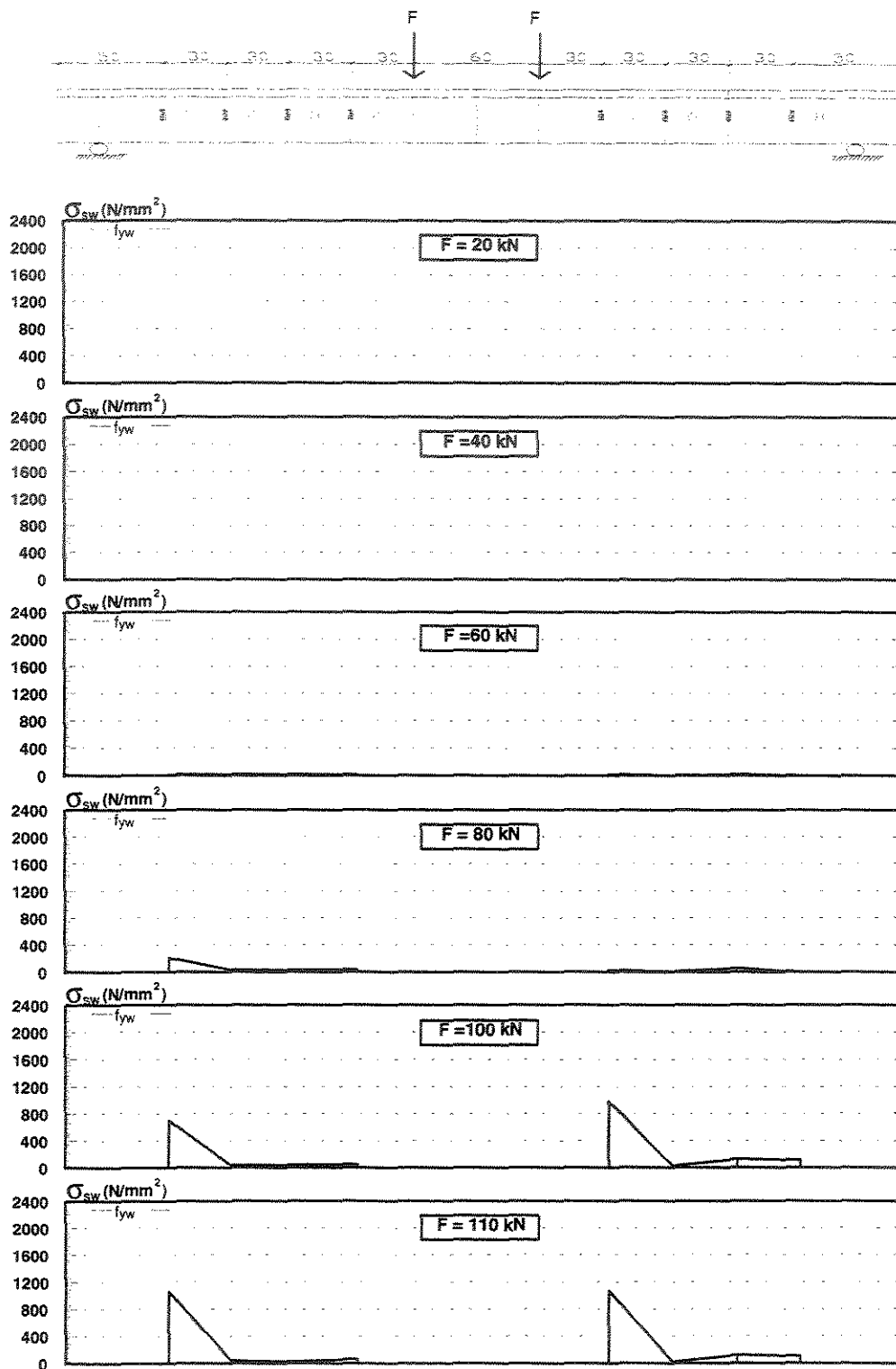


FIGURA 8.2A Tensões nas fibras da viga V2.

VIGA V3 - TENSÕES NAS FIBRAS

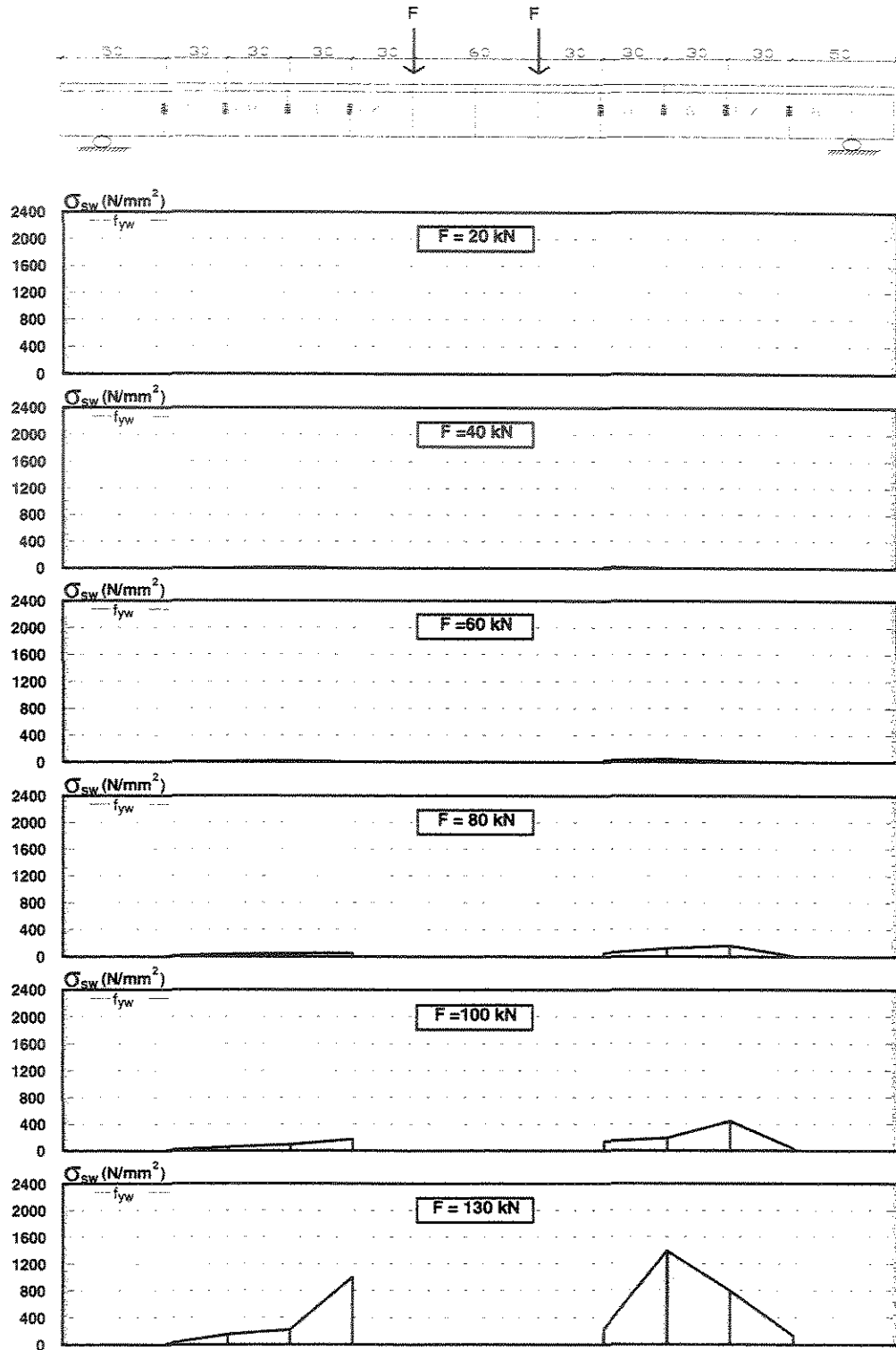


FIGURA 8.2B Tensões nas fibras da viga V3.

VIGA V4 - TENSÕES NAS FIBRAS

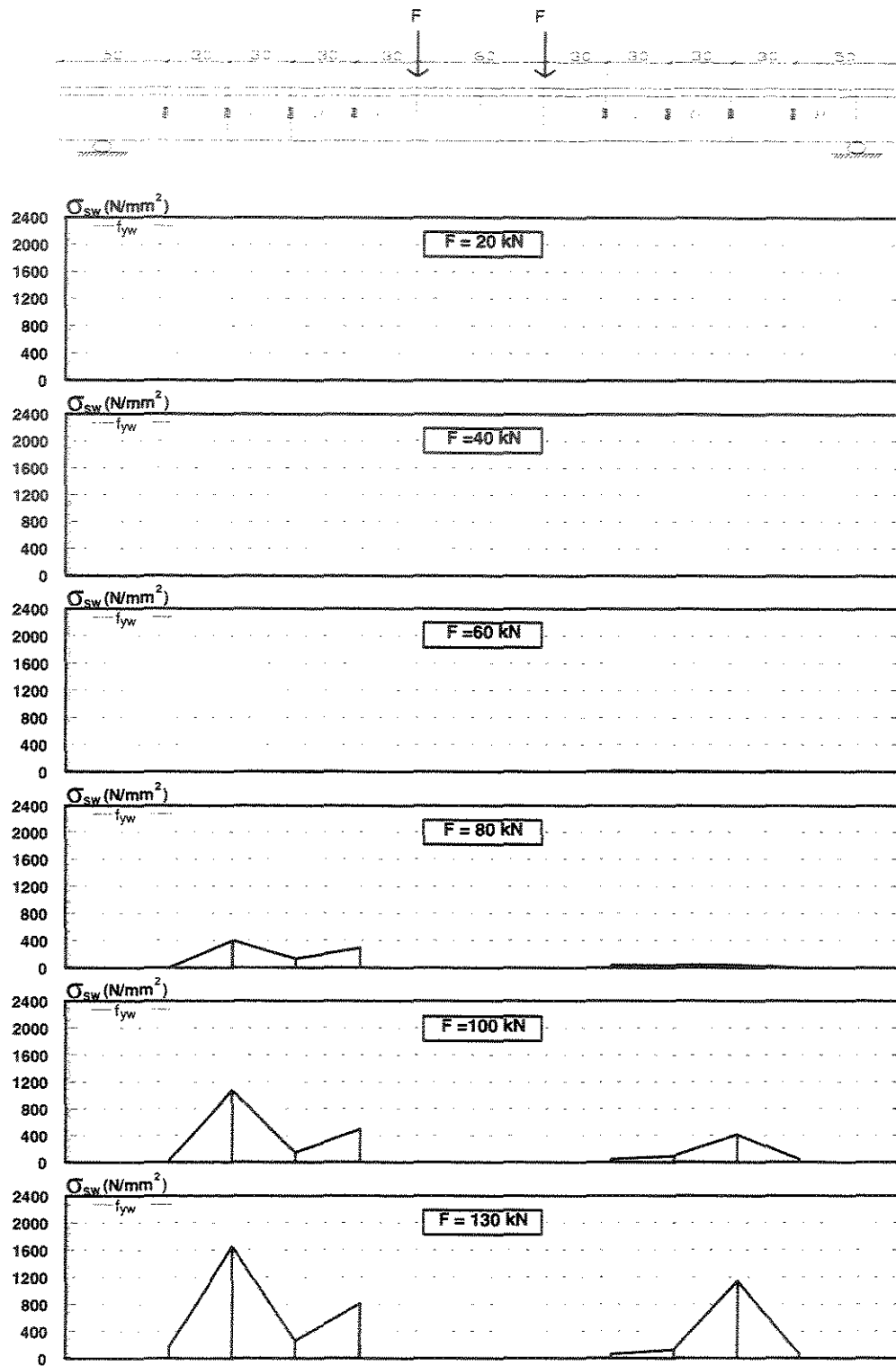


FIGURA 8.2C Tensões nas fibras da viga V4.

VIGA V5 - TENSÕES NAS FIBRAS

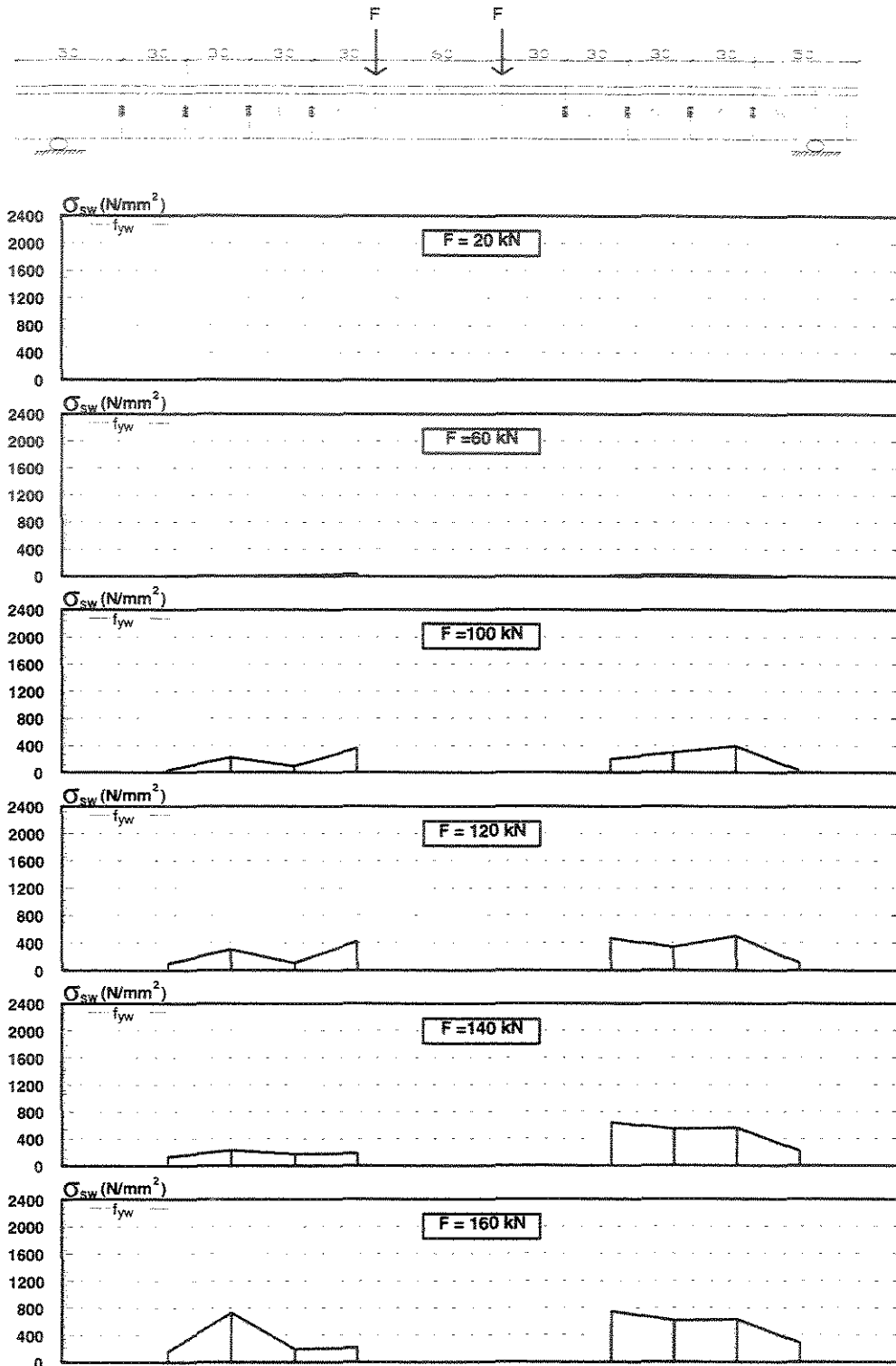


FIGURA 8.2D Tensões nas fibras da viga V5.

VIGA V6 - TENSÕES NAS FIBRAS

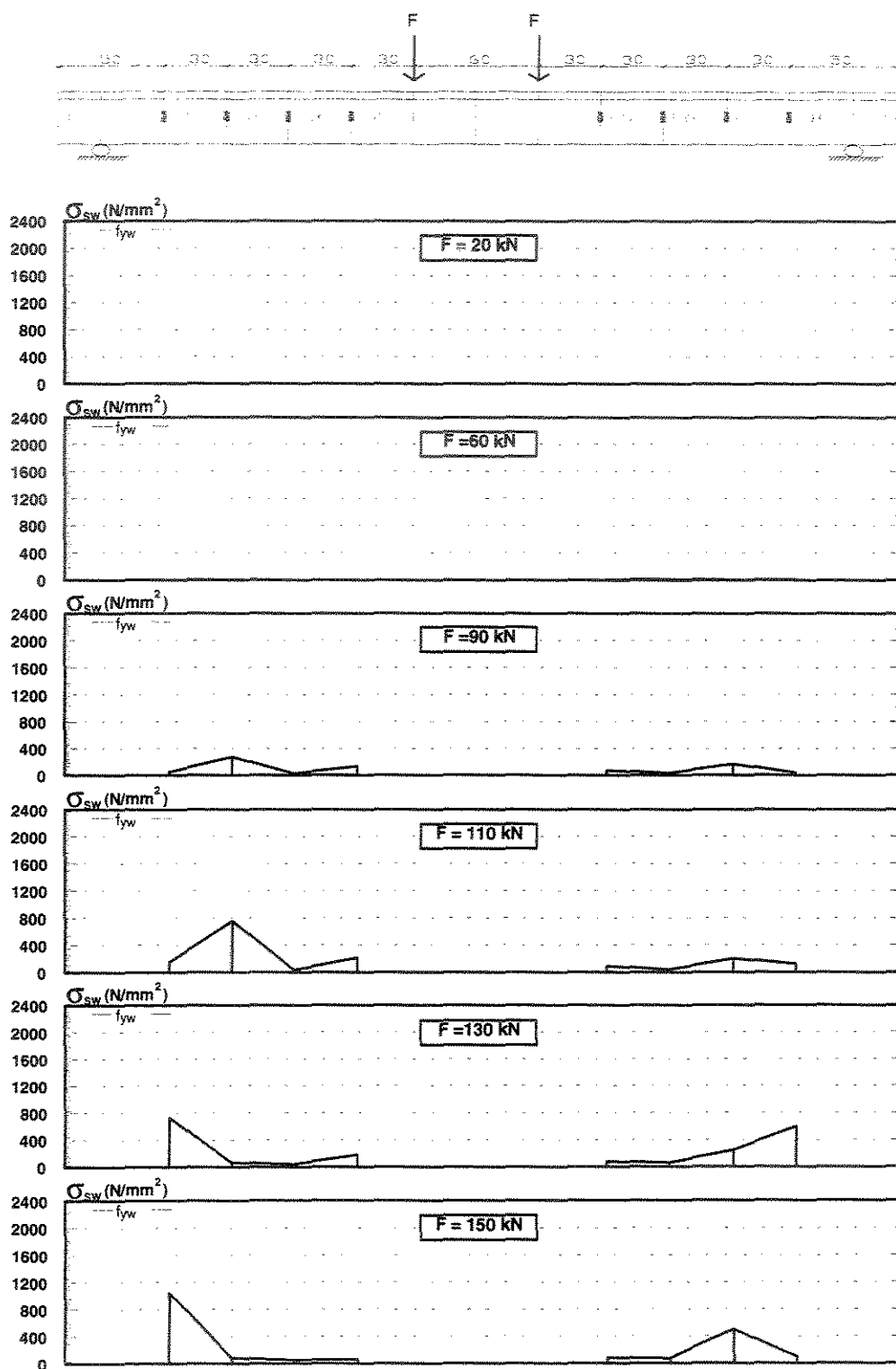


FIGURA 8.2E Tensões nas fibras da viga V6.

VIGA V1 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

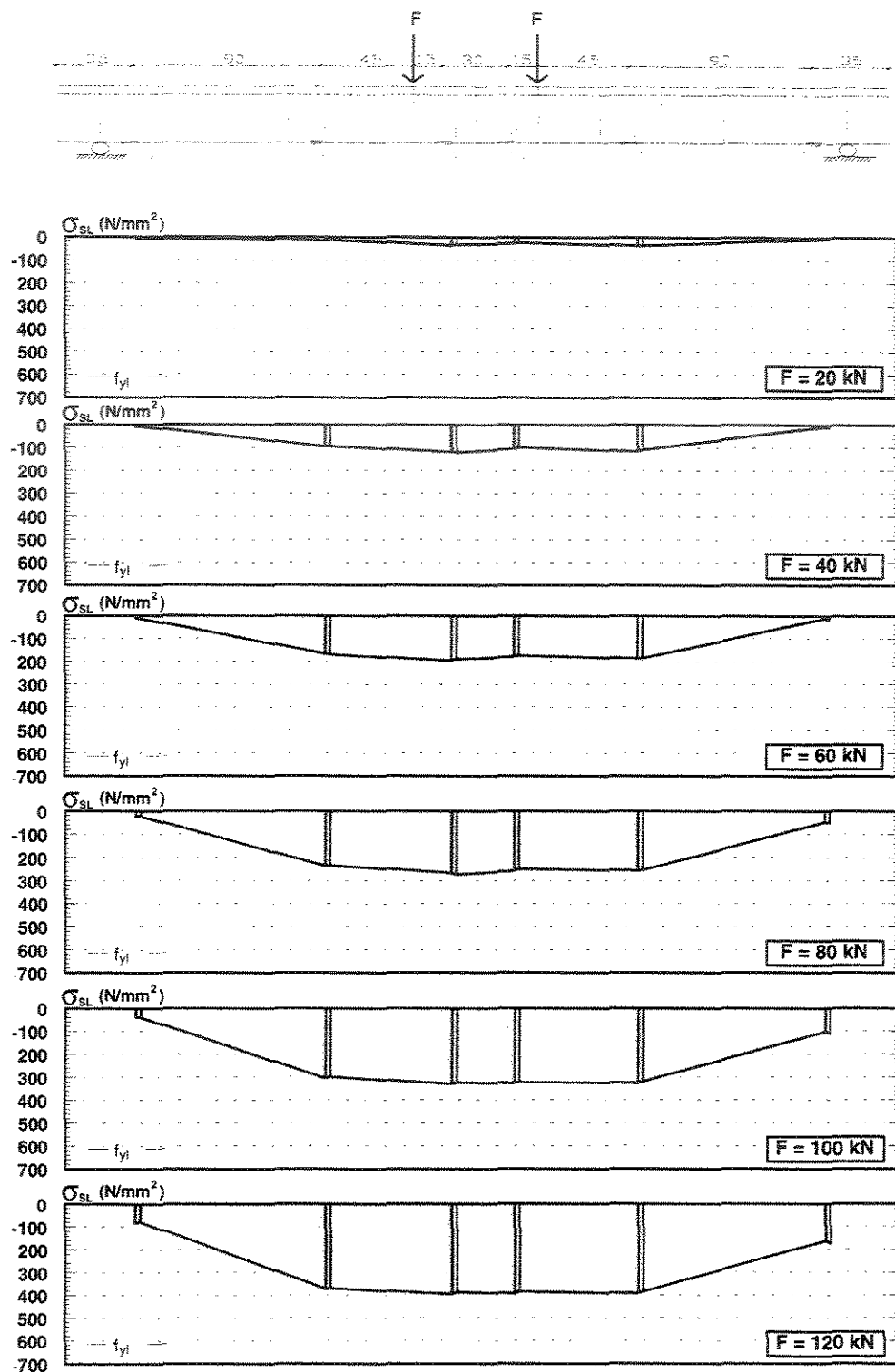


FIGURA 8.3A Tensões na armadura longitudinal da viga V1.

VIGA V5 - TENSÕES NAS FIBRAS

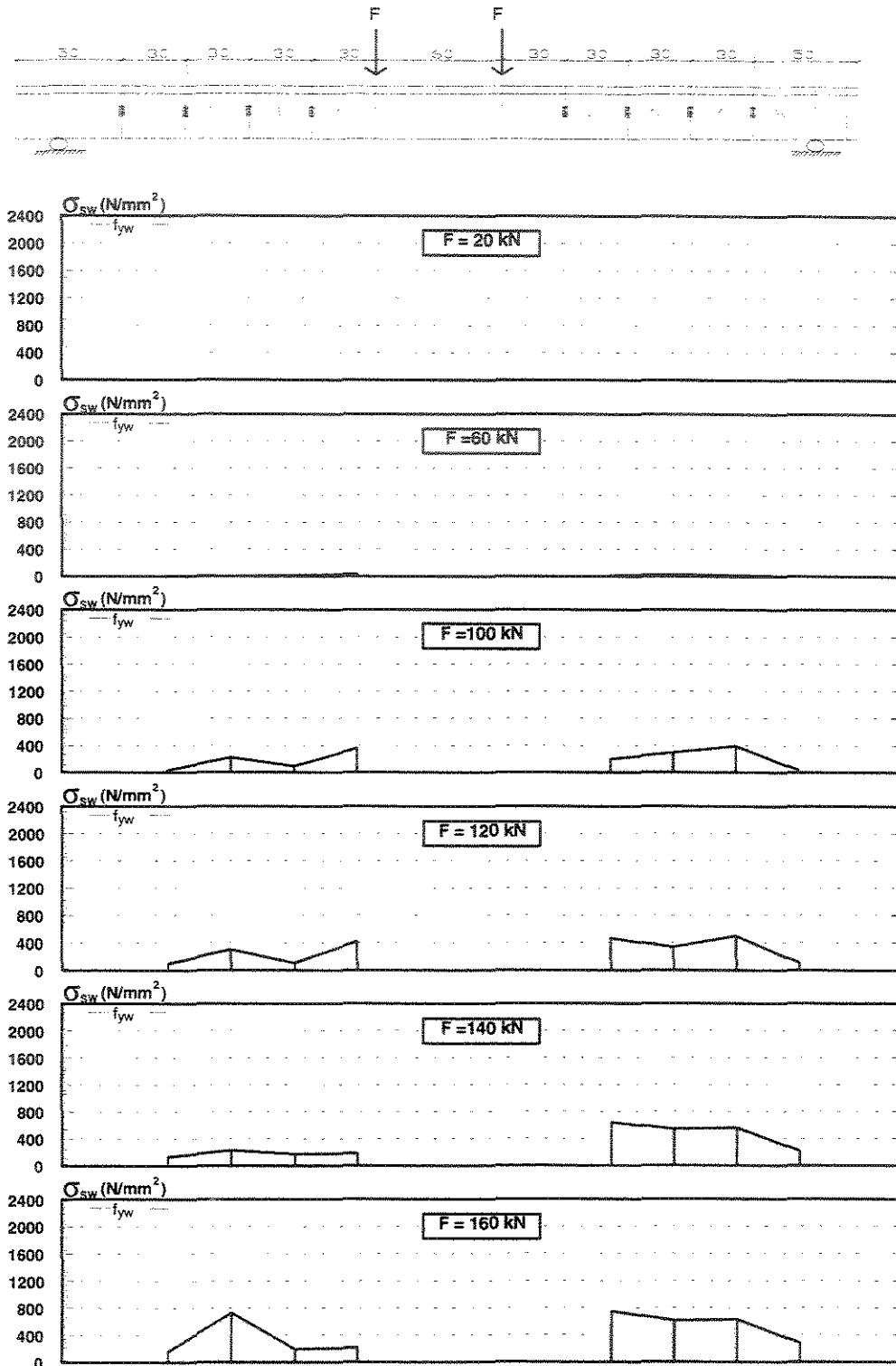


FIGURA 8.2D Tensões nas fibras da viga V5.

VIGA V6 - TENSÕES NAS FIBRAS

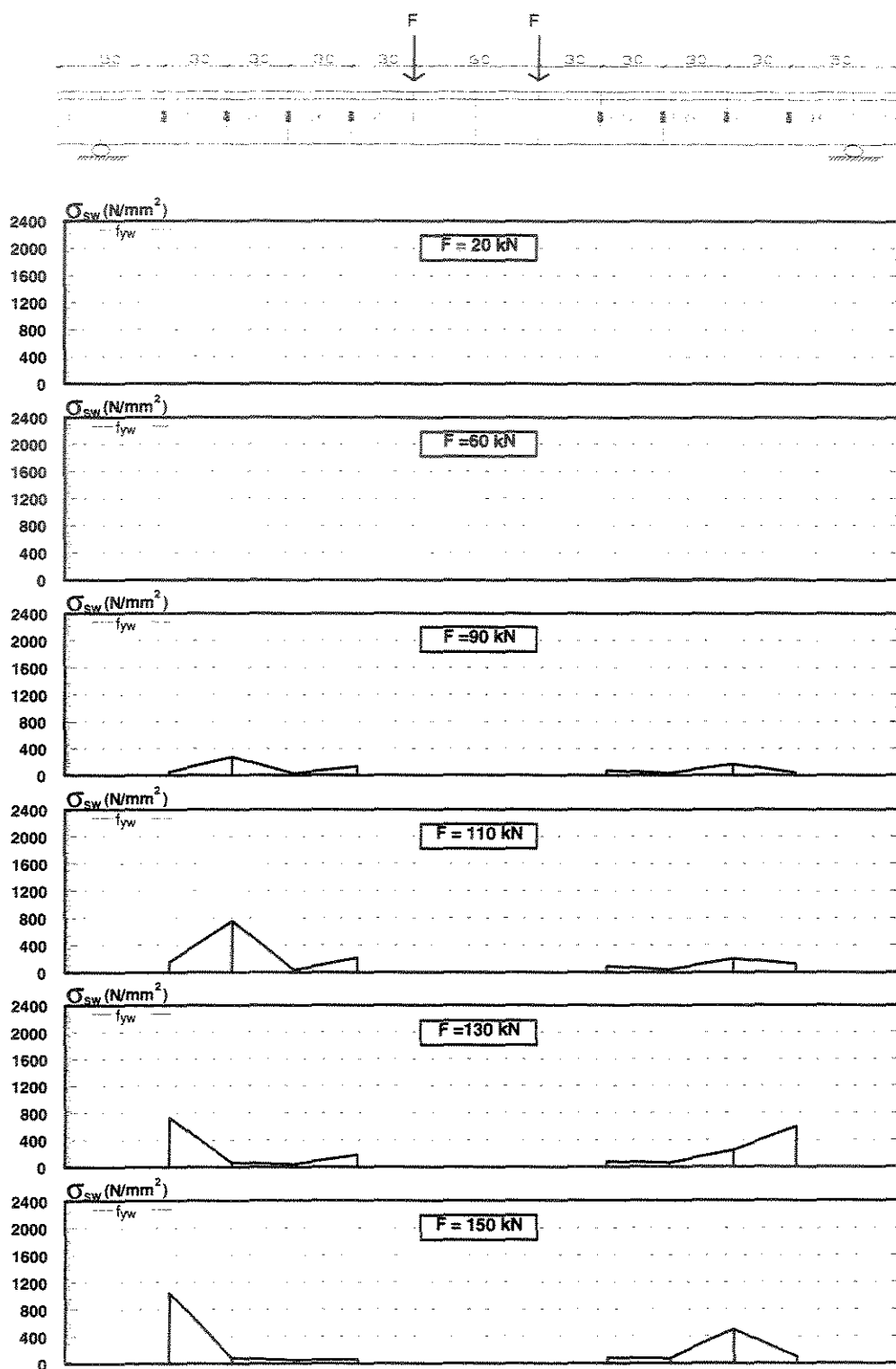


FIGURA 8.2E Tensões nas fibras da viga V6.

VIGA V1 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

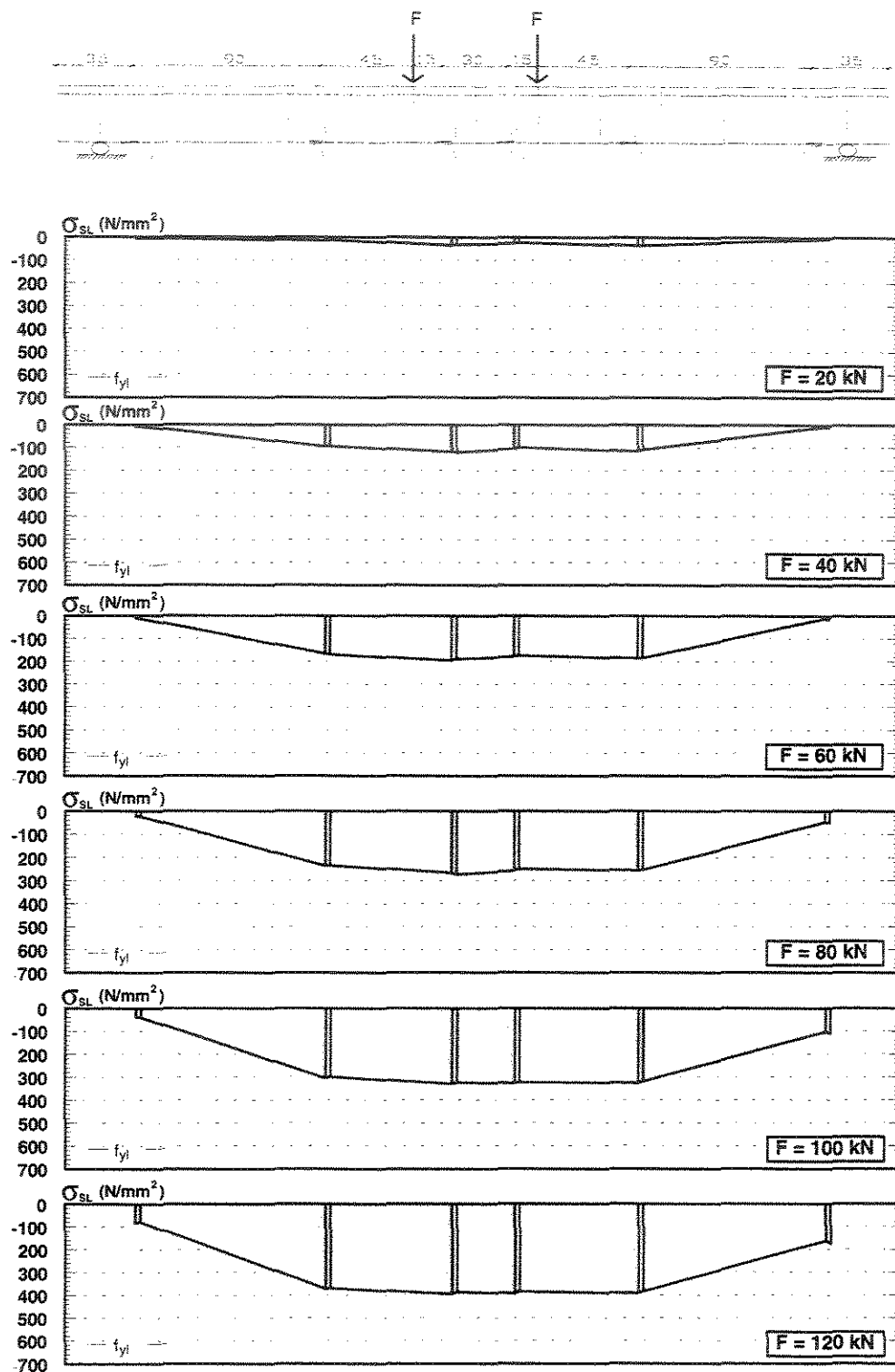


FIGURA 8.3A Tensões na armadura longitudinal da viga V1.

VIGA V2 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

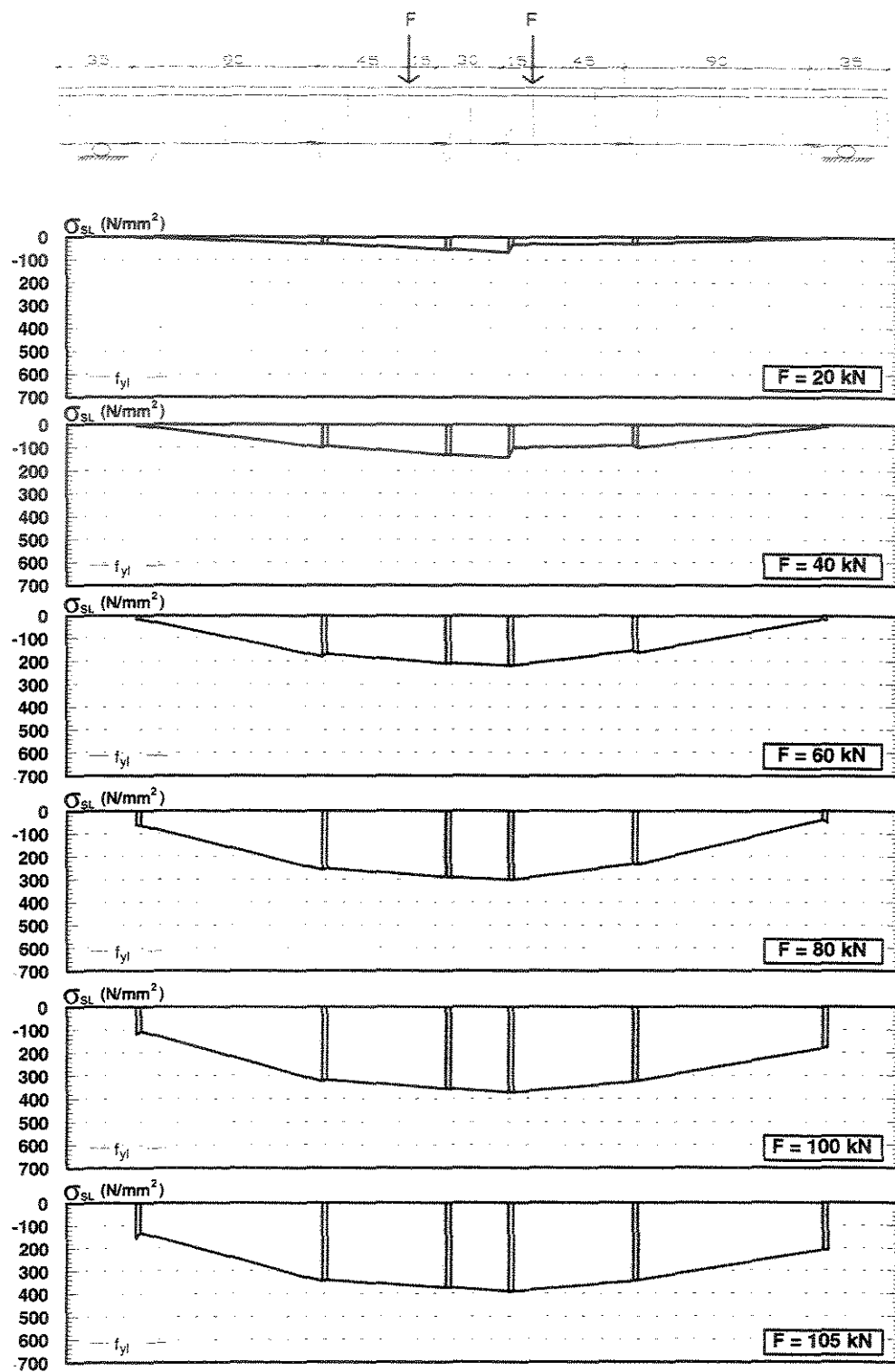


FIGURA 8.3B Tensões na armadura longitudinal da viga V2.

VIGA V3 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

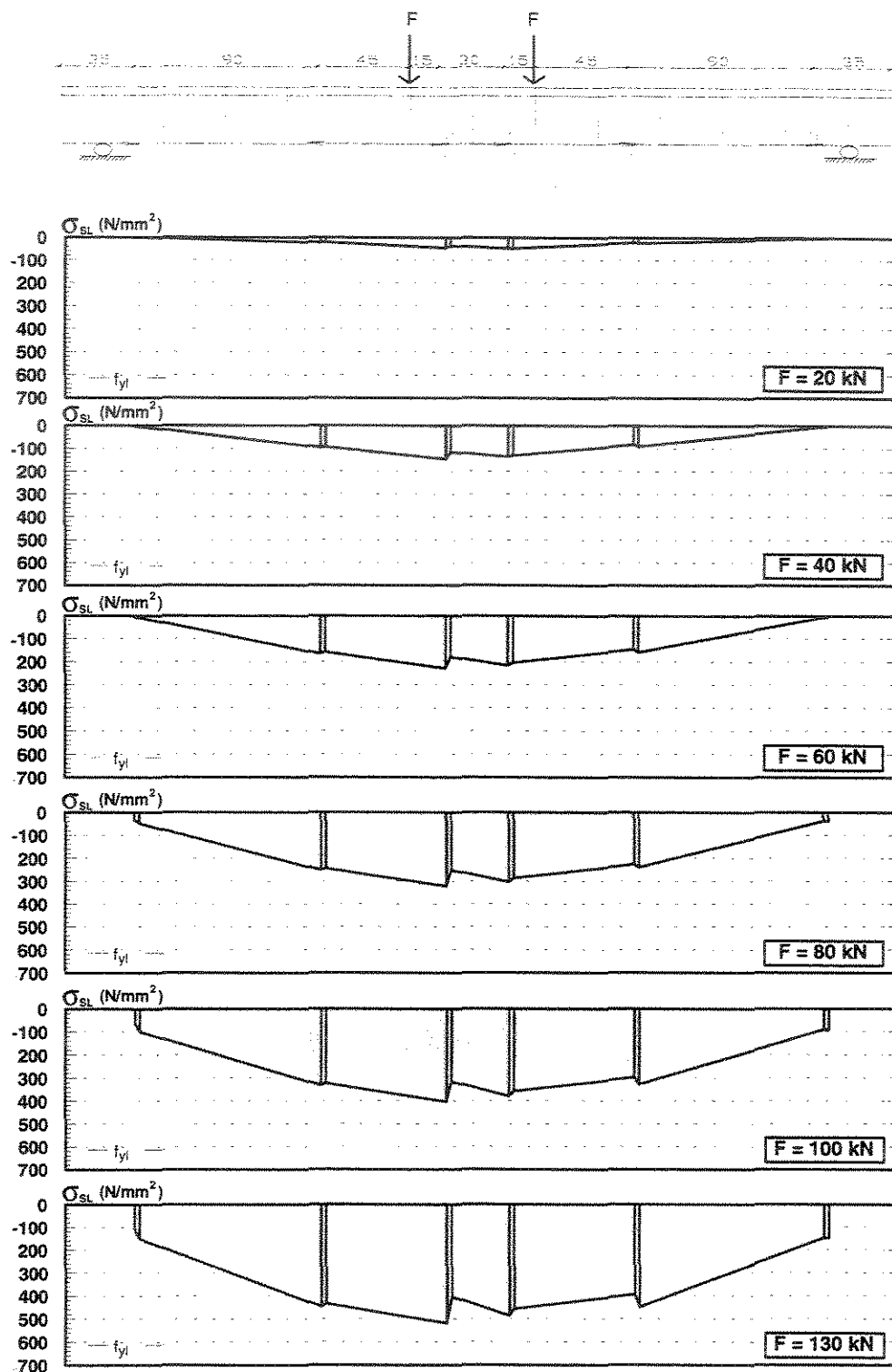


FIGURA 8.3C Tensões na armadura longitudinal da viga V3.

VIGA V4 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

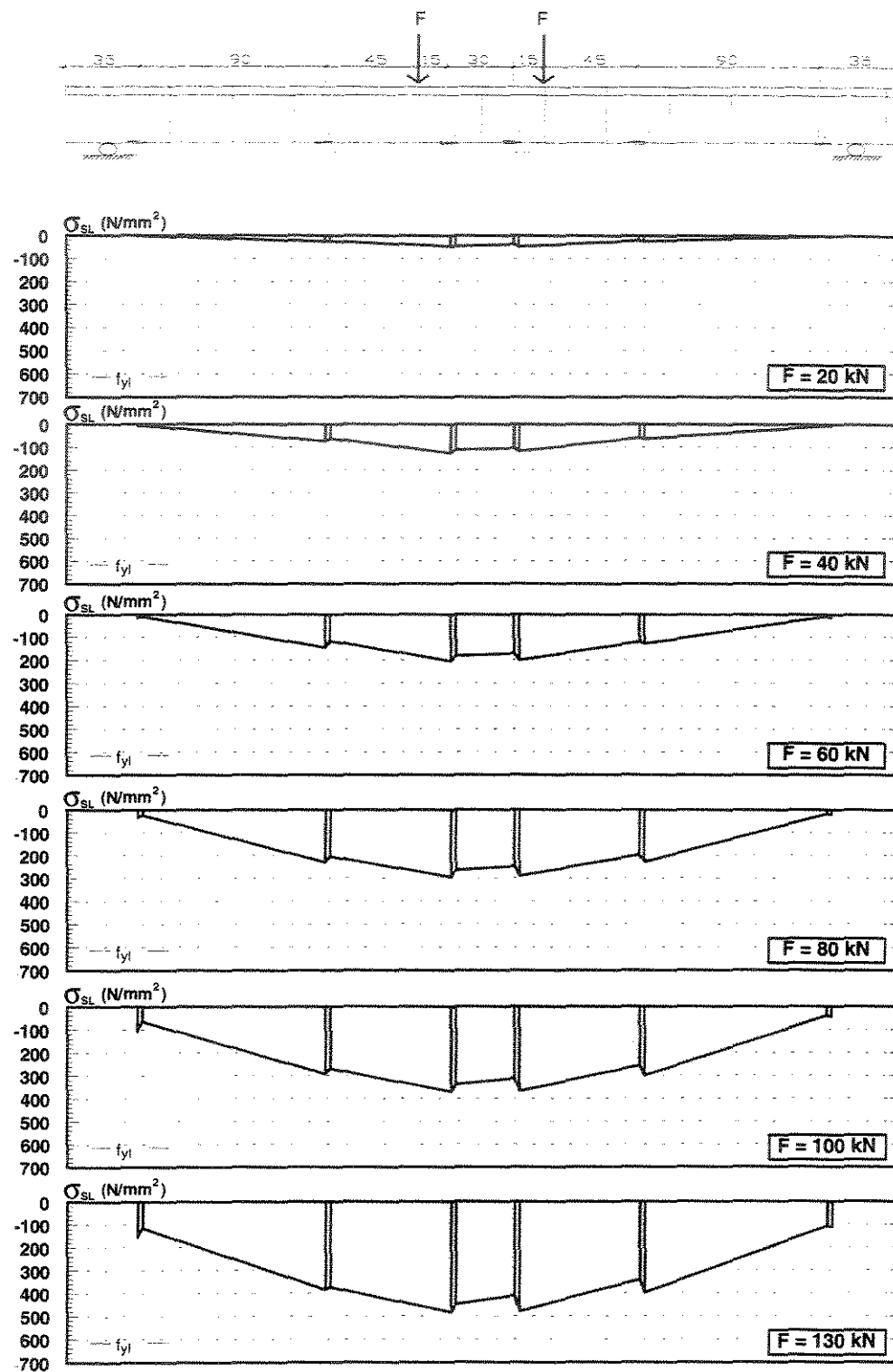


FIGURA 8.3D Tensões na armadura longitudinal da viga V4.

VIGA V5 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

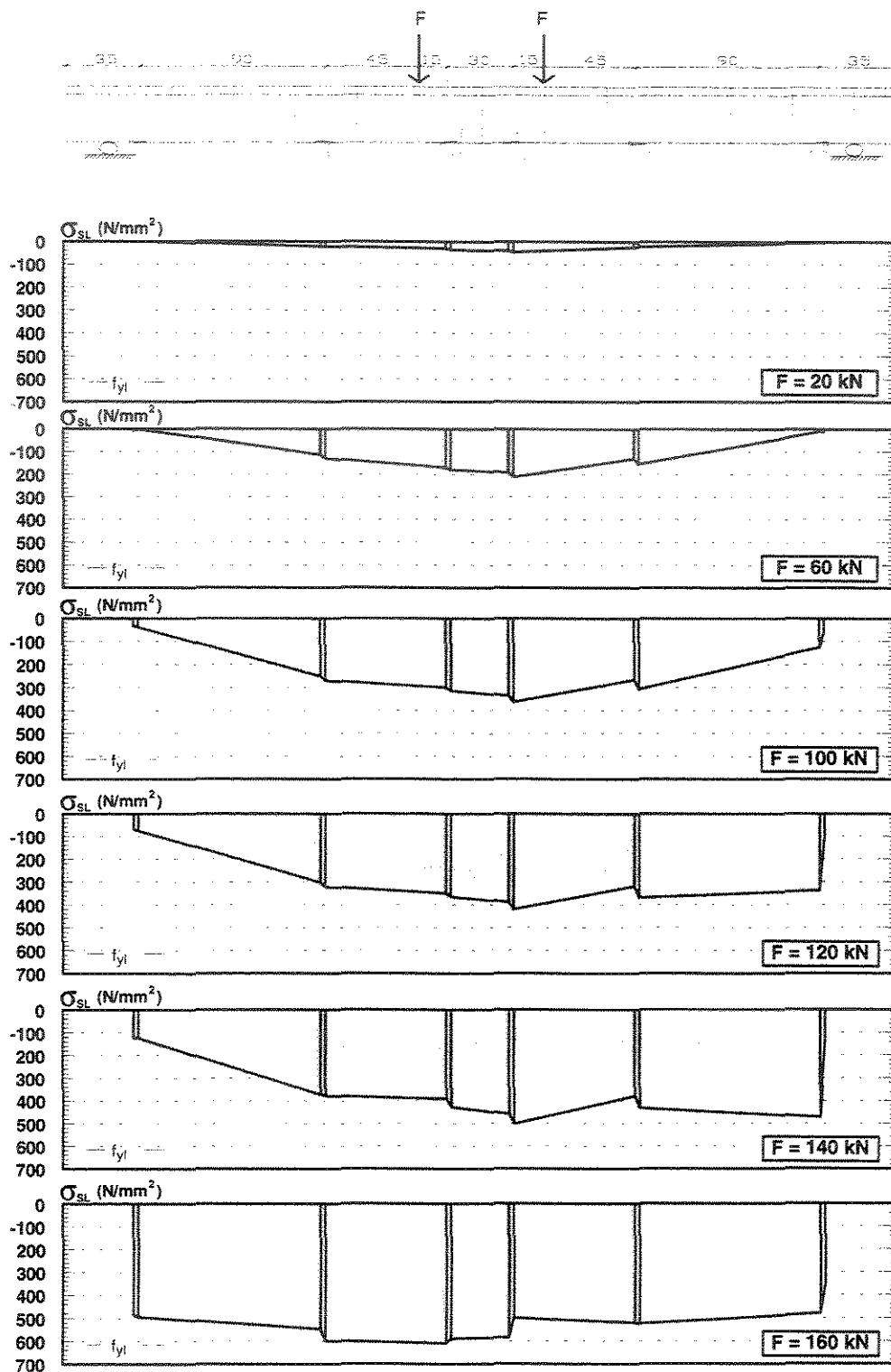


FIGURA 8.3E Tensões na armadura longitudinal da viga V5.

VIGA V6 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

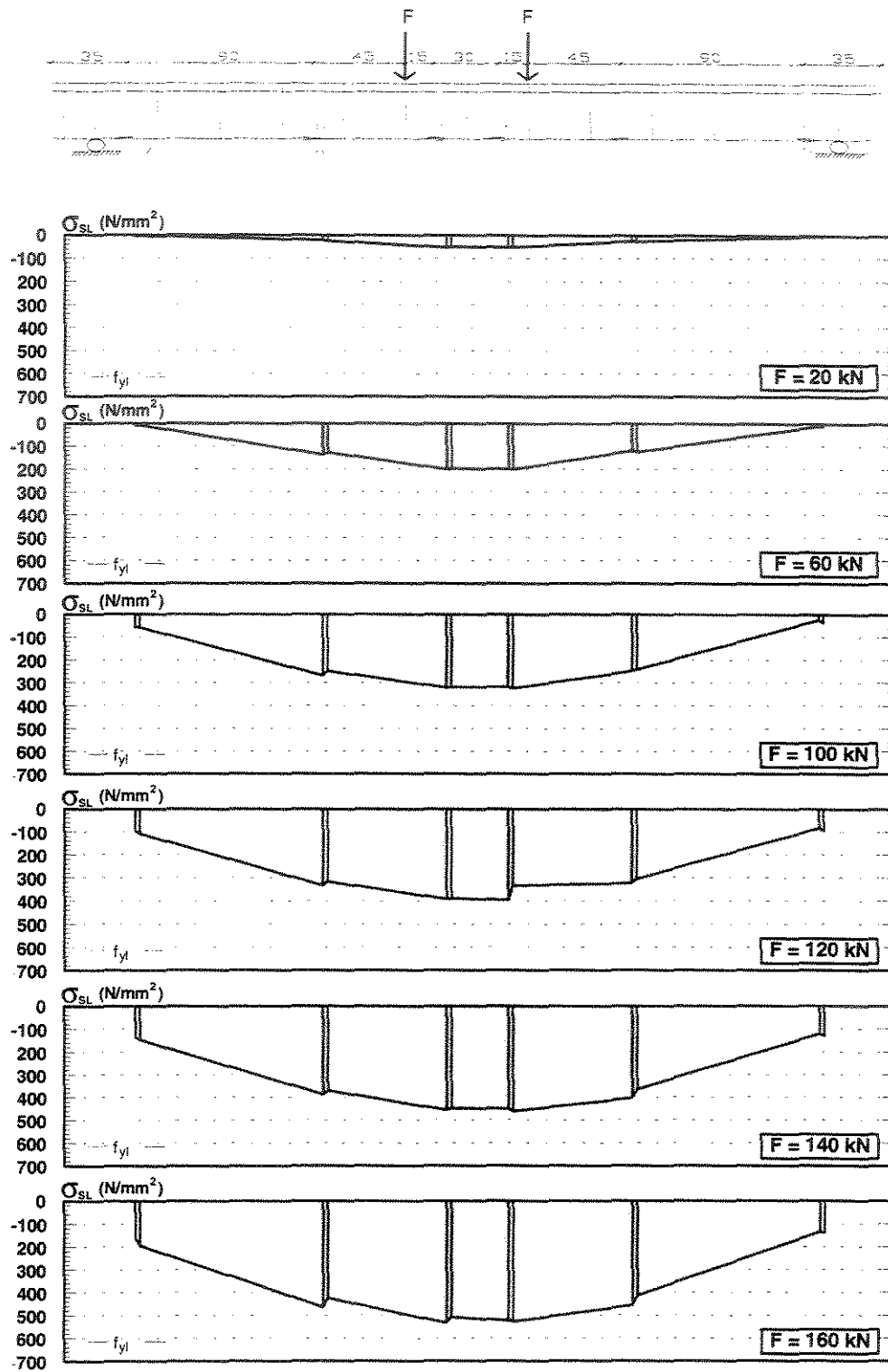


FIGURA 8.3F Tensões na armadura longitudinal da viga V6.

VIGAS V1 E V2 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

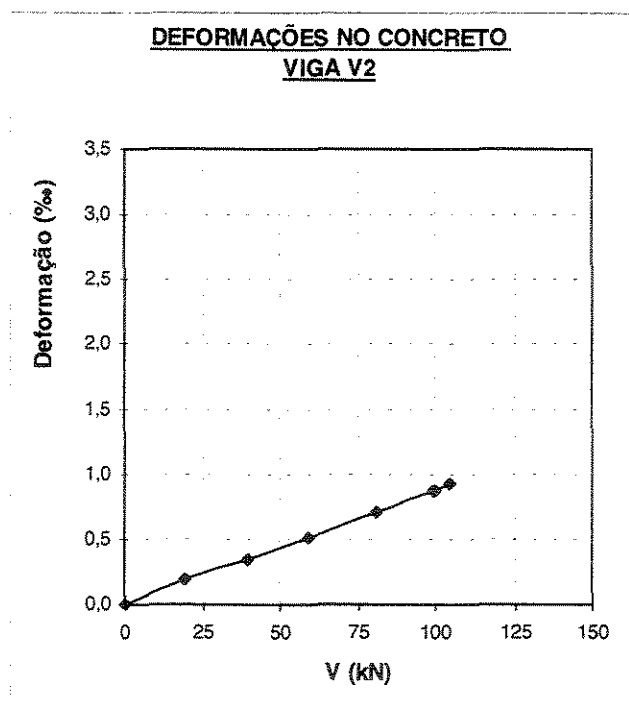
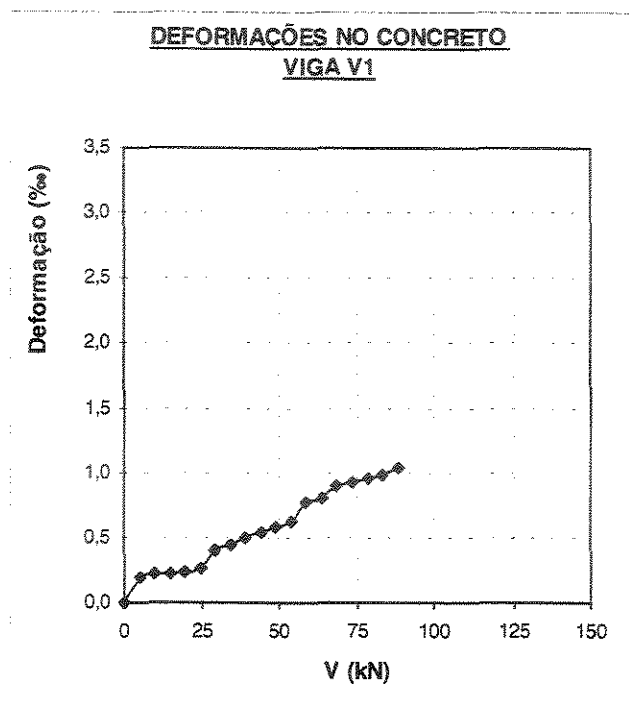


FIGURA 8.4A Deformações do concreto das vigas V1 e V2.

VIGAS V3 E V4 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

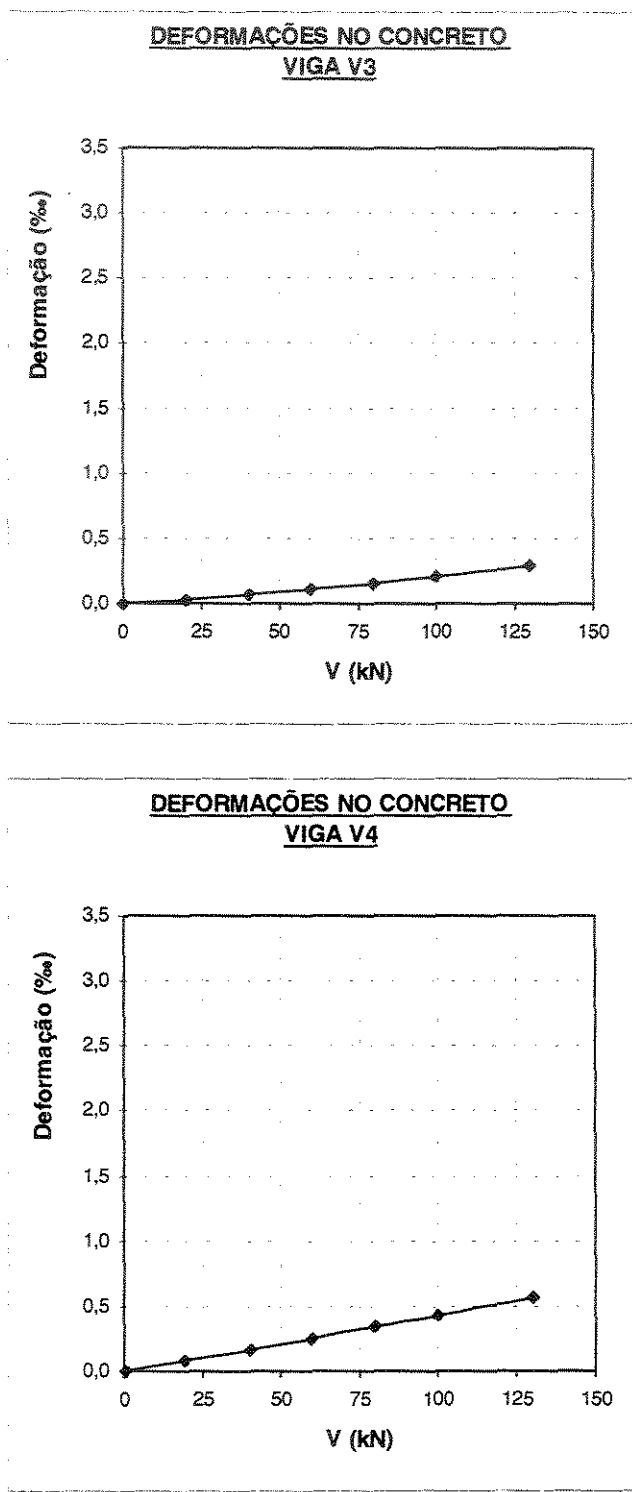


FIGURA 8.4B Deformações do concreto das vigas V3 e V4.

VIGAS V5 E V6- DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

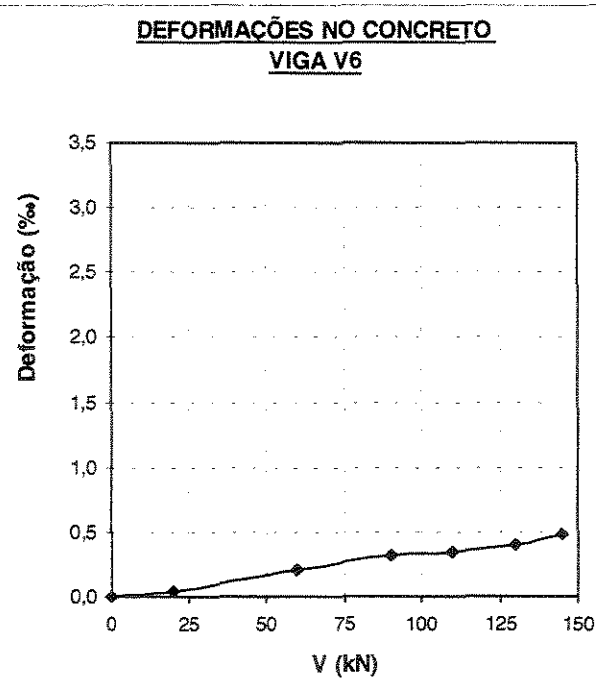
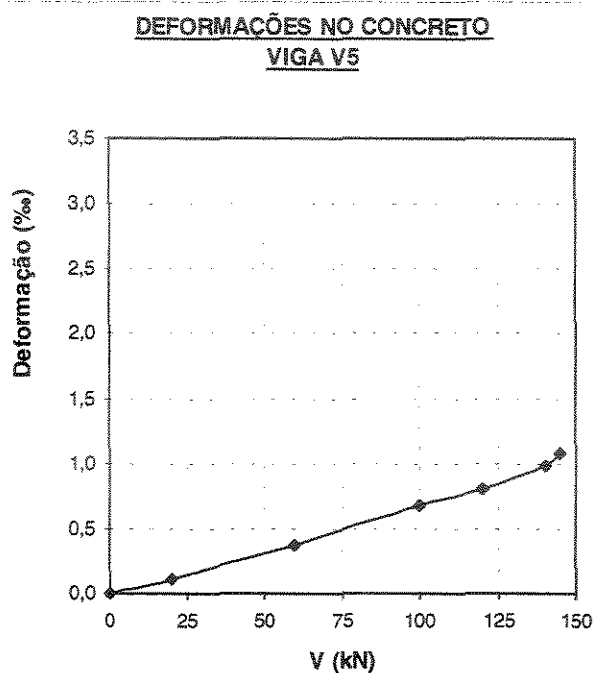


FIGURA 8.4C Deformações do concreto das vigas V5 e V6.

VIGAS V1 E V2 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

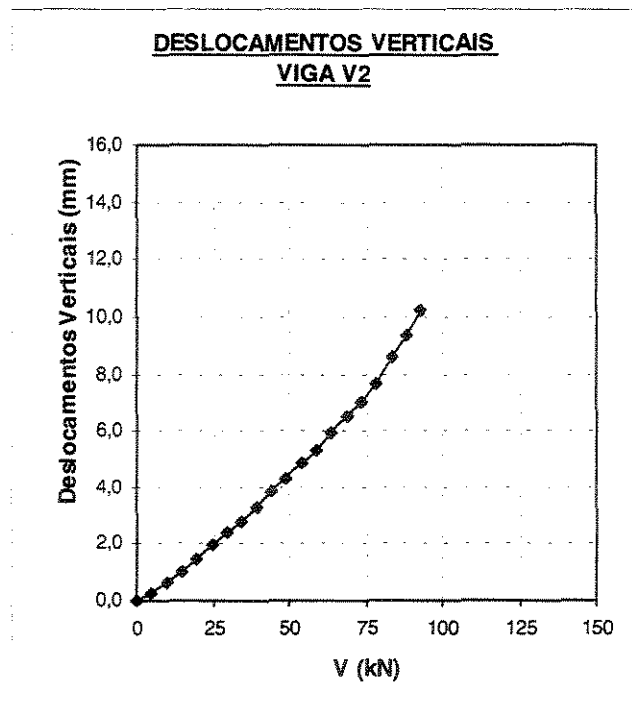
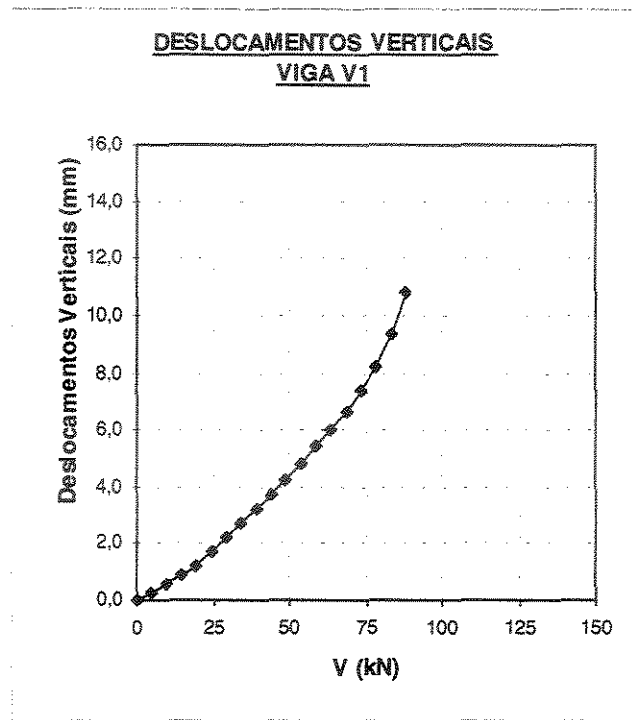


FIGURA 8.5A Deslocamentos Verticais das vigas V1 e V2.

VIGAS V3 E V4 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

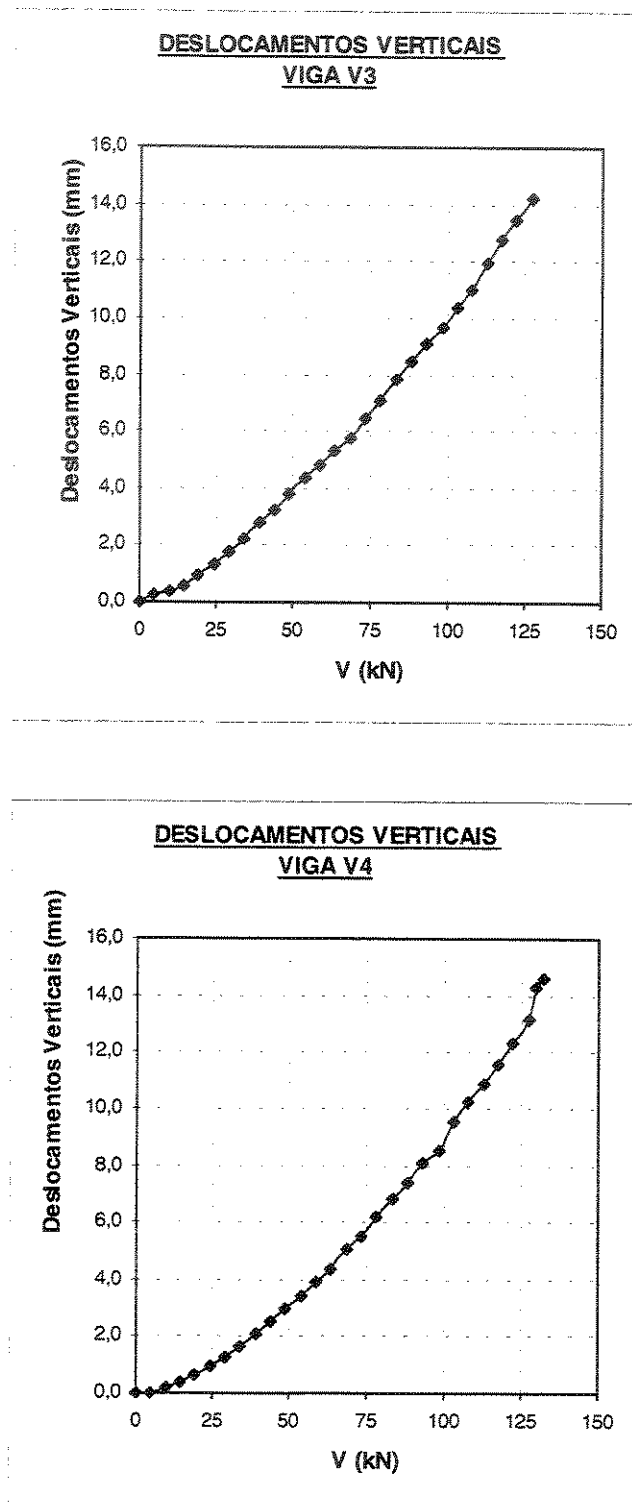


FIGURA 8.5B Deslocamentos Verticais das vigas V3 e V4.

VIGAS V5 e V6 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

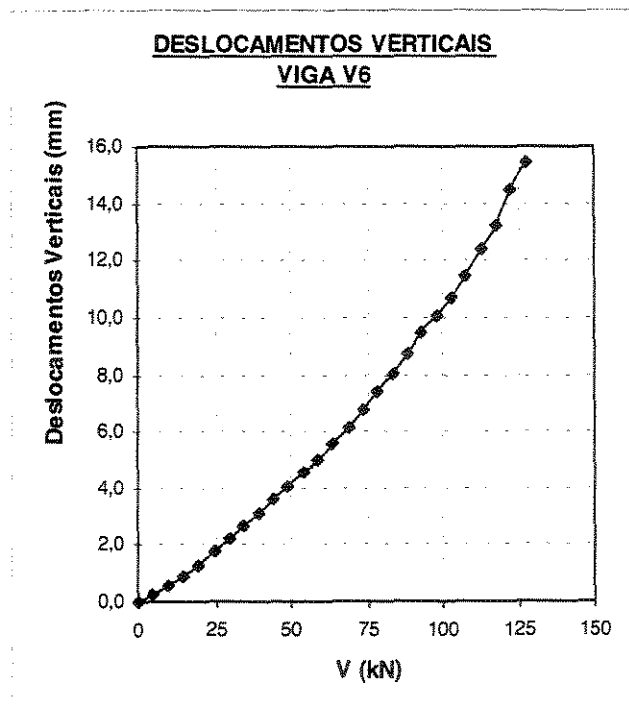
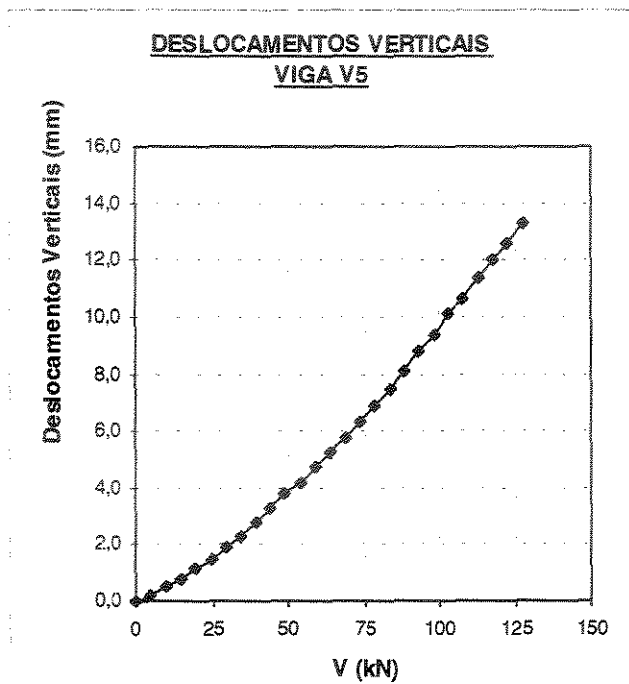


FIGURA 8.5C Deslocamentos Verticais das vigas V5 e V6.

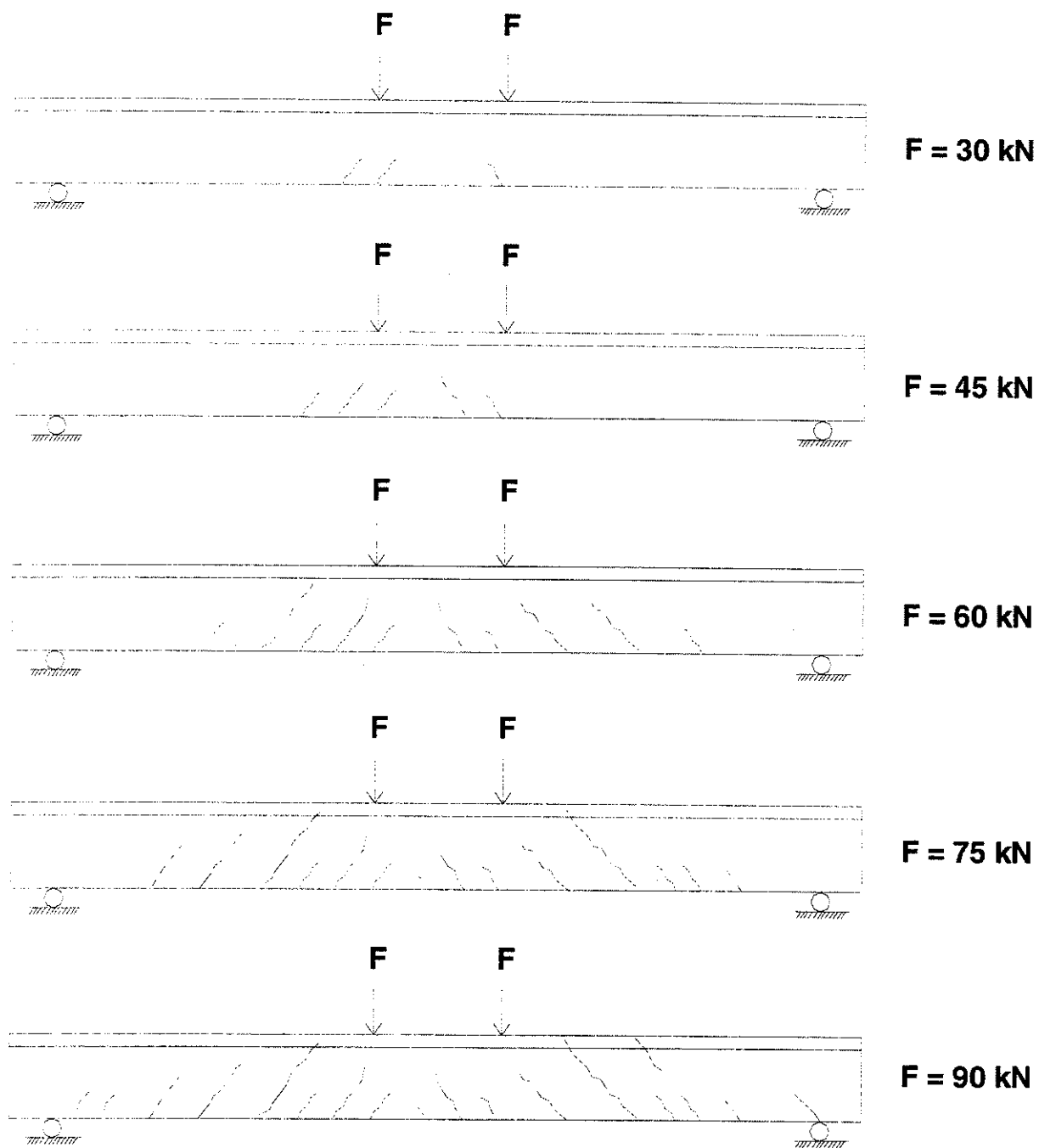


FIGURA 8.6 Evolução das fissuras da viga V1.

Nas figuras a seguir são mostrados detalhes dos ensaios de cada uma das vigas ensaiadas e dos seus modos de ruptura.

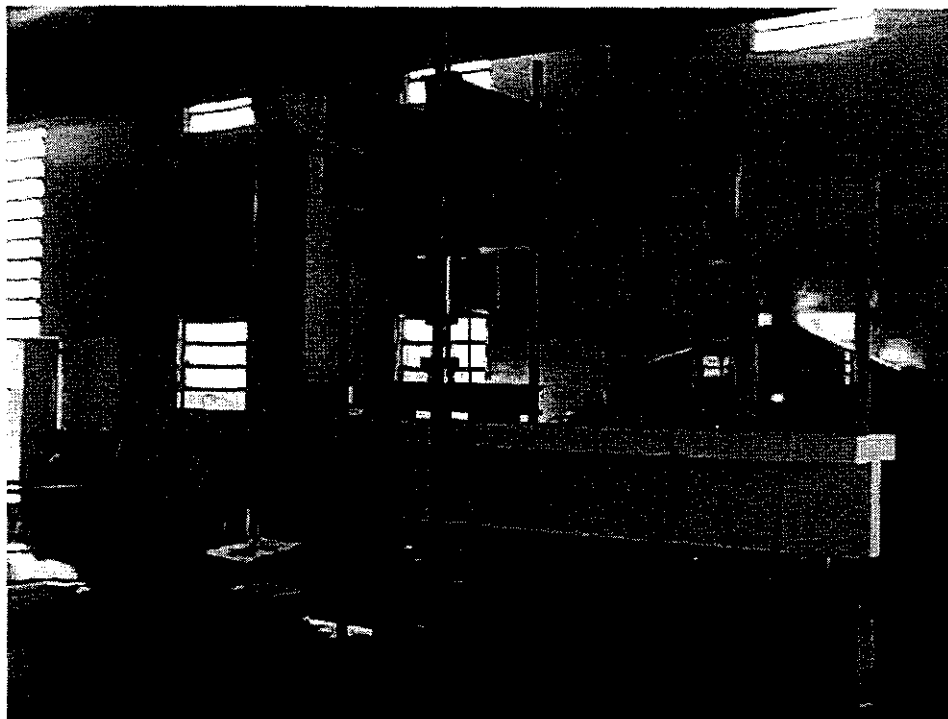


FIGURA 8.7 Viga V1 posicionada no pórtico.

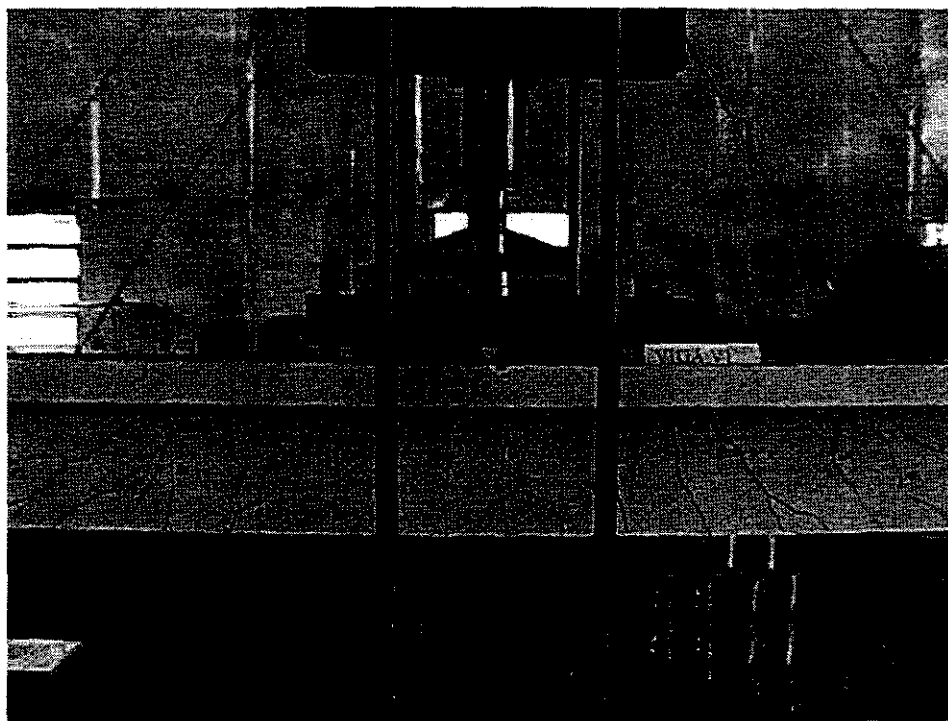


FIGURA 8.8 Panorama de fissuração da viga V1 após o ensaio.

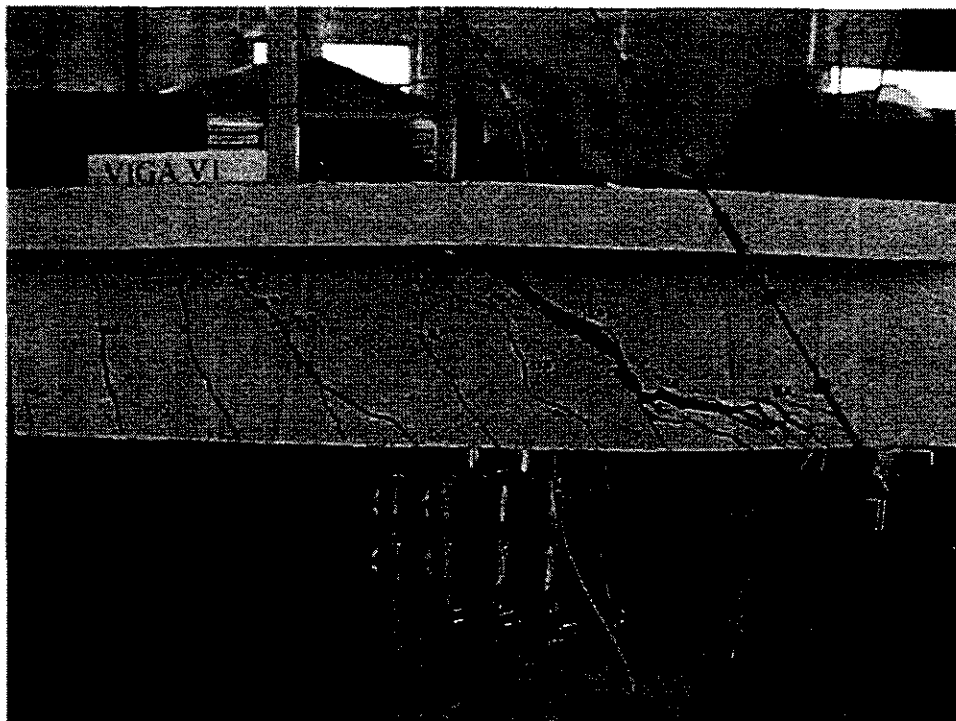


FIGURA 8.9 Detalhe da ruptura da viga V1.

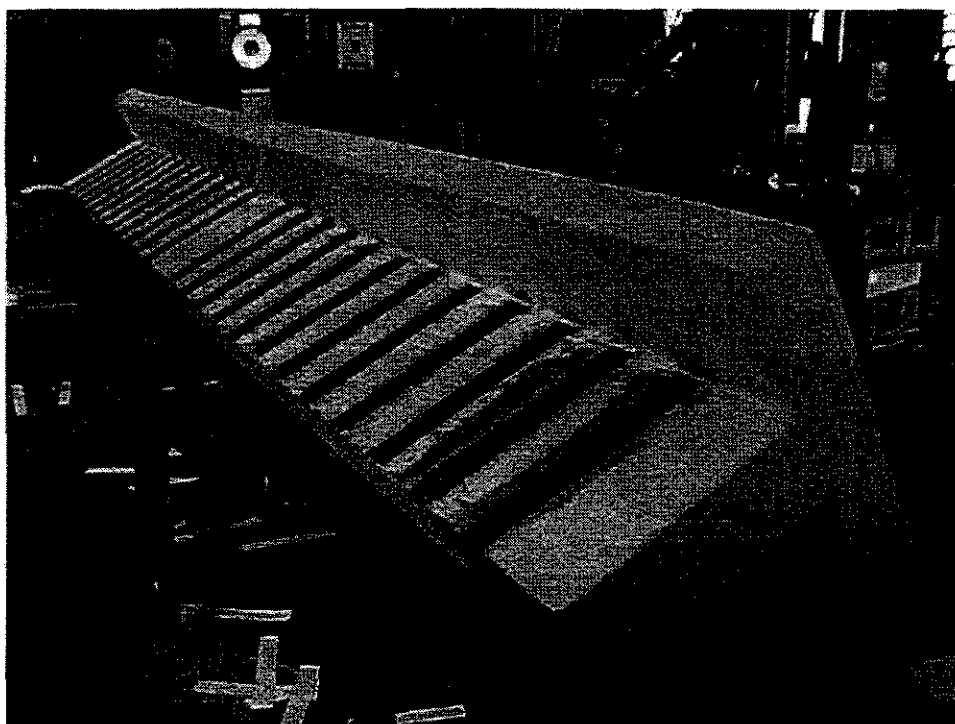


FIGURA 8.10 Viga V2 reforçada.



FIGURA 8.11 Panorama de fissuração Viga V2.



FIGURA 8.12 Detalhe do descolamento da fibra na Viga V2.

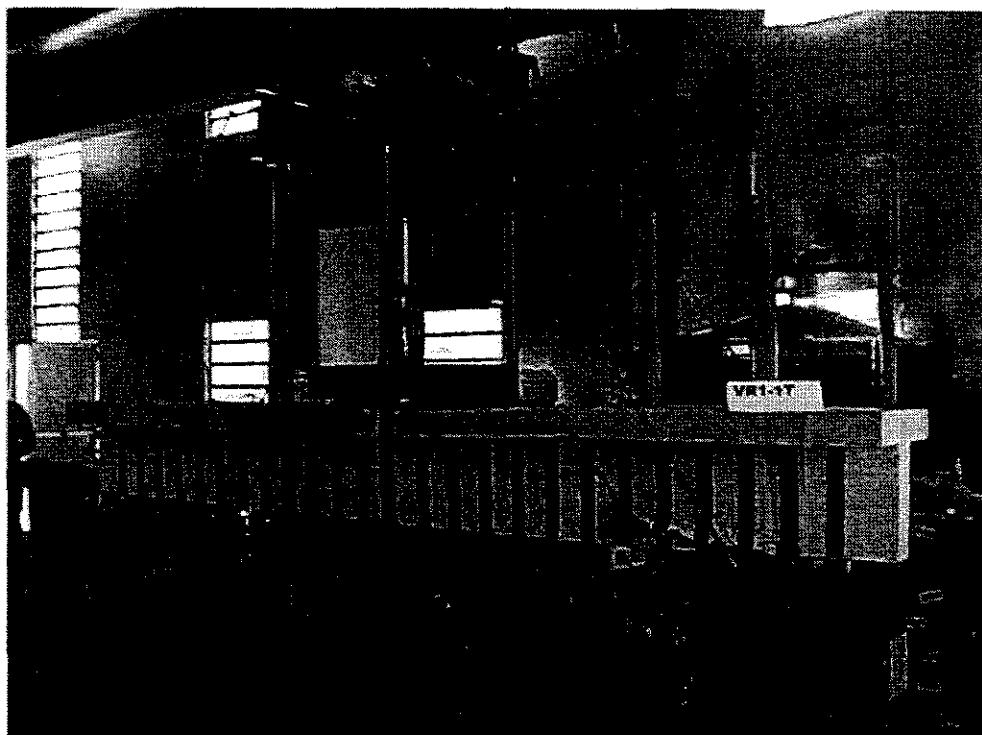


FIGURA 8.13 Viga V3 reforçada e posicionada no pórtico.



FIGURA 8.14 Panorama de fissuração da Viga V3.



FIGURA 8.15 Detalhe do descolamento da fibra na Viga V3.

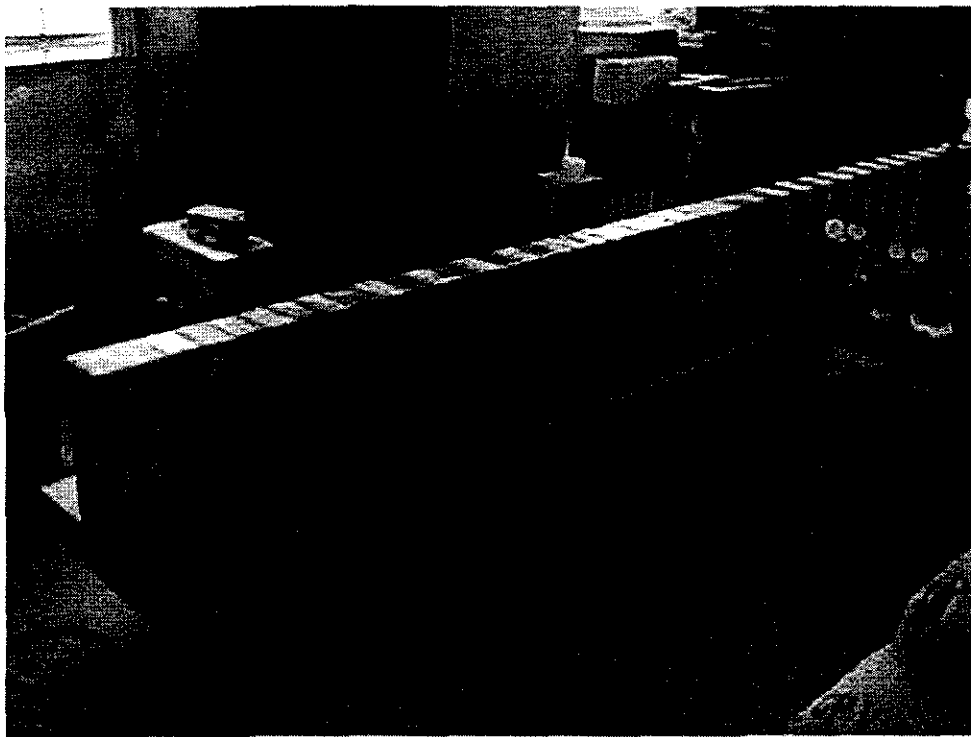


FIGURA 8.16 Viga V4 reforçada.

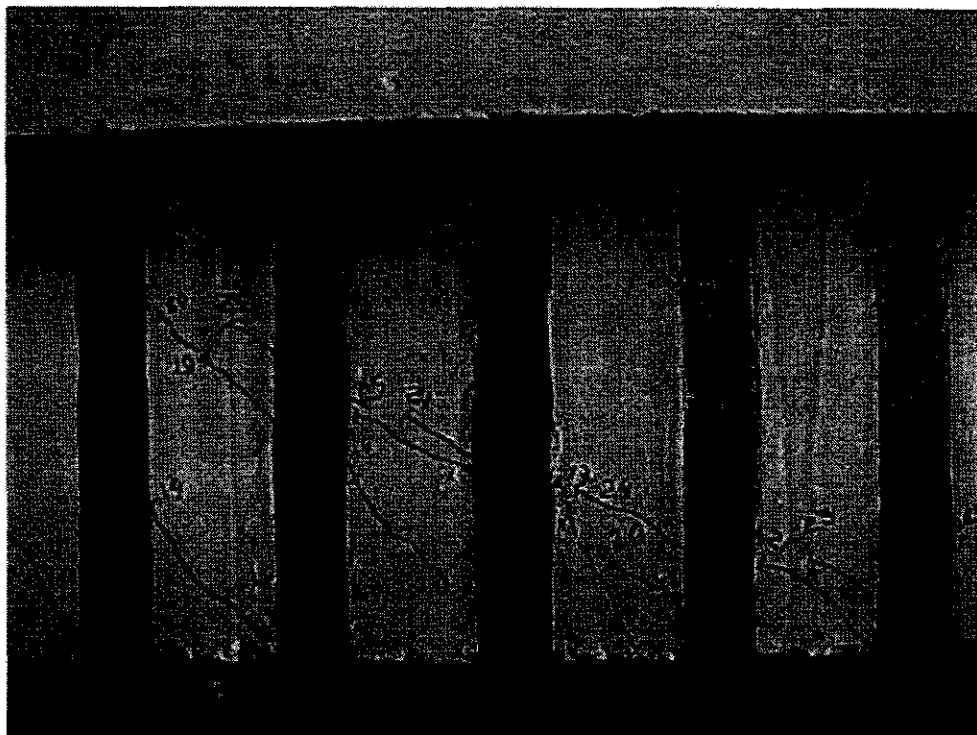


FIGURA 8.17 Panorama de fissuração da Viga V4.



FIGURA 8.18 Detalhe da ruptura e do descolamento da fibra na Viga V4.

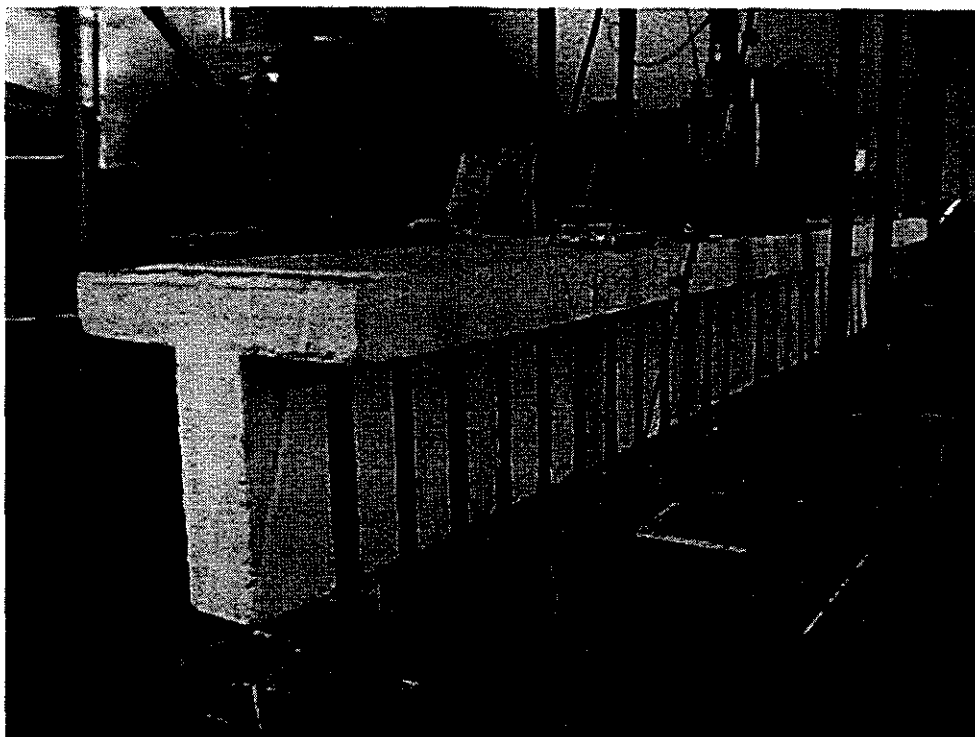


FIGURA 8.19 Viga V5 reforçada.

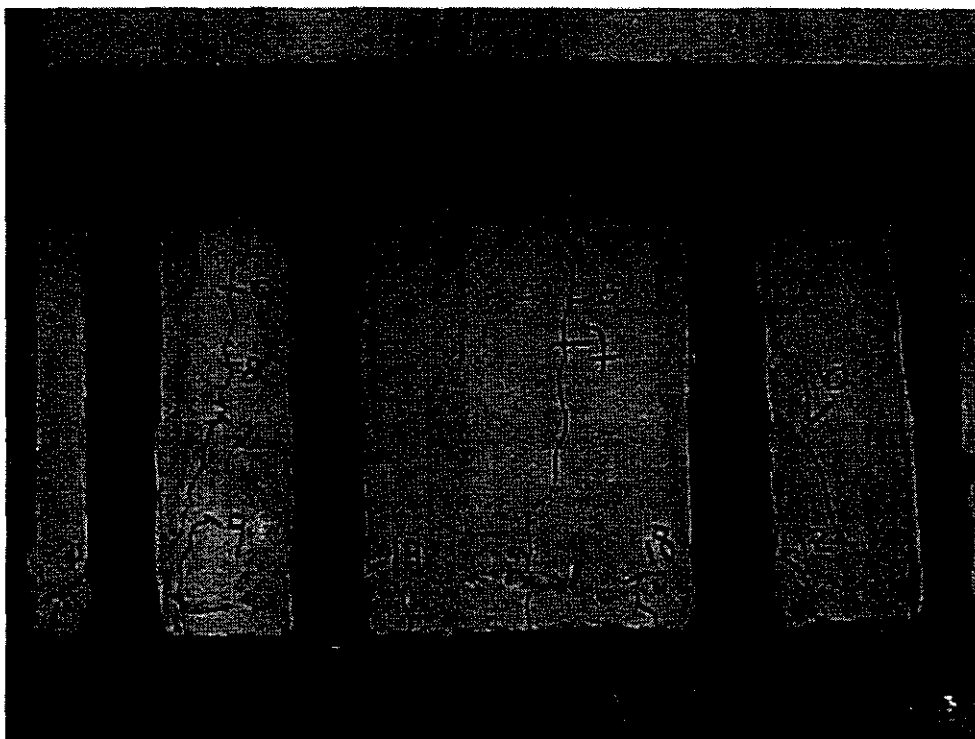


FIGURA 8.20 Panorama de fissuração da Viga V5.

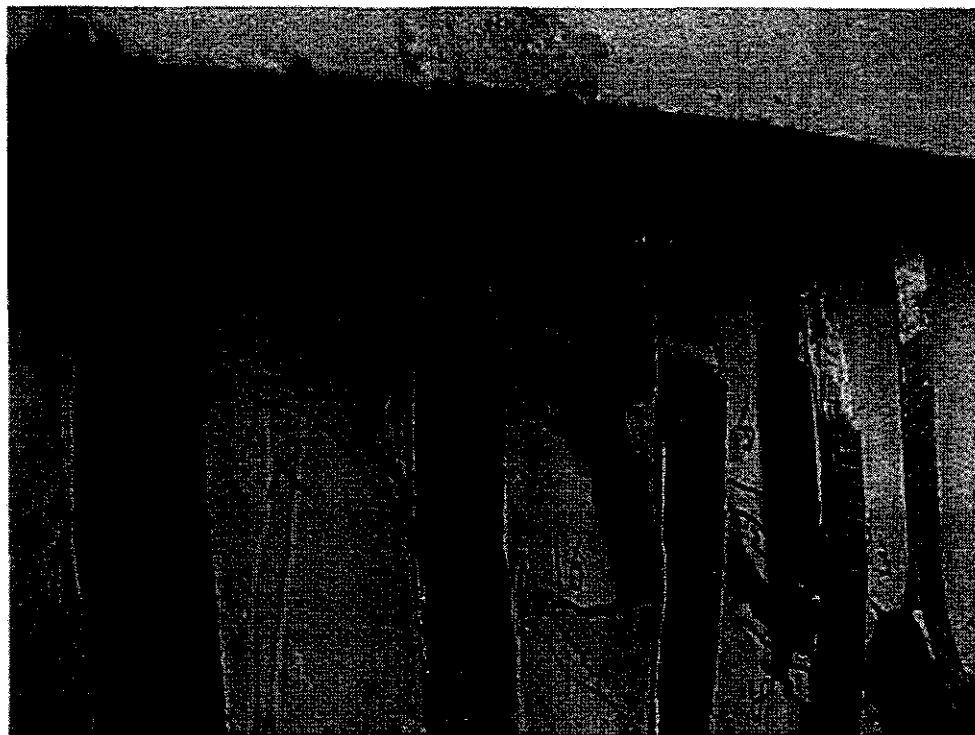


FIGURA 8.21 Detalhe da ruptura da Viga V5.

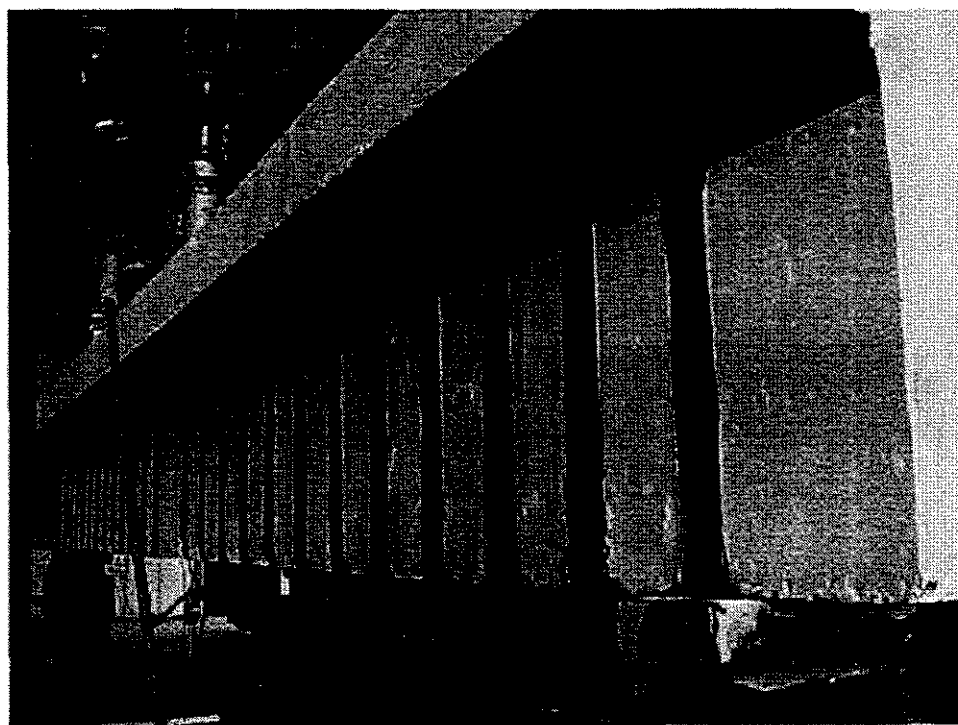


FIGURA 8.22 Viga V6 reforçada.

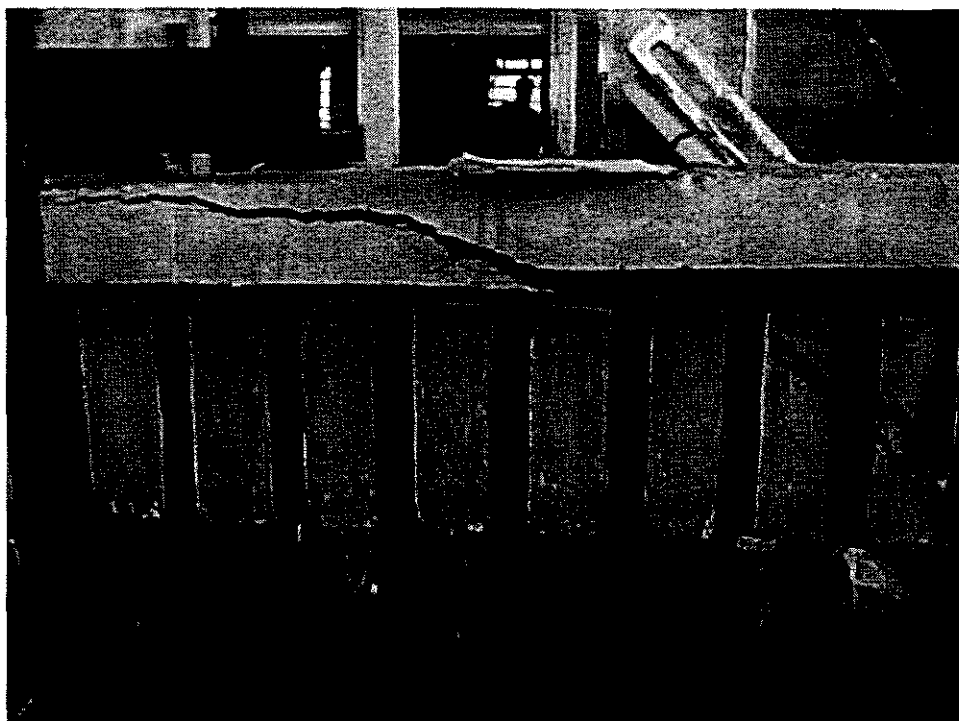


FIGURA 8.23 Panorama de fissuração da Viga V6.

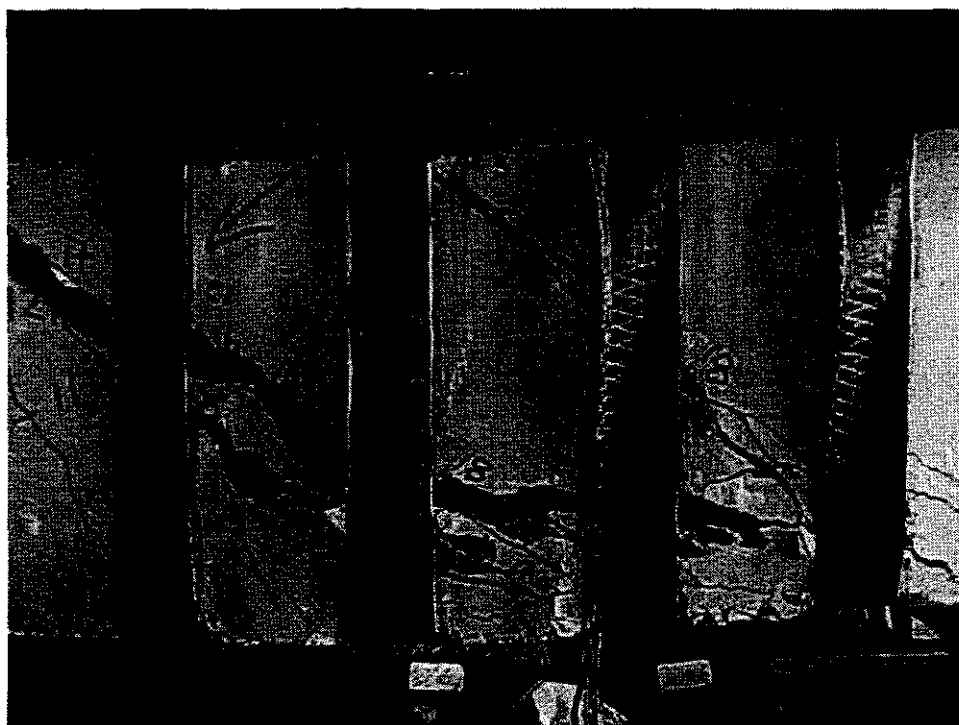


FIGURA 8.24 Detalhe da ruptura da Viga V6.

9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas tabelas 9.1 e 9.2 são comparados os resultados experimentais com os teóricos, segundo Noll et al⁽⁴⁰⁾ e segundo o ACI440-R-00⁽⁴⁾ que foram descritos nos itens 7.1 e 7.2, respectivamente.

TABELA 9.1 Comparação entre o resultado teórico, segundo Noll et al⁽⁴⁰⁾, e o experimental

Valores teóricos				Valores Experimentais			
Viga	V _{PRF} (kN)	V _{últ} (kN)	Modo de Ruptura*	V _{PRF} (kN)	V _{últ} (kN)	Modo de Ruptura*	Diferença (%)
V1	-	81,85	E	-	89,17	E	+ 8,9%
V2	69,70	151,55	D	12,18	94,03	D	- 37,95%
V3	69,70	151,55	D	43,85	125,70	D	- 17,05%
V4	73,68	155,53	R	49,60	131,45	D	- 15,48%
V5	147,36	229,21	R	73,97	155,82	D	- 32,01%
V6	147,36	229,21	R	42,78	124,63	D	- 83,92%

* E = esforço cortante;

D = descolamento do reforço;

R = ruptura da fibra.

TABELA 9.2 Comparação entre o resultado teórico, segundo ACI-440R-00⁽⁴⁾, e o experimental

Valores teóricos				Valores Experimentais			
Viga	V _{PRF} (kN)	V _{últ} (kN)	Ruptura*	V _{PRF} (kN)	V _{últ} (kN)	Ruptura*	• (%)
V1	-	81,85	E	-	89,17	E	+ 8,9%
V2	31,72	113,16	D	12,18	94,03	D	- 20,34%
V3	31,72	113,16	D	43,85	125,70	D	+ 11,08%
V4	31,72	113,16	D	49,60	131,45	D	+ 16,16%
V5	69,97	151,52	R	73,97	155,82	D	+ 02,84%
V6	69,97	151,52	R	42,78	124,63	D	- 21,57 %

* E = esforço cortante;

D = descolamento do reforço;

R = ruptura da fibra.

Enquanto que na tabela 9.3 é mostrado o acréscimo no valor da cortante última para cada uma das vigas reforçadas.

TABELA 9.3 Acréscimo na cortante última para cada uma das vigas reforçadas

Viga	V _{última} , sem reforço (kN)	V _{última} (kN)	Incremento(%)
V2	89,17	94,03	+ 5,45%
V3	89,17	125,70	+ 40,97%
V4	89,17	131,45	+ 47,42%
V5	89,17	155,82	+ 74,75%
V6	89,17	124,63	+ 39,73%

Nas figuras a seguir é mostrada uma comparação entre os valores verificados no ensaio de cada viga em seus pontos mais solicitados.

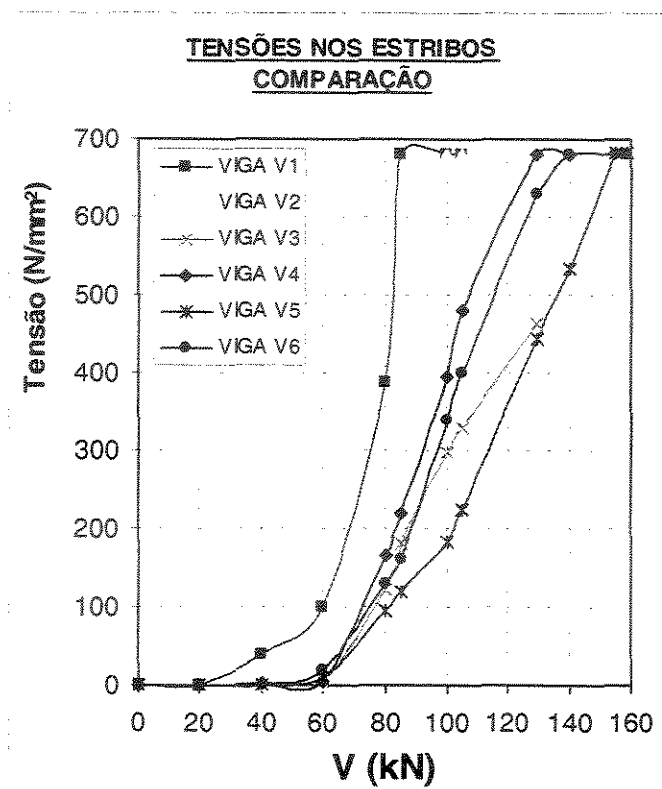


FIGURA 9.1 - Tensões nos estribos mais solicitados em cada viga.

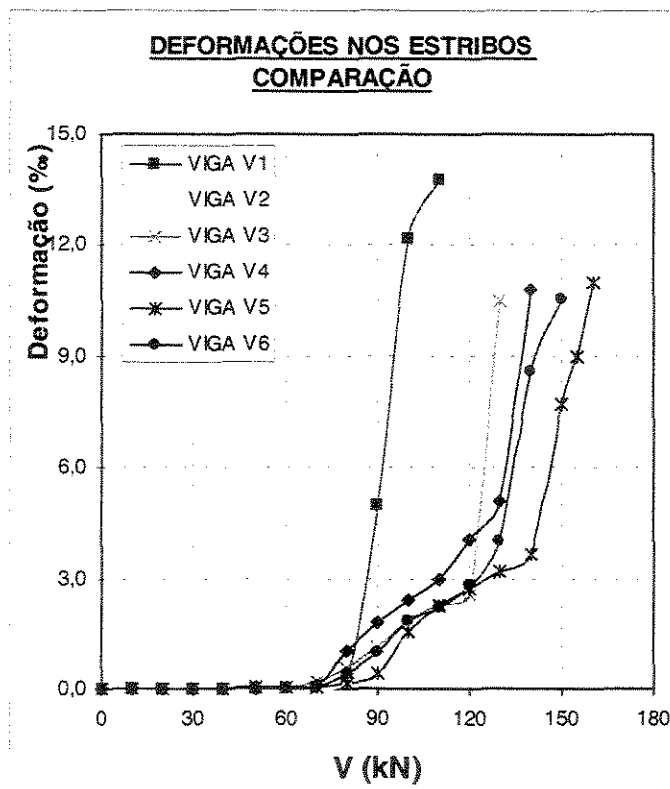


FIGURA 9.2 - Deformações nos estribos mais solicitados em cada viga.

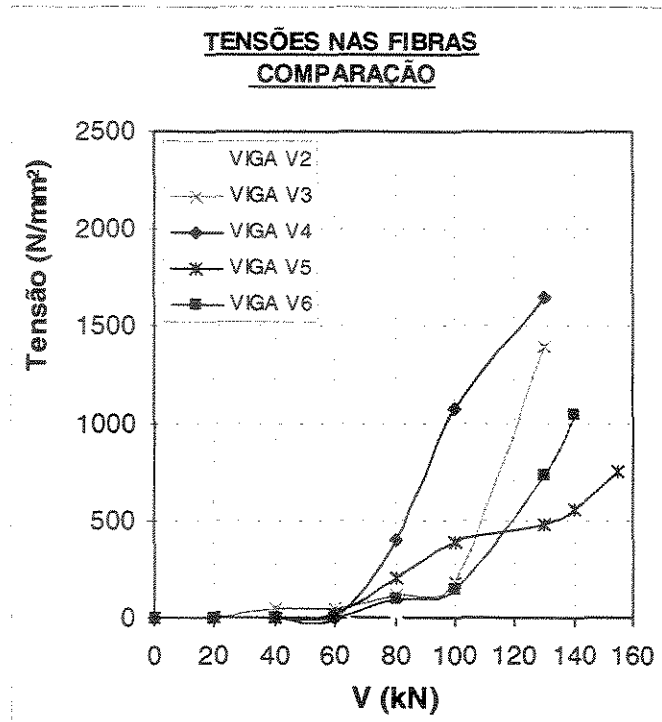


FIGURA 9.3 - Tensões nas fibras mais solicitadas em cada viga.

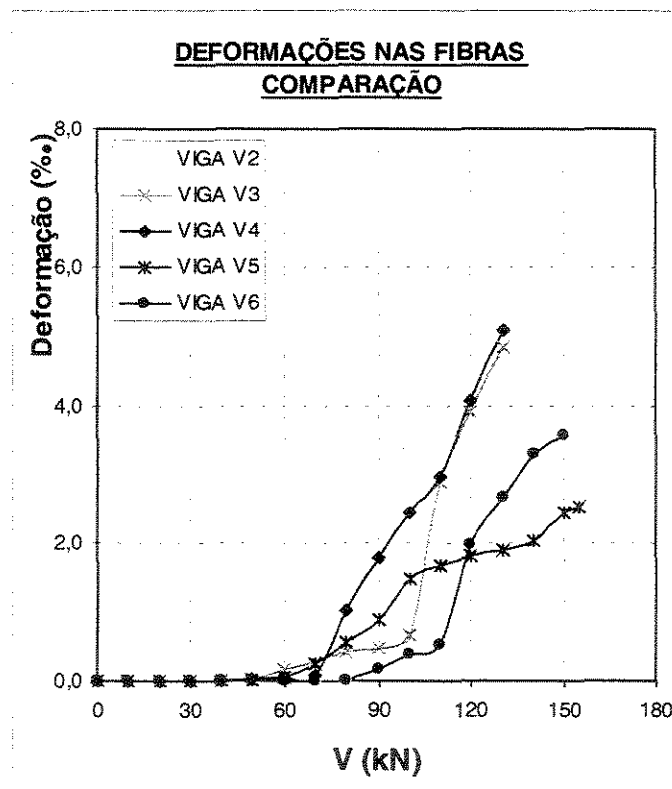


FIGURA 9.4 - Deformações nas fibras mais solicitadas em cada viga.

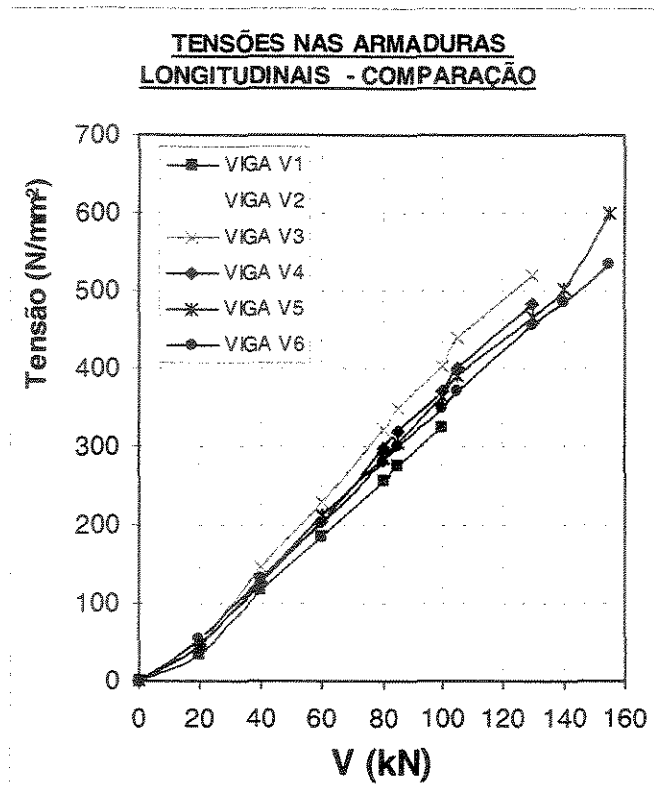


FIGURA 9.5 - Tensões nas armaduras longitudinais mais solicitadas em cada viga.

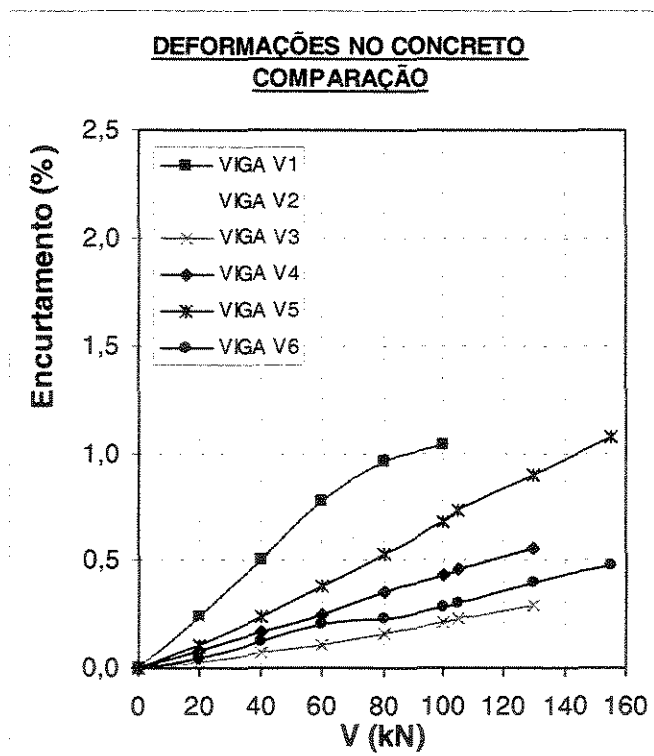


FIGURA 9.6 - Deformações no concreto em cada viga

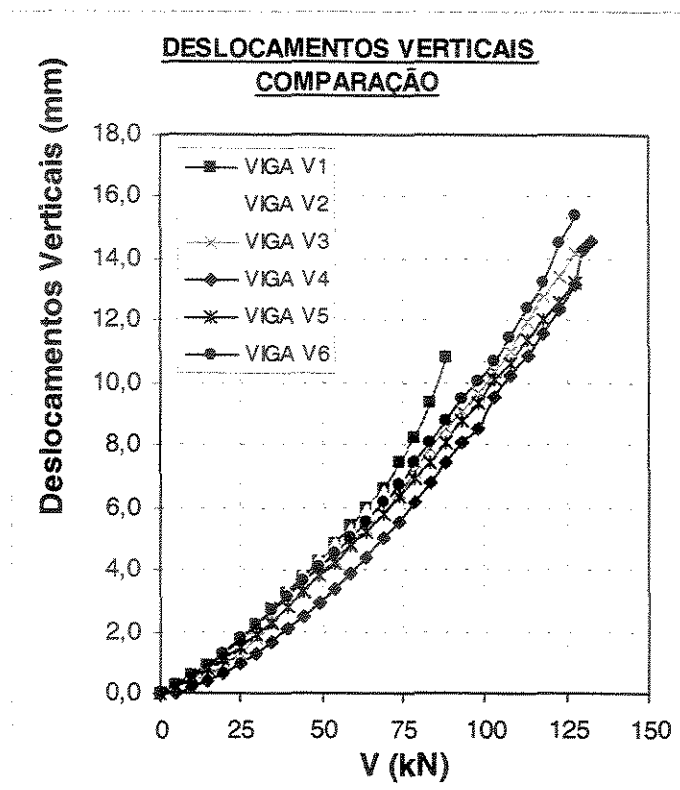


FIGURA 9.7 - Deslocamentos Verticais em cada viga.

A viga de referência V1 alcançou o Estado Limite Último por escoamento da armadura transversal, como esperado, já que sua armadura transversal foi subdimensionada.

Todas as vigas reforçadas (V2, V3, V4, V5 e V6) obtiveram carregamentos últimos maiores que o da viga de referência V1, como pode ser observado na tabela 9.3.

No que se refere à rigidez apresentada pelas vigas pode-se concluir que a rigidez da viga não foi influenciada pelo reforço lateral, e até mesmo em laço nos casos das vigas V4, V5 e V6, com a fibra de carbono. Esse efeito está evidenciado nas figuras 8.5 e 9.7.

Em relação à evolução das tensões na armadura longitudinal pode-se concluir que a adição de qualquer um dos tipos de reforço analisados, praticamente, não teve influência em seu comportamento. Pelas figuras 8.3 e 9.5 pode-se perceber a igualdade da evolução das tensões na

armadura longitudinal para todas as vigas reforçadas. Pode-se notar também que a resistência à flexão não teve qualquer incremento em função dos reforços ao esforço cortante executados em cada viga.

Observa-se através da análise das figuras 8.4 e 9.6 que as deformações no concreto, medidas na mesa de cada uma das vigas, sofreram uma sensível redução com o implemento do reforço lateral com a fibra de carbono.

No que se refere ao incremento de resistência ao esforço cortante pretendido com os reforços executados, nos casos das vigas V2 e V6 o incremento de resistência foi sensivelmente prejudicado por falhas no produto e na sua aplicação.

No caso da viga V2, a primeira a ser reforçada, o problema ocorreu devido a uma falha na especificação inicialmente passada pelo fornecedor do material de reforço. Foi utilizada uma espessura excessiva de resina epóxi e o tempo de cura não foi o correto.

Como consequência dessa aplicação equivocada o reforço da viga V2 sofreu um descolamento prematuro que comprometeu o resultado do experimento, razão pela qual a viga V3 foi executada exatamente com o mesmo tipo de reforço que a viga V2. Esse descolamento prematuro do reforço está evidenciado na figura 9.2, onde se percebe que mesmo reforçada, a viga V2 mostrou um comportamento muito similar ao comportamento da viga testemunho.

No ensaio da viga V6 ocorreu também o descolamento inesperado do reforço, mas já em uma fase bem mais avançada do ensaio se comparado com o ensaio da viga V2. Nesse caso o material utilizado pertencia a outro lote e não foi possível se avaliar a real causa para o descolamento prematuro. Aparentemente a resina não estava completamente curada e teria sido necessário um maior tempo de cura.

Da comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de arranjo do reforço verifica-se que, de acordo com o que foi previsto no item 7.1, o arranjo em “U” com ancoragem na parte inferior da mesa (viga V5) possui uma performance melhor que o arranjo em “U”

utilizado na viga V4, que por sua vez se mostrou mais eficiente que o arranjo em tiras utilizado na viga V3. Esse efeito está evidenciado na figura 9.1.

Nota-se também um incremento na resistência do composto quando utilizadas duas camadas de fibras de carbono, mas esse incremento se mostrou menor que o considerado na análise teórica, onde foi considerado que a resistência dobraria em função de se ter o dobro da espessura de fibra.

Quanto às tensões medidas nas fibras, figuras 8.2 e 9.3, nota-se que elas não apresentaram um comportamento linear em relação ao carregamento e não alcançaram o limite máximo da fibra de carbono em nenhum dos ensaios. Com isso não foi possível verificar a totalidade das propriedades do compósito.

Em relação às formulações teóricas propostas, todas as vigas reforçadas obtiveram carregamento últimos inferiores aos valores teóricos previstos na formulação teórica proposta por Nolle et al ⁽⁴⁰⁾, como mostrado na tabela 9.1.

Quanto ao dimensionamento proposto pelo ACI-440R-00 ⁽⁴⁾, os valores teóricos foram mais próximos aos valores obtidos experimentalmente, e à exceção das vigas V2 e V6 que apresentaram falhas no processo de execução de reforço, todos os outros valores esperados ficaram abaixo dos valores obtidos nos ensaios.

10 CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho, ficou evidenciado o bom desempenho do sistema de reforço ao esforço cortante com folhas flexíveis pré-impregnadas de fibra de carbono em vigas de concreto armado.

O procedimento de execução do reforço se mostrou rápido e de fácil execução, o que somado ao baixo peso próprio do material, à facilidade de moldagem das folhas às mais variadas formas do elemento a ser reforçado e ao seu desempenho mecânico faz com que esse novo método de reforço seja uma excelente alternativa aos outros modelos de reforços utilizados atualmente.

Os ganhos de resistência conseguidos, de até 75% como mostrado na tabela 9.3, evidenciam a eficiência desse tipo de reforço. Mas não há dúvida também que, a diferença encontrada entre os resultados experimentais e os resultados previstos baseados no entendimento atual do dimensionamento desse tipo de reforço evidenciam a necessidade de aprimoramento da teoria.

O método de cálculo proposto pelo ACI-440R-00⁽⁴⁾ se mostrou mais próximo ao obtido experimentalmente do que o proposto por Nollet et al⁽⁴⁰⁾, mas é necessário ainda um aprimoramento da teoria principalmente no que se refere à determinação do critério de cálculo para a ancoragem do reforço, já que em todas as vigas reforçadas deste trabalho ocorreu o descolamento do reforço.

Além disso, se faz necessário um estudo mais profundo da influência do acréscimo de camadas sobre o desempenho do reforço, considerando principalmente a interação entre as camadas em função do impregnante utilizado.

Fica evidente também, a necessidade de um maior número de pesquisas e trabalhos visando definir as características essenciais para as resinas epóxis utilizadas nesse tipo de reforço, assim como melhor definir seu processo de aplicação (espessura de aplicação, tempo de cura e efeito da temperatura e umidade no local, entre outros).

Os resultados obtidos neste trabalho fazem parte de uma série de estudos sobre o comportamento de vigas de concreto reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibras em desenvolvimento no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. Espera-se que este trabalho colabore para o entendimento do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas ao esforço cortante com PRF e sirva de incentivo para novos trabalhos nesta área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AL-SULAIMANI, G. J., SHARIF, A., BASUNBUL, I. A.,BALUCH, M. N. ; “ Shear Repair for Reinforced Concrete by Fiberglass Plate Bonding” . **ACI Structural Journal**, Vol.91, N°. 3, p458-464, July-August 1994.
- 2 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “Standard Specifications for Repairing Concrete with Epoxy Mortars.” **ACI 5034**. American Concrete Institute. 1979.
- 3 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440R-96- “State – of – the – art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures”, **ACI-440R-96**, USA, 1996.
- 4 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440R-00- “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, **ACI 440R-00**, USA, 2000.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” . **ASTM/D 3039**, American Society for Testing and Materials, August 1995.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “Standard Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete” . **ASTM/C 881**, American Society for Testing and Materials, March 1990.

- 7 ANDO, T.; HOSHIJIMA T.; YAGI, K.; "Strengthening and Repair of Existing Structures with Carbon Fiber Sheet". In : **Anais of 5th Japan International SAMPE Symposium**, Tokyo, 1997.
- 8 ARDUINI, M.; NANNI, A. "Parametric Study of Beam with Externally Bonded FRP Reinforcement". **ACI Structural Journal**, Vol.94, N°. 5, p493-501, September-October 1997.
- 9 ARDUINI, M.; NANNI, A.; TOMMASO, A. D.. "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams". **ACI Structural Journal**, Vol.94, N°. 4, p363-370, July-August 1997.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. "Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado". **NBR6118-82**, Rio de Janeiro, 1982.
- 11 BEBER, A. J.; CAMPOS, A. F.; CAMPAGNOLO, J. L.. "Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Lâminas de Fibra de Carbono". In : **Anais do V Congresso Iberoamericano de Patologia de Las Construcciones**, p855-862, Montevideu, 1999.
- 12 CÁNOVAS, M. F. "Patologia y Terapéutica del Hormigondo". **Editorial Dossat**, Madrid, 1984.
- 13 CHAJES, T.A.; THOMS'ON, J.; TARANTINO, B. "Reinforcement of Concrete Structures using Externally Bonded Composite Materials" . In : **Anais of Second International Symposium on Non Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS2)**, August 23-25, Ghent, Belgium, 1995.
- 14 CLARKE, J. L. e WALDRON, P. "The Reinforcement of Concrete Structures With Advanced Composites". **The Structural Engineer**. v.74, n.17, p. 283-288, sep. 19

- 15 COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. "Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for up-grading (Re-design)", **Bulletin d'Information n. 162**, Lausanne, 1983.
- 16 CORDEIRO, T.J.R.B.; COSTA, J.P. "Utilização de Folha Flexível de Fibras de Carbono Pré-Impregnadas no Aumento da Resistência e Ductilidade de Elementos Estruturais de Betão Armado". In : **Anais das Jornadas Portuguesas de Engenharia Estrutural**, Porto, Portugal, 1998.
- 17 DOLAN, B. E. , HAMILTON, H. R. e DOLAN, C. W. "Strengthening with Bonded FRP Laminate". **Concrete International**. v.20, n. 6, p.51-56, june. 1998.
- 18 FORTES, A. S.; PADARATZ, I. J. . "Vigas de Concreto Armado reforçadas com Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) ". In : **Anais do Instituto Brasileiro do Concreto**, pg 77, Fortaleza, 2000.
- 19 FYFE, E. R., GEE, D. J. e MILLIGAN, P. B. "Composite Systems for Seismic Applications". **Concrete International**. v.20, n. 6, p.31-34, june. 1998.
- 20 GALLARDO, G. O.; GALVEZ, L. H. 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 do Concreto**, pg 145, Fortaleza, 2000.
- 21 GALLO, M. ; SIQUEIRA, J. A. S.; VIEIRA, L. P.; BOMCHAKIER, B.; SCHEINER, A. P.; "Reforço Estrutural com Fibra de Carbono para Recuperação de Escada de Serviço da Estação Vila Madalena do Metrô de São Paulo". In : **Anais do Instituto Brasileiro do Concreto**, Salvador, Brasil, 1999.

- 22 GÓMEZ, W.; HOUSSAM, A. T. . "Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composite Sheets". **Cement and Concrete Composites**, nº19, p351-358. Inglaterra, 1997.
- 23 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 de Colagem externa de Mantas Flexíveis de Fibras de Carbono (PRFC) ". In : **Anais do Instituto Brasileiro do Concreto**, pg 76, Fortaleza, 2000.
- 24 HELENE, P.R.L. "Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto" **Editora PINI**, São Paulo, 1992.
- 25 HUSSAIN, M.; SHARIF, A.; BASUNBUL, I. A.; BALUCH, M. H.; AL-SULAIMANI, G. J. " Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by Steel Plates". **ACI Structural Journal**, Vol 92, Nº 1, p14-22, January-February 1995.
- 26 IMBROGNO, M. e APICELLA, F.. "Close in on Approval". **Civil Engineering**. v.70, n. 2, p.42-45, February 2000.
- 27 KHALIFA, A. E NANNI, A. . "Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CRFP Composites" . **Cement & Composites**, Vol 22, p165-174, May 1999.
- 28 KOGA, M.; FUJII, K. "Aplication of CRS Method – Carbon Fiber Retrofitting System for Concrete Structure". 7th **Technical Research Symposium on Inspection and Repair for Structures**, Tokio, 1995.
- 29 M'BAZAA, I.; MISSIHOUN, M. ; LABOSSIERE, P. "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets". In : **Anais of First International Conference on Composites in Infrastructure ICCI'96**, p. 15-17, Tucson, Arizona, USA, January, 1996

- 30 MALEK, A. M.; SAADATMANESH, H.; "Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates". **Journal of Composites for Construction**, p158-164, November 1998.
- 31 MALEK, A. M.; SAADATMANESH, H.; "Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Web-Bonded Fiber-Reinforced Plastic Plates". **ACI Structural Journal**. Vol. 95, N°4, p391-399, July-August 1998.
- 32 MALEK, A. M.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. . "Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End". **ACI Structural Journal**, Vol. 95, N°1, p142-152, January-February 1998.
- 33 MEIER, U. , KAISER, H. P. " Strengthening of Structures with CFRP Laminates ", **Proceedings of Conf. On Advanced Composites of Materials in Civil Engrg. Struct.**, ASCE, p. 224-232, 1991.
- 34 MEIER, U.; MEIER, H.; SCHWEGLER, G.. "Strengthening of Structures with CRFP Laminates: Research and Applications in Switzerland". **Advanced Composite Materials in Bridges and Structures**, p243-251, 1992.
- 35 MIYAUCHI, K.; INOUE, S.; NISHIBAYASHI, S.; TANAKA, Y. " Shear Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with CRFP Sheet". **Japan Concrete Institute**, Vol 19, p97-104, 1997.
- 36 MUSZYNSKI, L. C.; SIERAKOWSKI, R. L. ."Fatigue Strength of Externally Reinforced Concrete Beams". **Materials for the New Millennium**, Procedure of the Materials Engineering Conference. Vol 1, p648-656, 1996.
- 37 NANNI, A. . "Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement". **Concrete International**, p22-26, June - 1995.

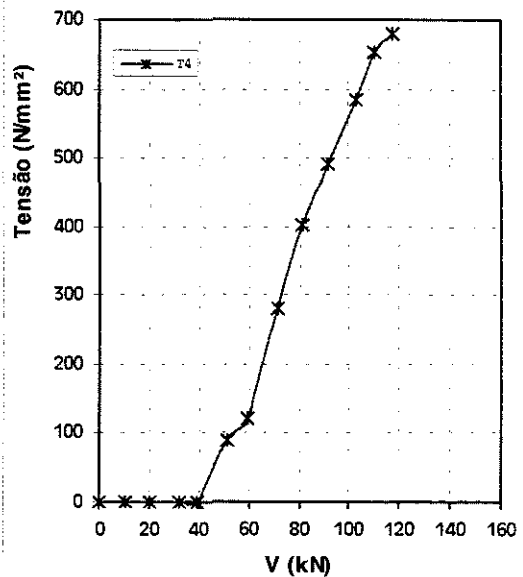
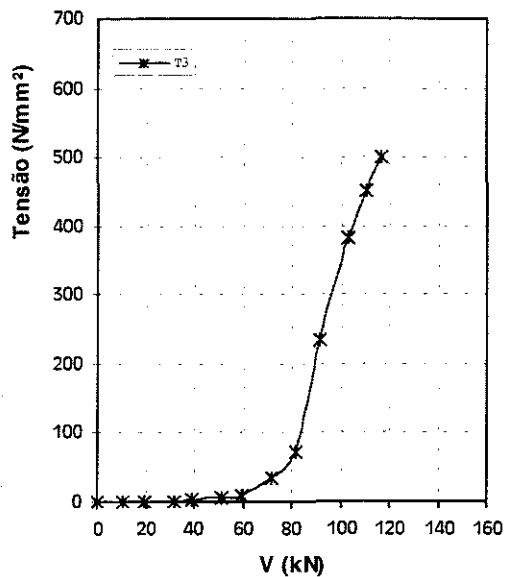
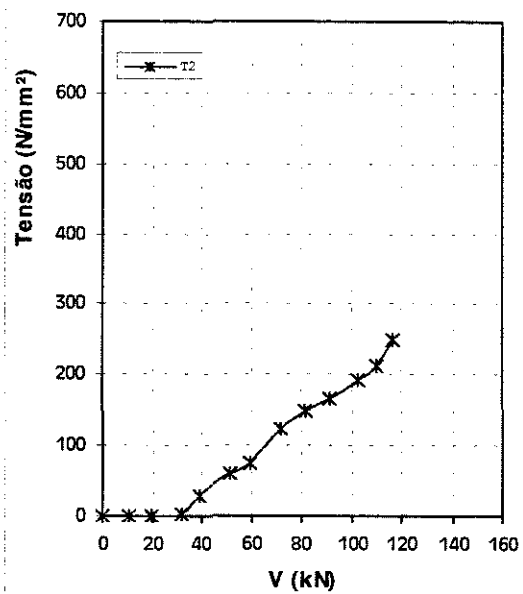
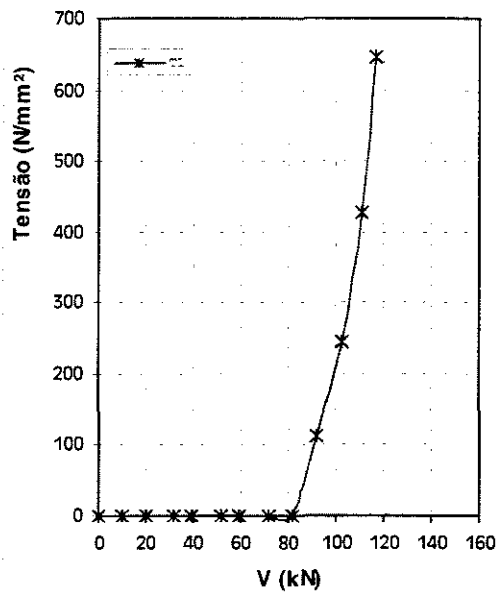
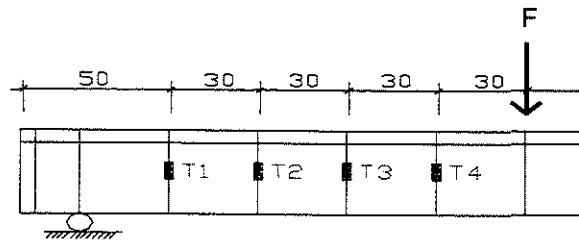
- 38 NANNI, A. . "CRFP Strengthening ". **Concrete International**, p19-23, June - 1997.
- 39 NEALE, K. W. e LABOSSIERE, P. . "Fiber Composite Sheets in Cold Climate Rehab". **Concrete International**. v.20, n. 6, p.22-24, june. 1998.
- 40 NOLLET , M. J. ,CHAALLAL, O., PERRATON, D. . "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced-Plastic Plates: Design Guidelines for Shear and Flexure" . **École de Technologie Supérieure**, NRC Montreal, Canadá, p692-703, February , 1998.
- 41 NORRIS, T.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. "Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets". **Journal of Structural Engineering**, V.123, N.7, p903-911, July 1997.
- 42 PICARD, A.; MASSICOTTE, B.; BOUCHER, E. ."Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Composite Materials: Theoretical Study". **Composite Structures**, Vol 33, p63-75, 1995.
- 43 RITCHIE, P., THOMAS, D., LU, L. CONNELLY, G. "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics". **ACI Structural Journal**, Vol.88, N°.4, p490-500, July-August 1991.
- 44 ROBERY, P.; INNES, C. "Carbon Fibre Strengthening of Concrete Structures". **In : Anais of '97 Structural Faults and Repair**, Portugal, 1997.
- 45 ROSS, C. A.; JEROME, D. M.; TEDESCO, J. W.; HUGHES, M. L. ."Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates". **ACI Structural Journal**, Vol.96, N°.2, p212-220, March-April 1999.

- 46 ROSTASY, F. S., HANKERS, C. RANISH, E. H. "Strengthening of R/C and P/C Structures with Bonded FRP Plates". **Proc. Conf. on Adv. Comps. Mat. In Civ. Engrg. Struct.**, ASCE, New York, N.Y., 253-263, 1991.
- 47 SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R.; " Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams". **Concrete Internacional**, p65-70, March - 1990.
- 48 SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R.; "RC Beams Strengthened with GRFP Plates - Experimental Study". **Journal of Structural Engineering**, Vol 117, N° 11, p3417-3431, November 1991.
- 49 SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R.; "RC Beams Strengthened with GRFP Plates - Analysis and Parametric Study". **Journal of Structural Engineering**, Vol 117, N° 11, p3434-3455, November 1991.
- 50 SAKAI, K., UCHIDA, Y., OKAMOTO, J., UOSHITA, H. KOMATSU, K. "Flexural Performance of a Steel Reinforced Concrete Beam Reinforced with Carbon Sheet". **Proc. 47th Meeting of the Japan Soc. of Civ. Engrs.**
- 51 SHEHATA, I. A. M. ; CERQUEIRA, E. C.; TRAVESSA, C. M. P.; SHEHATA, L. C. D. . "Comportamento e Dimensionamento de Vigas Reforçadas à Flexão e ao Cortante com Lâminas de Fibras de Carbono". **In : Anais do Instituto Brasileiro do Concreto**, pg 62, Fortaleza, 2000.
- 52 SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T.; "Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto". **Editora PINI**, São Paulo, 1998.
- 53 SWAMY, R. N., HOBBS, B. e ROBERTS, M.. "Structural Behavior of Externally Bonded, Steel Plated RC Beams After Long-term Exposure". **The Structural Engineer**. v.73, n.16, p.255-261, aug. 1995.

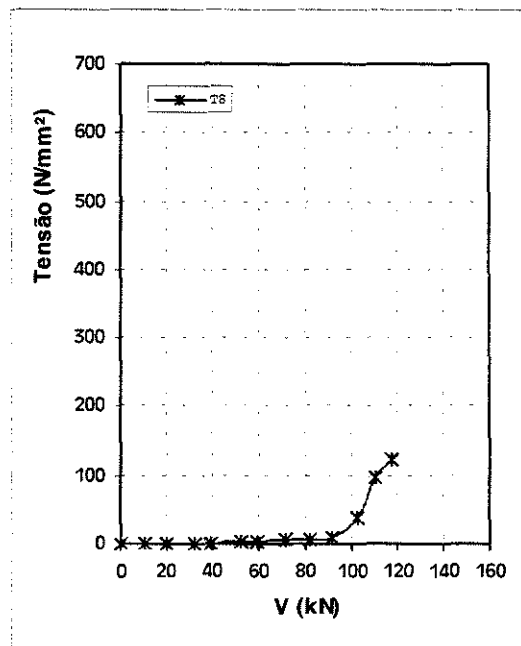
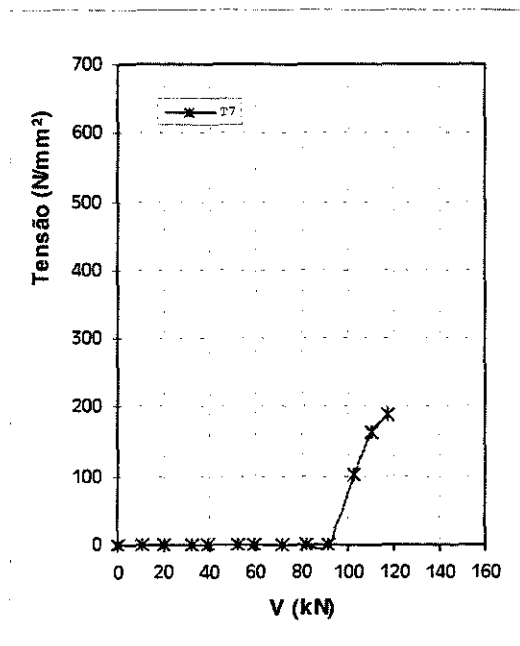
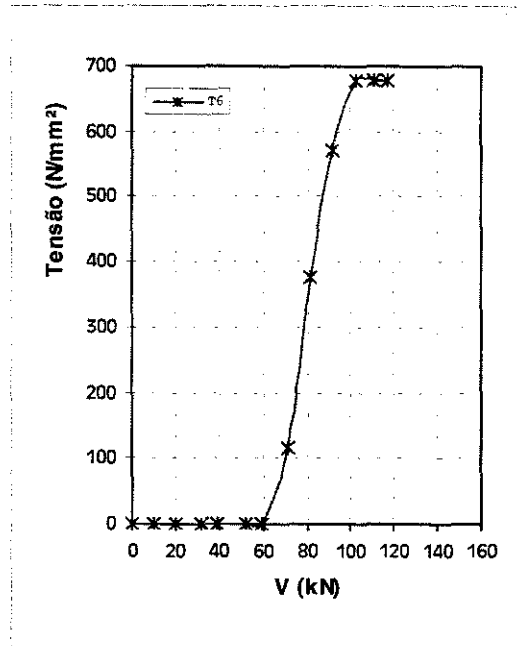
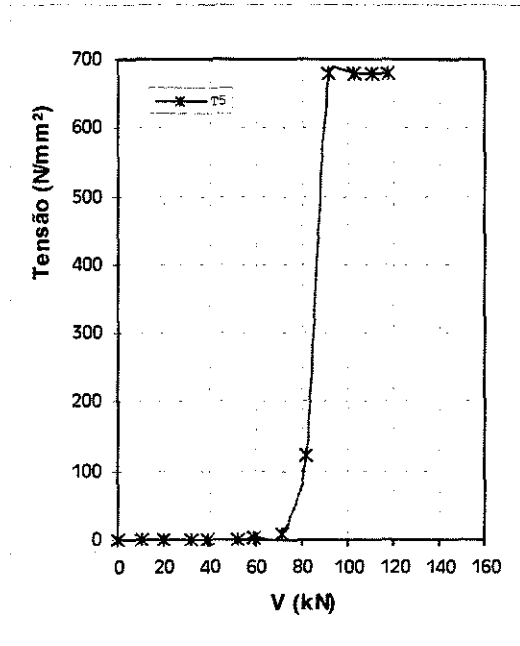
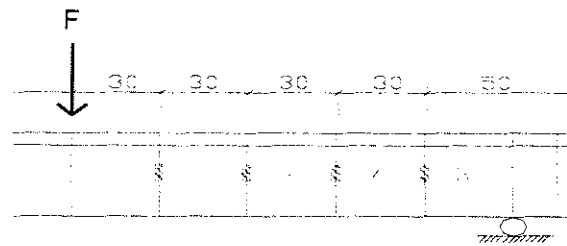
- 54 THOMAS, J.; KLINE, T. "Strengthening Concrete with Carbon Fiber Reinforcement", **Proceedings of the 45th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers**, 5, 1990, pp. 580-581.
- 55 THOMAZ, E. "Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação". Editora **PINI/EPUSP/IPT**, 1989.
- 56 TRIANTAFILOU, T. C; " Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites". **ACI Structural Journal**, V.95, N° 2, p107-115, March-April 1998.
- 57 TRIANTAFILLU, T., PLEVRIS, N. " Post Strengthening of R/C Beams with Epoxy Bonded Fiber Composite Materials". **Proc. Conf. on Advanced Compos. Mat. In Civil Engrg. Struct.** ASCE, New York, N.Y. 245-256, 1991.
- 58 UJI, K. "Effects of Carbon Fibers on Shear Load Bearing Mechanisms". **Proceedings of the 45th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers**, 5, 1990, pp. 580-581.
- 59 UJI, K. "Improving Shear Capacity of Existing Reinforced Concrete Members by Applying Carbon Fiber Sheets". **Proceedings of the Japan Concrete Institute**, Vol. 14, 1992.

ANEXO – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

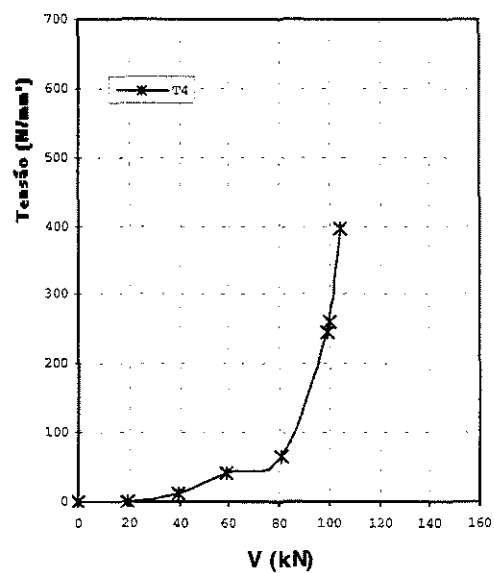
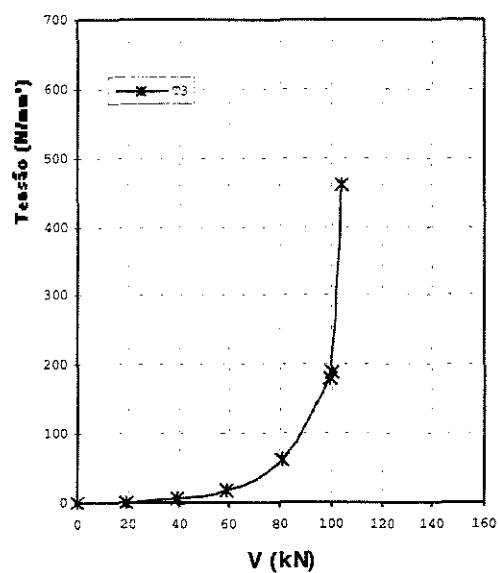
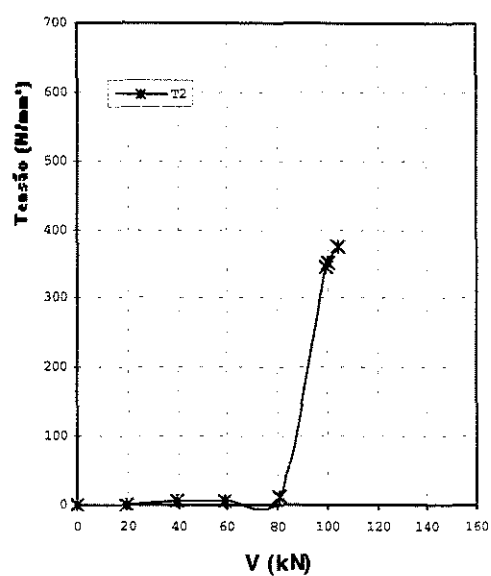
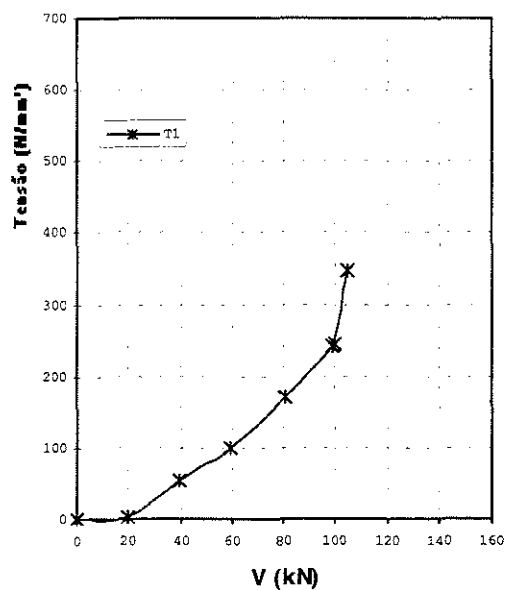
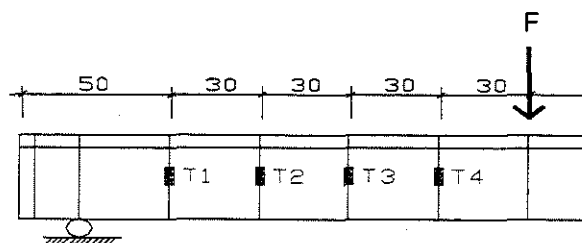
VIGA V1 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO ESQUERDO



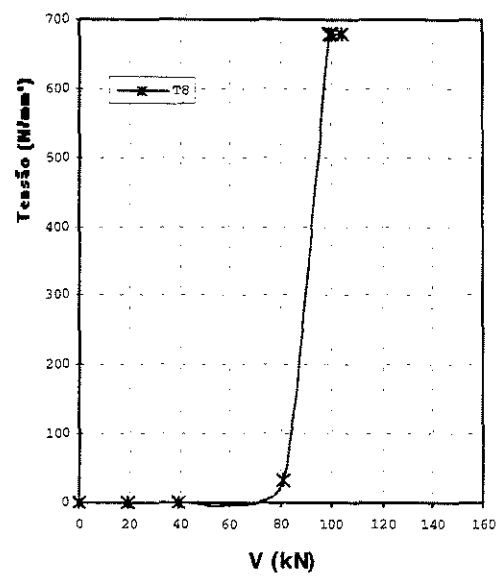
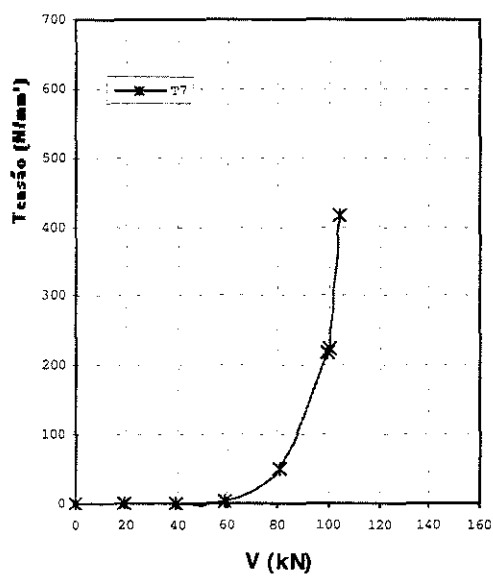
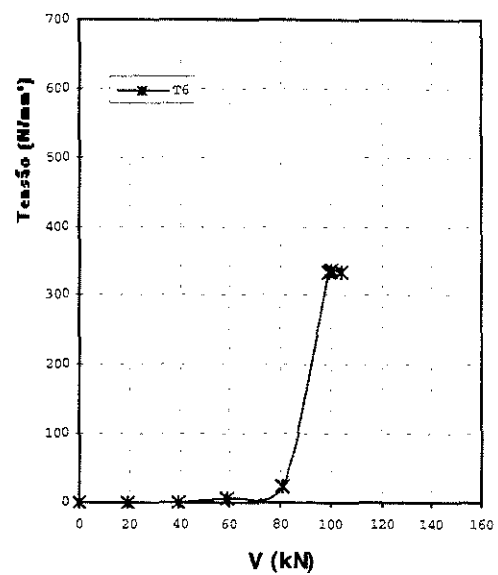
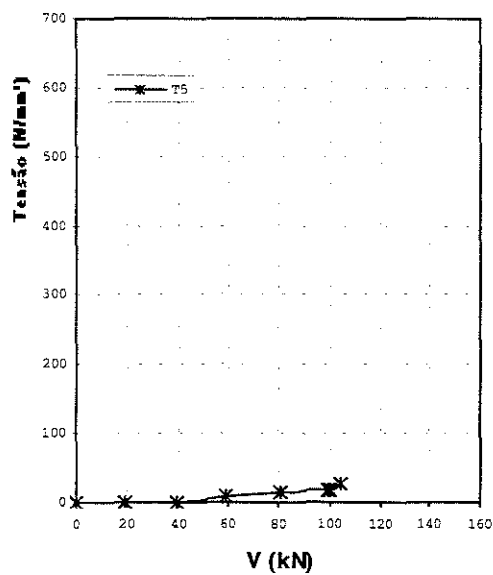
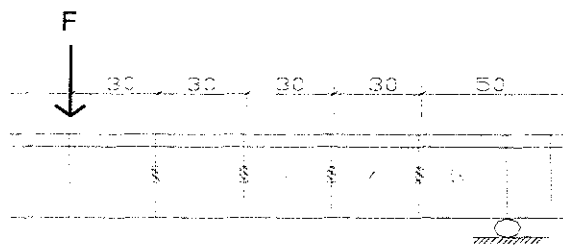
VIGA V1 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO DIREITO



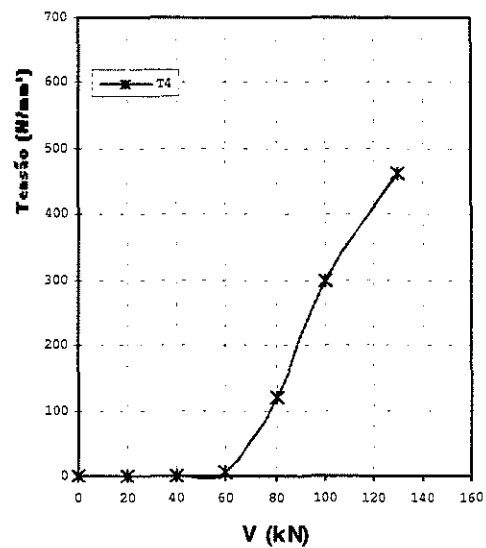
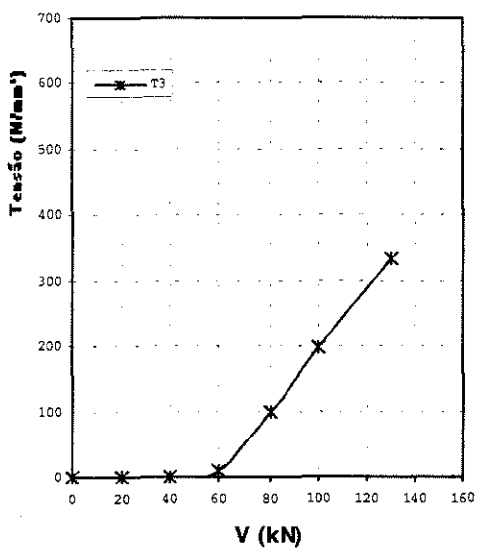
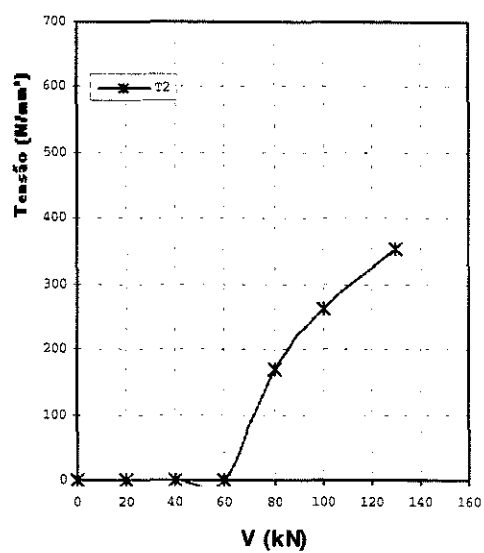
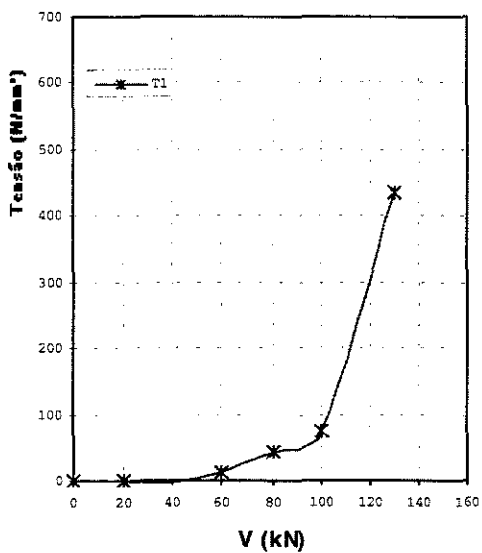
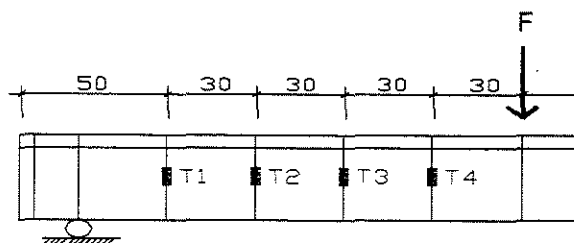
VIGA V2 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO ESQUERDO



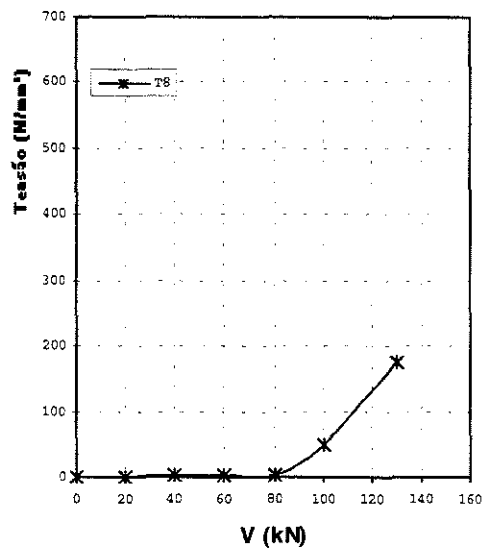
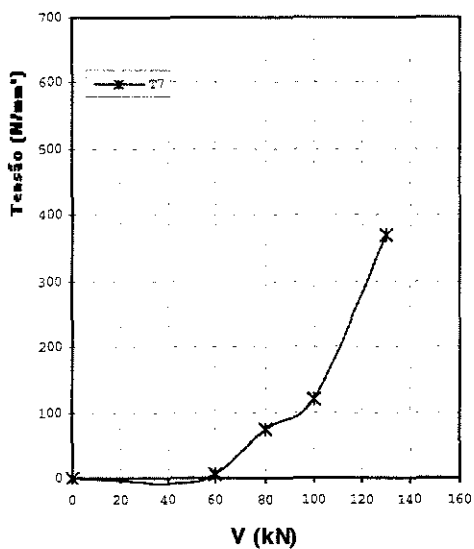
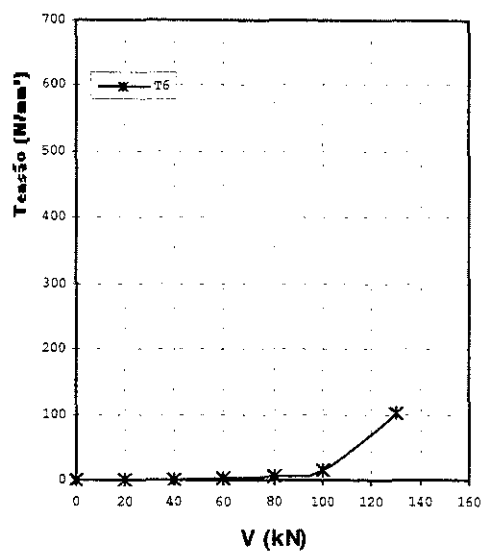
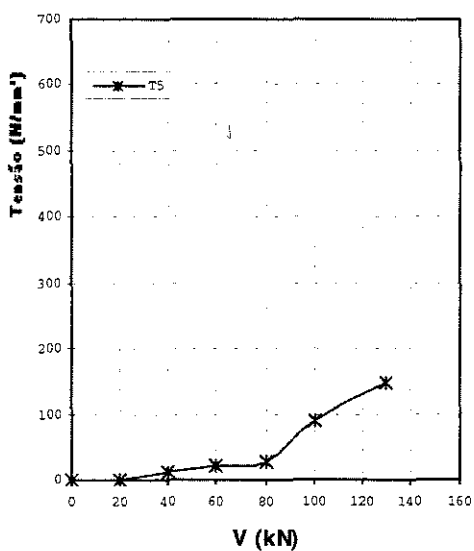
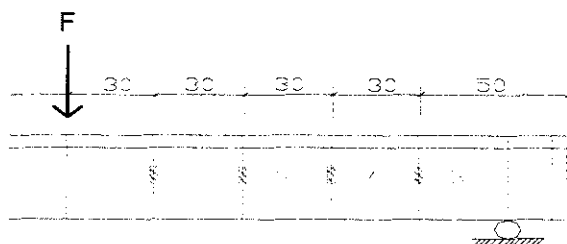
VIGA V2 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO DIREITO



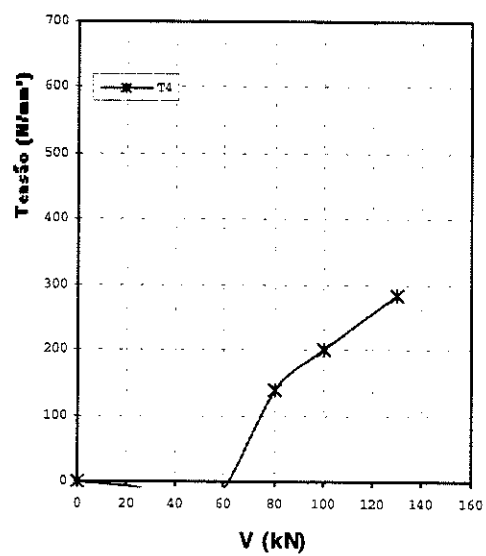
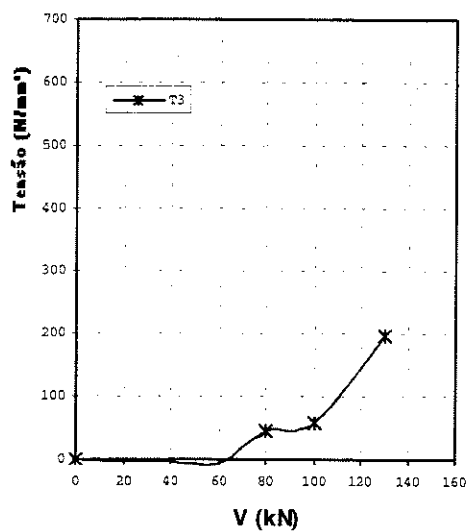
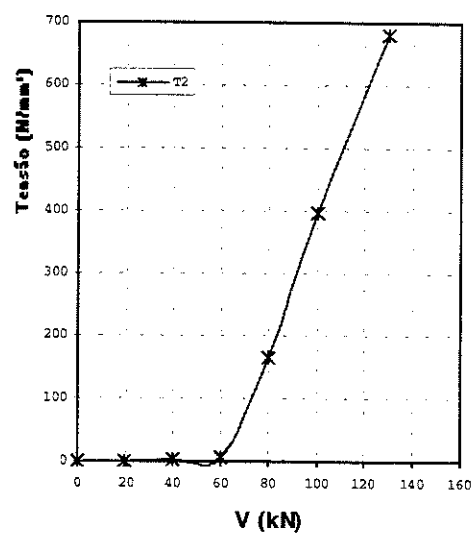
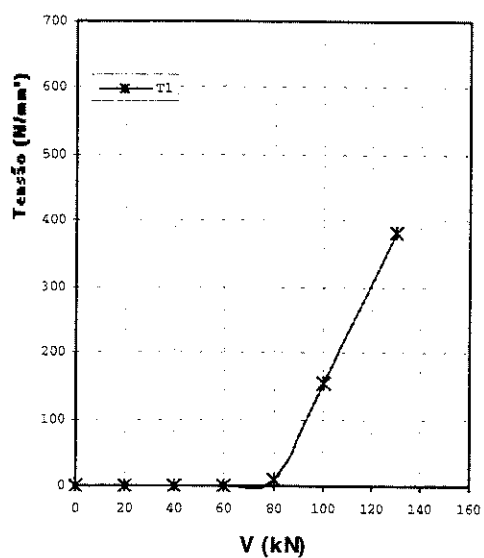
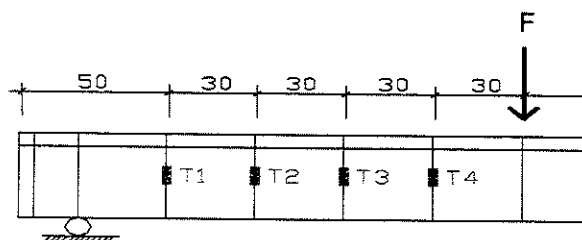
VIGA V3 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO ESQUERDO



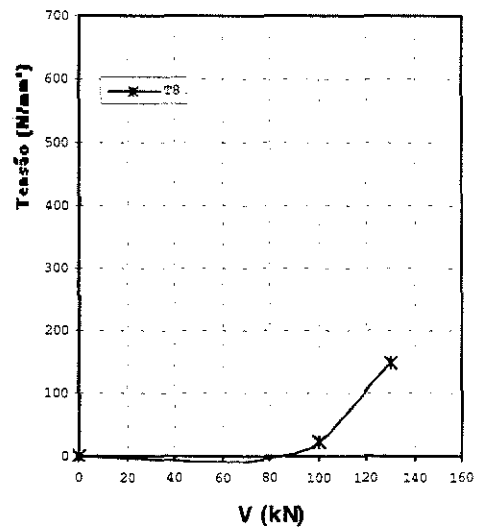
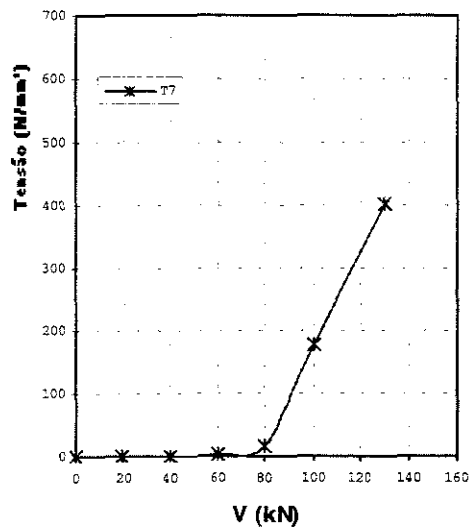
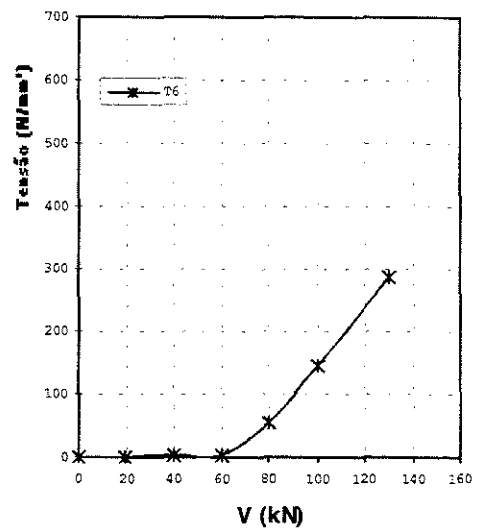
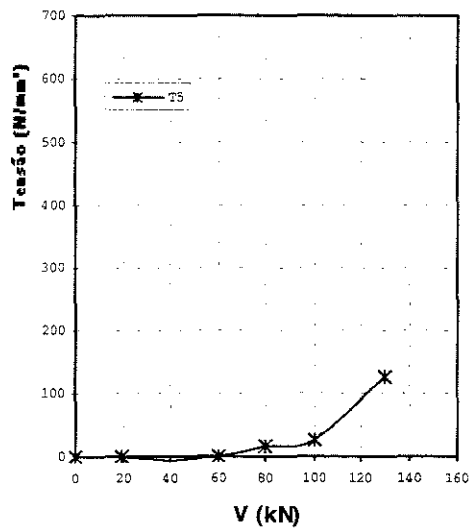
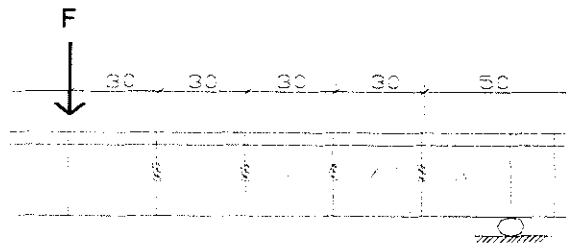
VIGA V3 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO DIREITO



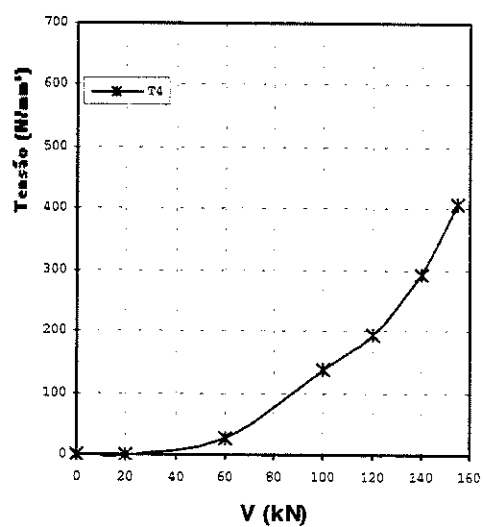
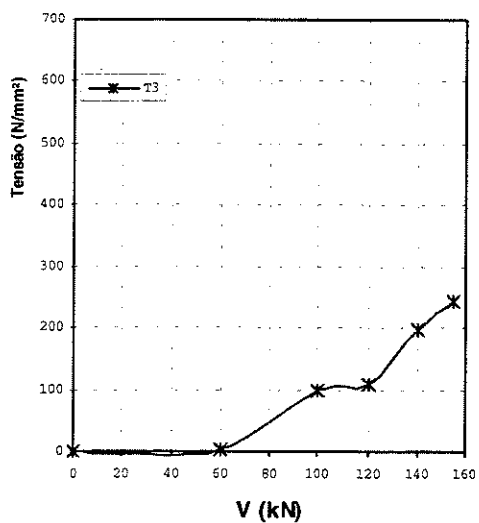
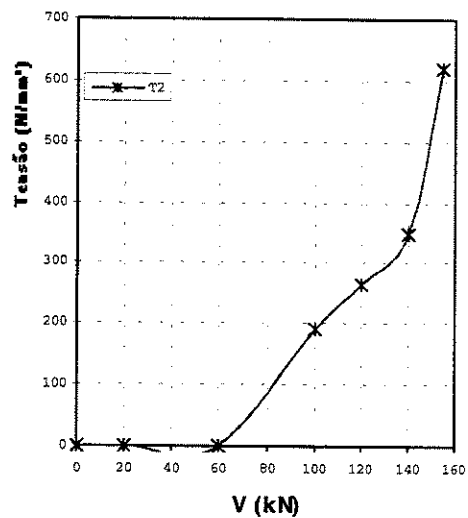
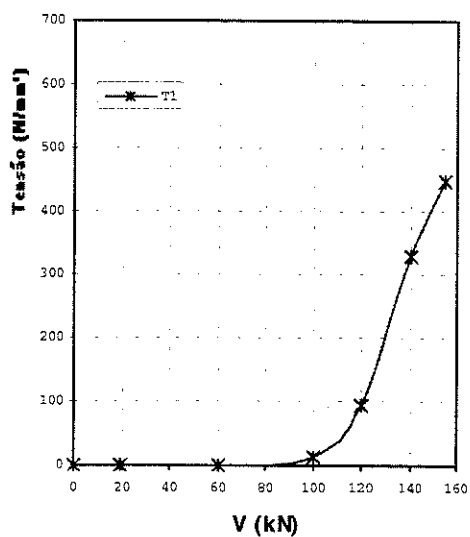
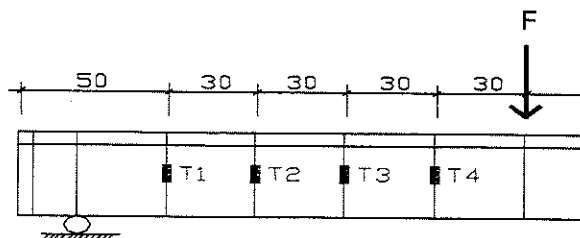
VIGA V4 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO ESQUERDO



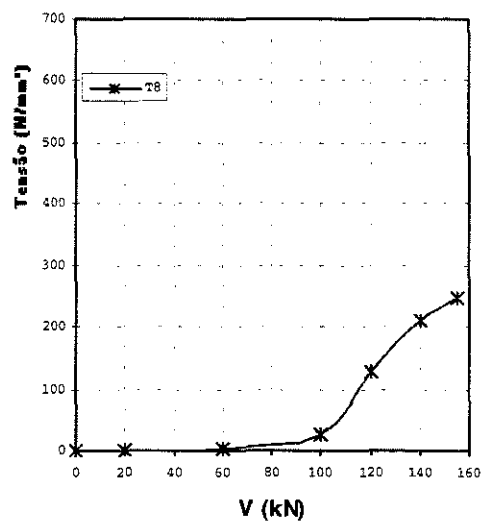
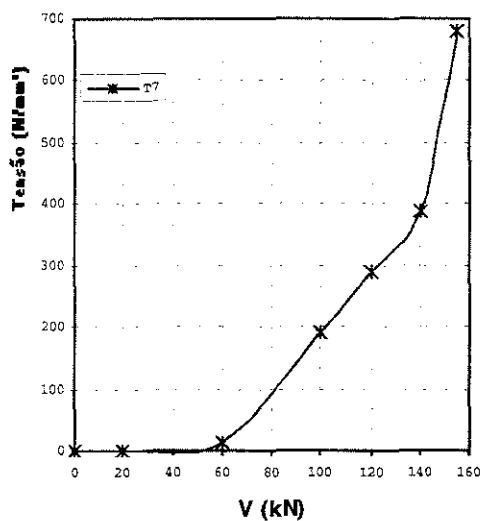
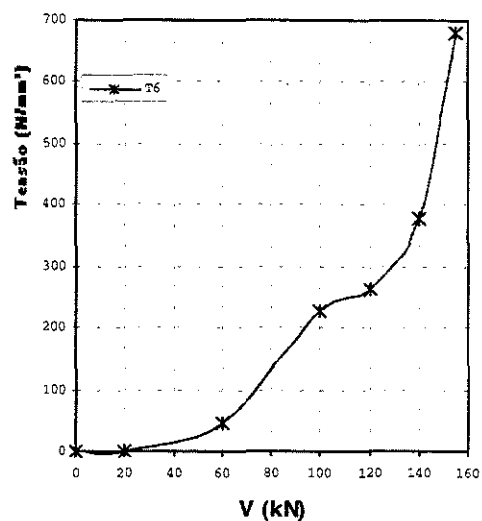
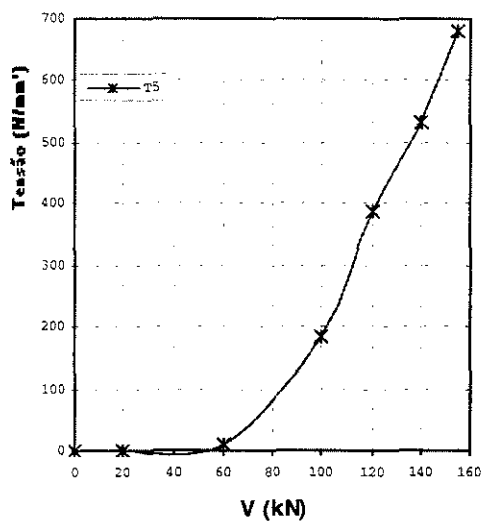
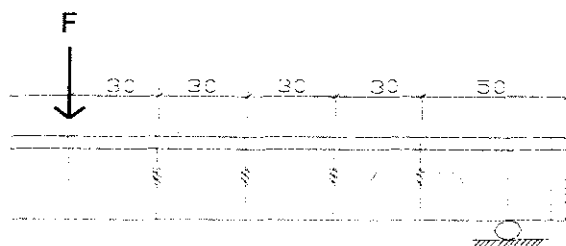
VIGA V4 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO DIREITO



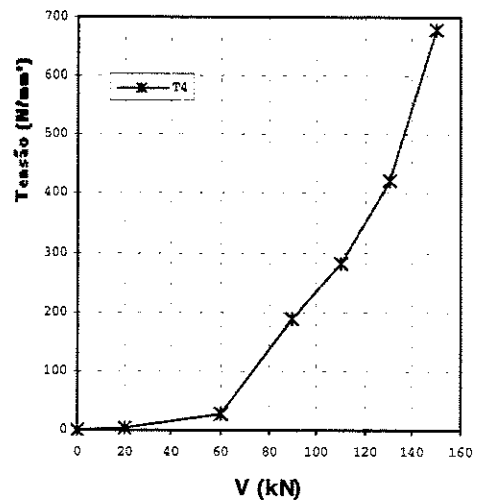
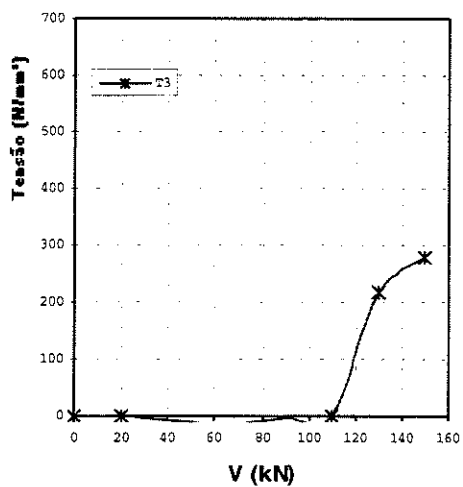
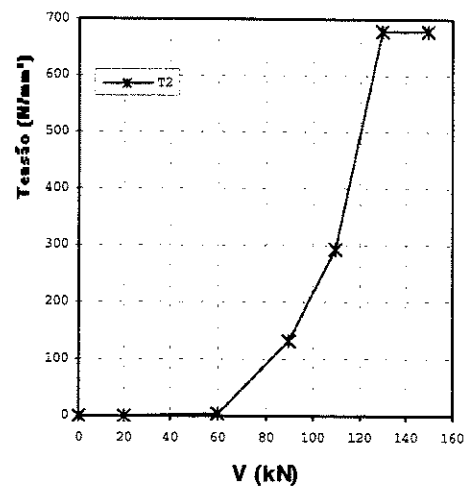
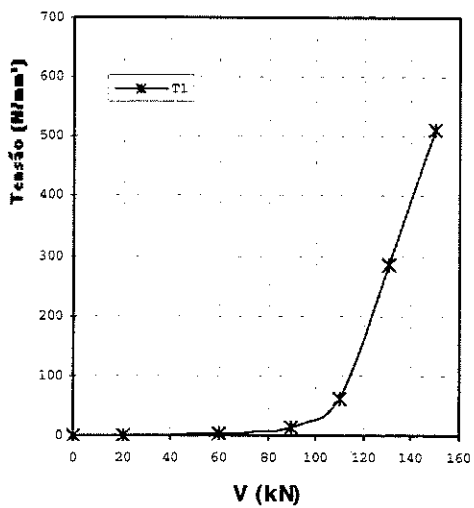
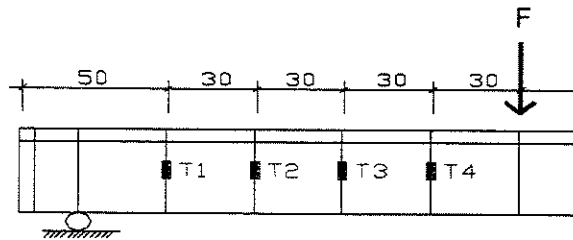
VIGA V5 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO ESQUERDO



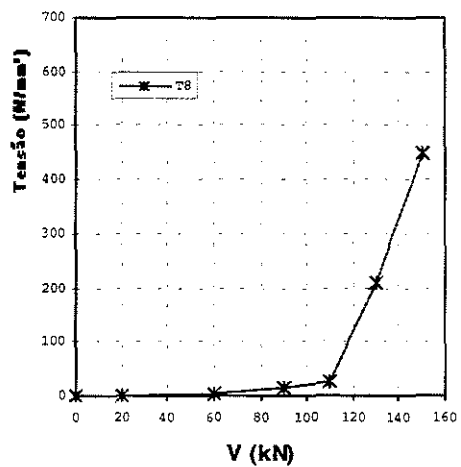
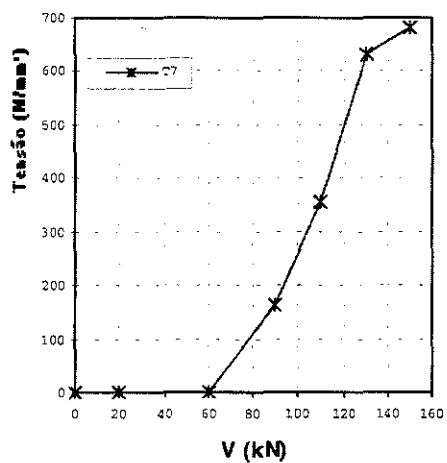
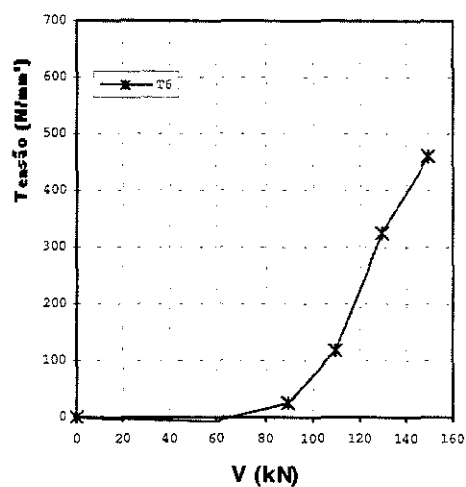
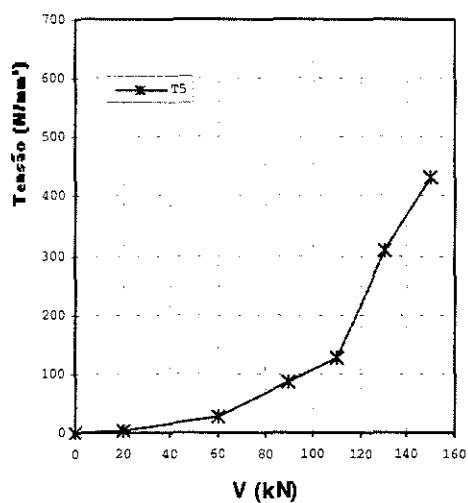
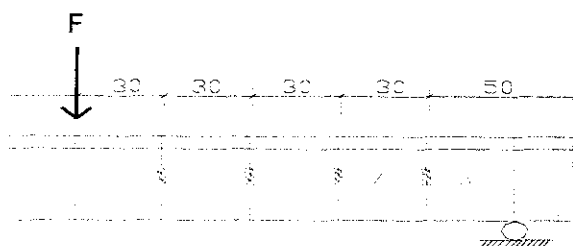
VIGA V5 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO DIREITO



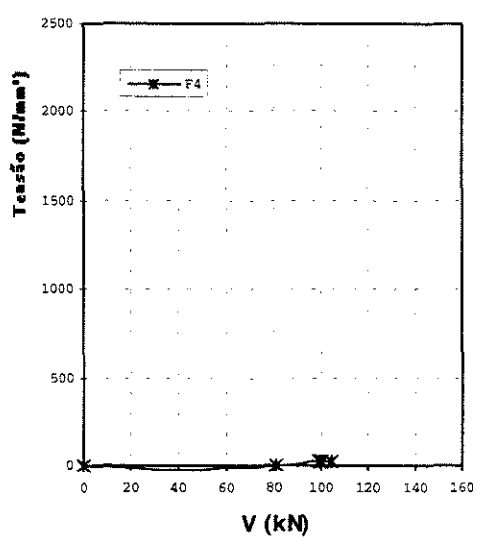
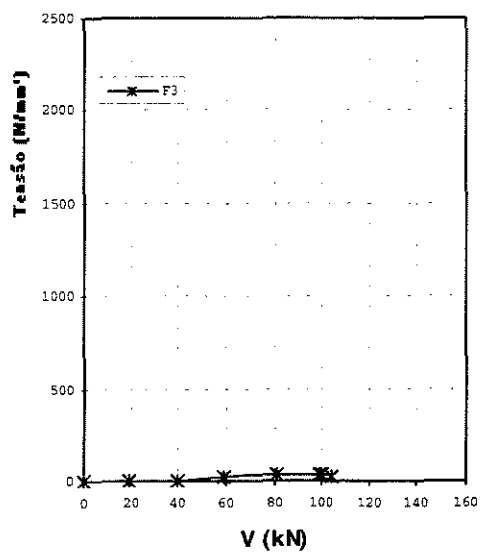
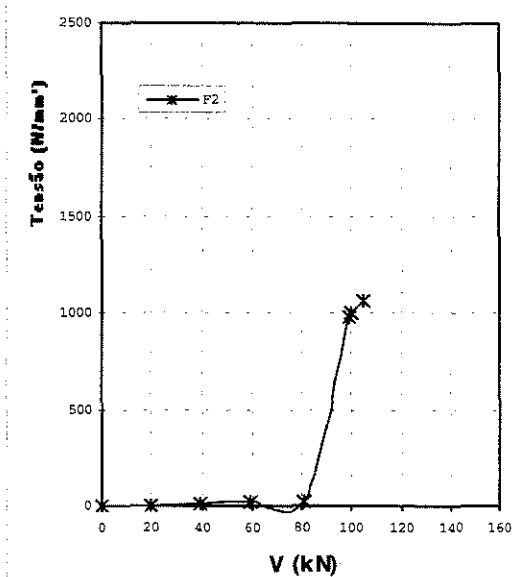
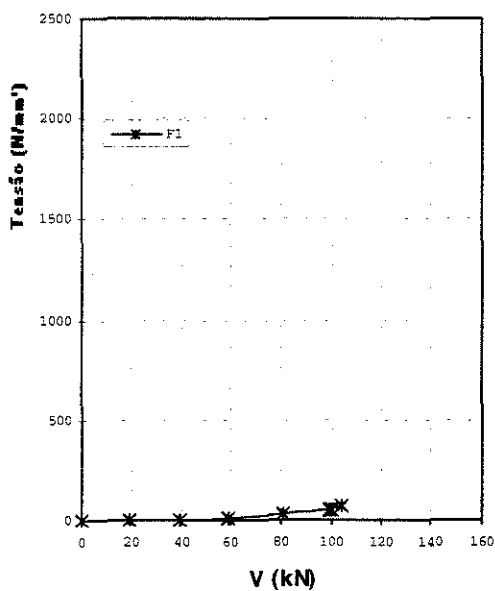
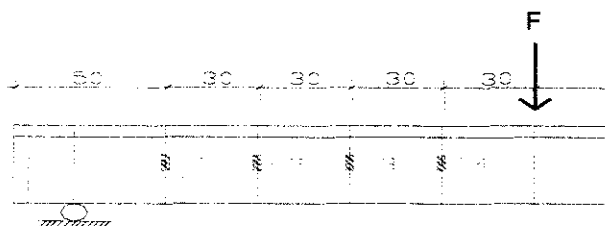
VIGA V6 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO ESQUERDO



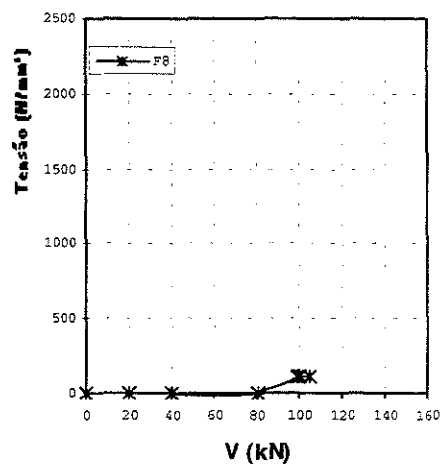
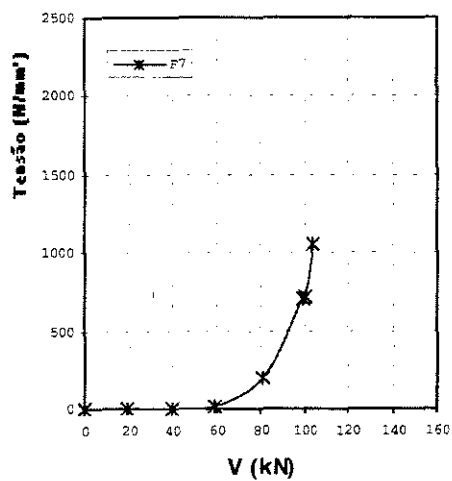
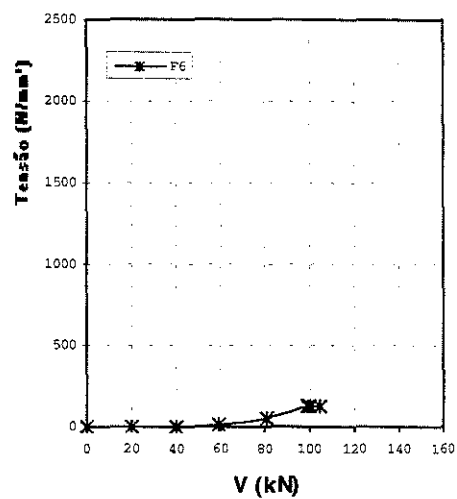
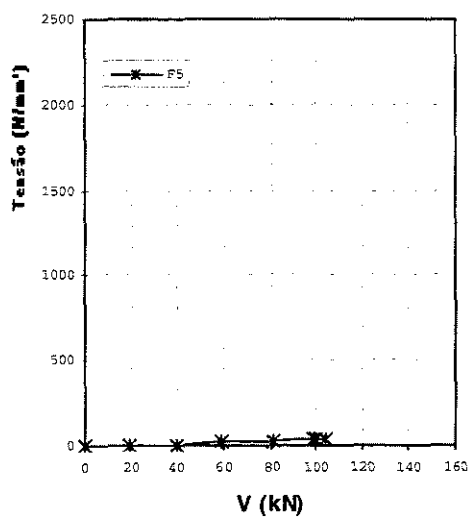
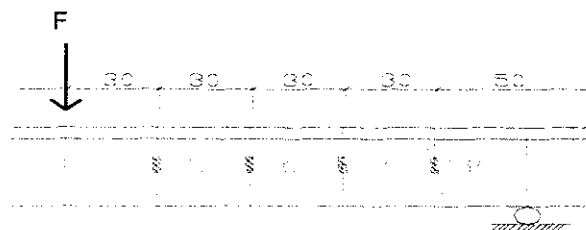
VIGA V6 - TENSÕES NOS ESTRIBOS - LADO DIREITO



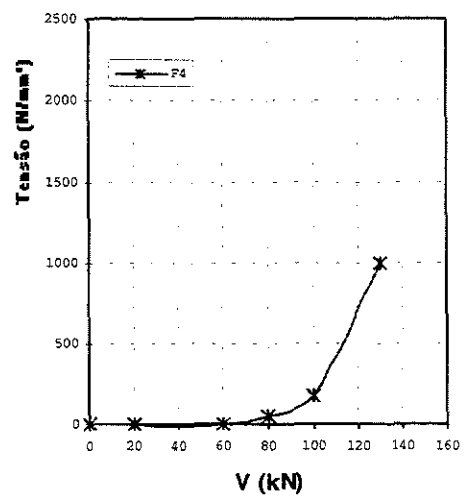
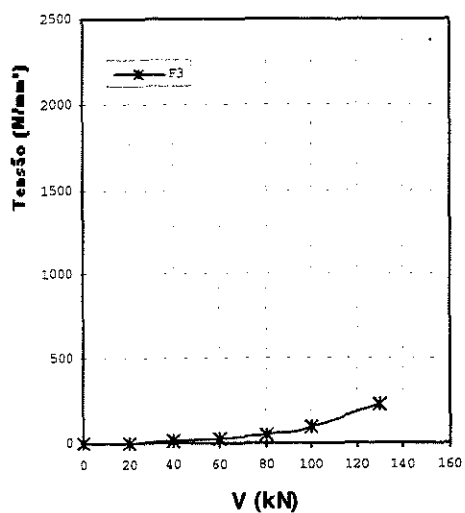
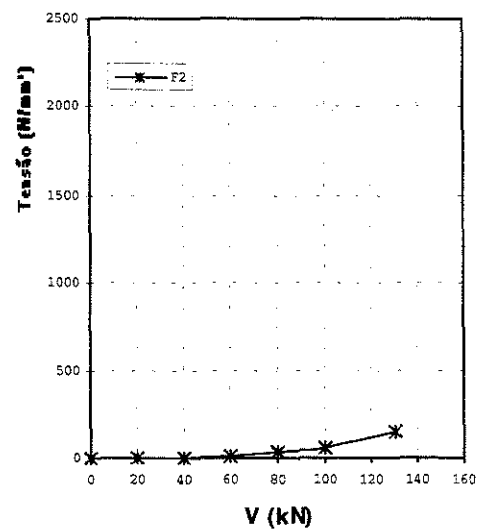
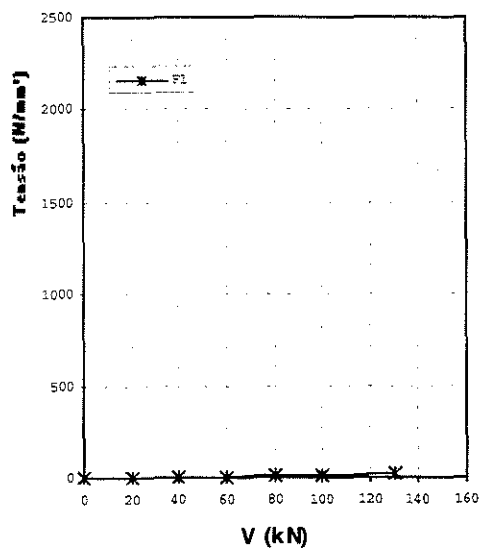
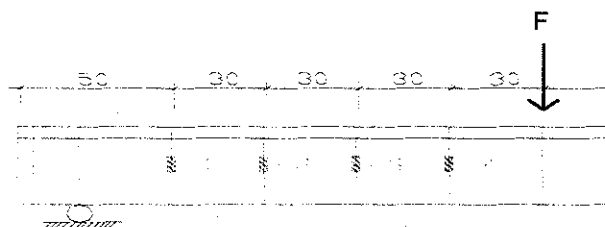
VIGA V2 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



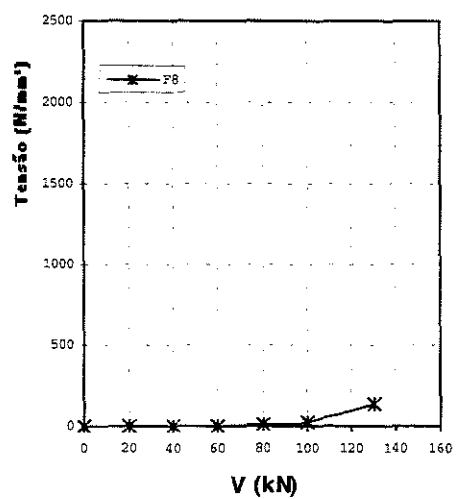
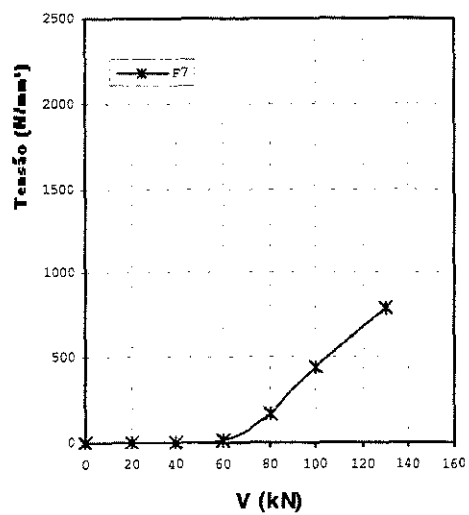
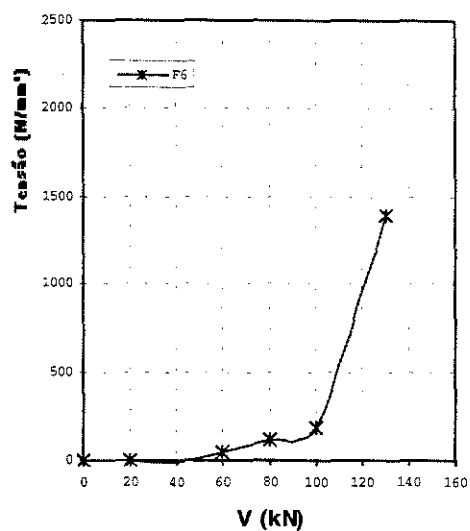
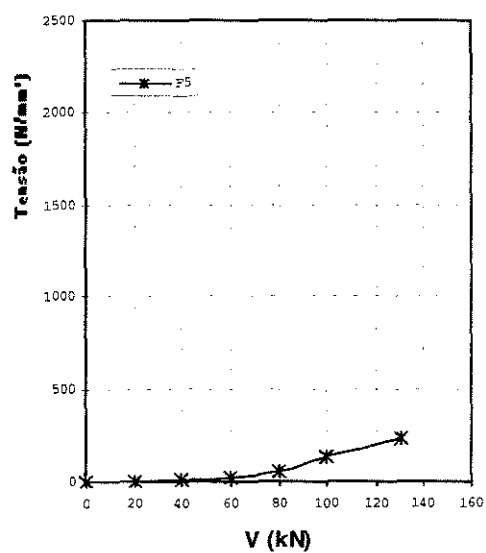
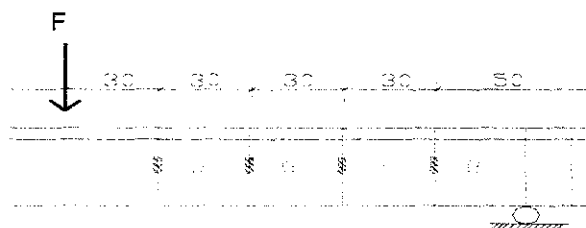
VIGA V2 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



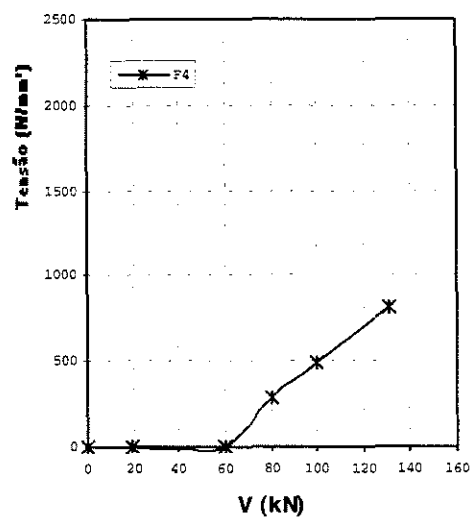
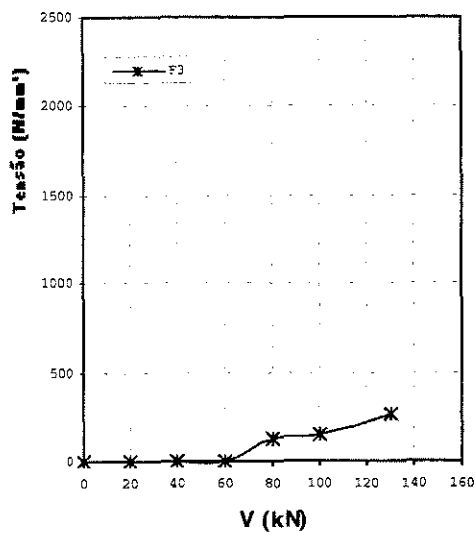
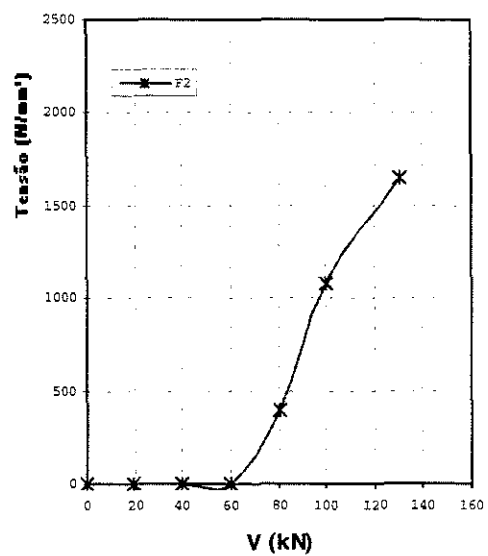
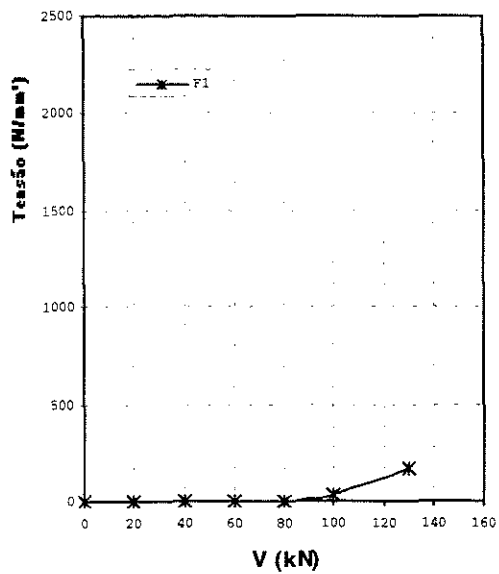
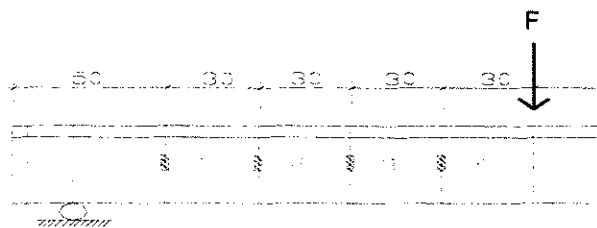
VIGA V3 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



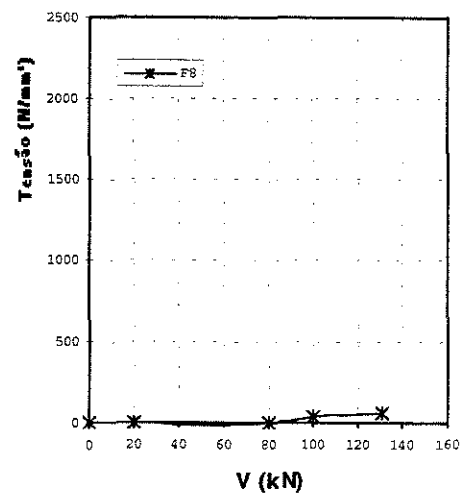
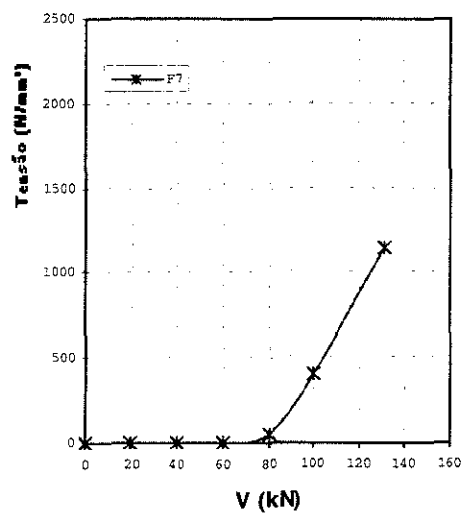
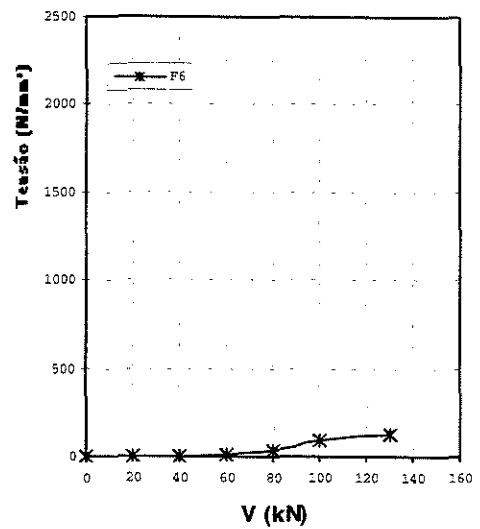
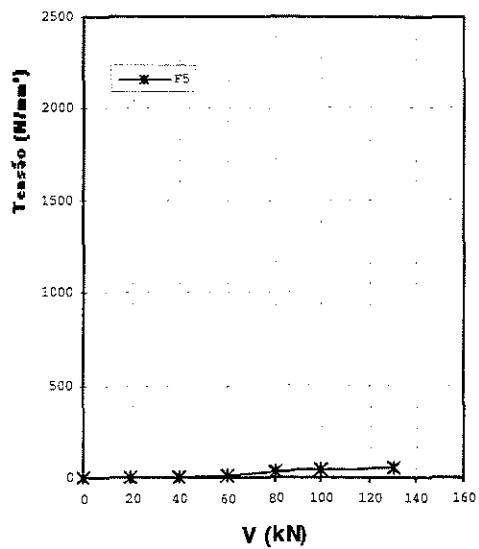
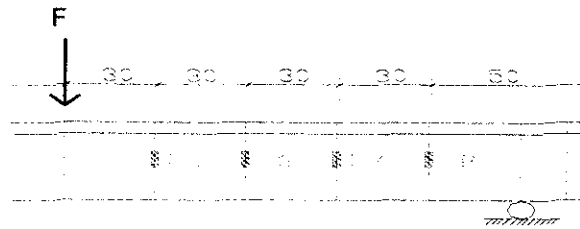
VIGA V3 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



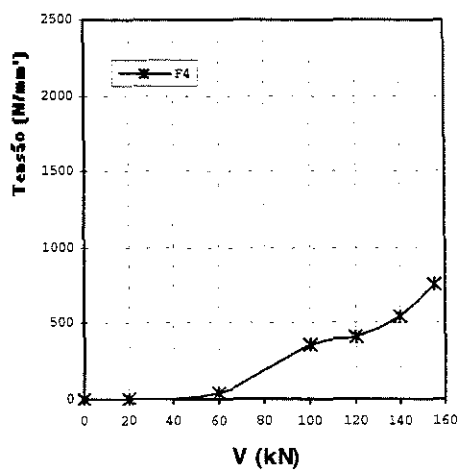
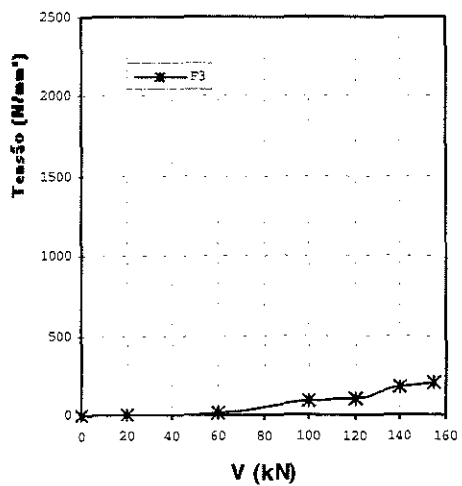
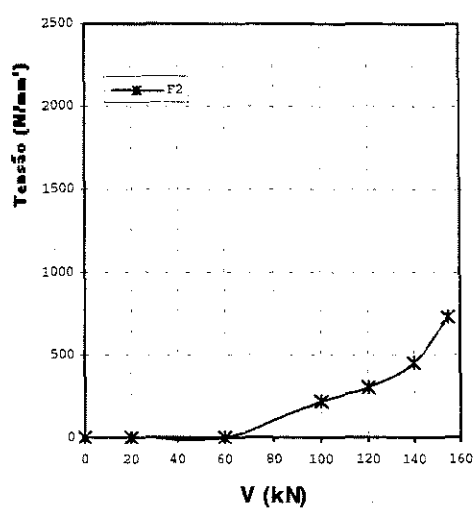
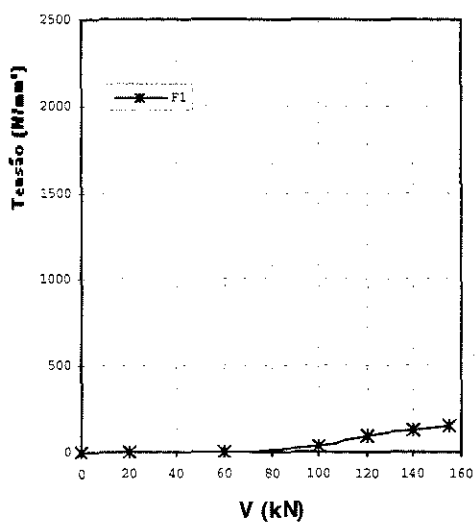
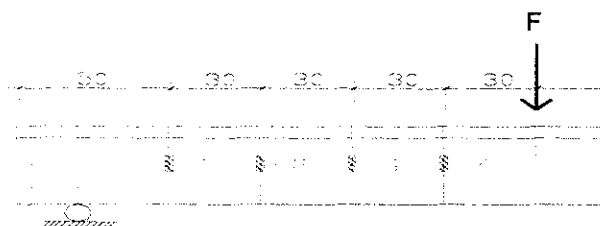
VIGA V4 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



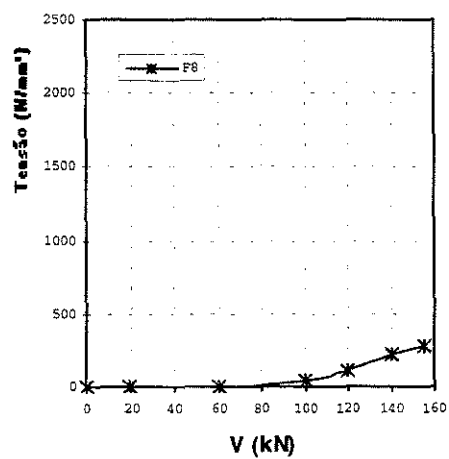
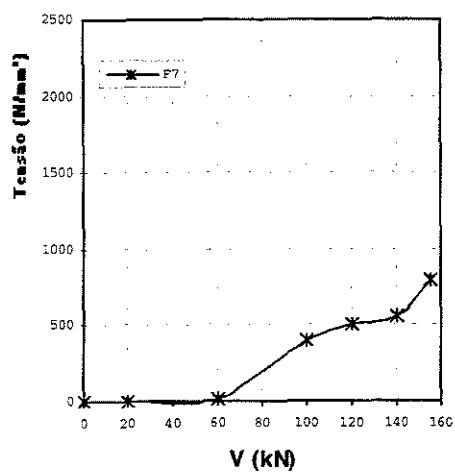
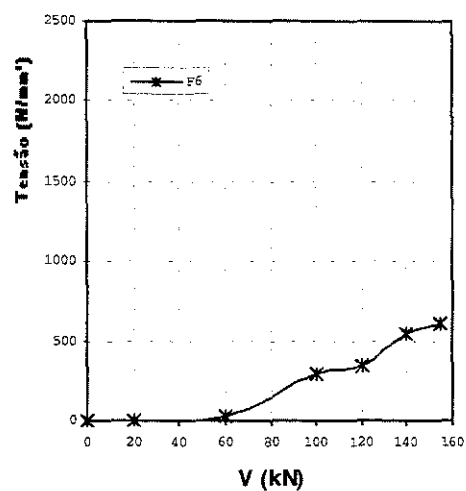
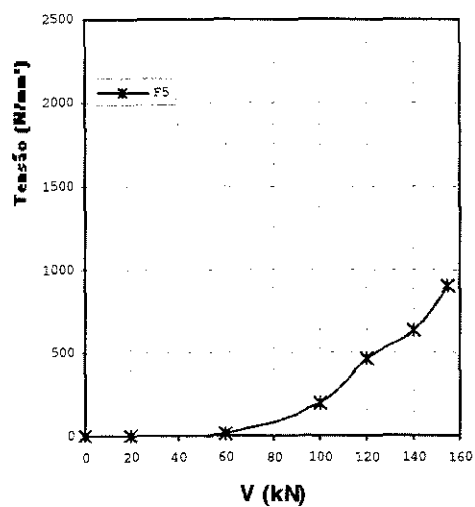
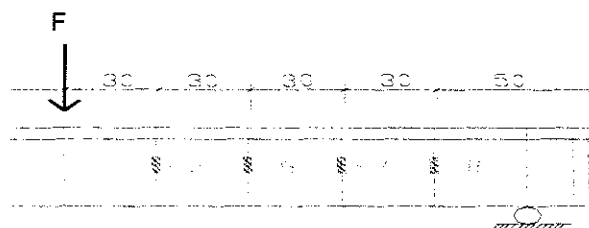
VIGA V4 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



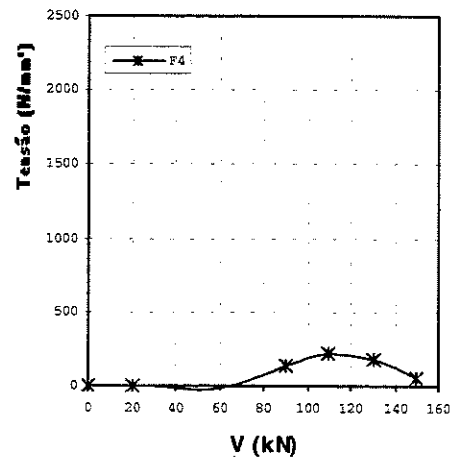
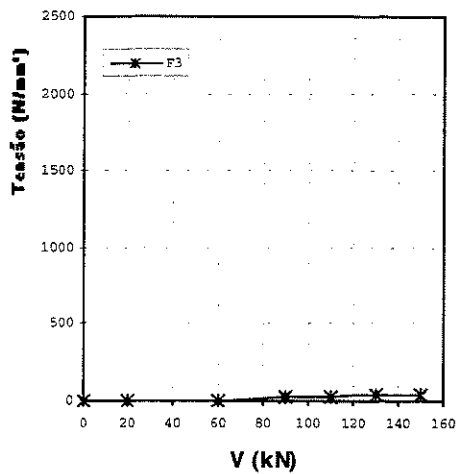
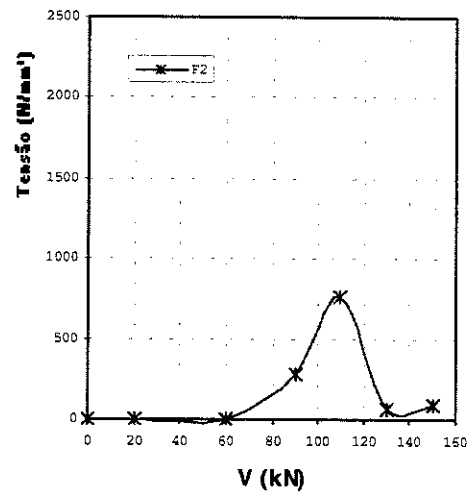
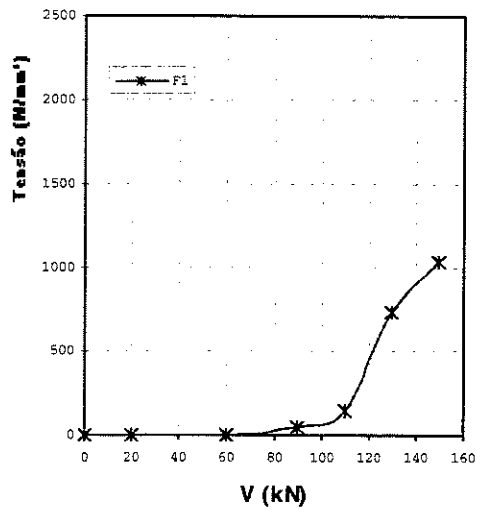
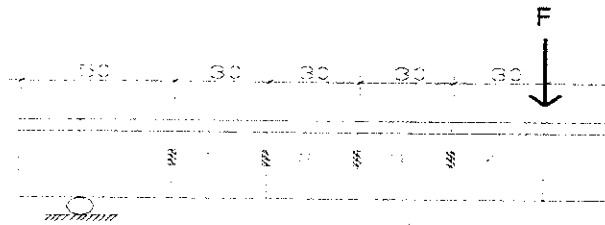
VIGA V5 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



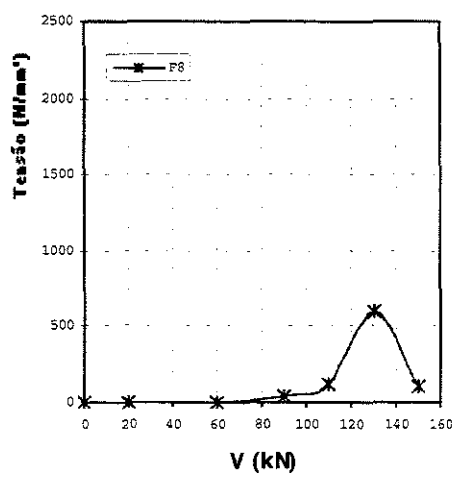
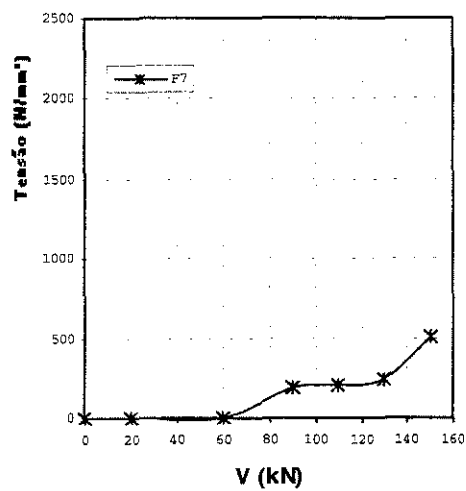
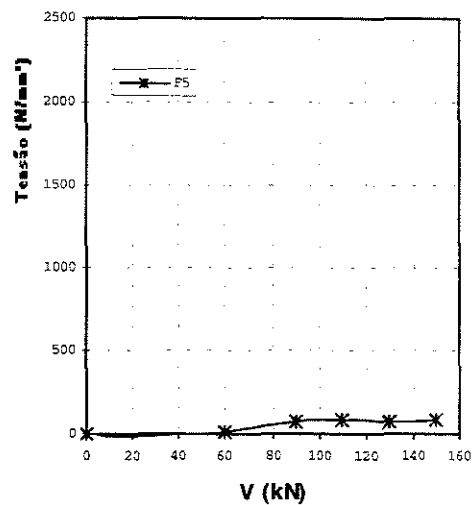
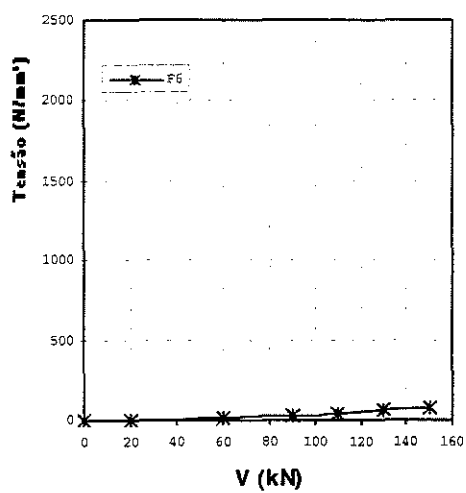
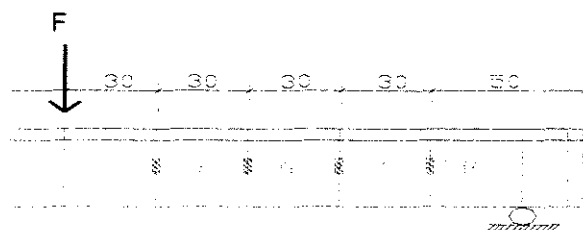
VIGA V5 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



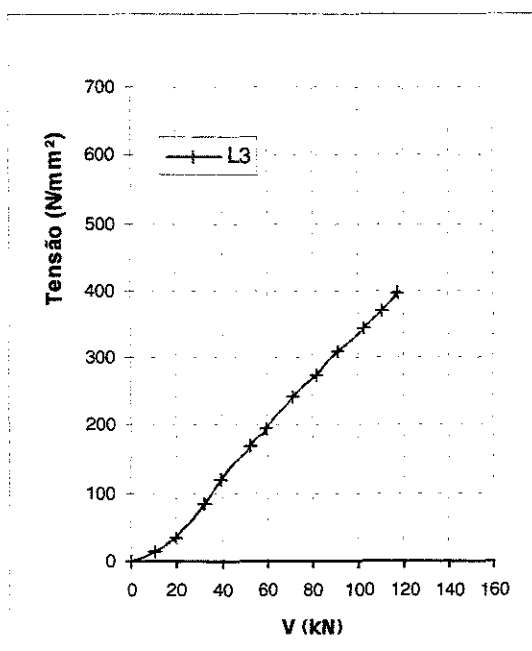
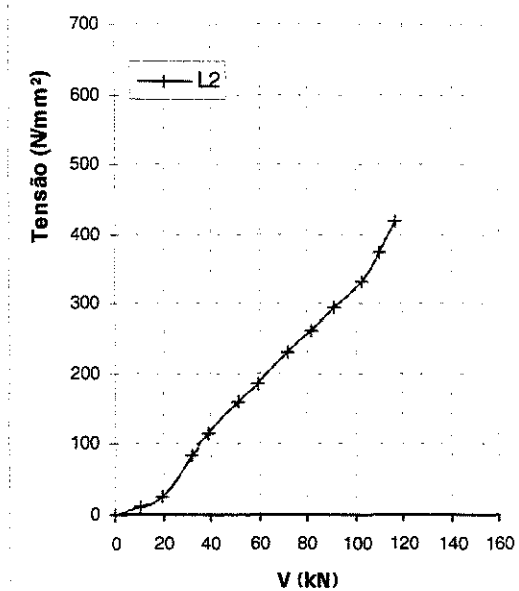
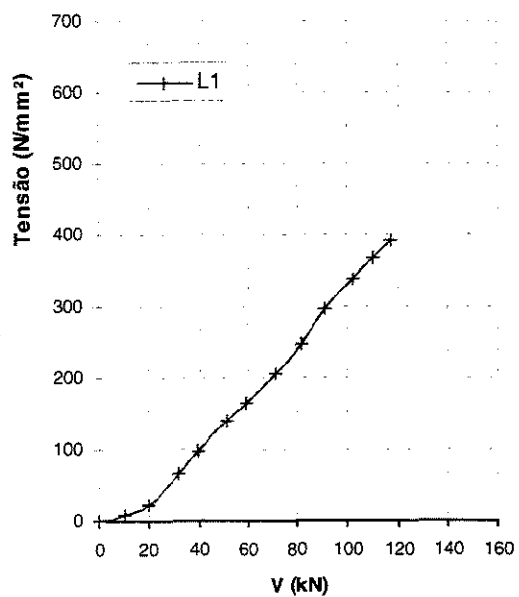
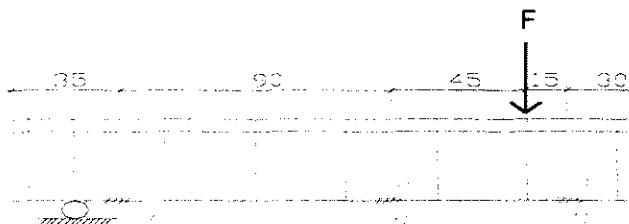
VIGA V6 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



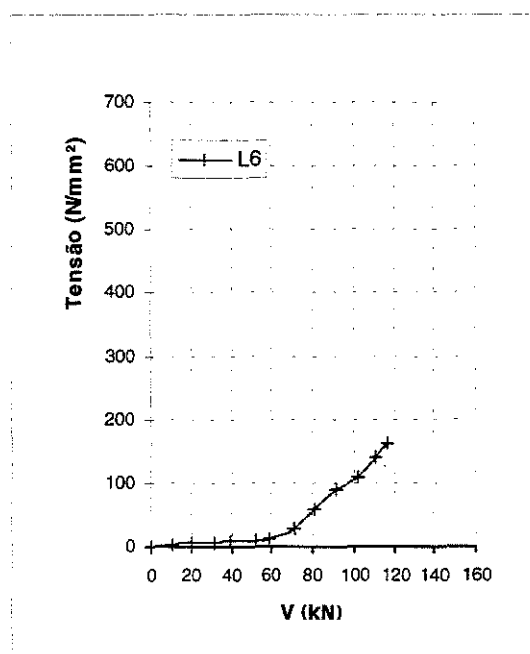
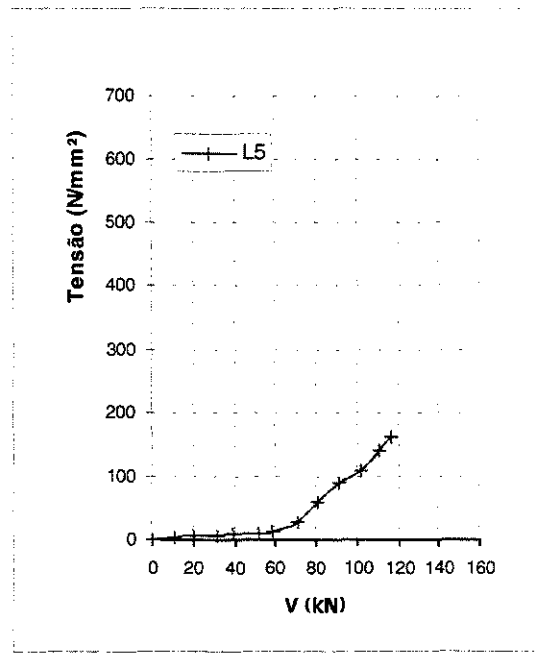
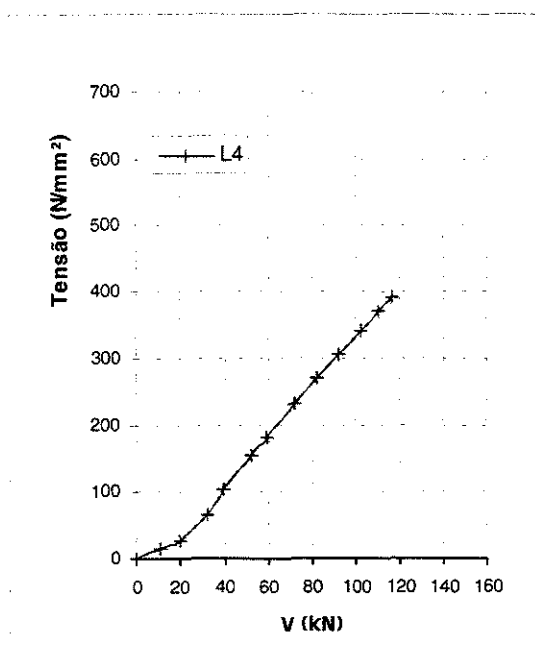
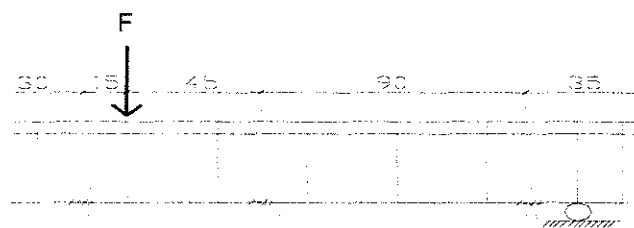
VIGA V6 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



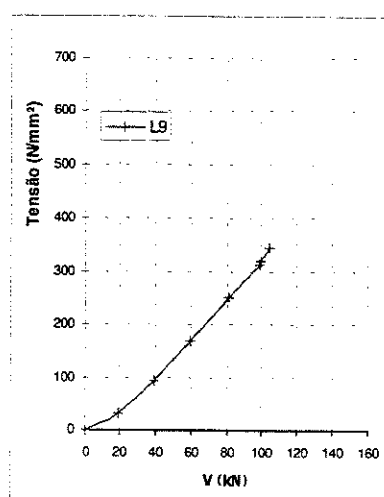
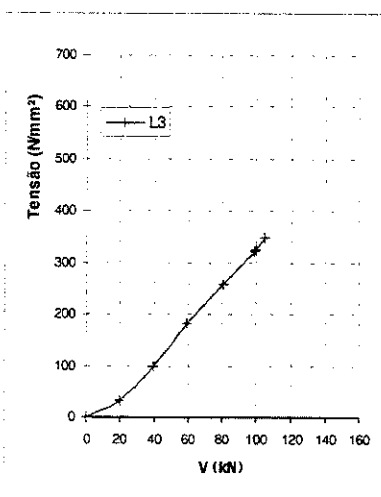
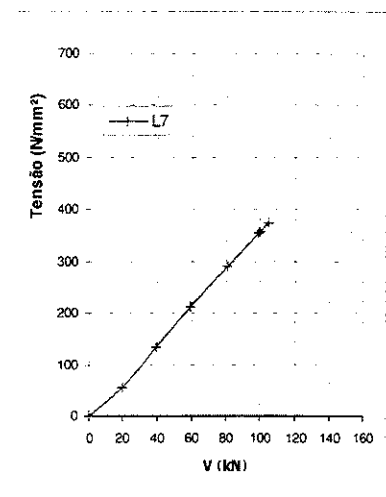
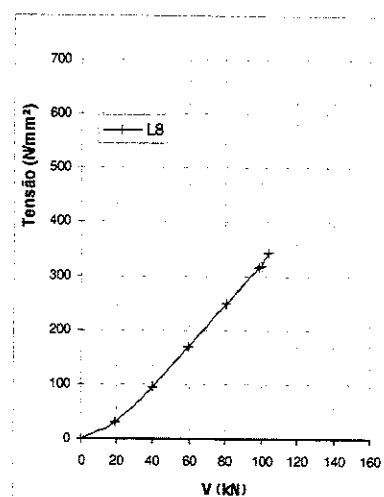
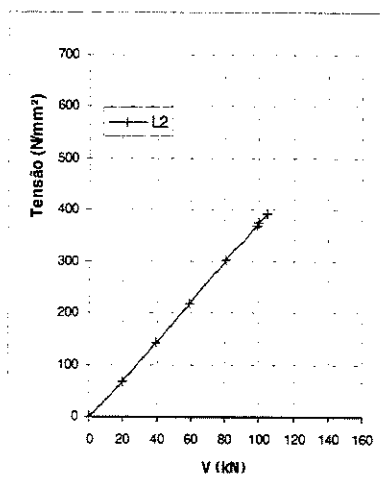
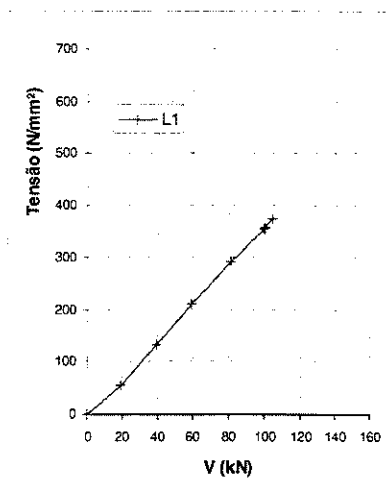
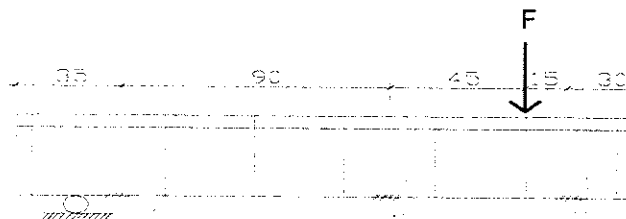
VIGA V1 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO ESQUERDO



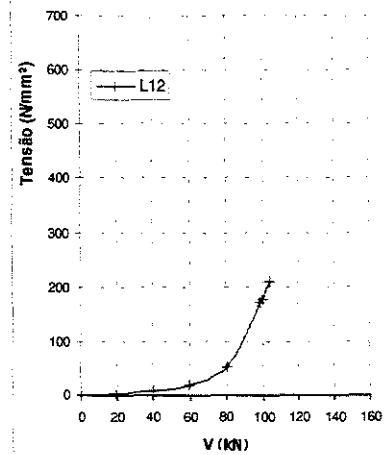
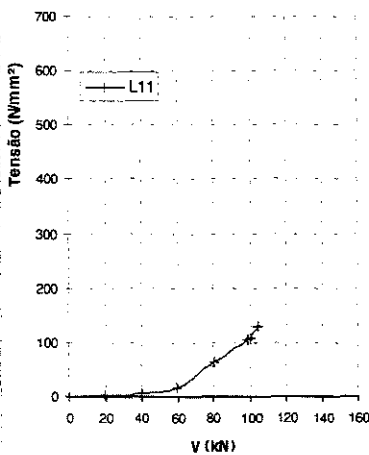
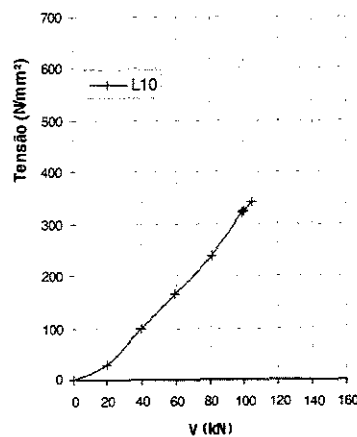
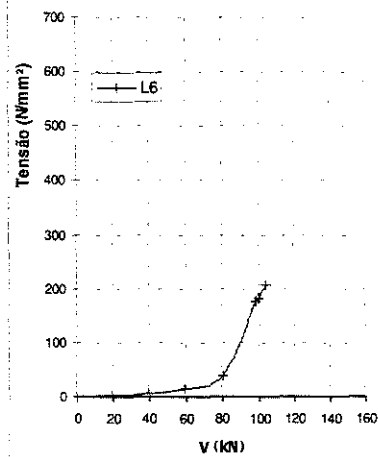
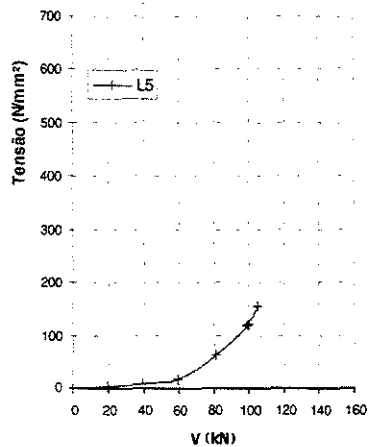
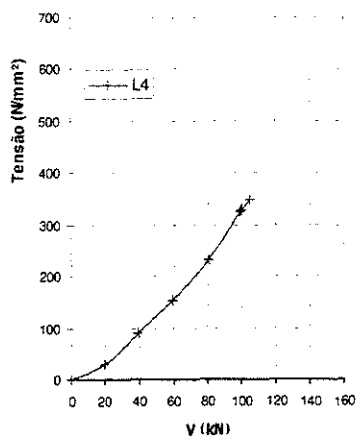
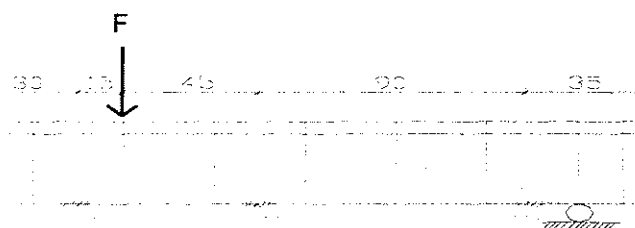
VIGA V1 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO DIREITO



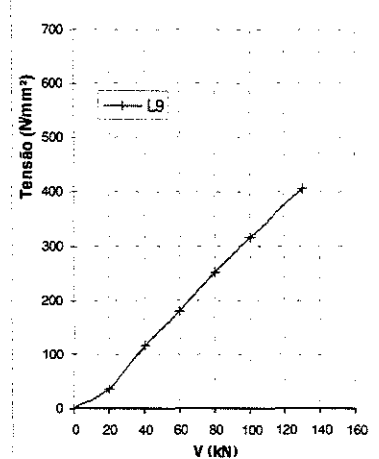
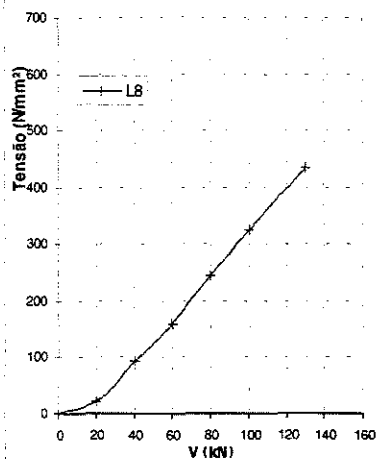
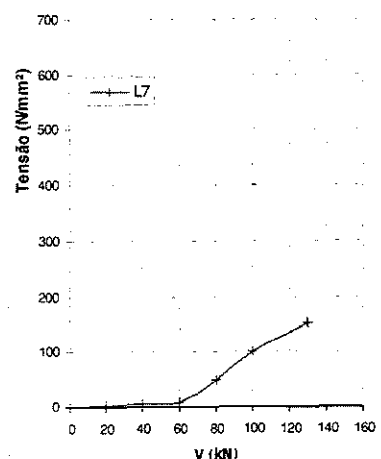
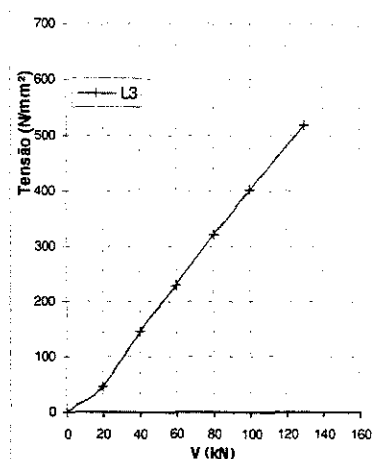
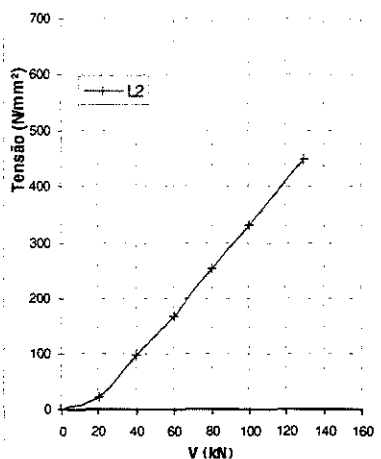
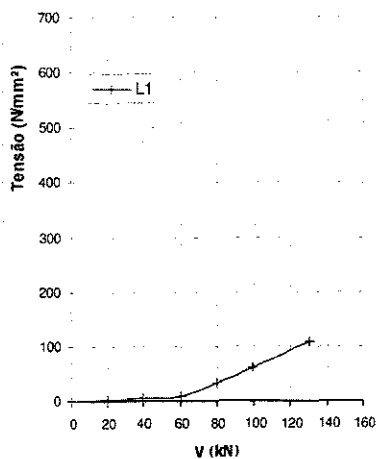
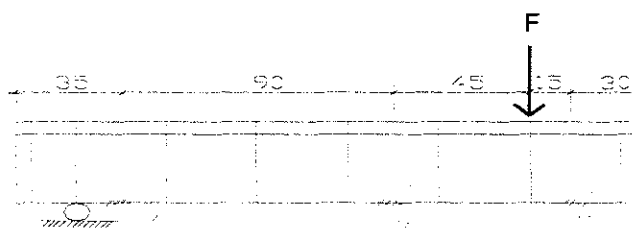
VIGA V2 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO ESQUERDO



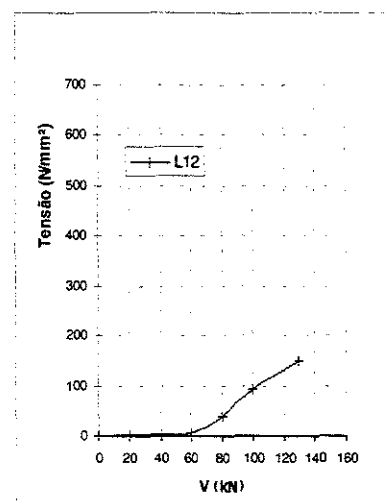
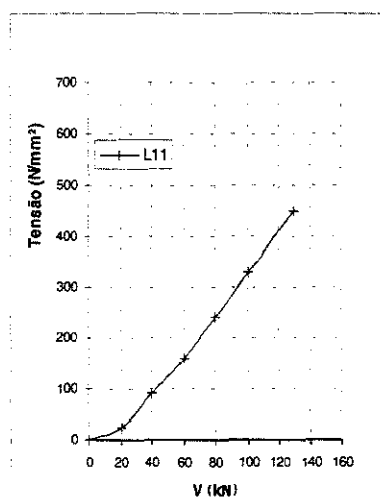
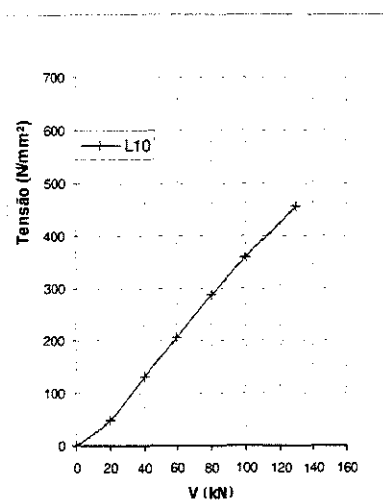
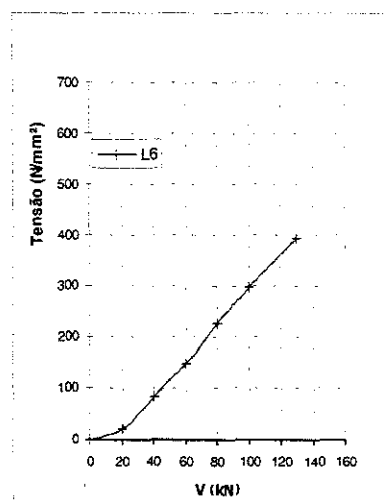
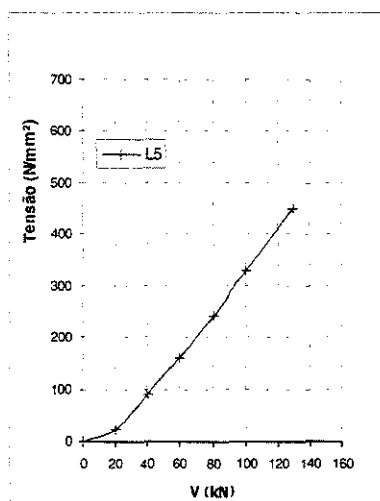
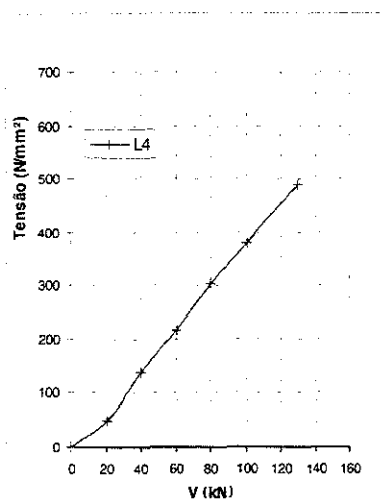
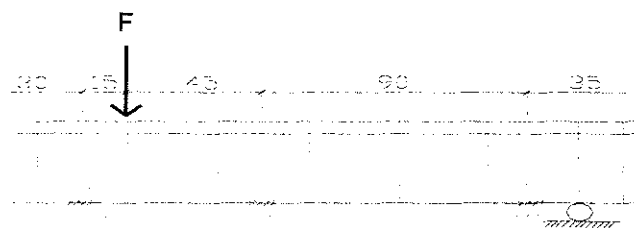
VIGA V2 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO DIREITO



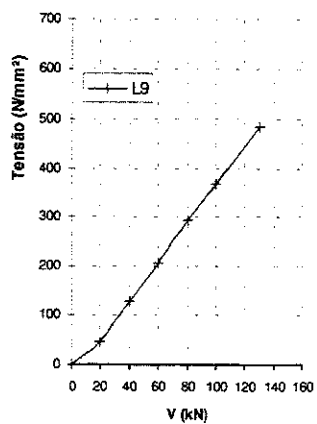
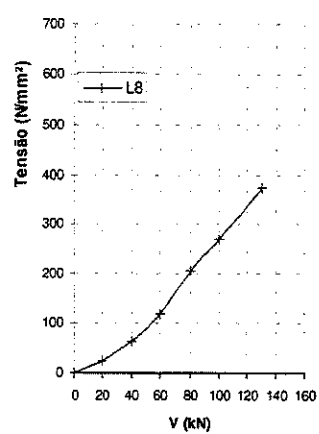
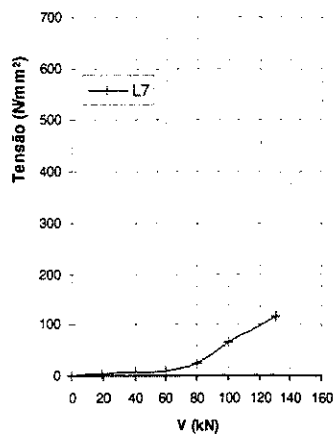
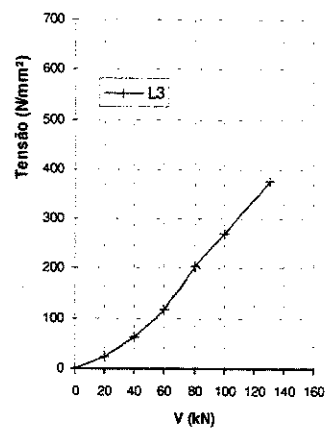
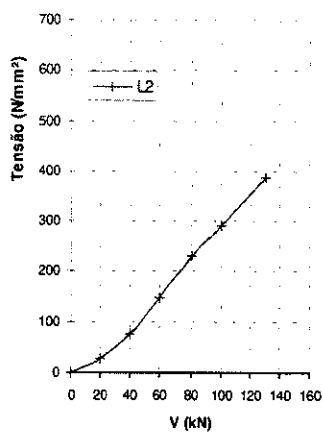
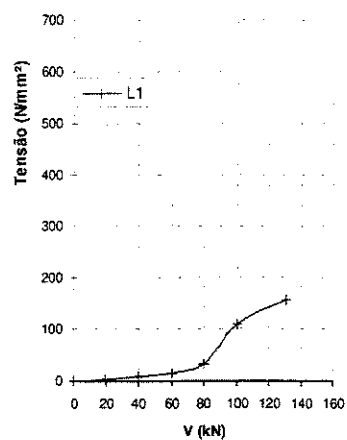
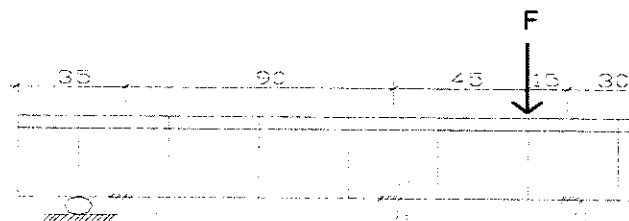
VIGA V3 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO ESQUERDO



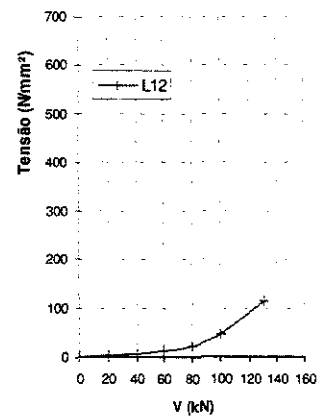
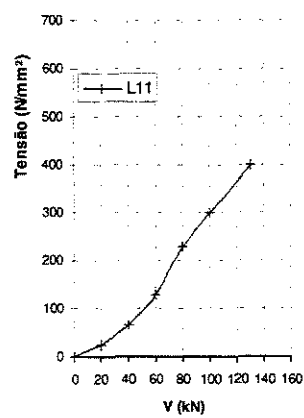
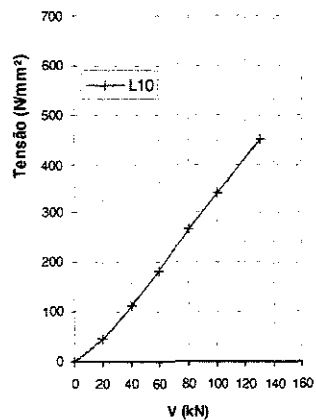
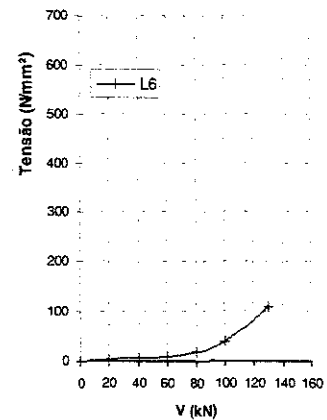
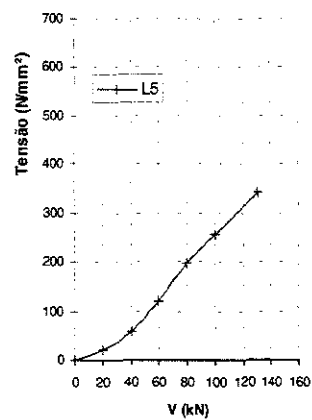
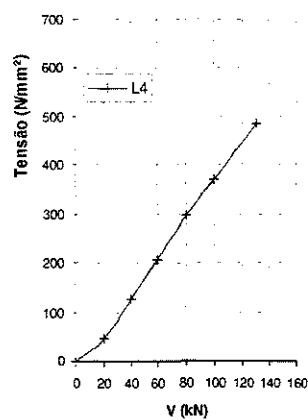
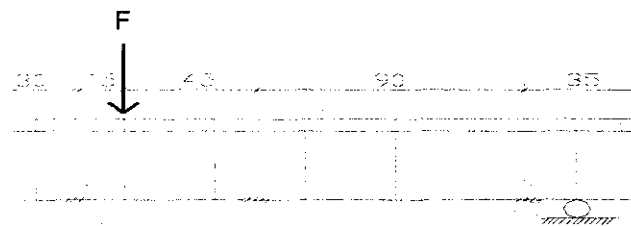
VIGA V3 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO DIREITO



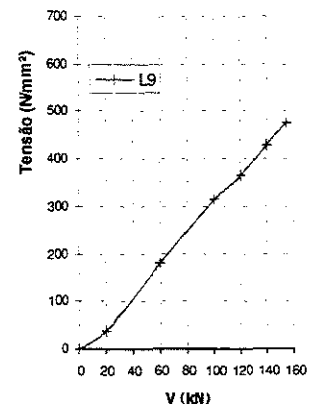
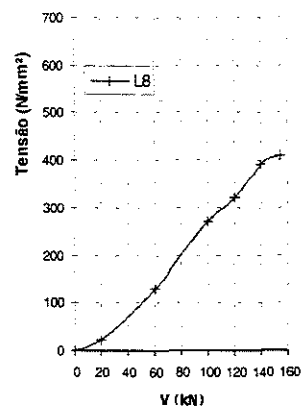
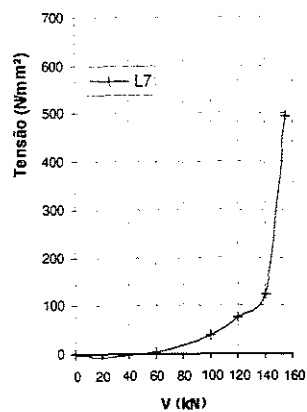
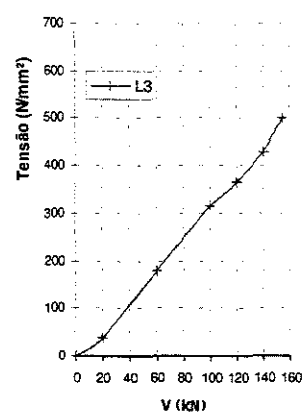
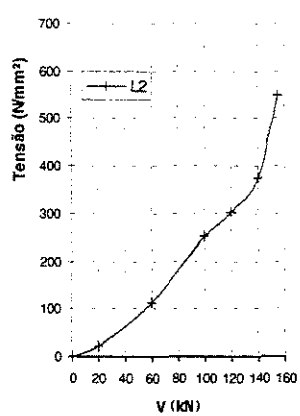
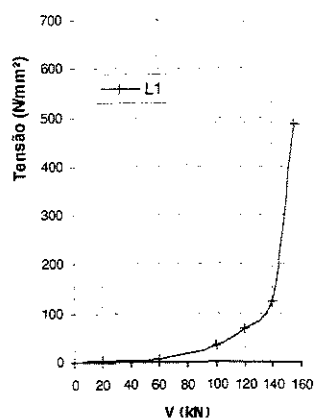
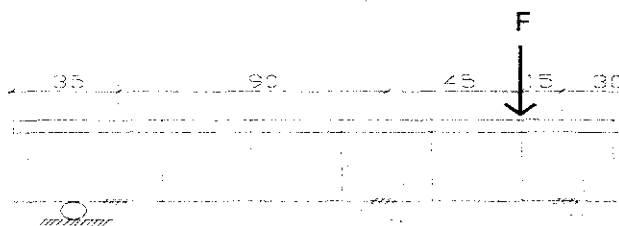
VIGA V4 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO ESQUERDO



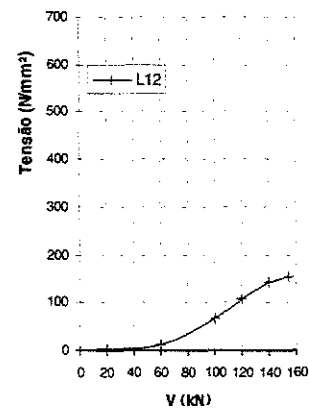
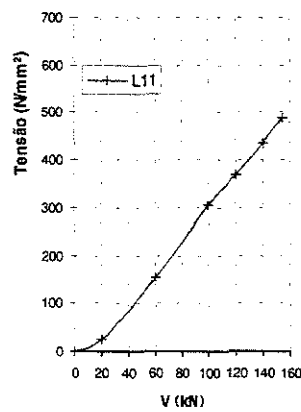
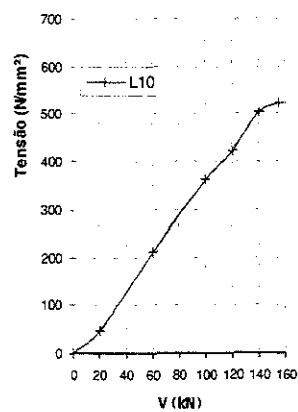
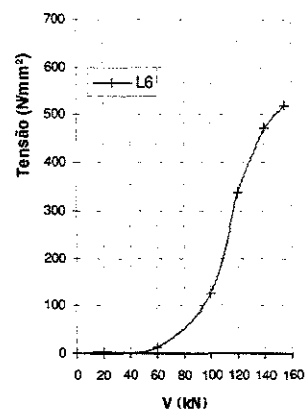
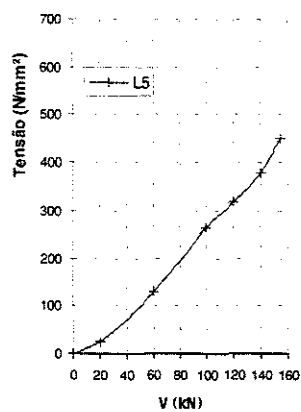
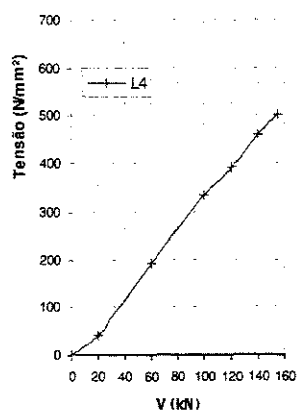
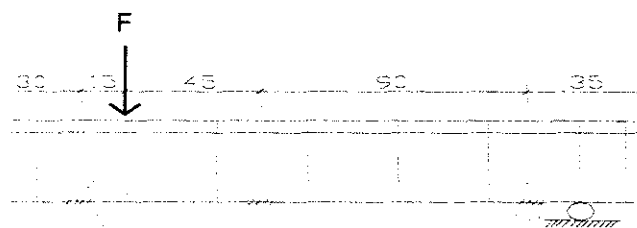
VIGA V4 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO DIREITO



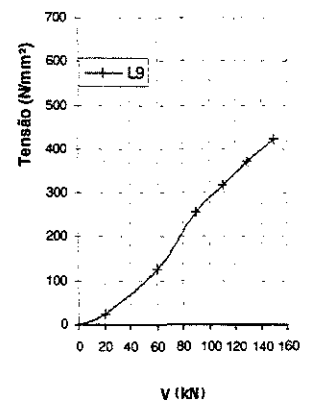
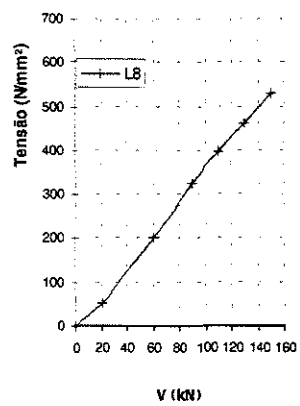
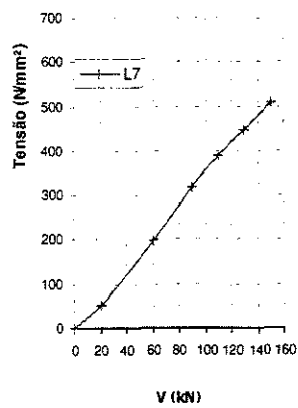
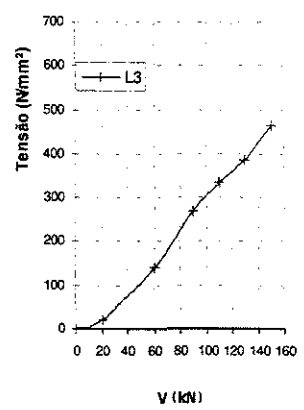
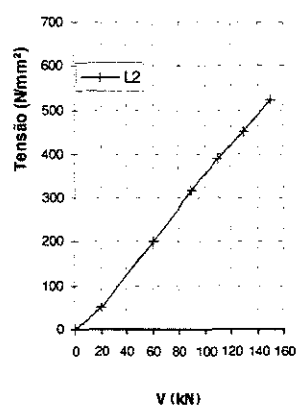
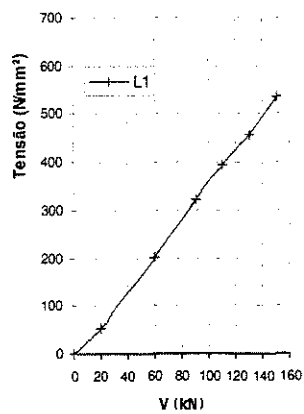
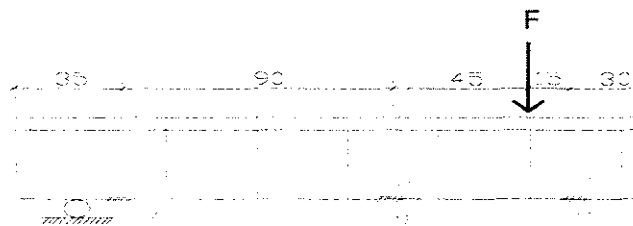
VIGA V5 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO ESQUERDO



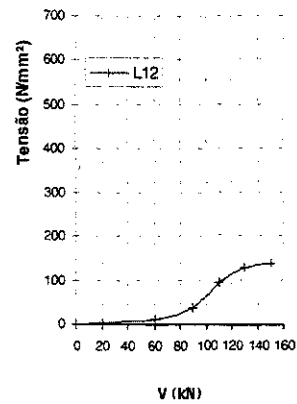
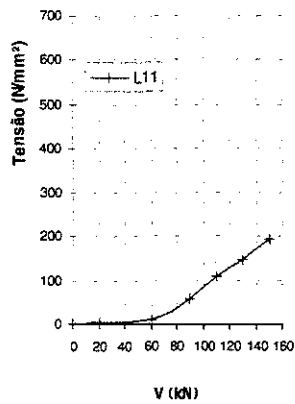
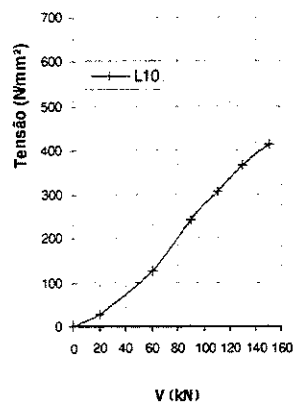
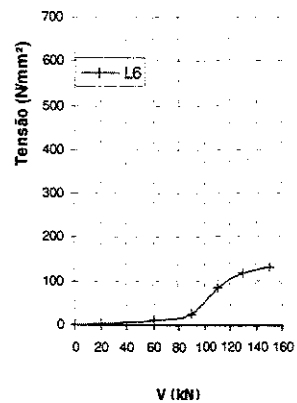
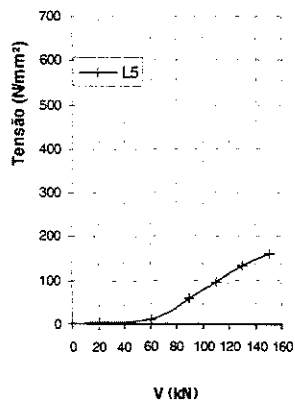
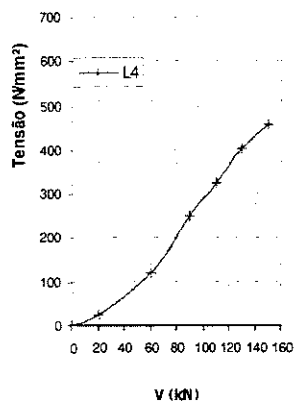
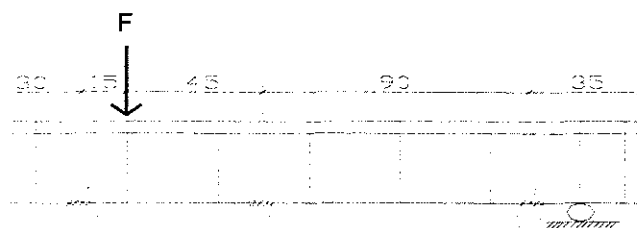
VIGA V5 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO DIREITO



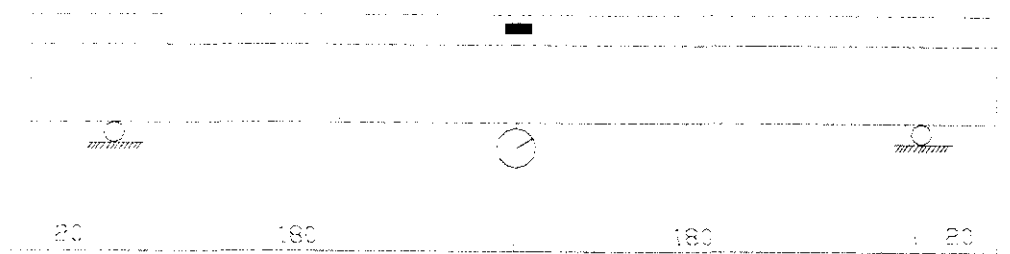
VIGA V6 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO ESQUERDO



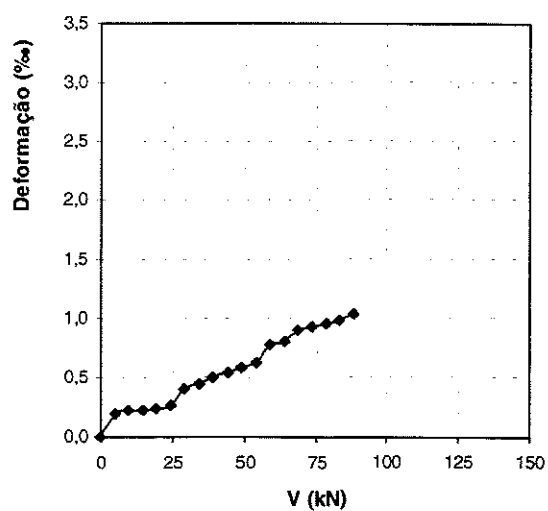
VIGA V6 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL - LADO DIREITO



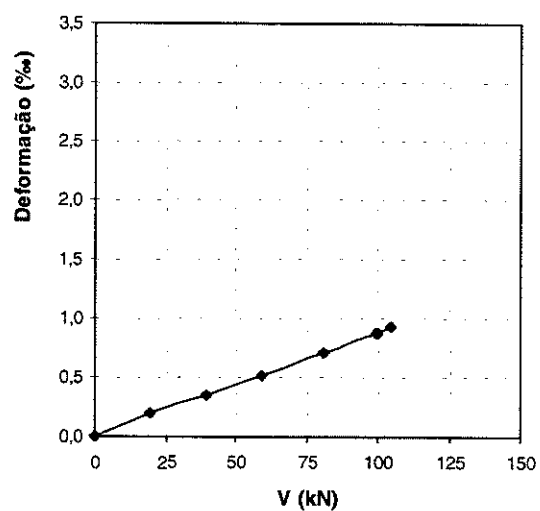
VIGAS V1,V2,V3 E V4 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO



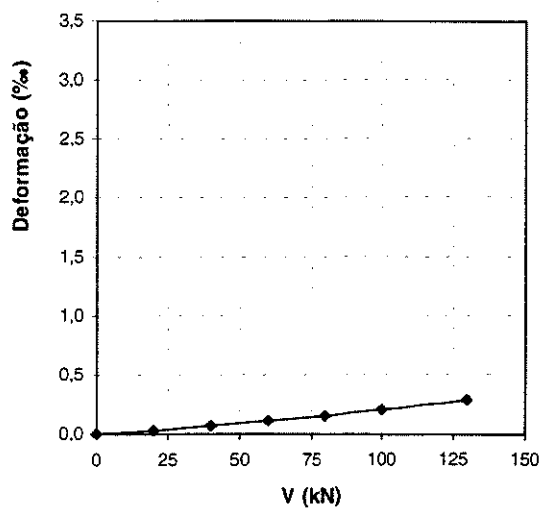
DEFORMAÇÕES NO CONCRETO
VIGA V1



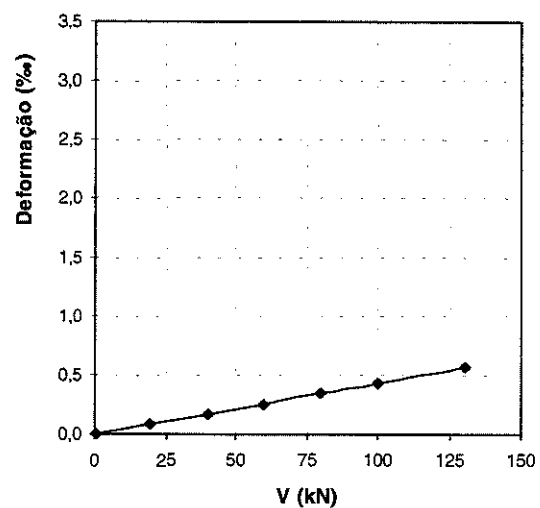
DEFORMAÇÕES NO CONCRETO
VIGA V2



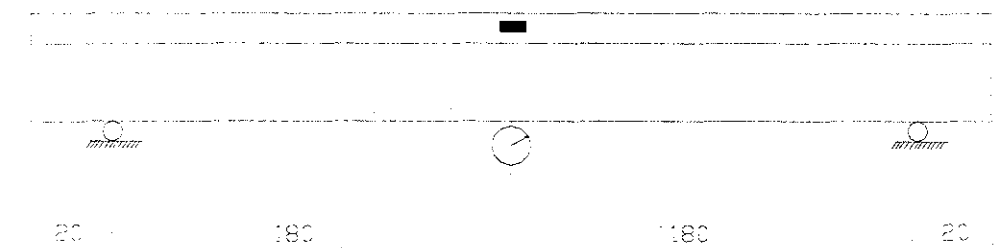
DEFORMAÇÕES NO CONCRETO
VIGA V3



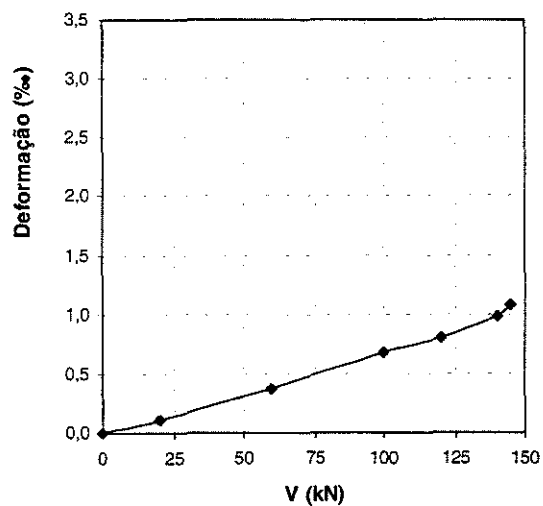
DEFORMAÇÕES NO CONCRETO
VIGA V4



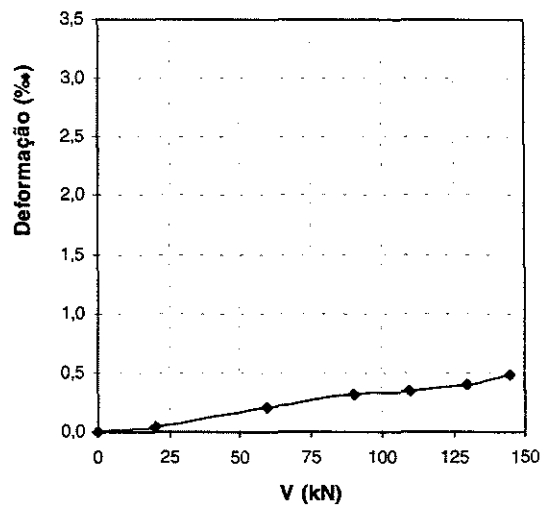
VIGAS V5 E V6 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO



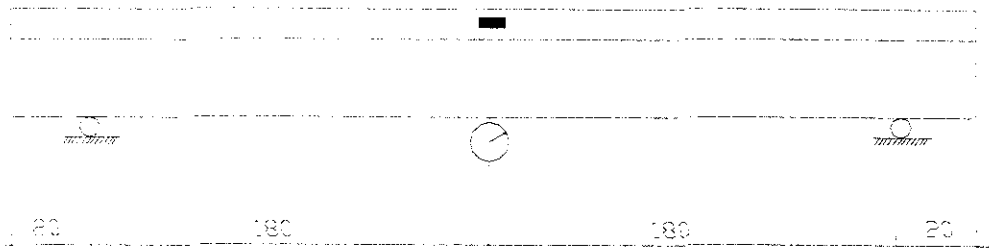
DEFORMAÇÕES NO CONCRETO
VIGA V5



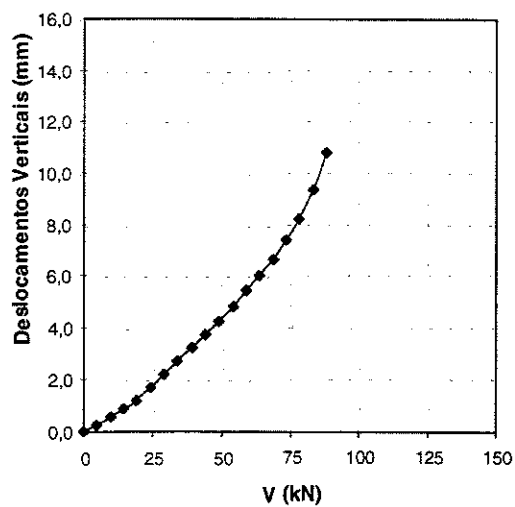
DEFORMAÇÕES NO CONCRETO
VIGA V6



VIGAS V1,V2,V3 E V4 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS



DESLOCAMENTOS VERTICAIS
VIGA V1



VIGAS V5 E V6 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

