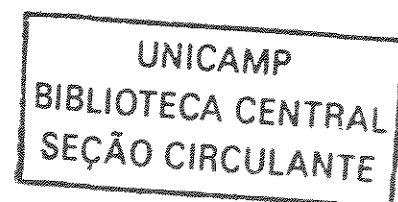


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**REFORÇO À FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO
UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE CARBONO**

Sílvia Maria Ascensão Guedes Gallardo

Campinas
2002



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

REFORÇO À FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO
UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE CARBONO

Sílvia Maria Ascensão Guedes Gallardo

Orientador: Armando Lopes Moreno Júnior

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

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

Prof. Dr.

Matrícula:

21412-4

Campinas

2002

200306564

HAMADAT/UNICAMP
 G135r
 EX
 ABO BC/ 52531
 DC 16-124/03
 C ☐ D ☒
 IÇO R\$ 11,00
 TA 13/03/02
 CPD

CM00180698-B

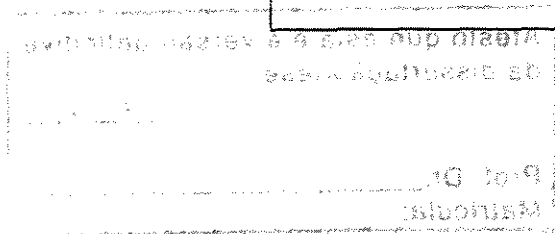
B 10 283928

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

G135r Gallardo, Sílvia Maria Ascensão Guedes
 Reforço à flexão em vigas de concreto utilizando
 polímeros reforçados com fibras de carbono / Sílvia
 Maria Ascensão Guedes Gallardo.--Campinas, SP: [s.n.],
 2002.

 Orientador: Armando Lopes Moreno Jr.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

 1. Flexão (Engenharia civil). 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 ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO**

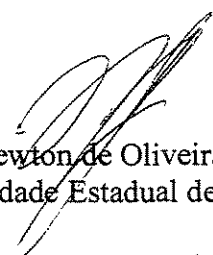
**REFORÇO À FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO
UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE CARBONO**

Sílvia Maria Ascensão Guedes Gallardo

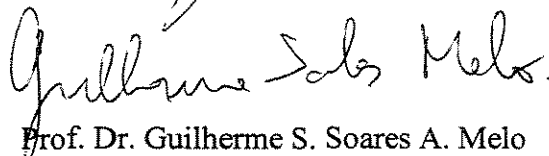
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Júnior
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Júnior
Universidade Estadual de Campinas



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

Campinas, Fevereiro de 2002.

DEDICATÓRIA

*Ao meu amado marido Gustavo,
meus amados pais Olegário e Maria Emília,
e meus amados irmãos Dô, Fabi, Lalá, Didi e Lili*

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 fundamental na realização deste trabalho.

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

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da Unicamp, pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao meu marido Gustavo, pelo apoio e paciência em todos os momentos difíceis desse período da minha vida.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE SIMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 MÉTODOS DE REFORÇO PARA VIGAS.....	4
3.1 ADIÇÃO DE PERFIS METÁLICOS.....	5
3.2 ARMADURAS DE COMPLEMENTAÇÃO OU REFORÇO.....	6
3.3 PROTENSÃO.....	8
3.4 COLAGEM DE CHAPAS DE AÇO COM RESINA EPÓXI OU FIXAÇÃO COM PARAFUSOS AUTO-FIXANTES.....	10
4 A FIBRA DE CARBONO E SEU USO COMO REFORÇO À FLEXÃO E VIGAS DE CONCRETO ARMADO.....	13
4.1 HISTÓRICO.....	14
4.2 MATERIAIS USADOS NOS COMPÓSITOS.....	15
4.2.1 A MATRIZ E SUA IMPORTÂNCIA.....	16
4.2.2 RESINAS EPÓXI.....	17
4.2.3 FIBRAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS ESTRUTURAIS.....	19
4.2.3.1 AS FIBRAS DE VIDRO.....	21
4.2.3.2 AS FIBRAS DE ARAMIDA.....	22
4.2.3.3 AS FIBRAS DE CARBONO.....	24

4.3	COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	26
4.3.1	RESISTÊNCIA À FADIGA DOS COMPÓSITOS.....	33
4.3.2	EFEITOS AMBIENTAIS PREJUDICIAIS AOS COMPÓSITOS.....	33
4.3.2.1	FATOR AMBIENTAL DE REDUÇÃO - C_E	36
4.4	APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP).....	37
4.4.1	CUIDADOS ESPECIAIS NAS ETAPAS DE APLICAÇÃO DOS COMPÓSITOS E EFEITOS DA AÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS....	38
4.4.2	PROTEÇÃO DURANTE O PERÍODO DE CURA DA RESINA.....	40
4.4.3	APLICAÇÃO DE LAMINADOS.....	41
4.4.4	APLICAÇÃO DE FOLHAS FLEXÍVEIS.....	43
4.4.4.1	CONTROLE DO DESCOLAMENTO DE PEQUENAS ÁREAS DO REFORÇO.....	46
4.5	MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS REFORÇADAS COM PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO.....	47
4.6	ANCORAGEM DOS COMPÓSITOS.....	50
4.6.1	SISTEMAS DE ANCORAGEM COM O USO DOS COMPÓSITOS.....	50
4.6.2	ANCORAGEM PROMOVIDA PELO CONTROLE DE TENSÕES....	53
4.7	INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS JÁ REALIZADAS.....	53
4.7.1	INVESTIGAÇÕES DE ROSS, C. A., JEROME, D. M., TEDESCO, J. W. E HUGHES, M. L. (1999).....	54
4.7.2	INVESTIGAÇÕES DE NORRIS, T., SAADATMANESH, H. e EHSANI, M. R.(1997).....	59
5	EQUACIONAMENTO.....	67
5.1	CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR ÚLTIMO.....	68
5.2	CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DE DESCOLAMENTO.....	72
6	METODOLOGIA / PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	78
6.1	DETALHES DAS VIGAS A ENSAIAR.....	78
6.2	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADOS.....	82
6.2.1	CONCRETO: CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	84
6.2.2	CARACTERÍSTICAS DAS ARMADURAS.....	87

6.2.3 CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS DE FIBRA D CARBONO UTILIZADOS.....	89
6.3 EXECUÇÃO, DESFORMA E CURA DAS VIGAS.....	91
6.4 MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO e DESLOCAMENTOS.....	93
6.4.1 NAS ARMADURAS.....	93
6.4.2 NOS COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO.....	95
6.4.3 NO CONCRETO.....	95
6.4.4 DESLOCAMENTO VERTICAL.....	96
6.5 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGAS.....	97
6.6 RESULTADOS ESPERADOS.....	99
7 RESULTADOS OBTIDOS.....	106
7.1 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO DAS VIGAS:.....	106
7.2 COMPORTAMENTO DA VIGA DURANTE O ENSAIO.....	107
7.3 TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL.....	116
7.4 TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL.....	116
7.5 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO.....	117
7.6 DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	117
8 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	147
9 CONCLUSÕES.....	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	161
ABSTRACT.....	167

LISTA DE FIGURAS

	Página
3.1 Reforço mediante a adição de perfis metálicos.....	5
3.2 (a) armadura da situação de projeto, (b) armadura corroída, (c) complementação pela adição de novas barras.....	7
3.3 Protensão usada em vigas para promover a costura de fissuras.....	8
3.4 Protensão usada na eliminação de deformações de uma viga.....	9
3.5 Reforço mediante a adição de chapas de aço coladas.....	10
3.6 Reforço mediante a adição de chapa de aço fixada com parafusos.....	11
4.1 Comportamento tensão-deformação de várias fibras usadas em reforços e do aço utilizado em concreto armado.....	20
4.2 Relação entre resistência e orientação da fibra.....	27
4.3 Variação na orientação das fibras na construção de laminados.....	28
4.4 Aspecto da folha flexível de fibras de carbono.....	29
4.5 Padrão de fissuração: (a) viga não reforçada, (b) viga reforçada com compósitos com fibras.....	32
4.6 Ensaio de pull out.....	39
4.7 Concentração de esforços devido a irregularidades na superfície da viga.....	41
4.8 Rolo de folhas flexíveis de fibra de carbono.....	43
4.9 Detalhe das camadas do processo de aplicação das folhas flexíveis de fibra de carbono...	44
4.10 Arredondamento de arestas para uma melhor aderência e transferência de esforços.....	45
4.11 Esmagamento do concreto por compressão na região da borda comprimida da viga.....	47

4.12 Ruptura do compósito usado no reforço.....	48
4.13 Descolamento da chapa de FRP usada no reforço.....	49
4.14 Arrancamento da camada de cobrimento devido à concentração de esforços de cisalhamento nas extremidades do laminado.....	49
4.15 a,b,c Métodos de ancoragem mecânica estudados por Ritchie et alii.....	51
4.16 Comprimento de ancoragem para vigas contínuas (a) e para vigas bi-apoiadas (b).....	52
4.17 Esquema de carregamentos e seção transversal da viga ensaiada.....	55
4.18 Comparação entre a relação área de concreto / área de armadura e o valor de RE.....	57
4.19 Comparação entre a taxa de armadura longitudinal utilizada e o valor de RE.....	58
4.20 Dimensões e armadura das vigas ensaiadas.....	60
4.21 (A), (B), (C) e (D) Sistemas de Reforço utilizados no trabalho.....	61
4.22 Diagrama carga x deslocamento para a viga IA.....	63
4.23 Diagrama carga x deslocamento para a viga IB.....	64
4.24 Diagrama carga x deslocamento para a viga ID.....	65
5.1 Forças e deformações em uma viga reforçada com fibra de carbono.....	68
5.2 Fissuração de cisalhamento na região da extremidade do compósito.....	76
5.3 Elemento formado entre duas fissuras de cisalhamento adjacentes.....	76
6.1 Características Geométricas das Vigas.....	79
6.2 Esquema de Carregamento das Vigas.....	79
6.3 Detalhe da armação da viga: armadura transversal e longitudinal.....	80
6.4 Detalhe do sistema de reforço a ser empregado na viga 2.....	81
6.5 Detalhe do sistema de reforço a ser empregado na viga 3.....	82
6.6 Detalhe do sistema de reforço a ser empregado na viga 4.....	82
6.7 Detalhe do sistema de reforço a ser empregado na viga 5.....	83
6.8 Detalhe do sistema de reforço a ser empregado na viga 6.....	83
6.9 Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.....	85
6.10 Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.....	86
6.11 Diagrama Tensão-Deformação do aço de diâmetro de 6,3 mm.....	87
6.12 Diagrama Tensão-Deformação do aço de diâmetro de 12.5 mm.....	88
6.13 Diagrama tensão x deformação da fibra de carbono.....	89
6.14 Detalhe do adensamento do concreto da viga V1, com o uso de vibrador.....	92

6.15 Vigas e corpos de prova cobertos por lona plástica durante o processo de cura.....	92
6.16 Posicionamento dos extensômetros nas armaduras longitudinal (L) e transversal (T).....	94
6.17 Detalhe de extensômetro colado numa das barras da armadura longitudinal da viga V2.	94
6.18 Detalhe da instrumentação feita nos compósitos.....	95
6.19 Posicionamento das pastilhas e do defletômetro.....	96
6.20 Detalhe do posicionamento do defletômetro na viga V1.....	97
6.21 Detalhe da viga V1 posicionada no pórtico, antes da realização do ensaio.....	98
6.22 Detalhe da marcação das fissuras realizada na viga V2.....	98
7.1 Detalhe da viga V1 logo após o término do ensaio.....	107
7.2 Detalhe do descolamento da camada de compósito na viga V2.....	109
7.3 Detalhe do padrão de fissuração obtido para a viga V2.....	109
7.4 Detalhe do arrancamento da camada de cobrimento com o reforço, apresentado pela viga V3.....	110
7.5 Detalhe da Ruptura da Viga V3.....	110
7.6 Detalhe da Fissuração da Viga V4.....	111
7.7 Detalhe da Fissuração da Viga V4.....	111
7.8 Posicionamento da viga V5 no pórtico durante o ensaio.....	112
7.9 Detalhe da Ruptura do reforço na região do meio do vão.....	113
7.10 Detalhe da fissuração apresentada pela viga V5 durante o ensaio.....	113
7.11 Detalhe da abertura de fissuras apresentada pela viga V5 após a ruptura do reforço.....	114
7.12 Detalhe do posicionamento da viga V6 no pórtico.....	115
7.13 Detalhe do rompimento da ancoragem e descolamento da camada de reforço da viga V6.....	115
7.14a Tensões na armadura transversal da viga V1.....	118
7.14b Tensões na armadura transversal da viga V2.....	119
7.14c Tensões na armadura transversal da viga V3.....	120
7.14d Tensões na armadura transversal da viga V4.....	121
7.14e Tensões na armadura transversal da viga V5.....	122
7.14f Tensões na armadura transversal da viga V6.....	123
7.15a Tensões na armadura longitudinal da viga V1.....	124
7.15b Tensões na armadura longitudinal da viga V1.....	125

7.15c Tensões na armadura longitudinal da viga V2.....	126
7.15d Tensões na armadura longitudinal da viga V2.....	127
7.15e Tensões na armadura longitudinal da viga V3.....	128
7.15f Tensões na armadura longitudinal da viga V3.....	129
7.15g Tensões na armadura longitudinal da viga V4.....	130
7.15h Tensões na armadura longitudinal da viga V4.....	131
7.15i Tensões na armadura longitudinal da viga V5.....	132
7.15j Tensões na armadura longitudinal da viga V5.....	133
7.15k Tensões na armadura longitudinal da viga V6.....	134
7.15l Tensões na armadura longitudinal da viga V6.....	135
7.16a Tensões nas fibras da viga V2.....	136
7.16b Tensões nas fibras da viga V3.....	137
7.16c Tensões nas fibras da viga V4.....	138
7.16d Tensões nas fibras da viga V5.....	139
7.16e Tensões nas fibras da viga V6.....	140
7.17a Deformações no concreto das vigas V1 e V2.....	141
7.17b Deformações no concreto das vigas V3 e V4.....	142
7.17c Deformações no concreto das vigas V5 e V6.....	143
7.18a Diagrama dos deslocamentos verticais das vigas V1 e V2.....	144
7.18b Diagrama dos deslocamentos verticais das vigas V3 e V4.....	145
7.18c Diagrama dos deslocamentos verticais das vigas V5 e V6.....	146
8.1 Tensões nos estribos mais solicitados em cada viga.	151
8.2 Tensões nas armaduras longitudinais mais solicitadas em cada viga.....	152
8.3 Deformações nas armaduras longitudinais mais solicitadas em cada viga.....	153
8.4 Tensões nas fibras mais solicitadas em cada viga.	155
8.5 Deformações nas fibras mais solicitadas em cada viga.....	155
8.6 Deformações no concreto em cada viga.	156
8.7 Deslocamentos Verticais em cada viga.....	157

LISTA DE TABELAS

	Página
4.1 Módulo de elasticidade de algumas fibras utilizadas em engenharia civil.....	20
4.2 Dados comparativos entre várias formas de plásticos armados com fibras de carbono.....	26
4.3 Posição e alinhamento das fibras para folhas, tecidos e laminados.....	31
4.4 Valores do coeficiente de expansão térmica para compósitos FRP.....	35
4.5 Fator ambiental de redução de acordo com o tipo de fibra utilizada.....	36
4.6 Armadura longitudinal inferior das vigas, por grupo.....	54
4.7 Resultados obtidos para todas as vigas.....	56
4.8 Denominação dada às vigas.....	62
6.1 Características da folha flexível de fibra de carbono ensaiada.....	90
6.2 Características da resina epóxi usada para o tamponamento dos poros (Primer).....	90
6.3 Características da resina epóxi utilizada como massa niveladora (Putty).....	90
6.4 Características da resina epóxi utilizada como saturante (Saturant).....	91
6.5 Valores teóricos esperados para os ensaios.....	99
7.1 Características do concreto da viga V1.....	102
7.2 Resultados do ensaio da viga V1.....	104
8.1 Comparação entre o valor teórico e experimental do momento último para as vigas.....	147
8.2 Acréscimo na cortante última para cada uma das vigas reforçadas.....	148
8.3 Comparação entre o valor teórico e experimental do momento último para as vigas.....	150
8.4 Incremento no Valor da Carga Máxima para as Vigas Reforçadas.....	154

LISTA DE SÍMBOLOS

C_c = resultante de compressão do concreto.

C_s = resultante de compressão do aço.

f_c = resistência à compressão do concreto.

f_y = tensão de escoamento do aço.

T_s = resultante de tração no aço.

T_c = resultante de tração no concreto.

T_{FRP} = resultante de tração na folha de reforço.

A_s = área de armadura.

E_s = módulo de deformação do aço.

E_c = módulo de elasticidade do concreto.

E_p = módulo de elasticidade do compósito.

b = largura da viga.

h = altura da viga.

ϵ_s = deformação no aço.

ϵ_{FRP} = deformação na folha de reforço.

ϵ_y = deformação de escoamento do aço.

ϵ_{cu} = deformação de encurtamento do concreto.

α_1 = fator de distribuição uniforme de esforços.

β_1 = fator de profundidade da linha neutra.

ϕ_{FRP} = fator de resistência da folha de reforço.

ϕ_c = fator de resistência do concreto.

ϕ_s = fator de resistência do aço. sobrescrito ' = de compressão

t_p = espessura do compósito.

t_a = espessura da camada de adesivo.

L_0 = distância entre a extremidade do compósito e o apoio da viga.

y' = distância entre o compósito e a linha neutra da viga.

y_c' = distância entre o centro da viga e sua extremidade (metade da altura).

I_{tr} = momento de inércia da viga reforçada, com relação ao concreto.

G_a = módulo de cisalhamento do adesivo (ou resina).

I_c = momento de inércia da viga de concreto.

I_p = momento de inércia da camada de compósito.

b_p = largura da camada de compósito.

M_0 = valor do momento fletor na região da extremidade do compósito.

q = carga distribuída na viga.

V_0 = valor da força cortante na região da extremidade do compósito.

f_p = tensão axial no compósito.

RESUMO

Gallardo, Sílvia Maria Ascensão Guedes. Reforço à Flexão em Vigas de Concreto Utilizando Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 229 pág. Dissertação final apresentada para obtenção de título de Mestrado.

A área de reforço e recuperação estrutural apresentou um grande salto em seu desenvolvimento, a partir do surgimento de novas técnicas, como o emprego de compósitos à base de fibras de carbono. Este trabalho investigou o comportamento de vigas de concreto reforçadas à flexão pela utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono. Foram analisadas seis vigas de concreto armado com armaduras e concreto com resistência à compressão idênticas, mas reforçadas diferentemente no que se refere ao número de camadas de compósitos utilizados e à ancoragem. Os resultados obtidos foram comparados com os de uma viga de referência, não reforçada.

1 INTRODUÇÃO

A área de recuperação e reforço estrutural vem apresentando importância cada vez maior na indústria da construção civil devido, principalmente, ao panorama econômico brasileiro; que colabora para que seja dada maior ênfase à recuperação e ao reforço do que à construção de novas estruturas.

A necessidade do emprego do reforço pode surgir não apenas em estruturas antigas e/ou danificadas, mas também naquelas estruturas onde se deseja um aumento de sua capacidade portante.

Algumas falhas decorrentes das etapas de projeto ou execução podem originar a necessidade do reforço. Entre elas estão: erros de cálculo; uso de materiais de construção de baixa qualidade; utilização incorreta da obra, com a aplicação de sobrecargas não previstas em projeto; má execução, etc.

Em relação ao material empregado, as técnicas de reforço mais comumente aplicadas em vigas são:

- a) reforço utilizando-se argamassa ou concreto,
- b) reforço empregando-se chapas de aço,
- c) reforço empregando-se compósitos com fibras de carbono.

A técnica de reforço empregando-se fibras de carbono desenvolveu-se mais rapidamente após o sismo no distrito de Kobe, no Japão, em 1995 e, desde então, tem sido largamente utilizada naquele país e na Europa.

As fibras de carbono possuem um alto módulo de elasticidade e altas resistências tanto à tração quanto à compressão.

As fibras de carbono, na área de reforço estrutural, são empregadas na forma de compósitos, em conjunto com uma matriz constituída por um material polimérico, geralmente uma resina epóxi. Esses compósitos são conhecidos por polímeros reforçados com fibras, ou *Fiber Reinforced Polymers (FRP)*.

Uma das formas comerciais mais empregadas destes plásticos em conjunto com as fibras de carbono são os laminados. Nesses compósitos, os feixes de filamentos de fibras de carbono são agrupados de forma contínua e colocados de maneira alternada com camadas de resina epoxídica, assumindo espessuras da ordem de milímetro.

Essa tecnologia é relativamente nova no Brasil, apresentando uma técnica muito simples de aplicação, ausência de problemas de corrosão, flexibilidade e fácil moldagem, além de possuir um baixo peso próprio e de ser álcali-resistente.

O emprego de fibras de carbono em reforços, tanto em relação à flexão quanto ao cisalhamento, proporciona um aumento na capacidade resistente das vigas de concreto armado, (flexão, cisalhamento), com redução da fadiga e aumento da rigidez e da durabilidade.

Apesar do sucesso obtido com o uso desta tecnologia no Japão e Europa, seu uso ainda é incipiente no Brasil. Esse fato pode ser explicado devido à quase inexistência de resultados experimentais obtidos em nosso país e à grande simplicidade do método de aplicação do material, que acaba causando certa hesitação em relação ao seu emprego.

Pode-se afirmar que trabalhos de pesquisa direcionados à realidade nacional ainda são escassos. Portanto, como forma de contribuição à comunidade técnica, a pesquisa aqui exposta visa estudar o comportamento à flexão teórico e experimental de vigas reforçadas por meio de compósitos reforçados com fibras de carbono.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho teve como principal objetivo a investigação do comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas por meio de polímeros reforçados com fibras de carbono. Essa investigação compreendeu o estudo do modo de ruptura, (que pode se dar de maneira brusca ou dúctil), do sistema de ancoragem e do número de camadas de compósito a ser utilizado.

Outro objetivo foi o de se estudar alguns dos modelos de cálculo existentes para o cálculo do reforço e de seu possível descolamento, verificando-se sua aplicabilidade para os resultados experimentais obtidos por este trabalho e analisando a contribuição da ancoragem.

Também procurou-se verificar ganhos de resistência última nas vigas reforçadas e um aumento de rigidez proporcionados pelo emprego do reforço, confirmando o sucesso da técnica estudada e fornecendo subsídios importantes ao meio técnico nacional, em relação ao emprego deste material como reforço à flexão em vigas de concreto.

3 MÉTODOS DE REFORÇO PARA VIGAS

Uma viga pode necessitar de reforço/reparo para aumento de sua capacidade de resistir a esforços cortantes e/ou esforços de flexão.

No caso da flexão, a falha pode produzir-se por diversos motivos. Entre os principais motivos, temos:

- a) insuficiência de armadura de tração, geralmente devido a problemas de corrosão;
- b) resistência à compressão insuficiente da viga, seja por reduzida área de aço na zona de compressão ou pela baixa qualidade do concreto empregado.

Pode-se ainda utilizar o reforço para que a viga aumente sua capacidade resistente e possa suportar novos carregamentos que não haviam sido previstos na fase de projeto ou que surgiram devido a uma mudança no uso da edificação.

O projeto de reforço deve levar em conta, entre outros fatores, a concepção original da estrutura, sua história, a disponibilidade de mão-de-obra e de materiais, os defeitos existentes e as novas exigências quanto à sobrecarga e arquitetura.

São diversos os métodos de reforço à flexão existentes para vigas e a escolha de um método em particular dependerá de uma análise prévia de fatores que vão desde a disponibilidade do material de reforço até o grau de impacto na arquitetura existente.

A seguir, são apresentados alguns destes métodos.

3.1 ADIÇÃO DE PERFIS METÁLICOS

Os perfis metálicos podem ser empregados para reforçar uma viga tanto à flexão como ao esforço cortante.

Uma utilização bastante comum é a de cantoneiras unidas por presilhas de aço ou chumbadores, como visto na figura 3.1.

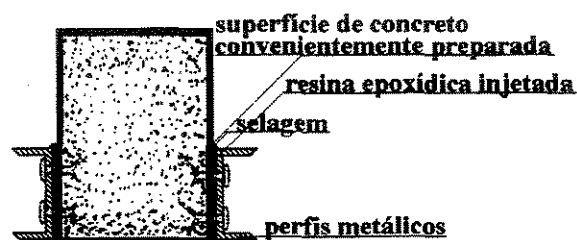


FIGURA 3.1 Reforço mediante a adição de perfis metálicos. Fonte: Ripper e Moreira de Souza (1998).

Também podem ser usadas resinas epoxídicas para se melhorar a aderência entre o aço e o concreto. Essa resina normalmente é colocada por injeção, após a colocação dos chumbadores; por isso, deve ter viscosidade inferior à aquela utilizada na colagem de chapas de aço.

Antes do processo de aplicação dos perfis, deve-se verificar se a superfície da viga não apresenta fissuras. Se elas existirem, devem ser seladas para se evitar possíveis fugas de resina.

Após a fixação do perfil, promove-se sua vedação ao redor de todo seu perímetro e ao redor dos chumbadores, com exceção dos pontos por onde serão introduzidos tubos de plástico por onde será feita a injeção.

Essa injeção é feita, normalmente, por bombas elétricas com dosadores de mistura da resina com o componente endurecedor.

Para que a aderência promovida pela resina seja efetiva é importante que exista certa rugosidade na superfície do concreto. Uma superfície muito rugosa, no entanto, pode provocar descontinuidades na película de cola, com a formação de bolhas de ar decorrentes de um excesso pontual na espessura de cola.

Então, o mais apropriado será uma superfície uniformemente rugosa, resultante do uso de jatos de areia, por exemplo, devendo estar limpa e seca no momento da aplicação da resina.

Um problema deste tipo de reforço sem o uso das resinas é a ausência de aderência aço-concreto, fazendo com que as cantoneiras não trabalhem simultaneamente com o concreto, quando à tração.

Os elementos reforçados por essa técnica se comportam, no seu estado último, como peças de concreto armado tradicionais, com armadura total correspondente à armadura interior mais a exterior (perfis).

3.2 ARMADURAS DE COMPLEMENTAÇÃO OU REFORÇO

A adição de armaduras pode ser usada para se aumentar a capacidade resistente da viga, caracterizando o reforço, e, também, para recuperar uma armadura danificada pela corrosão, quando perde parte de sua seção original, caso da figura 3.2.

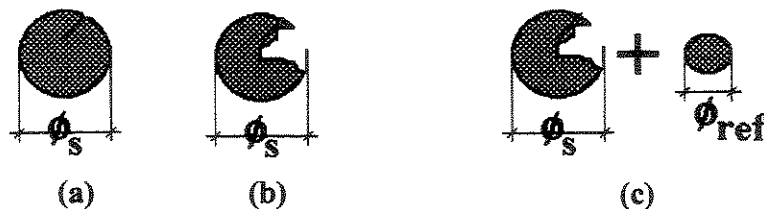


FIGURA 3.2 (a) armadura da situação de projeto, (b) armadura corroída, (c) complementação pela adição de novas barras.

Este reforço também pode ser realizado frente à flexão e frente ao esforço cortante, em cada caso, com procedimentos específicos de aplicação.

Segundo Ripper e Moreira de Souza (1998), é costume adotar-se a necessidade de adição de uma nova barra quando a redução da barra corroída tiver ultrapassado 15%. Sugere-se, ainda, que este limite não seja analisado barra a barra, mas sim em toda a seção transversal de armadura. Teríamos, então, que a redução total da área de armadura não deveria ultrapassar o valor de 15%. Ou seja:

$$\Sigma A_s \text{ corroída} < 0,85 A_s$$

No caso da viga possuir uma armadura de flexão insuficiente na zona de tração, pode-se fazer um acréscimo com concreto na altura da viga e ali colocar a armadura adicional. Esse acréscimo pode apresentar um melhor desempenho se for usado um adesivo epóxi adequado na união concreto velho/ concreto novo.

Quando o aumento da altura da viga não for possível, pode-se introduzir as armaduras adicionais de flexão em sulcos longitudinais abertos na face inferior da viga, que são fechados posteriormente com argamassa epóxi ou com argamassa de cimento de alta resistência e retração controlada ou ligeiramente expansiva. Nesse caso, é mais comum admitir-se que o comprimento

de emenda se promova apenas no trecho não corroído, ignorando-se o limite visto anteriormente, no qual com apenas 15% de área corroída ainda teríamos um desempenho aceitável da armadura.

A emenda de uma barra de reforço ou recuperação deve ocupar o menor comprimento longitudinal possível, para que não haja necessidade de remoção de uma camada adicional de concreto, e um mínimo espaço transversal, oferecendo mínima obstrução para o material cimentício de complementação.

Nos casos em que houver espaço suficiente para se fazer o transpasse, esse será o tipo de emenda mais recomendado. Pode-se recorrer também a uma ligeira inclinação das barras.

3.3 PROTENSÃO

Consiste em se introduzir uma força exterior capaz de compensar a existência de acréscimos de tensões interiores indesejáveis, incrementando-se a capacidade resistente da viga.

A técnica de protensão exterior, isto é, não aderente, utilizando-se barras ou cabos, têm sido a mais defendida no caso de serviços de recuperação ou reforço. Como no caso de costura de fissuras, com a colocação de barras de aço rosqueadas nas extremidades, junto às almas das vigas e tensionadas pelas porcas que transmitirão sua tensão a ancoragens adequadas, (fig. 3.3).

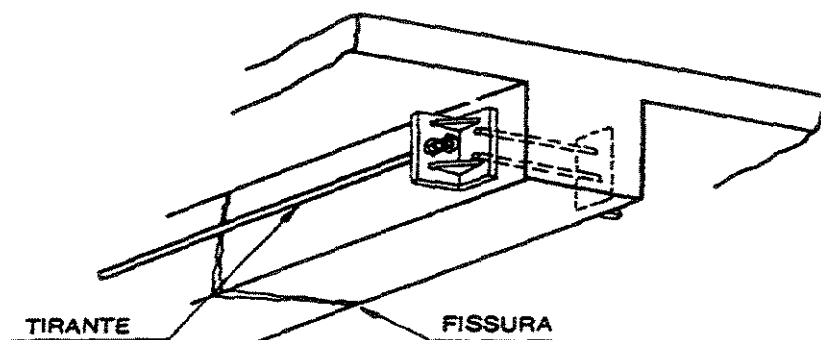


FIGURA 3.3 Protensão usada em vigas para promover a costura de fissuras. Fonte: Cánovas (1998).

A protensão exterior também pode ser utilizada para eliminação da deformação de uma viga, (fig. 3.4). Com a protensão, o cabo tensionado transmite esforços verticais à viga, comprimindo a parte inferior tracionada e conduzindo a viga a sua posição primitiva.

Dependendo da tensão disponível, pode-se até conseguir uma contra-flecha.

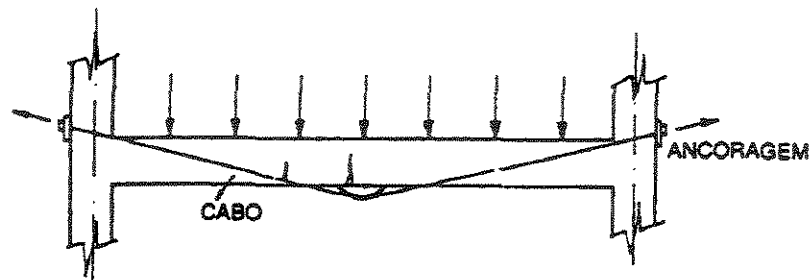


FIGURA 3.4 Protensão usada na eliminação de deformações de uma viga. Fonte: Cánovas (1998).

A principal vantagem apresentada por este método é que a força de protensão pode ser aplicada na viga carregada, sem a necessidade de escoramento prévio antes da aplicação do reforço.

Outra importante vantagem é a possibilidade de se voltar a aplicar o esforço no futuro, corrigindo-se erros, perda ou mudança das condições iniciais, com o passar do tempo. Além disso, pode-se utilizar plenamente a capacidade resistente da estrutura existente, mesmo que esteja deformada.

3.4 COLAGEM DE CHAPAS DE AÇO COM RESINA EPÓXI OU FIXAÇÃO COM PARAFUSOS AUTO-FIXANTES

Este método é muito utilizado, pois pouco interfere nas dimensões arquitetônicas, introduz um baixo peso próprio na estrutura e é de fácil execução. Além disso, a correta colocação das chapas não interfere na redistribuição dos esforços no restante da estrutura.

Para a preparação da superfície do concreto, deve-se seguir o mesmo disposto para a adição de perfis metálicos.

Para as chapas coladas (fig. 3.5), a superfície da chapa de aço deve ser previamente desengordurada com tricloruretano e depois ser submetida à decapagem com jato abrasivo. E, as superfícies que não ficarem em contato com a resina deverão receber tratamento de pintura anticorrosiva.

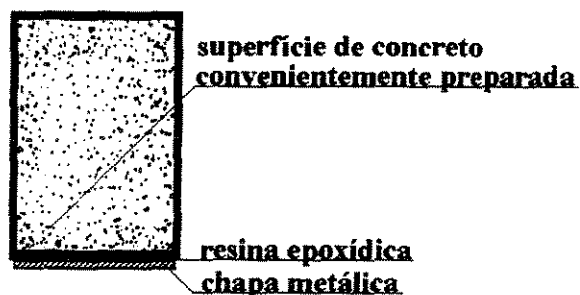


FIGURA 3.5 Reforço mediante a adição de chapas de aço coladas. Fonte: Ripper e Moreira de Souza (1998).

Após a aplicação da resina na viga, as chapas serão fixadas mediante uma ligeira pressão para que o excesso de resina seja expulso, até que ocorra o seu endurecimento.

No caso da fixação da chapa com a contribuição adicional de parafusos (geralmente com buchas expansivas, fig. 3.6), estes possuem dupla função: uma de montagem, garantindo ancoragem à chapa enquanto ocorre o endurecimento da resina; e a outra estrutural, servindo de elemento resistente para garantir a manutenção do reforço em casos de comprometimento da resina.

Primeiramente são abertos os locais para a colocação dos parafusos e, durante a aplicação da resina, eles deverão ser protegidos para que a resina não os preencha. Após o posicionamento da chapa sobre a viga, os parafusos devem ser colocados.

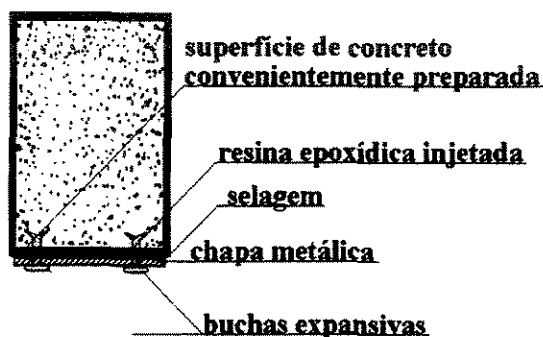


FIGURA 3.6 Reforço mediante a adição de chapa de aço fixada com parafusos. Fonte: Ripper e Moreira de Souza (1998).

O uso dos dois materiais, (resina + parafusos), tem sido defendido por alguns pesquisadores devido ao seu comportamento solidário e melhor distribuição dos esforços.

Apesar do uso de chapas de aço ter sido amplamente divulgado em diversos países como uma técnica eficiente e prática, podem surgir problemas graves já citados por Saadatmanesh, H. et alii (1991) e por Meier, U. et alii (1992).

Um problema bastante citado é o da corrosão, comprometendo o desempenho do reforço. Essa corrosão surge na interface resina – chapa de aço, dificultando sua observação e é considerada um problema grave já que sua constatação pode ser demorada. Além disso, surgem

dificuldades quando da fixação dos parafusos, pois durante a abertura dos furos pode-se atingir a armadura longitudinal, cujo posicionamento nem sempre é conhecido devido à inexistência dos projetos originais.

Existem, ainda, outros problemas como os associados à agressividade ambiental, peso acrescentado à estrutura (no caso da utilização de grandes áreas de chapas de aço) e até mesmo da relação custo-benefício. Por isso, tem-se recorrido ao uso de novas técnicas como o emprego de materiais compósitos, que apresentam melhor desempenho.

O uso de **compósitos com fibras de carbono** é uma dessas técnicas e, por ser objeto de estudo deste trabalho, será mais detalhado nos capítulos seguintes.

4 A FIBRA DE CARBONO E SEU USO COMO REFORÇO À FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

As fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros orgânicos, sendo suas características diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. Compostas em sua maioria por átomos de carbono, as fibras são formadas por feixes de 500 a 150000 filamentos de, aproximadamente, 5 microns de diâmetro, possuindo alto módulo de elasticidade e altas resistências tanto à tração quanto à compressão.

Os compósitos reforçados com fibras de carbono são formados por filamentos paralelos, aderidos através de quantidades muito pequenas de resina epóxi, podendo assumir espessuras da ordem de décimos de milímetro.

A espessura e o formato em folhas, tecidos ou laminados permitem a fácil moldagem do conjunto às diversas formas geométricas da superfície receptora da estrutura ou elemento estrutural a ser reforçado.

O uso da fibra de carbono no reforço à flexão, apesar de recente, tem demonstrado resultados surpreendentes no que se refere à facilidade de aplicação dos compósitos e ao incremento na capacidade de carga obtido.

4.1 HISTÓRICO

A utilização de compósitos reforçados com fibras (FRP) em elementos de concreto, como alternativa ao aço, começou ao que se tem notícia, em meados deste século (Rubinsky and Rubinsky, 1954).

No que se refere ao reforço de estruturas por adição de elementos exteriores, tudo começou em finais da década de 60, com as primeiras pesquisas de Bresson e L'Hermite, no ITBTP da França, sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com chapas de aço coladas com resina epóxi.

O sucesso deste tipo de reforço de estruturas através da colagem de chapas metálicas, levou um conjunto de pesquisadores a se dedicar à investigação de alternativas ao aço, particularmente através do uso de materiais mais leves e mais duráveis.

Em meados da década passada, com a constante ameaça de um violento sismo no distrito de Kanto, que inclui a cidade de Tóquio, o governo japonês tomou a decisão de preparar as construções existentes, em particular as estruturas do sistema viário. Surgiu, então, a idéia de se adaptar a utilização de compósitos de fibras de carbono (CFRP), material já amplamente utilizado em soluções de reforço de alto desempenho nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automobilística; ao reforço das estruturas de concreto armado.

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

Os compósitos com fibras de carbono vêm sendo utilizados, desde então, em pilares, aumentando sua ductilidade e em vigas e lajes, aumentando sua capacidade resistente à flexão e ao cisalhamento.

Esta tecnologia representa, portanto, mais um passo evolutivo na indústria da construção civil para a reabilitação de estruturas de concreto, dando sequência a um ciclo que antes já passou pelo recurso a metodologias tão distintas quanto as do aumento de seções pela aplicação de concreto projetado e/ou argamassas modificadas, e pelo reforço através da adição de chapas de aço coladas ao concreto.

4.2 MATERIAIS USADOS NOS COMPÓSITOS

O termo compósito pode ser aplicado para qualquer combinação de dois ou mais materiais diferentes, claramente identificáveis, em que as propriedades do conjunto são superiores às que possuem em separado, para um determinado propósito.

Neste trabalho, os compósitos são formados por uma matriz de um material polimérico reforçado por fibras de carbono.

A performance de qualquer compósito depende dos seus materiais constituintes, do arranjo do material que irá suportar as solicitações (fibras), e da interação entre os materiais (fibras e matriz).

Os principais fatores que afetam a performance física dos compósitos com fibras são as propriedades mecânicas das fibras, sua orientação, formato e composição, as propriedades mecânicas da resina da matriz e a adesão entre as fibras e a matriz.

4.2.1 A MATRIZ E SUA IMPORTÂNCIA

Grande parte da literatura sobre compósitos, principalmente aquela que trata sobre o reforço de concreto armado, focaliza as fibras como sendo o constituinte principal no suporte dos carregamentos. Apesar disso, é muito importante considerar e entender o papel importante desenvolvido pela matriz.

As funções da matriz são transferir os esforços entre as fibras e proteger as fibras de danos mecânicos ou causados pelo meio ambiente. Por essas razões tem sido dada uma ênfase maior para a resina da matriz, que constitui-se num material polimérico.

Um polímero é definido como uma molécula de cadeia longa, tendo uma ou mais unidades repetidas de átomos unidos por forças covalentes. Um material polimérico, (ou um plástico), é uma coleção de um grande número de moléculas poliméricas de estrutura química similar.

As matrizes mais usadas são formadas de materiais poliméricos.

Os polímeros são formados por 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.

A polimerização pode ocorrer em virtude da ação conjunta de um catalisador e do calor, pela ação de raios gama emitidos por cobalto 60, ou pela ação conjunta de um catalisador e um acelerador, à temperatura ambiente.

Matrizes poliméricas como as de poliéster, éster-vinil ou epóxi, em comparação com os termoplásticos usados comumente na engenharia, apresentam um grande aumento na performance frente a altas temperaturas e na capacidade de suportar cargas. Normalmente, esses

polímeros só pegam fogo a temperaturas muito altas, mas podem sofrer alterações em suas propriedades, daí a continuidade de pesquisas para o desenvolvimento de resinas mais resistentes ao fogo.

Os polímeros são quase sempre processados com uma baixa viscosidade, em estado líquido. Portanto, é possível se obter um bom “envolvimento” da fibra, sem se ter que recorrer ao uso de altas temperaturas ou de pressão. Esse tipo de material tem sido a escolha de maior aplicação em compósitos, incluindo o reforço de concreto.

As matrizes poliméricas termoplásticas possuem uma grande resistência ao impacto, assim como alta resistência à ruptura, muitas vezes apresentando maiores deformações na ruptura do que alguns polímeros.

4.2.2 RESINAS EPÓXI

As resinas epoxídicas são as resinas mais utilizadas no Brasil para obras de recuperação ou de reforço de estruturas, sendo as matrizes mais utilizadas em compósitos estruturais.

Estas resinas são derivadas do petróleo, resultantes da combinação da epocloridina e do bifenol. De acordo com as proporções utilizadas de cada um destes componentes, torna-se possível a obtenção de resinas com diferentes propriedades, principalmente no que diz respeito a sua densidade e peso molecular.

Para se conseguir a polimerização das resinas epoxídicas são usados catalisadores, em geral à base de aminas e poliaminas, ou poliamidas, à temperatura ambiente, produtos estes caracterizados por possuírem hidrogênios ativos em suas moléculas. Outros materiais que podem ser adicionados na fase inicial são diluentes, para diminuir a viscosidade e flexibilizadores, para aumentar a resistência ao impacto da resina curada.

Obtém-se, então, produtos denominados de formulações epoxídicas, que são, em última análise, os produtos realmente úteis aos trabalhos de recuperação e de reforço de estruturas de concreto.

As resinas epoxídicas podem ser curadas a diferentes temperaturas, da temperatura ambiente até temperaturas que atingem os 175° C, e com o uso, ou não, de endurecedores.

De acordo com as proporções de resina e de endurecedor, e do tipo de endurecedor utilizado, obtém-se o produto mais apropriado para determinada aplicação.

Estas formulações têm boa aderência à maioria dos materiais, como o concreto, argamassas e aço, mas não aderem a superfícies sujas de ceras, graxas ou óleos ou a materiais em desagregação.

As resinas epóxi provêm, ainda, as seguintes características:

- a) grande variedade de propriedades mecânicas e físicas, obtida devido à diversidade de materiais que podem ser adicionados à mistura.
- b) não emissão de monômeros voláteis durante a cura e o processamento.
- c) ausência quase total de retração durante a cura, garantindo a integridade da superfície de ligação.
- d) boa adesão a fibras e substratos.

A resina influi muito pouco na resistência à tração final do plástico, mas influi bastante no comportamento do mesmo ao corte e à compressão. A grande influência da resina acontece nas condições de fabricação do plástico, tais como viscosidade, ponto de fusão, temperatura de cura, etc.

É fundamental que a quantidade de resina utilizada seja estritamente a necessária à impregnação e/ou colagem das fibras, para que não haja alteração das características do plástico, pois quanto mais resina, maior será o peso do compósito e menor sua resistência.

As características exigidas às resinas de epóxi com função resistente são:

- módulo de elasticidade da ordem dos 2 GPa. (Cánovas (1988)).
- baixa retração durante o processo de cura.
- estabilidade frente a agentes químicos.
- boa capacidade de adesão às fibras.
- boa adesão ao substrato em que será aplicada.

Para os adesivos de epóxi usados para colagem de laminados ao substrato, por serem mais espessos, é indispensável a apresentação de um elevado módulo de elasticidade, (aproximadamente 7 GPa), em especial face a esforços de cisalhamento, de forma a garantir a sua transmissão entre os elementos colados.

Nos casos em que houver confinamento, o uso do epóxi deve se restringir a situações de amarração e emenda, usando-se resinas de poliuretano nas demais situações.

4.2.3 FIBRAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

As principais fibras usadas em aplicações na engenharia civil são as fibras de vidro, as de carbono, as de poliéster e as de aramida (*Aromatic polyamid*) .

Cada uma destas fibras possui propriedades de alongamento e tensão-deformação diferentes, (tabela 4.1).

No emprego de cada uma delas, deve-se ter certeza de que a energia absorvida na ruptura, que corresponde à área sob a curva tensão-deformação, mostrada na figura 4.1, é a maior possível, já que isso indica um compósito mais tenaz.

TABELA 4.1 – Módulo de elasticidade de algumas fibras utilizadas em engenharia civil.

Tipo de fibra	Módulo de elasticidade (GPa)
carbono	240 – 640
aramida	124
vidro	65 – 70

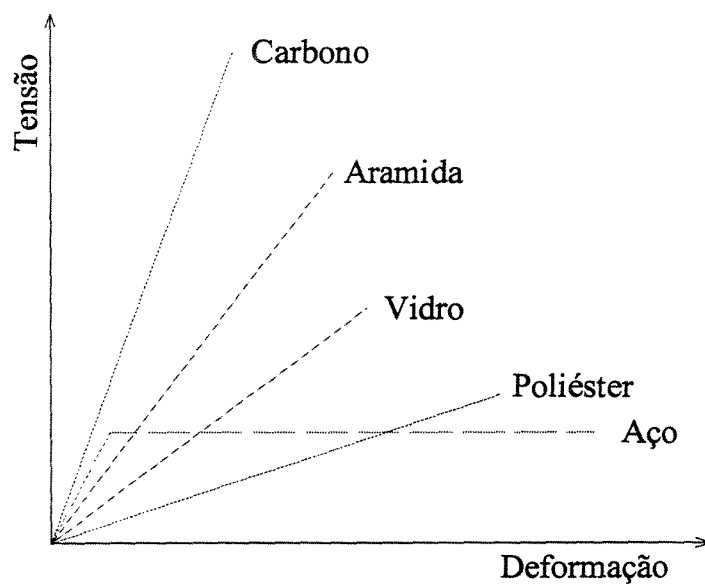


FIGURA 4.1 Comportamento tensão-deformação de várias fibras usadas em reforços e do aço utilizado em concreto armado.

4.2.3.1 AS FIBRAS DE VIDRO

As fibras de vidro têm sido muito utilizadas na indústria da construção civil, devido à condição satisfatória encontrada na relação entre seu custo e sua resistência. Elas são usadas em reforço estrutural principalmente quando se tem problemas de abalos sísmicos, sendo utilizado um tipo especial de fibras quando o ambiente é alcalino.

As formulações comerciais mais utilizadas são a *E-glass*, a mais usada na constituição de compósitos para reforços, a *ECR*, um tipo modificado de *E-glass* que possui maior resistência a ácidos e a *S-glass*, que possui alta resistência e boa performance frente a altas temperaturas, sendo, também, a formulação mais cara do mercado.

Outras composições ainda incluem os tipos *AR* (álcali-resistentes), *R* e *Te*, com diferentes composições químicas.

A formulação *E-glass* representa cerca de 80% a 90% da produção comercial de fibras de vidro.

Tem-se ainda as formulações *C-glass*, muito usadas para promover estabilidade química em ambientes corrosivos, principalmente em compósitos que ficam em contato com ácidos ou os contêm.

As fibras de vidro presentes em compósitos apresentam seu comprimento bem maior do que seu diâmetro, sendo que o diâmetro comercial mais produzido varia entre 22,86 e 24,12 microns.

As fibras de vidro são hidrófilas e podem ser danificadas facilmente no processo de manufatura. Devido a isso, aplica-se um filme protetor logo nas primeiras etapas de sua fabricação. Esse filme também pode atuar para promover a união entre as fibras e a resina na matriz.

O comportamento das fibras de vidro é elástico até a ruptura, (fig. 4.1), e o módulo de elasticidade de um monofilamento de *E-glass* é de, aproximadamente, 73 GPa e sua deformação última na ruptura varia de 2,5% a 3,5%.

A ruptura das fibras se dá de uma maneira gradual, onde as fibras menos resistentes rompem-se primeiro e, então, os esforços são repassados para as fibras mais resistentes que restaram, que se rompem posteriormente.

A superfície do vidro contém vazios microscópicos que atuam como pontos de concentração de tensões. Com a exposição a ambientes agressivos ou até mesmo à umidade do ar, que pode conter dióxido de carbono, podem ocorrer mudanças nas tensões nesses vazios, ocorrendo a ruptura. Além disso, a exposição desse tipo de material a ambientes com pH elevado pode causar ruptura associada com o tempo de exposição.

As formas comerciais mais encontradas das fibras de vidro são: a forma considerada básica, em grupos de fios; a forma de fios entrelaçados, (a 0° , 90° , $+45^{\circ}$ ou -45°); como "tapetes", formados por fios cortados unidos por uma resina e a forma de tecidos, compostos por filamentos contínuos que são entrelaçados num processo têxtil convencional.

4.2.3.2 AS FIBRAS DE ARAMIDA

As fibras de aramida constituem-se no tipo mais popular de fibra orgânica e são produzidas comercialmente pela DuPont (KevlarTM) e pela Akso Nobel (TwaronTM). São usadas nas mais diversas áreas, desde blindagem até o seu uso conjunto com outras fibras para formação de compósitos usados na construção civil.

Essas fibras possuem uma estrutura anisotrópica, com resistência e módulo de elasticidade maiores no sentido longitudinal do que no transversal.

A estrutura anisotrópica contribui para uma maior estabilidade térmica e uma maior dureza e rigidez, proporcionando altos módulos de elasticidade e resistência.

Para temperaturas elevadas, (superiores a 150°C), e exposições de longa duração, podem surgir problemas de oxidação. Apesar disso, possuem uma alta estabilidade térmica, decompondo-se a uma temperatura em torno de 425°C.

Além de pela ação de altas temperaturas, as fibras de aramida podem ser degradadas por ácidos ou bases fortes, mas são resistentes à maioria dos outros solventes e substâncias químicas.

As fibras de aramida são resistentes à fadiga e, em temperatura ambiente, o efeito da umidade do ar é de uma diminuição menor do que 5% nas suas propriedades à tração.

Sob esforços de compressão, as fibras de aramida apresentam um comportamento não-linear e dúctil. Observa-se a ocorrência de escoamento a partir de deformações em torno de 0,3 a 0,5%. Isso limita sua aplicação em componentes sujeitos a altas deformações devido a cargas de compressão ou de flexão e é por isso que esse tipo de fibra, nesses casos, é mais utilizada em compostos híbridos em conjunto com fibras de vidro ou de carbono.

As fibras de aramida são encontradas na forma de fios, conjuntos de fios unidos em "pacotes", formados por filamentos torcidos (*tow*) e na forma de tecidos.

4.2.3.3 AS FIBRAS DE CARBONO

Existem três origens principais para as fibras de carbono comerciais: o piche, (um subproduto da destilação do petróleo); a poliacrilonitrila (PAN) e o *rayon*.

A primeira fabricação de fibras de carbono com alto módulo e alta resistência foi realizada a partir do *rayon*. Essa fabricação consiste em se esticar as fibras em várias vezes o seu comprimento original, a temperaturas acima de 2800°C. Como trata-se de um processo de alto custo e existe incerteza quanto à fácil obtenção da matéria prima (o *rayon*), o uso deste tipo de fibra tornou-se inviável.

A fabricação de fibras a partir da poliacrilonitrila apresenta uma combinação de baixo custo de produção e boas propriedades físicas. As fibras são inicialmente esticadas para que as cadeias moleculares se alinhem paralelamente ao seu eixo. Em seguida ocorre o seu aquecimento até 250°C.

O uso do piche na produção de fibras de carbono com elevada resistência e módulo requer a sua prévia transformação em cristal líquido, já que as fibras de piche possuem pouca ou nenhuma orientação preferencial.

Dos três materiais apresentados para a produção de fibras de carbono, o piche é o mais barato.

E, para todos os materiais, quanto mais elevada for a temperatura no processo, maior o módulo de elasticidade obtido. E, quanto maior o módulo de elasticidade, mais caro o produto. Um quilo de fibras de grafite custa, em média, vinte vezes mais do que um quilo de fibras de carbono 150.

O agrupamento de um conjunto da ordem de dezena de milhar de filamentos, que adquire a espessura de um fio de cabelo, apresenta excepcionais características mecânicas que,

dependendo do arranjo micro-estrutural das fibras, podem ser traduzidas tanto num maior módulo de elasticidade, quanto numa maior resistência à tração.

Existem dois tipos de fibras de carbono: as de elevado módulo de elasticidade, classificadas como Tipo I, e as fibras de elevada resistência, classificadas por Tipo II; de acordo com o ACI 440R-96.

Essas propriedades derivam do arranjo das camadas de *graphene* no grafite. Se essas camadas apresentam-se em “pilhas” tridimensionais, o material é definido como grafite. Se a ligação entre camadas for fraca e formarem-se camadas bidimensionais, o material resultante é definido como carbono.

A orientação preferencial das camadas determina o módulo de elasticidade da fibra e a orientação dessas camadas na superfície da fibra afeta a resistência na interface de adesão fibra-matriz.

As fibras de carbono destacam-se, principalmente, pelas seguintes características:

- a) excepcional resistência a todos os tipos de ataques químicos, não sendo afetadas pela corrosão, pois o carbono é inerte. Atenção apenas ao caso de reforço de estruturas metálicas, pela possibilidade de favorecer corrosão do tipo galvânico, dadas as diferenças de potencial que gera ao estar em contato com metais;
- b) ótimo comportamento quanto à fadiga e face à atuação de cargas cíclicas;
- c) muita leveza: peso específico da ordem de 18 kN/m³;
- d) extraordinária rigidez;
- e) estabilidade térmica, (com coeficiente de expansão térmica da ordem de 50 vezes menor que o do aço), e reológica.

As fibras de carbono são mais comumente encontradas no mercado na composição de plásticos armados formados pela sua união com matrizes poliméricas, (CFRP – *carbon fiber reinforced plastics*), como laminados, tecidos e folhas; cuja comparação encontra-se na tabela 4.2.

TABELA 4.2 Dados comparativos entre várias formas de plásticos armados com fibras de carbono.

CFRP	FOLHAS	TECIDOS	LAMINADOS
espessura de cálculo (mm)	0,11 a 0,23	0,27 a 0,45	1 a 1,4
espessura do plástico (mm)	0,35 a 0,65	0,90 a 1,60	1 a 1,4
quantidade de fibras (g/m ²)	200 a 400	300 a 500	200 a 400
proporção de fibras no plástico	25 a 40%	20 a 35%	65 a 75%
módulo de elasticidade usado no dimensionamento	E / 1,2	E / 1,4	E

As fibras de carbono não são facilmente “envolvidas” pela matriz, principalmente as fibras de elevado módulo de elasticidade. Tratamentos na superfície da fibra que aumentam o número de grupos químicos ativos, (e, algumas vezes tornam áspera a superfície da fibra), têm sido desenvolvidos.

As fibras de carbono recebem, freqüentemente, um tratamento com epóxi para prevenir a abrasão, melhorar o manuseio e proporcionar uma compatibilidade maior na interface com a matriz.

4.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A performance do compósito irá depender dos materiais que o constitui, do arranjo das fibras e da interação entre fibra e matriz. Os principais fatores que afetam essa performance são: a orientação das fibras, seu comprimento, sua forma e composição, as propriedades mecânicas da matriz e a adesão entre as fibras e a matriz.

Um arranjo unidirecional, ou em uma dimensão, é anisotrópico. Esse tipo de orientação da fibra resulta numa máxima resistência na direção do eixo da fibra.

Um arranjo plano das fibras é bidirecional e apresenta diferentes resistências para cada ângulo de orientação das fibras.

O arranjo multidirecional é isotrópico, mas apresenta resistências muito menores do que aquelas obtidas no arranjo unidirecional, como é visto na figura 4.2, que relaciona resistência do compósito e volume de fibras incorporado ao arranjo dessas fibras.

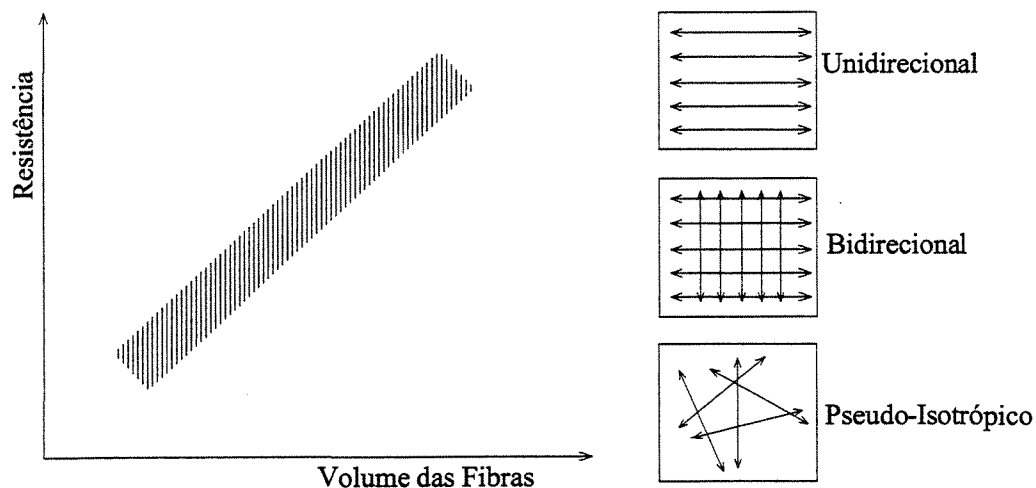


FIGURA 4.2 Relação entre resistência e orientação da fibra.

A orientação das fibras também pode proporcionar um comportamento isotrópico (pseudo-isotrópico), dependendo da posição escolhida no empilhamento das diversas camadas, como mostra a figura 4.3.

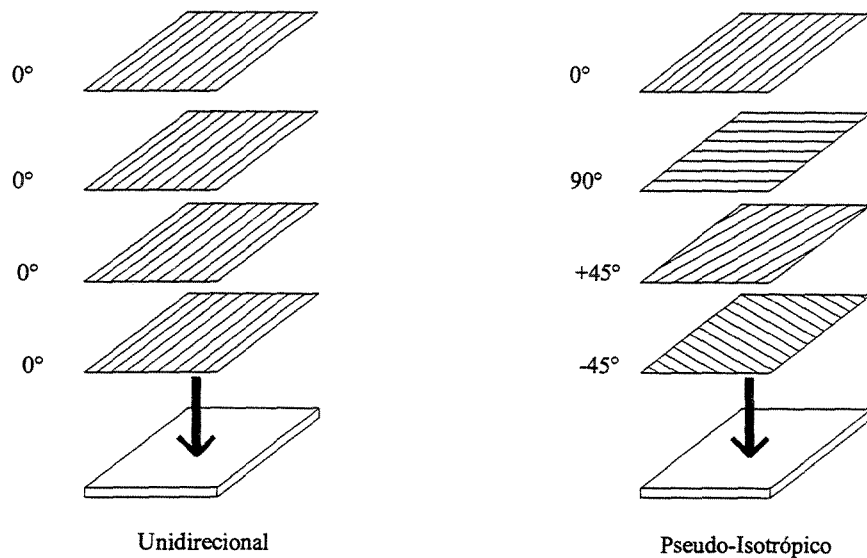


FIGURA 4.3 Variação na orientação das fibras na construção de laminados. Fonte: ACI 440-96.

Portanto, as propriedades de um compósito com fibras dependerão da direção de medição dos esforços em relação à direção das fibras. A resistência à tração e o módulo de elasticidade de um laminado unidirecional será máxima quando essas propriedades forem medidas na direção longitudinal (axial) das fibras. Para outros ângulos, essas propriedades ficarão reduzidas. Uma dependência similar dessa direção de medição é verificada para outras propriedades, também.

Os compósitos reforçados com fibras são normalmente encontrados em três formas distintas: folhas flexíveis (com as fibras orientadas em apenas uma direção, figura 4.4), tecidos (com as fibras colocadas em duas direções) e laminados (formados pela superposição de várias camadas de fibras e resina, apresentando maior rigidez e espessura do que as folhas e os tecidos).

Os laminados devem ser objeto de grande controle na produção para que se garanta a máxima incorporação de fibras (65 a 75% por volume de plástico, no caso do emprego de fibras de carbono).

Os laminados são formados pelo empilhamento de camadas finas de fibra e matriz (resina), de acordo com a espessura desejada. A orientação das fibras, assim como o número de camadas utilizadas, pode ser controlada de maneira a se obter uma gama de diferentes propriedades físicas e mecânicas.

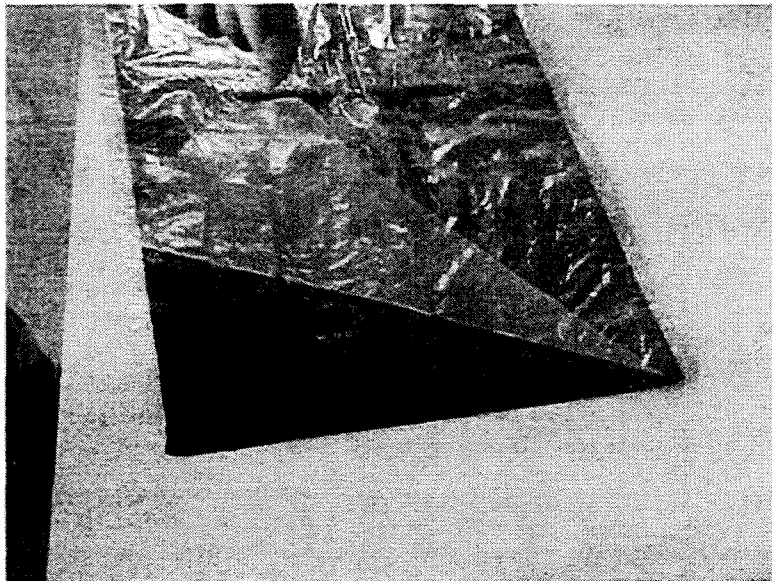


FIGURA 4.4 Aspecto da folha flexível de fibras de carbono.

As fibras são desenroladas, esticadas e alinhadas, sendo depois submetidas a um processo convencional de pultrusão (ou de prensagem a quente), que é o processo escolhido devido à rapidez de operação, bom controle de qualidade e custo relativamente baixo do equipamento.

Durante a pultrusão, as fibras inicialmente passam por “guias” onde adquirem o formato desejado, depois sofrem impregnação pela resina, (geralmente epóxi ou polyester), que já é pré-

misturada com os aceleradores, catalisadores e outros aditivos necessários. No último estágio do processo, o material passa através de um aquecedor onde o excesso de resina é retirado, mantendo-se a espessura desejada, e iniciando o processo de cura.

Os tamanhos de laminados mais encontrados possuem espessuras entre 0,8 e 1,5 mm e larguras de 25 a 250 mm, sendo que alguns podem ser armazenados em rolos, com comprimento mínimo de 50 m, já que podem ser facilmente cortados.

Nos casos em que houver a necessidade de curvatura, deve-se recorrer ao uso de folhas flexíveis e tecidos, já que a rigidez característica dos laminados não permite qualquer tipo de dobração.

As folhas flexíveis unidirecionais de fibras são complementares ao laminado ou mesmo usadas em substituição a este. Constituem o compósito com fibras mais utilizado como reforço ao cisalhamento em vigas.

Estas folhas são constituídas por feixes de fibras agrupadas de forma contínua, com espessura da ordem de décimos de milímetro, sendo unidas por uma costura, em tela de fibra de vidro impregnada com mínimas quantidades de resina de epóxi, em alguns casos, ou mesmo por impregnação direta das fibras, em outros, situação esta que não será compatível com a utilização das folhas como material confinante, pois a resina não admite qualquer permeabilidade ao vapor de água, requisito fundamental para um material cimentício como o concreto.

Os tecidos, possuindo fibras nas duas direções, nos percentuais que se deseje, requerem mais resina para garantir sua impregnação, adquirindo, portanto, espessura média maior do que a das folhas flexíveis, sendo da ordem de 0,5 mm.

Em termos de fabricação, as folhas, depois de terem as fibras devidamente alinhadas e esticadas, tem-nas, num processo semelhante aos laminados, introduzidas numa prensa, em simultâneo com a tela impregnada de epóxi e com um plástico de proteção.

Já para os tecidos, as fibras, após o alinhamento, recebem um banho de resina e passam a ser entrelaçadas, num tear comum.

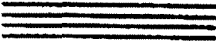
As folhas e os tecidos passam a ser elementos compósitos quando da adição da resina, no próprio processo de aplicação.

Para o reforço à flexão de vigas, o compósito mais utilizado é o laminado, pois este apresenta valores mais significativos no incremento do momento resistente ou maior economia para um dado incremento, em comparação ao uso de folhas e tecidos onde seria necessária a aplicação de diversas camadas.

Além disso, o módulo de elasticidade, que é um valor importante no dimensionamento dos reforços, dependerá tanto da quantidade de fibras incorporada quanto da posição e do alinhamento destas fibras. E, para as folhas flexíveis e tecidos, a posição das fibras pode ser fortemente afetada durante a fixação das mesmas devido ao próprio processo de aplicação e a irregularidades na superfície do substrato. Isso não ocorrerá para os laminados já que estes apresentam espessuras maiores, sendo bem menos flexíveis.

O alinhamento das fibras é mais regular para os laminados, garantindo os valores esperados para o módulo de elasticidade. (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Posição e alinhamento das fibras para folhas, tecidos e laminados.

	folhas e tecidos	laminados
posição e alinhamento das fibras		

Muitos compósitos reforçados com fibras exibem uma grande capacidade interna de amortecimento. Isto conduz a uma melhor absorção de energia vibracional, reduzindo a transmissão para estruturas adjacentes. Esse aspecto do comportamento desses compósitos pode ser de grande relevância para algumas estruturas como pontes, estradas, etc.; que estão mais sujeitas a cargas transitórias e de curta duração do que a cargas permanentes.

Quanto ao padrão de fissuração, vários pesquisadores têm verificado que as vigas reforçadas por meio destes compósitos apresentam um número maior de fissuras, as quais possuem aberturas menores e menores espaçamentos entre si, quando comparadas com as fissuras apresentadas pelas vigas sem reforço, Fig. 4.5 a e b.

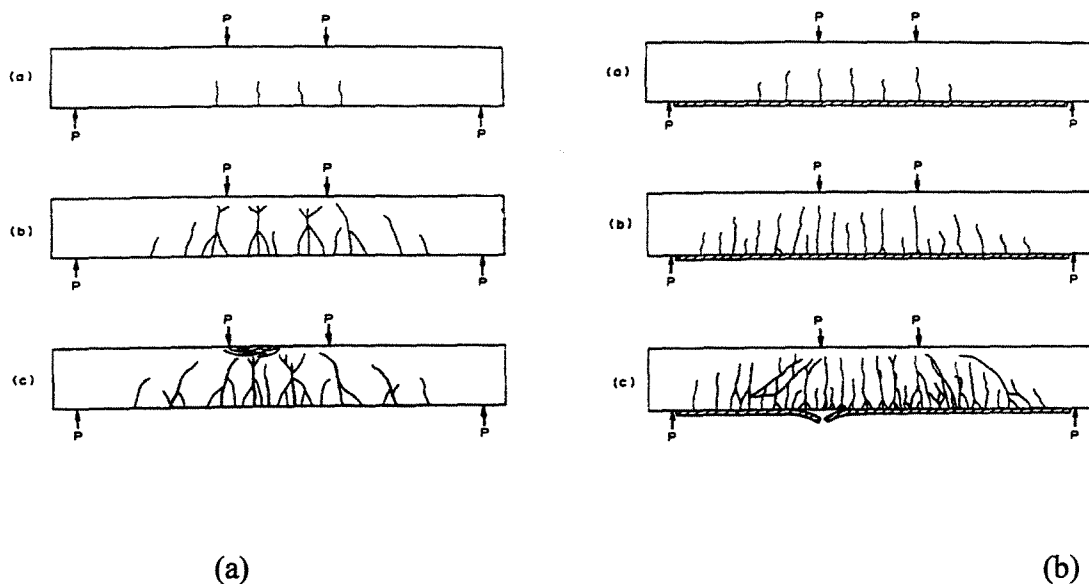


FIGURA 4.5 Padrão de fissuração. (a) viga não reforçada. (b) viga reforçada com compósitos com fibras
Fonte: Ritchie, P. A. et alii (1991).

Isso demonstra uma melhor distribuição dos esforços para as vigas reforçadas.

4.3.1 RESISTÊNCIA À FADIGA DOS COMPÓSITOS

Segundo Neale et al (1991), os polímeros reforçados com fibras possuem boa resistência à fadiga. Depois de cerca de 10 milhões de ciclos de carregamento as fibras de carbono mantêm 80% de sua resistência total, as fibras de aramida, 40%; e as fibras de vidro, 25%.

Estudos desenvolvidos por Meier et alii (1991) analisaram o desempenho de vigas reforçadas com CFRP com relação à fadiga juntamente com a exposição a uma alta umidade relativa do ar.

Os ensaios foram realizados a uma temperatura ambiente de 40°C e umidade do ar de, pelo menos, 95%; e as vigas foram submetidas a 14 milhões de ciclos de carregamento. Constatou-se que a adesão entre o compósito e o concreto não foi significativamente afetada, provando o bom desempenho do sistema quando solicitado por carregamento cíclico simultaneamente com altas umidades.

4.3.2 EFEITOS AMBIENTAIS PREJUDICIAIS AOS COMPÓSITOS

As condições ambientais podem afetar diferentemente os diversos tipos de fibras e de resinas empregados nos compósitos.

Algumas de suas propriedades mecânicas como resistência à tração, deformação de ruptura e módulo de elasticidade podem ser muito prejudicadas quando ocorre a exposição a determinados ambientes com a existência de alcalinidade, água do mar, raios ultravioleta, altas temperaturas e umidade, ciclos gelo-degelo, etc.

Tem-se, a seguir, algumas considerações ambientais importantes, mas deve ser observado que informações específicas devem sempre ser requeridas do fabricante.

a) presença de alcalinidade/acidez

Em ambientes alcalinos ou ácidos, as fibras de carbono não apresentam nenhum problema em sua performance já que são resistentes a esses ambientes.

Já as fibras de vidro que não receberam nenhum tipo de tratamento superficial são as que mais sofrem perda de suas propriedades, representando o tipo de fibra que é mais atacado por ácidos e bases.

Num ambiente ácido ou alcalino deve-se selecionar uma resina para a matriz que resista à exposição, protegendo e isolando as fibras e retardando ou até mesmo evitando sua deterioração.

No caso do material ter sido afetado, apresentando áreas com abrasão, deve-se corrigir o problema imediatamente com a colagem de um pedaço extra de material sobre a área danificada. Deve-se verificar que o material adicionado possua as mesmas características do original, (como espessura e orientação das fibras).

b) expansão térmica

Sistemas FRP possuem propriedades de expansão térmica diferentes das do concreto. Além disso, essas propriedades variam nas direções longitudinal e transversal da fibra.

Na tabela 4.4 tem-se os valores característicos do coeficiente de expansão térmica (CET) para compósitos reforçados com fibras de vidro (GFRP), com fibras de carbono (CFRP) e com fibras de aramida (AFRP).

Valores negativos atribuídos aos CET indicam que o material contrai com um aumento na temperatura e se expande quando a temperatura diminui.

Pode-se ainda tomar como referência os valores dos CET do concreto, considerado isotrópico, e que varia de 4×10^{-6} a $6 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$. Para o aço tem-se um coeficiente isotrópico de expansão térmica de $6,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$.

TABELA 4.4 Valores do coeficiente de expansão térmica para compósitos FRP. Fonte: ACI 440 R-2000.

Direção	CET, $\times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$		
	GFRP	CFRP	AFRP
longitudinal	6 a 10	-1 a 0	-6 a -2
transversal	11.7 a 12.8	22 a 23	60 a 80

Segundo o ACI 440R-2000, na direção longitudinal das fibras, compósitos com fibras de carbono apresentam coeficiente de expansão térmica próximo de zero, enquanto compósitos com fibras de vidro possuem este coeficiente próximo ao do concreto. A experiência tem demonstrado que pequenas variações de temperatura, ($+10^\circ \text{C}$ a -10°C), não conduzem a diferenças de expansão térmica capazes de afetar a adesão entre o compósito e o concreto. Entretanto, devido à ação de altas temperaturas pode-se notar mudanças na coloração do compósito.

De acordo com Kaiser (1989) depois da exposição a cem ciclos gelo-degelo, com temperaturas variando de -25°C a 20°C não ocorreu nenhuma diminuição na capacidade portante de três vigas reforçadas com compósitos reforçados com fibras de carbono.

c) condutividade elétrica

Os sistemas que utilizam fibras de vidro ou de aramida não apresentam problemas, já que esses materiais são considerados isolantes elétricos.

Já com o uso de fibras de carbono deve-se tomar o cuidado especial de não promover o contato direto entre as fibras e a armadura da estrutura para que não ocorra corrosão devido a diferenças de potencial, já que esse tipo de fibra é condutor de eletricidade.

4.3.2.1 FATOR AMBIENTAL DE REDUÇÃO - C_E

O ACI 440R-2000 recomenda que sejam utilizados coeficientes de redução das propriedades dos compósitos, (C_e), devido à exposição dos mesmos à agressividade ambiental por longos períodos de tempo. Esses coeficientes de redução serão multiplicados pela resistência última à tração e pela deformação de ruptura de cálculo dos compósitos, determinando os valores a serem utilizados no dimensionamento do reforço.

Esses coeficientes dependem do tipo de fibra utilizado no reforço e da agressividade do ambiente, em que considerou-se agressivo o ambiente com presença de alta umidade, água salgada ou alcalinidade. (Tabela 4.5).

TABELA 4.5 Fator ambiental de redução de acordo com o tipo de fibra utilizada. Fonte: ACI 440R-2000.

Condição de Exposição	Tipo de fibra usada com	Fator Ambiental de Redução
	resina epóxi	(C_e)
Ambientes fechados	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Ambientes abertos	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Ambientes agressivos	Carbono	0,85
	Vidro	0,50
	Aramida	0,70

De acordo com a tabela 4.5, as fibras que sofrem menos com a agressividade ambiental são as de carbono, sendo que as de aramida apresentam um desempenho visivelmente inferior.

Pode-se notar que para as fibras de vidro, os fatores de redução implicarão numa maior diminuição da resistência do material, o que demonstra uma maior fragilidade deste tipo de fibra frente a efeitos agressivos do ambiente. Entretanto, já existem no mercado tipos mais resistentes de fibras de vidro, conhecidas por *AR Glass Fiber* ou fibras de vidro álcali-resistentes, que permitem o uso de valores maiores para os fatores ambientais.

Esses fatores de redução também poderão ser alterados se for utilizado algum tipo de cobertura de proteção devidamente testada para o ambiente em que será empregado o polímero e com uma manutenção adequada. Segundo um fabricante do material, têm sido utilizadas argamassas poliméricas e pinturas anti-fogo, sempre com a preocupação de se estabelecer uma boa adesão entre as duas.

4.4 APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)

Será visto, a seguir, como se dá a aplicação de laminados e de folhas flexíveis reforçados com fibras de carbono. Estes serão os dois tipos de polímeros reforçados com fibras de carbono utilizados neste estudo.

Devido ao uso de resinas epóxi, recomenda-se atenção à temperatura ambiente, umidade relativa do ar, temperatura e umidade do substrato, de acordo com as indicações do fabricante, para que se mantenha uma viscosidade compatível com o processo de aplicação dos compósitos.

O acabamento final das superfícies pode receber desde pinturas até revestimentos de alto desempenho, para que se alcance melhor desempenho frente à ação do fogo e de raios ultravioleta. Geralmente empregam-se argamassas poliméricas e pinturas anti-fogo.

Recomenda-se que seja esperado um prazo de 24 h a 48 h, a partir do término da aplicação dos compósitos, para que sejam realizados os primeiros ensaios.

4.4.1 CUIDADOS ESPECIAIS NAS ETAPAS DE APLICAÇÃO DOS COMPÓSITOS E EFEITOS DA AÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS

Durante a aplicação dos compósitos deve-se preparar a superfície do substrato, promovendo-se sua limpeza, com a remoção total de graxas e óleos e lixando a superfície para que se obtenha a adesão requerida. Além disso, recomenda-se que a superfície de aplicação possua uma resistência mínima ao arrancamento de 1,4 MPa e que a estrutura possua um concreto com resistência à compressão superior a 14 MPa, para que a adesão com o compósito não seja prejudicada.

Para a verificação da resistência mínima de aderência da superfície de concreto preparada utiliza-se um ensaio conhecido como *pull out*, ilustrado na figura 4.6. Esse ensaio consiste na colagem de pinos de alumínio sobre o reforço que são posteriormente arrancados por um aparelho especial que determina a tensão de arrancamento.

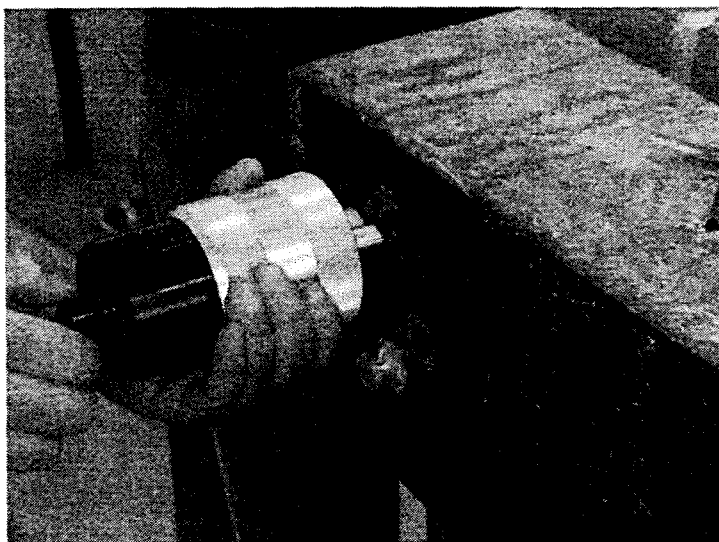


FIGURA 4.6 Ensaio de *pull out*.

Deve-se, também, 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 são capazes de afetar seu desempenho.

Um dos cuidados principais a ser tomado refere-se à resina empregada que, por ser composta por um material polimérico, endurece rapidamente quando exposta à temperatura ambiente, inviabilizando sua aplicação, e também pode amolecer quando exposta a altas temperaturas, perdendo muitas de suas propriedades e comprometendo o sistema de reforço.

A temperatura na qual o polímero amolece é conhecida por temperatura de transição vítrea, (T_g), e esse amolecimento é comparado ao escoamento sofrido pelo aço quando solicitado por esforços de tração. Acima desta temperatura, o módulo de elasticidade do polímero é significativamente reduzido devido a mudanças em sua estrutura molecular.

O valor de T_g depende do tipo de resina utilizado, mas varia de 95°C a 150°C, segundo o ACI 440 R-2000. De acordo com um fabricante obteve-se valores que variam de 60°C a 80°C, demonstrando que sempre se deve recorrer a informações do fabricante antes de qualquer escolha ou aplicação.

Depois de alcançada a temperatura T_g , as fibras ainda podem suportar um certo carregamento até que atinjam uma temperatura limite que varia de 180°C para fibras de aramida até 1700°C para fibras de aço. Entretanto, devido à redução da transferência de forças entre as fibras ser promovida pela resina, a capacidade do compósito fica muito reduzida como um todo.

Segundo Kumahara et alii (1993), para temperaturas em torno de 250°C, compósitos de fibras de carbono e de fibras de vidro apresentaram redução em suas resistências à tração de cerca de 20%.

Para FRPs, a manutenção das condições ideais de adesão na interface concreto-compósito é essencial, mas para uma temperatura próxima de T_g , as propriedades mecânicas do polímero serão seriamente reduzidas e sua capacidade de transferência de esforços será totalmente comprometida.

O ACI 216R recomenda que se garanta uma resistência mínima global para a estrutura a ser reforçada, sem que se considere a contribuição dos polímeros, para que não ocorra o colapso total da estrutura no caso de um incêndio, garantindo-se um nível de segurança mínimo. Mas, de qualquer modo, sugere-se o uso do valor de T_g como limite para a temperatura de exposição do compósito.

4.4.2 PROTEÇÃO DURANTE O PERÍODO DE CURA DA RESINA

O processo de cura da resina pode ser prejudicado pela presença 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. Antes desse período também não se deve expor a estrutura à ação de carregamentos adicionais.

4.4.3 APLICAÇÃO DE LAMINADOS

O bom desempenho de um laminado depende não somente das características de seus materiais constituintes e do adesivo de ligação ao substrato como também das características da superfície onde será aplicado.

Deve-se tomar cuidados especiais quando se tem temperaturas muito baixas ($< -20^{\circ}\text{C}$) ou muito altas ($> 60^{\circ}\text{C}$), devido à diferença de comportamento térmico, (diferentes coeficientes de dilatação térmica), entre o concreto e o laminado.

A superfície de concreto deve estar isenta de fissuras e/ou irregularidades. Caso necessário, deve-se promover a injeção das fissuras, e a estrutura deve receber uma camada de epóxi regularizadora, que deve ser finalizada com uma espátula.

Essa regularização da superfície é importante para que se evite concentração de esforços e, conseqüentemente, o descolamento do laminado. (Fig. 4.7).

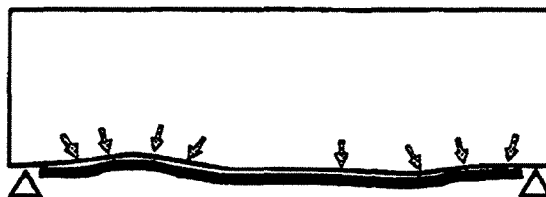


FIGURA 4.7 Concentração de esforços devido a irregularidades na superfície da viga.

Depois da regularização, a superfície deverá ser levemente desgastada, com o uso de jatos de areia ou de uma lixa fina.

É importante que não se exagere na remoção dessa camada de concreto com pouca aderência para se limitar a quantidade de adesivo a ser utilizada.

A superfície, então, deve ser bem limpa e a umidade do substrato deve ser inferior a 4%.

Depois disso é aplicada a primeira camada de resina, o primário. O primário tem por função melhorar as características superficiais do concreto, através da impregnação e garantir uma boa adesão do laminado, com uma tensão mínima de arrancamento da ordem de 1,4 MPa.

Os laminados devem ser limpos, com solvente apropriado, principalmente na face que ficará em contato com o adesivo.

A aplicação desse adesivo deve ser cuidadosa, de modo que não ultrapasse 2 mm, na superfície do concreto. O controle desta medida pode ser feito com o auxílio de uma régua como gabarito.

O adesivo também deve ser aplicado na superfície do laminado.

É feita, então, a aplicação do laminado sobre a estrutura de concreto. Essa aplicação é manual, (pois o laminado é muito leve), pressionado-se o laminado contra a superfície, com a ajuda de um rolo, para que seja retirado todo o excesso de adesivo.

No caso de sobreposição de laminados, quando estes não apresentarem largura suficiente, recomenda-se um comprimento de amarração de 30 cm.

4.4.4 APLICAÇÃO DE FOLHAS FLEXÍVEIS

As folhas flexíveis possuem um processo de aplicação um pouco mais complexo do que o dos laminados. Isto ocorre porque os laminados já vêm com as camadas de fibra e resina sobrepostas desde o seu processo de fabricação, que é mecanizado, e as folhas flexíveis são "montadas" manualmente durante sua fase de aplicação, onde as fibras e a resina serão unidas.

As folhas flexíveis são comercializadas na forma de rolos, com larguras específicas podendo ser facilmente cortadas com o auxílio de uma tesoura comum, no comprimento desejado, figura 4.8.

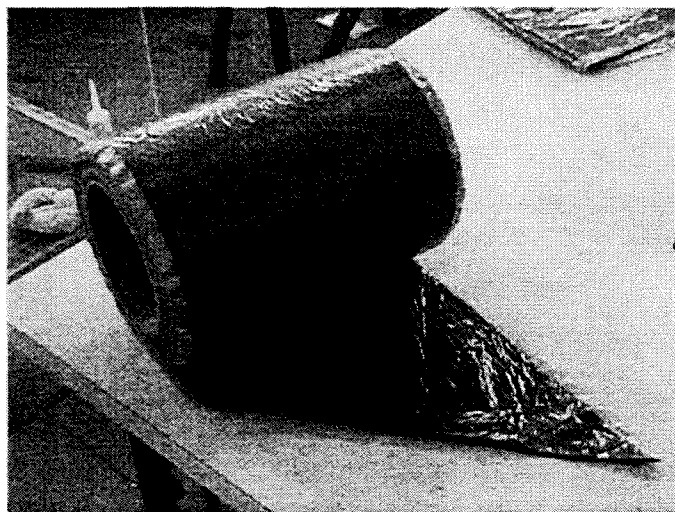


FIGURA 4.8 Rolo de folhas flexíveis de fibra de carbono.

As folhas flexíveis passam a ser elementos compósitos somente depois da adição da resina, durante o próprio processo de aplicação. Isto reflete num controle menor sobre as características finais do reforço.

As folhas flexíveis são montadas e aplicadas na seguinte sequência:

- a) fazer a limpeza da superfície onde será executado o reforço, com a ajuda de uma espátula e de uma escova de aço para remover a sujeira;
- b) aplicar a primeira camada de resina epóxi, o primário, (“primer”), para promover a aderência do concreto à primeira camada de saturante. O primário é um epóxi claro de baixa viscosidade, de alto teor de sólidos, que pode ser aplicado usando um rolo;
- c) utilizar uma camada de epóxi para nivelar a superfície, conhecida como Putty, quando esta apresentar porosidade ou pequenas irregularidades. O Putty é uma pasta de epóxi com alto teor de sólidos que pode ser aplicada usando uma desempenadeira ou rolo;
- d) aplicar a primeira camada de resina saturante, (“saturant”). Este saturante é uma resina com alto teor de sólidos que deve ser aplicada usando um rolo para iniciar a saturação das fibras de carbono;
- e) aplicar a fibra de carbono sobre a primeira camada de saturante ainda úmida. Sobre o papel que acompanha a fibra, passar um rodo de borracha e em seguida um rolo de aço, para promover a colagem da fibra ao saturante e não deixar bolhas. Posteriormente remover o papel que acompanha a fibra; e,
- f) aplicar a segunda camada de saturante sobre a fibra. (Figura 4.9)



FIGURA 4.9 Detalhe das camadas do processo de aplicação das folhas flexíveis de fibra de carbono.

Quando se deseja aplicar mais de uma camada de fibra, é necessário um intervalo de 30 minutos para a segunda camada de saturante e a colocação da fibra. No caso de sobreposição do material, quando este não tem a largura correspondente à área a ser aplicada, deve-se fazer uma sobreposição de 10 a 15 cm.

No caso de se usar as folhas para envolver uma estrutura, as arestas devem ser arredondadas, garantindo-se um raio mínimo de 1 cm para uma melhor aderência e transferência de esforços entre as fibras. (Fig. 4.10).

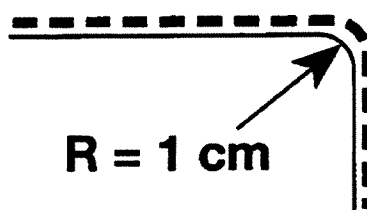


FIGURA 4.10 Arredondamento de arestas para uma melhor aderência e transferência de esforços.

4.4.4.1 CONTROLE DO DESCOLAMENTO DE PEQUENAS ÁREAS DO REFORÇO

Deve-se verificar a presença de pequenos descolamentos e de bolhas de ar entre as diversas camadas de compósito utilizadas, ou entre o compósito e o concreto. Os métodos empregados devem ser capazes de detectar descolamentos de 1300 mm^2 ou maiores, segundo o ACI 440 R-2000. Na avaliação dos descolamentos deve-se analisar seu tamanho, localização e área, em relação à área total de reforço empregada.

Segundo o mesmo ACI, descolamentos de até 1300 mm^2 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 / m^2 .

Descolamentos maiores do que 16000 mm^2 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.

4.5 MODOS DE RUPTURA DAS VIGAS REFORÇADAS COM PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO

Segundo O. Challal et alii. (1997), a capacidade última da viga reforçada pode ser alcançada por modos de colapso que podem ser divididos em clássicos e prematuros. Os modos de colapso clássicos ocorrem quando a estrutura já alcançou maiores deslocamentos verticais, indicando uma melhor performance estrutural. São eles:

- a) esmagamento do concreto por compressão na borda superior, com deformação maior do que a deformação última igual a 0,0035. Fig. 4.11.

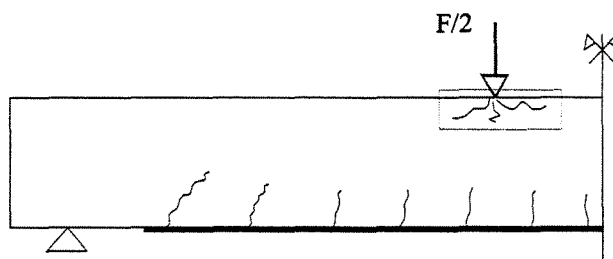


FIGURA 4.11 Esmagamento do concreto por compressão na região da borda comprimida da viga.

b) ruptura por esforços de tração no laminado utilizado no reforço, quando a tensão alcançada for maior do que a tensão última de ruptura por tração deste ou quando a deformação na região mais solicitada for maior do que sua a deformação última, já que esses tipos de compósito apresentam comportamento linear e elástico até sua ruptura. Fig. 4.12.

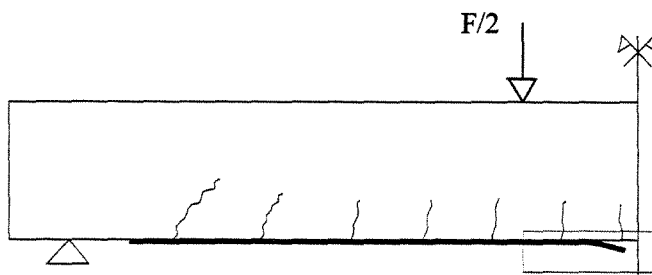


FIGURA 4.12 Ruptura do compósito usado no reforço.

Os modos de colapso considerados prematuros são bruscos e ocorrem a cargas menores do que as últimas esperadas devendo, portanto, ser evitados. São eles:

c) descolamento do laminado, que ocorre geralmente nas extremidades deste, no sentido do seu comprimento. Esse modo de colapso se dá quando não foi desenvolvida uma adesão suficiente entre a chapa de FRP e o concreto, devido a propriedades de adesão insatisfatórias do adesivo ou a sua incorreta aplicação. Fig. 4.13.

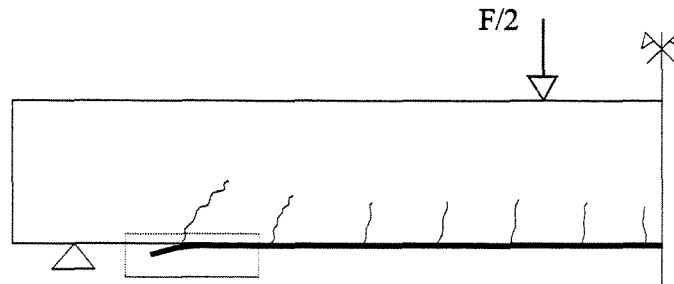


FIGURA 4.13 Descolamento da chapa de FRP usada no reforço.

d) arrancamento da camada de cobrimento da armadura longitudinal inferior devido à concentração de esforços de cisalhamento nas extremidades do laminado. Neste caso, a adesão entre a chapa e o concreto é suficiente para prevenir o descolamento, mas existe a formação de fissuras diagonais de cisalhamento que acabam danificando a região. Fig. 4.14.

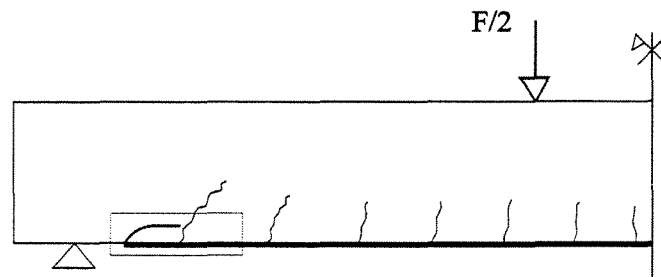


FIGURA 4.14 Arrancamento da camada de cobrimento devido à concentração de esforços de cisalhamento nas extremidades do laminado.

4.6 ANCORAGEM DOS COMPÓSITOS

Para se evitar que ocorram os modos de colapso prematuros, anteriormente relatados, a ancoragem dos compósitos ao substrato deve ser garantida. Essa ancoragem pode ser alcançada usando-se os próprios compósitos, (no caso, as folhas flexíveis), ou com o controle das tensões normais e de cisalhamento na interface laminado-concreto, nas extremidades do laminado.

4.6.1 SISTEMAS DE ANCORAGEM COM O USO DOS COMPÓSITOS

Os sistemas de ancoragem dos compósitos resumem-se em evitar o descolamento do compósito ou da camada de cobertura inferior da viga, que ocorre nas extremidades do compósito ou no seu sentido longitudinal.

Para que se evite este descolamento, as folhas flexíveis são colocadas nessas extremidades, formando uma espécie de laço de amarração ao redor da viga.

Tem sido indicado, também como um sistema eficiente de ancoragem, o prolongamento do comprimento do compósito até uma região bem próxima dos apoios.

Ritchie et alii. (1991) pesquisaram três diferentes sistemas de ancoragem, Fig. 4.15, e obtiveram um aumento na capacidade última da viga reforçada para todos eles. No entanto, somente em um dos casos, o da figura Fig. 4.15a, foi possível mudar o modo de ruptura da viga de prematuro para clássico, mas somente para uma das três vigas ensaiadas com esse tipo de ancoragem.

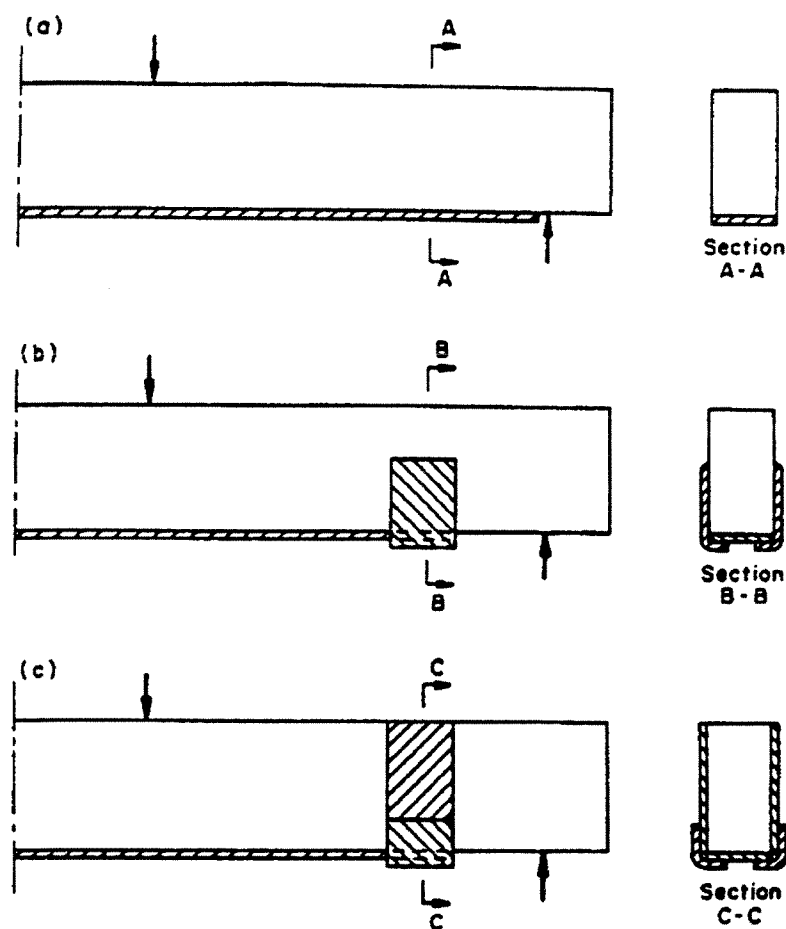


Figura 4.15 a,b,c Métodos de ancoragem mecânica estudados por Ritchie et alii.

O ACI 440R-2000 recomenda qual o comprimento de ancoragem necessário ao compósito, tanto para o caso de sua utilização em vigas contínuas quanto para o caso em que serão bi-apoiadas.

Para vigas contínuas, recomenda-se que a camada mais externa de compósito fique a uma distância de aproximadamente 15 cm além do ponto onde o momento fletor calculado é zero. As camadas intermediárias deverão ser prolongadas em mais 15 cm, cada uma, além do ponto de corte da camada que lhe for seguinte. (Fig. 4.16).

Para vigas bi-apoiadas, (fig. 4.16), as indicações são as mesmas com a ressalva de que o ponto a ser tomado como referência será o ponto em que o momento fletor se iguala ao valor do momento de início de fissuração, (M_{fis}), dado pela equação 4.1. Em que σ corresponde à resistência à tração do concreto, I corresponde ao momento de inércia da seção da viga e y seria correspondente à metade da altura da viga, para o caso de uma viga retangular.

$$M_{fis} = \frac{\sigma}{I} \times y \quad (4.1)$$

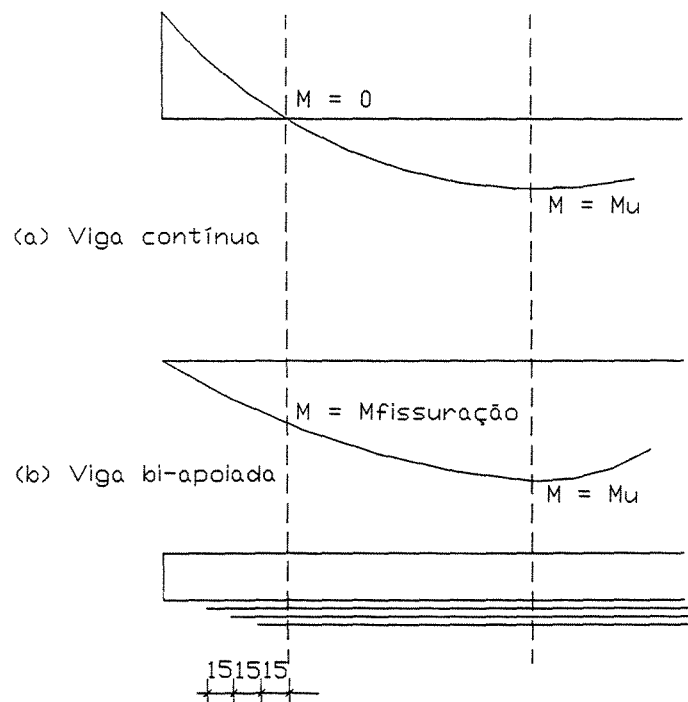


FIGURA 4.16 Comprimento de ancoragem para vigas contínuas (a) e para vigas bi-apoiadas (b).

Neste trabalho será estudada a eficiência do sistema de envolvimento em laço do laminado, nas suas extremidades, com o uso de folhas flexíveis de fibra de carbono e o cálculo do comprimento de ancoragem dos compósitos pode ser visto no capítulo 6.

4.6.2 ANCORAGEM PROMOVIDA PELO CONTROLE DE TENSÕES

Entende-se que o método mais eficiente de se evitar a ocorrência de modos de colapso prematuros, e de se prever melhor o comportamento da viga reforçada, se dá através do cálculo das tensões normais e de cisalhamento máximas que podem ocorrer na extremidade do laminado, sem que este se separe da viga, (com ou sem a camada inferior de cobrimento), e nas vizinhanças das fissuras de flexão.

O cálculo do valor destas tensões possibilita a determinação do valor de um momento fletor máximo atingido quando ocorre o descolamento. O cálculo deste momento está especificado no capítulo 5, ($M_{\text{descolamento}}$).

4.7 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS JÁ REALIZADAS

Tem-se, a seguir, alguns trabalhos importantes para a verificação da eficiência do método de reforço através do emprego de materiais compósitos com resina epóxi e fibras de carbono. Estes trabalhos também apresentam análises interessantes dos parâmetros influentes nesse tipo de reforço como o posicionamento das fibras.

4.7.1 INVESTIGAÇÕES DE ROSS, C. A., JEROME, D. M., TEDESCO, J. W. E HUGHES, M. L (1999).

O trabalho em questão analisou vinte e quatro vigas retangulares de seção 200 mm x 200 mm e comprimento de 3,05 m, (fig. 4.17). Foi utilizado cimento Portland Tipo I e diâmetro máximo do agregado de 10 mm.

A resistência à compressão aos 28 dias apresentada foi de 54,8 MPa. A tensão de escoamento do aço utilizado era de 410 MPa e a deformação no escoamento era de 0,002.

As vigas foram divididas em 6 grupos de 4, de acordo com a taxa de armadura longitudinal utilizada. (Tabela 4.6).

A armadura longitudinal superior de todas as vigas foi igual a 2 barras de diâmetro 9,5 mm e a transversal era composta de barras de diâmetro 9,5 mm colocadas a cada 102 mm.

TABELA 4.6 Armadura longitudinal inferior das vigas, por grupo.

Vigas, grupo	Armadura longitudinal inferior	As, mm ²	$\rho = A_s / bd$
1	2 x 9,5 mm	142	0,00458
2	2 x 12 mm	259	0,00833
3	2 x 16 mm	400	0,01242
4	2 x 20 mm	612	0,01833
5	2 x 22 mm	774	0,02500
6	2 x 25 mm	1019	0,03292

Para cada grupo foram reforçadas três vigas (tipos B, C e D), e uma foi utilizada como referência (tipo A).

Para o reforço foi utilizado um laminado de fibras de carbono com composição de 60% de fibras por volume, tendo uma resistência à tração de 2206 MPa e módulo de elasticidade de 138 GPa. Suas dimensões eram de 2,74 m x 0,203 m x 45 mm e sua aplicação foi realizada usando-se uma resina epóxi composta por duas partes.

Todas as vigas foram instrumentadas com extensômetros colocados na própria viga e no laminado na região do meio do vão.

O carregamento foi feito nos terços de vão. (Fig. 4.17).

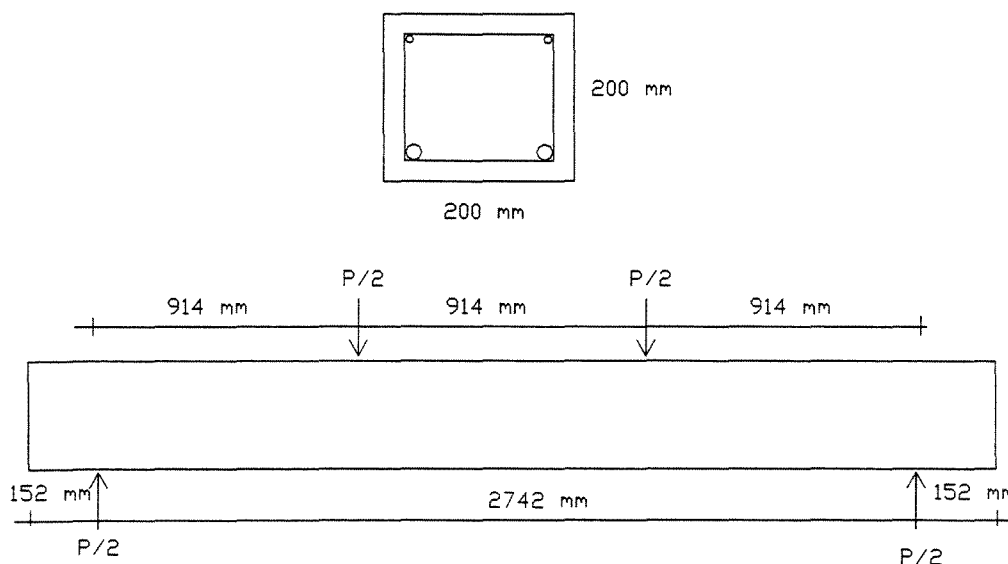


FIGURA 4.17 Esquema de carregamentos e seção transversal da viga ensaiada.

As vigas apresentaram basicamente dois modos de ruptura: para as vigas com maiores taxas de armadura (grupos 4, 5 e 6) ocorreu predominantemente o esmagamento do concreto na região da borda superior acompanhado de uma fissuração horizontal nas vizinhanças da armadura

longitudinal de tração (modo I); para as vigas com taxas de armadura menores (grupos 1, 2 e 3) ocorreu o descolamento do laminado na interface com o adesivo, (modo II).

Os resultados obtidos constam na tabela 4.7, onde Re corresponde à carga de pico da viga reforçada dividida pela carga de pico da viga de referência.

TABELA 4.7 Resultados obtidos para todas as vigas

Viga	Carga Pico (kN)	Re	Relação Ac/As	Modo de Ruptura
1A	26,7	--	--	--
1B	80,1	3,00	0,64	II
1C	71,2	2,67	0,64	II
2A	46,7	--	--	--
2B	97,9	2,10	0,35	II
2C	71,2	1,52	0,35	II
2D	80,1	1,71	0,35	II
3A	62,3	--	--	--
3B	109,0	1,75	0,23	II
3C	108,1	1,74	0,23	II
3D	108,6	1,74	0,23	II
4A	71,2	--	--	--
4B	107,6	1,51	0,16	I
4C	104,7	1,47	0,16	I
4D	111,3	1,56	0,16	I
5A	115,7	--	--	--
5B	146,9	1,27	0,12	I
5C	146,9	1,27	0,12	I
5D	145,5	1,26	0,12	I
6A	133,5	--	--	--
6B	169,1	1,27	0,09	I
6C	153,1	1,15	0,09	I
6D	153,1	1,15	0,09	I

Também foi analisada uma comparação entre a relação A_c / A_s (área de concreto / área de armadura) da seção das vigas em relação ao valor de R_e obtido. (Fig. 4.18).

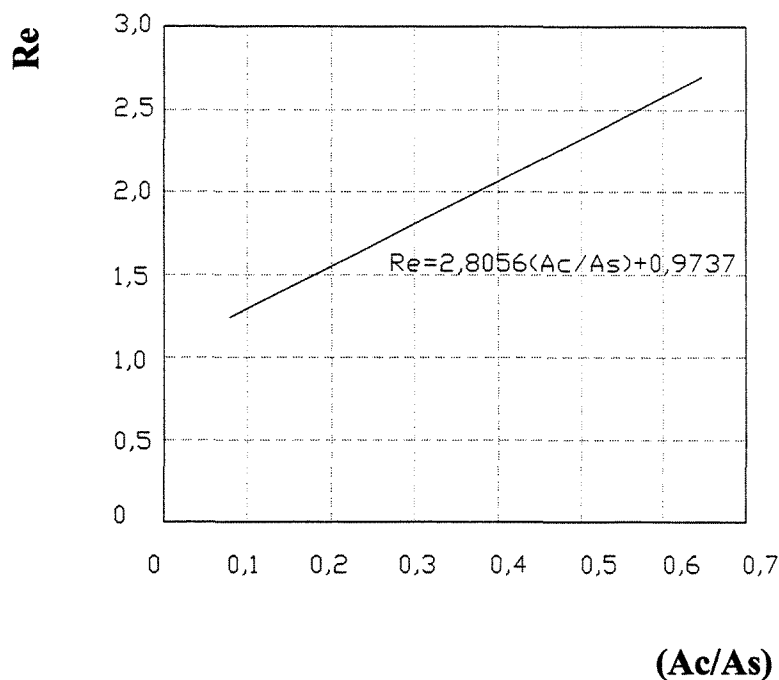


FIGURA 4.18 Comparação entre a relação área de concreto / área de armadura e o valor de R_e .

Verificou-se que o grau de reforço alcançado depende da relação área de concreto / área de armadura, da taxa de armadura existente na viga e da adesão existente entre o compósito e a viga.

Também foi analisada uma comparação entre a taxa de armadura longitudinal utilizada em relação ao valor de R_e obtido. (Fig. 4.19).

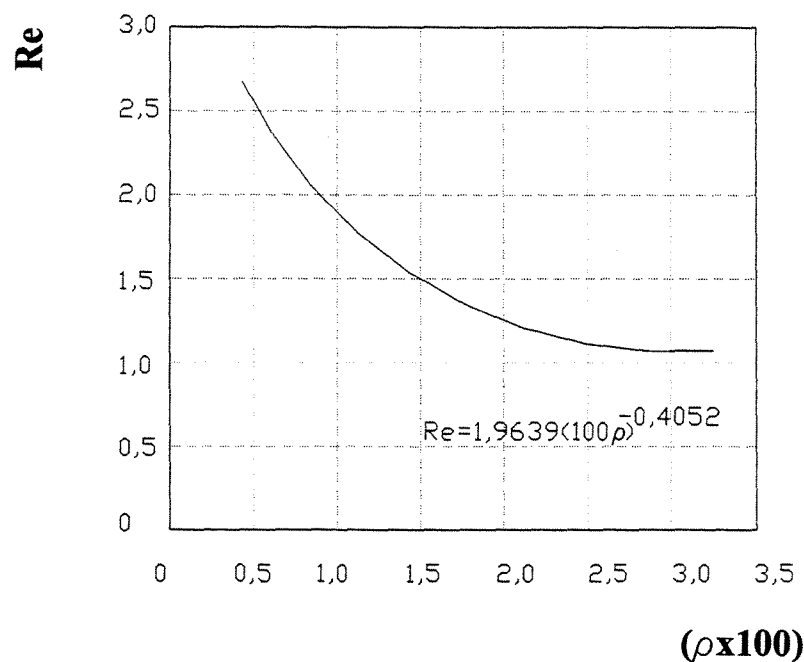


FIGURA 4.19 Comparação entre a taxa de armadura longitudinal utilizada e o valor de R_e .

Concluiu-se que foi obtido um aumento significativo na resistência à flexão para as vigas com ρ menor ou igual a 0,01 e que para vigas com ρ maiores, um aumento comparável na resistência requer um aumento na quantidade de fibras do compósito utilizada ou da relação área de concreto / área de armadura longitudinal.

Para as vigas com uma taxa de armadura menor, ocorreram flechas maiores antes da ruptura, fazendo com que a tensão no compósito fosse maior, aproximando-se da sua resistência à tração e evidenciando seu melhor aproveitamento.

A adesão FRP-concreto foi tida como de grande influência no "comportamento" das vigas reforçadas e, portanto, é necessária a utilização de um sistema de ancoragem.

4.7.2 INVESTIGAÇÕES DE NORRIS, T., SAADATMANESH, H. E EHSANI, M. R. (1997).

Nesse estudo foram analisadas 13 vigas reforçadas à flexão pelo uso de folhas e tecidos de fibra de carbono. A taxa de armadura longitudinal usada foi $\rho = 0,0067$, valor próximo do mínimo proposto pelo ACI. A resistência à compressão do concreto era de 36,5 MPa.

As dimensões das vigas eram de 12,7 cm x 20,3 cm x 2,44 m. Tanto a armadura longitudinal inferior quanto a superior eram compostas por duas barras de diâmetro 9,5 mm, com tensão de escoamento igual a 420 MPa. A armadura transversal era composta por barras de diâmetro 6 mm. Fig. 4.20.

Os sistemas de reforço foram aplicados em vigas pré-fissuradas e em vigas não danificadas. A pré-fissuração dessas vigas foi obtida através da realização de um pré-carregamento nas mesmas, antes da aplicação do reforço e sem que a armadura longitudinal atingisse sua tensão de escoamento.

Foram usados três diferentes sistemas de reforço:

- 1) sistema 1: uso de folhas de fibras de carbono contínuas em duas camadas aplicadas com uma resina epóxi, com espessura final de 1 mm.
- 2) sistema 2: uso de tecido de fibras de carbono unidirecionais em duas camadas e resina epóxi, com espessura final de 1 mm.
- 3) sistema 3: uso de tecido com fibras trançadas a 90^0 em apenas uma camada e resina epóxi, espessura total final igual a 1,5 mm.

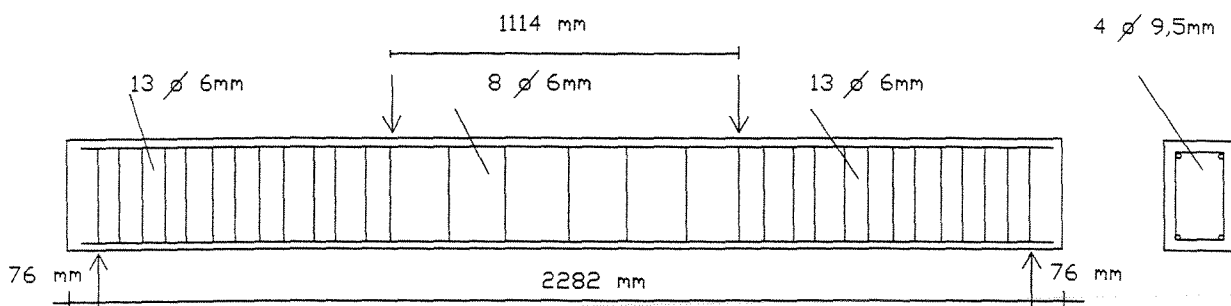


FIGURA 4.20 Dimensões e armadura das vigas ensaiadas.

Cada sistema foi testado para três diferentes alinhamentos das fibras, 0° , 90° e $\pm 45^\circ$; exceto o sistema 3, em que o alinhamento das fibras variou entre $0^\circ/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$. A figura 4.21 mostra como foi realizado este alinhamento.

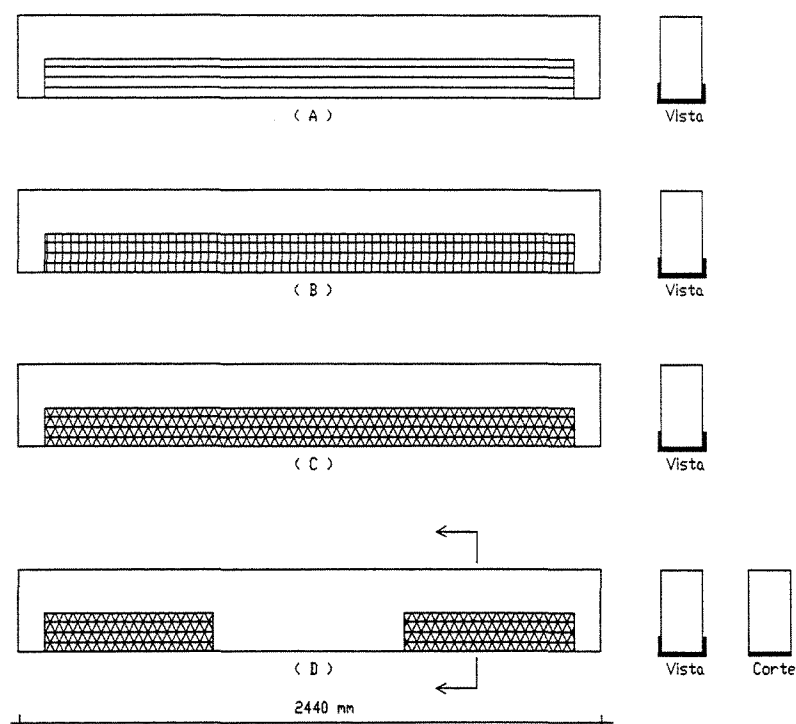


FIGURA 4.21 (A), (B), (C) e (D) Sistemas de Reforço utilizados no trabalho.

Tipo A: uso de duas camadas de compósitos com as fibras dispostas longitudinalmente à viga. Realizado para os sistemas 1 e 2. (Fig. 4.21A).

Tipo B: uso de duas camadas unidirecionais de compósitos dispostas perpendicularmente, sendo a primeira camada colocada com as fibras paralelas ao sentido longitudinal da viga e a segunda camada, ao sentido transversal da viga. Realizado para os sistemas 1 e 2. (Fig. 4.21B).

Tipo C: duas camadas de compósitos com as fibras aplicadas a $\pm 45^\circ$, aproximadamente paralelas e normais ao sentido das fissuras de cisalhamento. Uso do sistema 3. (Fig. 4.21C).

Tipo D: mesmo procedimento de C, exceto pelo fato de que, neste caso, a cobertura lateral de compósito na região sem esforços de cisalhamento foi retirada. (Fig. 4.21D).

Foi aplicado aproximadamente a mesma quantidade de fibras por unidade de área em cada viga.

A denominação dada na tabela 4.8 foi utilizada para as vigas, onde a letra u indica as vigas que não foram pré-fissuradas.

TABELA 4.8 Denominação dada às vigas.

Denominação	Sistema de reforço	Orientação das fibras
IA	1	A
IB	1	B
Ibu	1	B
IC	1	C
ID	1	D
IIA	2	A
IIB	2	B
IIBu	2	B
IIIC	3	C
IIID	3	D

Os resultados obtidos demonstraram que as folhas trabalharam de modo parecido com os tecidos costurados ou entrelaçados. Entretanto, seu método de aplicação foi relativamente mais simples.

Quanto à resistência última, não foi verificado comportamento diferenciado entre as vigas pré-fissuradas e as não previamente danificadas. A maior diferença de desempenho foi verificada quanto à orientação das fibras em relação à direção de aplicação da carga e quanto à área de material usada no reforço (tamanho, disposição).

Quanto aos modos de ruptura observados obteve-se:

Para a viga IA: descolamento do reforço com parte do substrato. Foi o caso onde se obteve o maior valor para a resistência última à flexão, superando o valor obtido para a viga de referência em 138 kN, antes da ocorrência do colapso que se deu de maneira brusca. O diagrama carga-deslocamento vertical pode ser visto na figura 4.22.

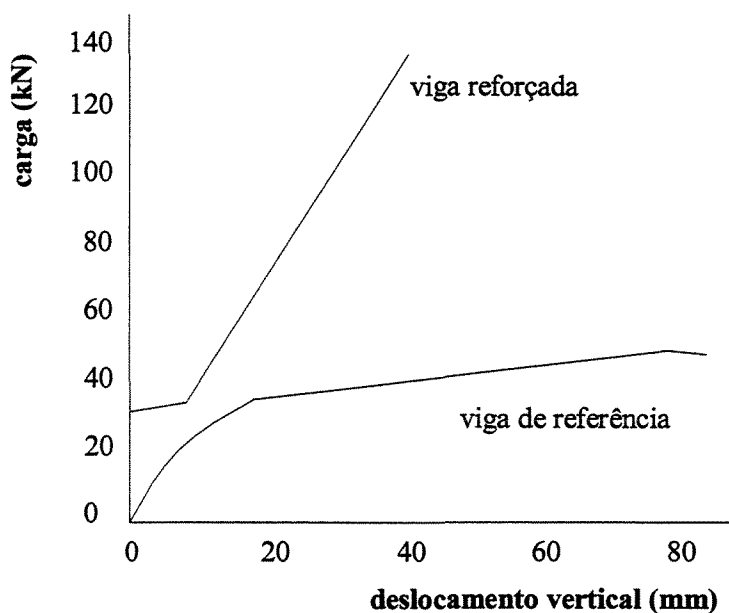


FIGURA 4.22 Diagrama carga x deslocamento vertical para a viga IA.

Para as vigas IB, (fig. 4.23), e IBu o incremento de carga observado foi menor, mas ainda significativo. A camada do cobrimento da parte inferior da viga rompeu, mas foi contida pelo compósito. Ocorreu, então a separação brusca do compósito do concreto, pelo lado inferior e

pelas partes laterais da viga, indicando que os esforços foram transferidos pelas fibras transversais para a parte de baixo da viga.

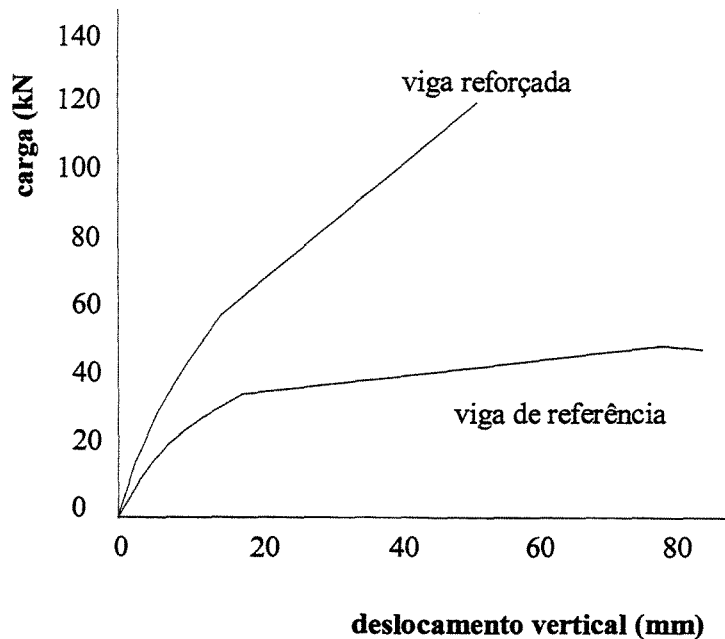


FIGURA 4.23 Diagrama carga x deslocamento vertical para a viga IB.

Para a viga IC o incremento na carga última também foi menor, como já havia sido previsto e a ruptura se deu de modo diferente e mais dúctil do que o observado anteriormente. Conforme o carregamento ia sendo aumentado, iniciou-se um descolamento progressivo da extremidade do compósito e, com o descolamento, o carregamento foi interrompido.

Para a viga ID, (fig. 4.24), devido ao menor desenvolvimento do comprimento da fibra, obteve-se o menor incremento da carga última de todas as vigas analisadas anteriormente. Sua ruptura se deu de maneira dúctil, havendo um descolamento gradual do compósito na região da interface, no meio do vão.

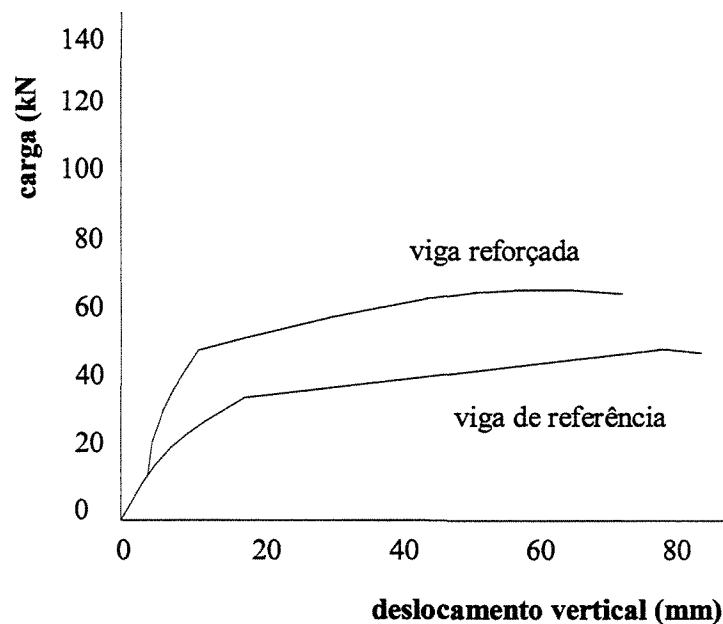


FIGURA 4.24 Diagrama carga x deslocamento vertical para a viga ID.

Para as vigas reforçadas com o sistema II, os resultados obtidos foram os mesmos do sistema I no que se refere ao modo de ruptura observado.

Para a viga IIIC o colapso se deu com o descolamento do reforço e o carregamento foi interrompido. Nesse caso observou-se um incremento, na capacidade última da viga, menor do que o verificado com a utilização do reforço com fibras dispostas no sentido longitudinal. Entretanto, a ruptura se deu de maneira mais lenta, apresentando um comportamento mais dúctil.

Para a viga IIID o incremento na capacidade última obtido foi o menor de todos os casos. Ocorreu uma ruptura dúctil e gradual da fibra, com um aumento gradual dos deslocamentos verticais. A camada de fibra mais externa do reforço deslocou-se lateralmente, expondo a extremidade das fibras rompidas.

As conclusões dos pesquisadores foram de que com a disposição perpendicular das fibras em relação às fissuras houve um grande incremento na resistência e na rigidez das vigas, mas ocorreu uma ruptura brusca do concreto, devido à concentração de tensões na região próxima à extremidade do compósito. Com a colocação das fibras obliquamente às fissuras, os incrementos de resistência e rigidez verificados foram menores, mas o colapso se deu de maneira mais dúctil e com avisos como estalos ou descolamento da chapa.

Verificou-se, também, a eficiência do reforço através do uso de CFRP, com aumento da capacidade última e da rigidez de todas as vigas reforçadas em relação às vigas de referência.

5 EQUACIONAMENTO

De acordo com o capítulo 4, as fibras e resinas utilizadas apresentam características muito diferentes entre si. Isso implica num cuidado maior do projetista, que deve conhecer bem as propriedades tanto físicas quanto mecânicas do compósito utilizado.

As recomendações encontradas na literatura, quanto ao dimensionamento de vigas de concreto reforçadas com compósitos de FRP, são variadas, mas também apresentam muitos pontos em comum. A variação se deve principalmente às diferentes propriedades que podem apresentar os compósitos, de acordo com seus materiais constituintes.

A maior parte dos pesquisadores indica que o cálculo dessas estruturas deve ser feito considerando que ocorram os modos de colapso clássicos e evitando os modos de colapso prematuros garantindo-se a adesão compósito-concreto, através da realização prévia de ensaios, e do cálculo de valores máximos da tensão de cisalhamento nessa interface e na região das extremidades da chapa.

Recomenda-se que se assuma o colapso do reforço juntamente com o escoamento da armadura longitudinal inferior, antes que o esmagamento do concreto na borda mais comprimida ocorra.

Deve-se determinar a espessura e largura do laminado que proporcionem o maior momento resistente, sem que ocorra um colapso prematuro.

Os principais parâmetros que afetam a resistência última da viga de concreto reforçada são a resistência à compressão do concreto, a taxa de armadura da viga, o módulo de elasticidade do compósito e sua espessura.

O momento fletor máximo a ser considerado será o menor valor obtido entre os itens 5.1, 5.2 e 5.3.

5.1 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR ÚLTIMO

A seguir será descrito o procedimento padrão para o dimensionamento do reforço utilizando folhas flexíveis, tecidos ou laminados de fibra de carbono em vigas de concreto armado. Na figura 5.1 estão representadas as forças atuantes e as respectivas deformações a serem consideradas no cálculo.

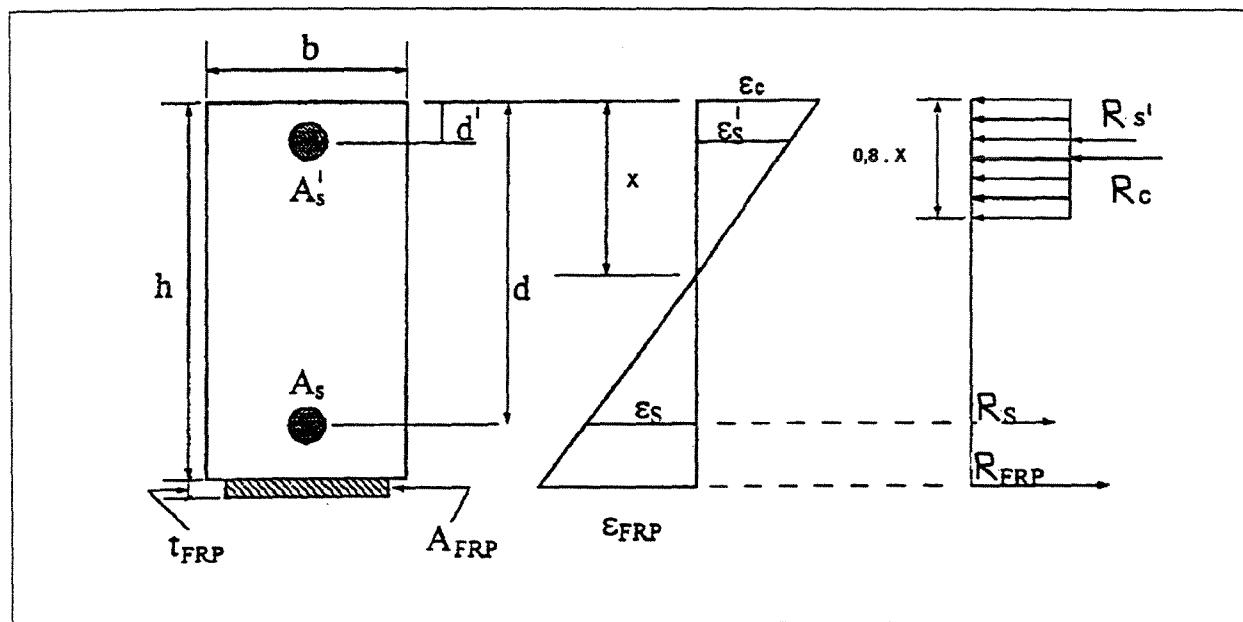


Figura 5.1 – Forças e deformações em uma viga reforçada com fibra de carbono.

Onde tem-se:

A_s'	=	Área da armadura comprimida.
A_s	=	Área da armadura tracionada.
h	=	Altura da viga.
b	=	Largura da base da viga.
d	=	Distância entre a borda comprimida e o centro da armadura tracionada.
d'	=	Distância entre a borda comprimida e o centro da armadura comprimida.
T_{FRP}	=	Espessura da chapa de folha de carbono.
A_{FRP}	=	Área do reforço de fibra de carbono.
x	=	Altura da linha neutra.
ϵ_s'	=	Deformação na armadura comprimida.
ϵ_s	=	Deformação na armadura tracionada.
ϵ_{cu}	=	Deformação última no concreto.
ϵ_{FRP}	=	Deformação na folha de fibra de carbono.
R_s'	=	Força resultante na armadura comprimida.
R_s	=	Força resultante na armadura tracionada.
R_c	=	Força resultante de compressão no concreto.
R_{FRP}	=	Força resultante de tração na folha de fibra de carbono.

Da figura 5.1 , ainda pode-se deduzir as seguintes compatibilidades de deformações, em função da deformação última no concreto:

$$\epsilon_s = \left(\frac{d - x}{x} \right) \cdot \epsilon_{cu} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_s' = \left(\frac{x - d'}{x} \right) \cdot \varepsilon_{cu} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_{FRP} = \left(\frac{h - x}{x} \right) \cdot \varepsilon_{cu} \quad (5.3)$$

E as seguintes forças resultantes:

$$R_s' = A_s' \cdot E_s \cdot \varepsilon_s' \quad (5.4)$$

$$R_s = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \quad (5.5)$$

$$R_c = 0,80 \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \quad (5.6)$$

$$R_{FRP} = A_{FRP} \cdot E_{FRP} \cdot \varepsilon_{FRP} \quad (5.7)$$

Onde:

E_s = Módulo de deformação da armadura.

E_{FRP} = Módulo de deformação da fibra de carbono.

f_{cd} = Resistência de cálculo do concreto à compressão.

obs: No dimensionamento alguns pesquisadores sugerem a utilização de um fator de minoração da resistência do compósito denominado por fator de eficiência da fibra, Φ_{FRP} , tomado como 0,8 ou 0,85 pela norma canadense CAN/CSA-S806-96 e como 0,85 pelo ACI 440R-2000.

Além deste fator ainda ter-se-ia a aplicação do fator ambiental de redução (C_E) indicado no item 4.3.2.1 também como um fator de minoração da resistência à tração do compósito.

Com esses valores fixados tem-se diretamente o valor de x definindo a posição da linha neutra e possibilitando a obtenção dos valores de R_s , R_s' e R_c anteriormente descritos, faltando apenas o valor de R_{FRP} . Nesse caso se tivermos o tipo de fibra a ser usado fixado, saberemos o seu módulo de elasticidade e a única variável a ser calculada será a área do reforço de fibra de carbono.

Sabendo-se que uma espessura, (t_{FRP}), menor resulta numa ruptura mais dúctil, temos que a largura do compósito do reforço, (b_{FRP}), deve ser a maior possível, não ultrapassando, é claro, a largura da seção da viga, (b). Além disso, geralmente, a espessura do compósito dependerá do que se tem disponível no mercado, tendo-se somente a sua largura como parâmetro que poderia ser modificado.

A largura do compósito a ser utilizada numa viga pode ser selecionada de acordo com o proposto por Ziraba et alii. (1994) citado por O. Challal et alii. (1994):

$$b - 20 < b_{FRP} < b \quad (5.8)$$

Sendo b a largura da alma da viga e com as referidas medidas em milímetros.

Sem a adição do reforço, o valor do momento fletor era:

$$M_{\text{último}} = R_c \times \left(d - \frac{x}{2}\right) \quad (5.9)$$

Com a adição do reforço, o momento fletor é aumentado por uma parcela, fazendo com que a linha neutra da peça abaixe. O novo valor do momento será de:

$$M_{\text{último}} = R_c \times \left(d - \frac{x}{2}\right) + R_{FRP} \times (h - d) \quad (5.10)$$

Note-se que o valor correspondente à espessura do compósito, por ser desprezível, é desconsiderado no cálculo.

Os valores obtidos para as vigas deste trabalho encontram-se no capítulo 6.

5.2 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DE DESCOLAMENTO

No item 4.5 foi visto que a ruptura pode ocorrer de modo considerado prematuro e que se inicia, geralmente, na região da extremidade do compósito.

Chaallal et alii. (1994) recomendam que sejam avaliadas as tensões de cisalhamento (τ) e normal (σ) nessa região, utilizando-se a solução analítica aproximada proposta por Roberts (1989). Esses valores serão comparados com os valores máximos permissíveis para que não haja descolamento.

Segundo essa análise, temos o seguinte equacionamento:

$$\tau = \left\{ V + \left[\frac{K_s}{E_{FRP} \times b_{FRP} \times t_{FRP}} \right]^{\frac{1}{2}} \times M \right\} \times \frac{b_{FRP} \times t_{FRP}}{I \times b_a} \times (h - x) \quad (5.11)$$

A relação entre τ e σ é dada pela equação 5.12:

$$\sigma = k_1 \times \tau \quad (5.12)$$

Em que k_1 é uma constante calculada de acordo com 5.13.

$$k_1 = t_{FRP} \times \left[\frac{k_n}{4 \times E_{FRP} \times I_{FRP}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.13)$$

k_s e k_n representam, respectivamente, os valores da rigidez de cisalhamento e normal do adesivo, por unidade de comprimento. Esses valores podem ser obtidos pelas equações 5.14 e 5.15.

$$k_s = G_a \times \frac{b_a}{t_a} \quad (5.14)$$

$$k_n = E_a \times \frac{b_a}{t_a} \quad (5.15)$$

E, temos que:

V = valor da força de cisalhamento na região da extremidade do compósito.

M = valor do momento fletor na região da extremidade do compósito, calculado num ponto específico (dap) calculado pela equação 5.16.

b_a = largura da camada de adesivo.

t_a = espessura da camada de adesivo.

E_a = módulo de Young do adesivo.

G_a = módulo de cisalhamento do adesivo.

I_{FRP} = momento de inércia do compósito.

I = momento de inércia equivalente do compósito já colocado (compósito + camada de adesivo).

$$d_{ap} = d_m + \frac{h + t_{FRP}}{2} \quad (5.16)$$

Em que d_m corresponde à distância entre o ponto de apoio da viga e a extremidade do compósito.

Depois de realizado o cálculo da tensão de cisalhamento atuante (τ), procede-se para a determinação da tensão de cisalhamento atuante no instante do descolamento na interface compósito-adesivo, ($\tau^{\text{descolamento}}$), para que se possa obter o valor do momento fletor.

O descolamento do compósito ocorre na direção paralela à linha do adesivo, onde o valor da tensão de cisalhamento combinado ao da tensão normal atinge seu valor máximo. Esse tipo de colapso pode ser descrito pela lei de Mohr-Coulomb, como visto na equação 5.17.

$$\tau^{\text{descolamento}} = c - \sigma_n \times \text{tg} \theta \quad (5.17)$$

Em que c é a coesão, σ_n é a tensão normal à linha de adesivo e θ é o ângulo de atrito interno.

c e θ dependem das propriedades do adesivo e do concreto e das condições de preparação da superfície. Varastehpour e Hamelin (1996) sugeriram valores para c e θ através de ensaios de cisalhamento com tensão normal nula e de uma viga projetada para romper por descolamento, realizados com diversos tipos de compósitos reforçados com fibras. Essa sugestão é apresentada na equação 5.18.

$$\tau_{\text{máx}}^{\text{descolamento}} = 5,4 - \sigma_n \times \text{tg} 33^\circ \quad (5.18)$$

E, de acordo com 5.12 e 5.13, tem-se:

$$\tau_{m\acute{a}x}^{descolamento} = \frac{5,4}{1 + k_1 \times tg33^0} \quad (5.19)$$

Determinando-se o valor de $\tau_{m\acute{a}x}^{descolamento}$, iguala-se a τ e, através de um processo de interação, obtém-se o valor do carregamento para o qual a tensão de cisalhamento na extremidade do compósito é máxima. Com esse carregamento chega-se ao valor do momento fletor em que, teoricamente, ocorrerá o descolamento do compósito, se não for empregado nenhum mecanismo de ancoragem.

Os valores obtidos para este trabalho estão detalhados no capítulo 6.

5.3 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DE ARRANCAMENTO DA CAMADA DO COBRIMENTO

Para que se evite este outro modo de colapso prematuro, é proposto o dimensionamento que segue, (O. Chaallal et alii. (1994)), em que se calcula a tensão de cisalhamento máxima na região da altura da armadura longitudinal inferior, na qual ocorrerá o arrancamento da camada de cobrimento. Este valor também será comparado com a tensão de cisalhamento que se desenvolve na viga (eq. 5.11) e assim pode-se estabelecer o valor da carga máxima, P, em que será atingido o colapso e, conseqüentemente o valor do momento fletor correspondente a esta carga.

Como visto no capítulo 4, o arrancamento da camada de cobrimento do concreto é iniciado nas fissuras de cisalhamento que surgem próximas à região da extremidade do compósito, fig.5.2.

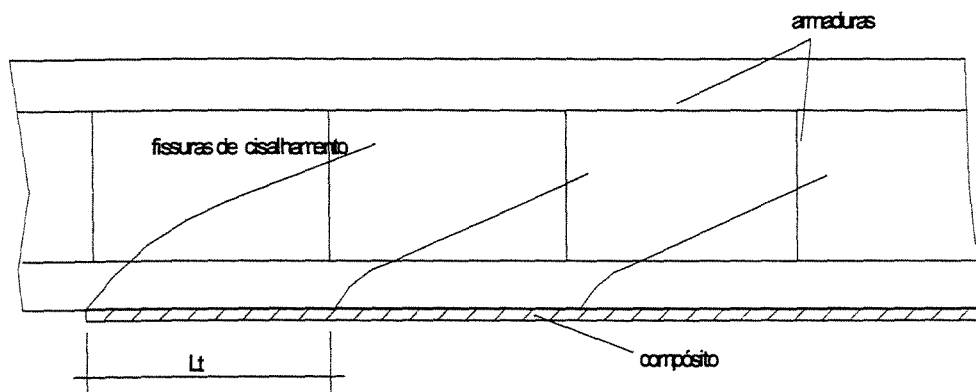


FIGURA 5.2 Fissuração de cisalhamento na região da extremidade do compósito.

Considerando um elemento formado pela região entre duas fissuras adjacentes sob uma tensão de cisalhamento τ , a tensão de tração em A, σ_A , é dada por, (fig. 5.3):

$$\sigma_A = \frac{M_A}{I_A} \left(\frac{L_t}{2} \right) \quad (5.20)$$

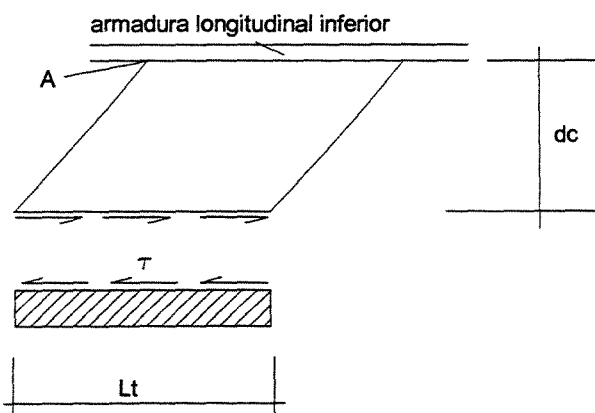


FIGURA 5.3 Elemento formado entre duas fissuras de cisalhamento adjacentes.

Onde tem-se para o valor de M_A :

$$M_A = \tau \times L_t \times b_{FRP} \times d_c \quad (5.21)$$

$$I_A = \frac{b \times L_t^3}{2} \quad (5.22)$$

Em que d_c é a distância entre o centro da armadura longitudinal inferior e a borda inferior da viga e L_t corresponde à distância entre duas fissuras adjacentes. Essa distância, segundo Park e Paulay (1975) citados por O. Chaallal et alii. (1994) pode ser considerada como sendo aproximadamente o valor do espaçamento entre as armaduras transversais.

O arrancamento do cobrimento ocorrerá quando a tensão desenvolvida pelo concreto for igual a sua resistência à tração, f_t . Então, substituindo as equações 5.21 e 5.22 em 5.20 e igualando σ_A a f_t , tem-se:

$$\tau_{máx}^{arrancamento} = \left(\frac{f_t \times L_t}{6 \times d_c} \right) \times \left(\frac{b}{b_{FRP}} \right) \quad (5.23)$$

O valor obtido em 5.23 deve ser comparado com a equação 5.11 para a obtenção do valor da carga máxima P .

Os valores calculados para este trabalho podem ser vistos no capítulo 6.

6 METODOLOGIA / PROGRAMA EXPERIMENTAL

A técnica em questão, englobando tecnologia de aplicação e modelos de dimensionamento existentes, foi 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 tiveram a mesma armadura, transversal e longitudinal, dimensionadas de maneira que a ruptura à flexão, definida neste caso pelo início de escoamento da armadura longitudinal, seja alcançada tanto na viga sem reforço quanto nas vigas reforçadas.

6.1 DETALHES DAS VIGAS A ENSAIAR

Todas as vigas tiveram 400 cm de comprimento, seção transversal em “T” com 50 cm de largura da mesa, 12 cm de largura da alma, 47 cm de altura total e 10 cm de altura da mesa , de acordo com a Fig.6.1.

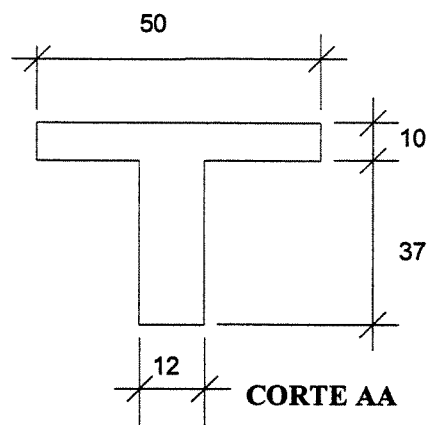
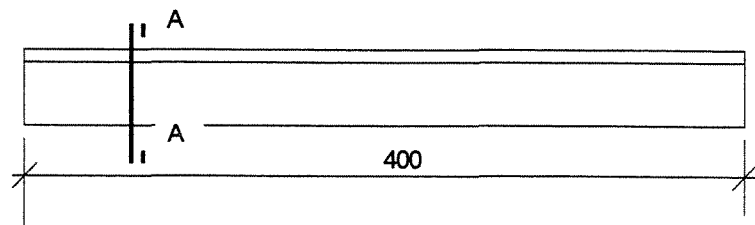


FIGURA 6.1 Características Geométricas das Vigas.

Na Fig. 6.2 temos que o carregamento das vigas foi constituído por 2 cargas concentradas aplicadas a uma distância de 150 cm dos apoios.

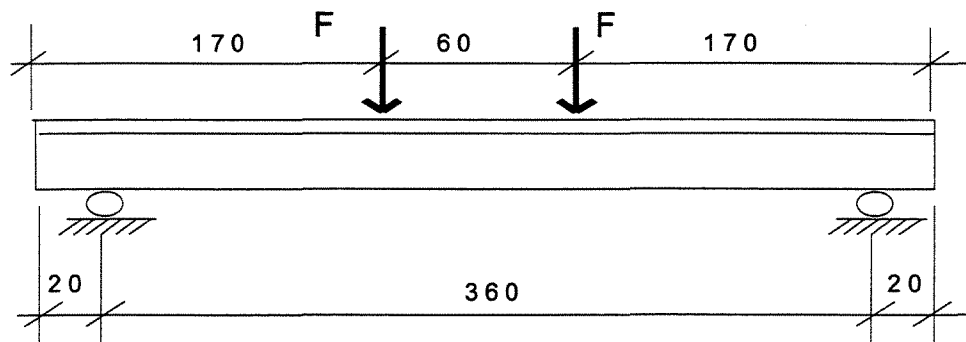


FIGURA 6.2 Esquema de Carregamento das Vigas.

As armaduras das vigas foram dimensionadas de modo que, mesmo no caso em que se usar a viga com maior taxa de fibras, atinja-se a ruptura por flexão. Isso irá proporcionar grandes deformações na armadura longitudinal e nos compósitos, avaliando-se, deste modo, efetivamente o seu desempenho.

Nos pontos de aplicação dos carregamentos, a armadura transversal teve seu espaçamento diminuído para se melhorar a distribuição dos esforços na mesa, evitando-se o esmagamento do concreto nessas regiões.

A armadura longitudinal inferior das vigas foi composta por duas barras de 12,5 mm e a armadura transversal será composta por barras de 6,3 mm de diâmetro colocadas a cada 10 cm. Na região da mesa serão utilizadas 6 barras de diâmetro 6,3 mm como armadura para sustentação da armadura transversal. (Figura 6.3).

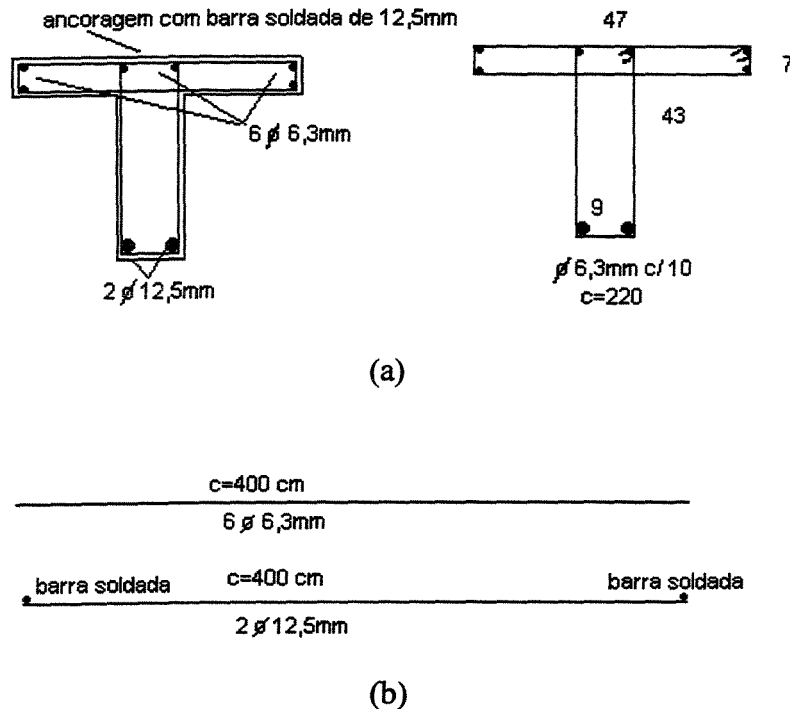


FIGURA 6.3 Detalhe da armadura da viga: (a) transversal e, (b) longitudinal.

O processo de colagem das folhas flexíveis de fibra de carbono nas vigas obedeceu os procedimentos indicados pelo fornecedor do material. Estes procedimentos foram detalhados no capítulo 4.

A primeira viga foi uma viga testemunho, sem qualquer tipo de reforço à flexão; as outras 5 vigas foram diferentemente reforçadas à flexão por meio de laminados de fibra de carbono. Desta maneira, teve-se:

- a) **VIGA 1:** viga testemunho dimensionada de maneira que a ruptura foi alcançada por flexão (neste caso, definida como o início do escoamento da armadura longitudinal);
- b) **VIGA 2:** viga 1 reforçada à flexão por meio de folhas flexíveis com fibras de carbono, posicionadas em toda a face inferior da viga, em uma só camada, sem nenhum tipo de mecanismo de incremento de ancoragem na região dos apoios, com as fibras de carbono orientadas em relação ao eixo longitudinal da viga, de acordo com a Fig. 6.4.

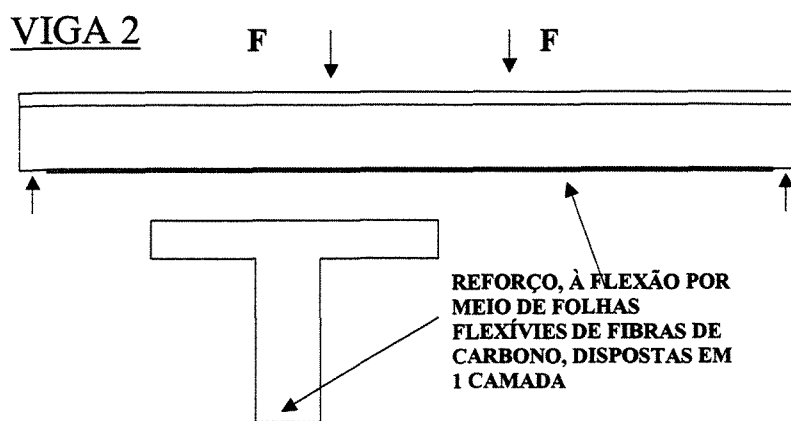


FIGURA 6.4 Detalhe do sistema de reforço empregado na viga 2.

c) **VIGA 3** : viga 1 reforçada à flexão por meio de folhas flexíveis, dispostas em 1 camada, posicionada ao longo de toda a face inferior da viga com o mesmo comprimento e sem nenhum tipo de mecanismo de incremento de ancoragem na região dos apoios, de acordo com a Fig. 6.5.

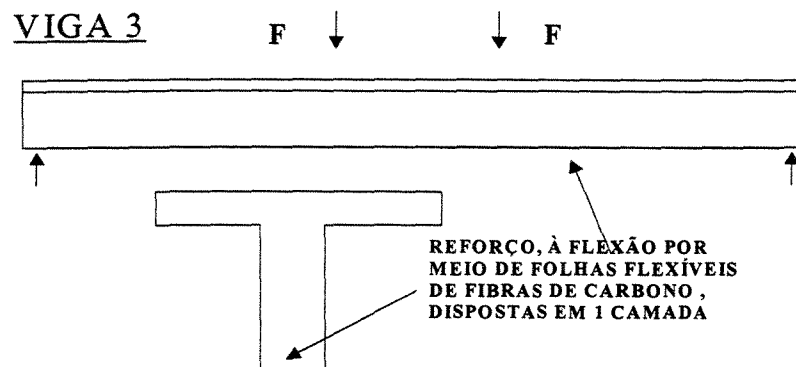


FIGURA 6.5 Detalhe do sistema de reforço empregado na viga 3.

d) **VIGA 4** : viga 3, com folhas flexíveis dispostas em 3 camadas, sem nenhum tipo de mecanismo de incremento de ancoragem na região dos apoios, de acordo com a Fig. 6.6;

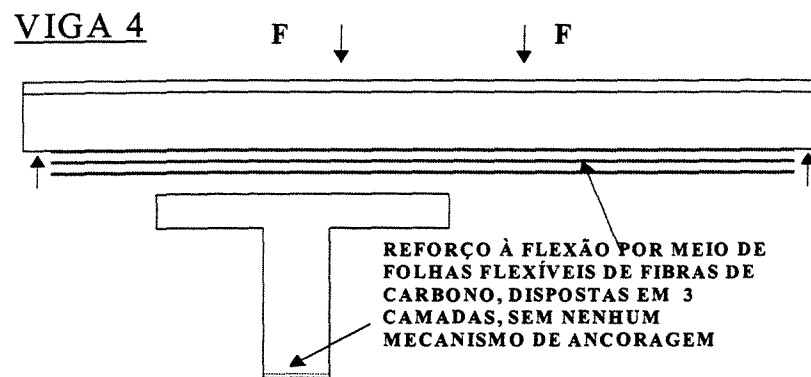


FIGURA 6.6 Detalhe do sistema de reforço empregado na viga 4.

e) **VIGA 5** : viga 3, com as camadas de folhas flexíveis ancoradas na região dos apoios por intermédio de tiras de folhas flexíveis de carbono dispostas transversalmente a 45°- “embrulhando” toda a alma da viga. Esta viga é mostrada na Fig. 6.7;

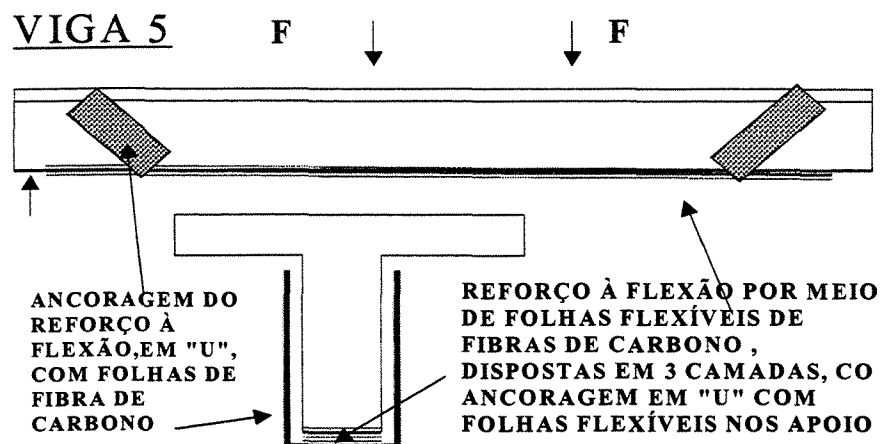


FIGURA 6.7 Detalhe do sistema de reforço empregado na viga 5.

f) **VIGA 6** : Na Fig. 6.8, é mostrado o sistema de reforço empregado na viga 6, com a colocação de seis camadas de folha flexível de fibra de carbono, com ancoragem em "U".

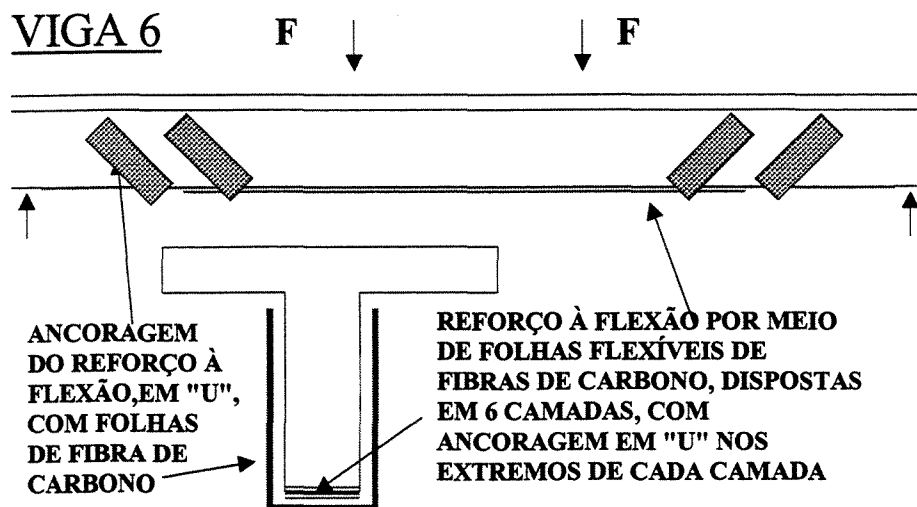


FIGURA 6.8 Detalhe do sistema de reforço empregado na viga 6.

A eficiência dos diferentes procedimentos de reforço à flexão com uso de folhas flexíveis reforçadas com fibra de carbono foi quantificada pela comparação dos resultados dos ensaios das vigas experimentadas. A influência, na resistência à flexão de alguns parâmetros foi avaliada como, por exemplo, número de camadas (VIGAS 2 e 3 com 1 camada, VIGAS 4 e 5 com três camadas e VIGA 6 com seis camadas), e presença ou não de mecanismos de ancoragem das folhas à viga (VIGAS 5 e 6 com ancoragem).

As vigas V2 e V3 foram iguais a fim de se verificar se a ocorrência do descolamento da camada de reforço ocorrida para V2 iria se repetir.

6.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Tem-se, neste capítulo, características gerais dos materiais utilizados na execução das vigas e dos sistemas de reforço.

Os ensaios de caracterização do concreto e das armaduras obedeceram aos procedimentos de Normas Brasileiras, já os de caracterização dos compósitos de fibra de carbono obedeceram aos procedimentos da Norma Americana ASTM D 3039 – 76.

6.2.1 CONCRETO: CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Para a confecção do concreto, foram utilizados materiais com as características seguintes.

a) CIMENTO

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, o CPV- ARI-PLUS da Cimentos Nacionais de Minas S.A- CIMINAS.

Esse cimento tem como características relativas à finura um resíduo na peneira 200 de, aproximadamente, 1% e uma superfície específica Blaine de, aproximadamente, 400 m²/kg.

b) AGREGADOS

O agregado gráúdo utilizado era constituído por brita com dimensão máxima de 19 mm e módulo de finura igual a 6,82 mm. Sua análise granulométrica é vista na figura 6.9.

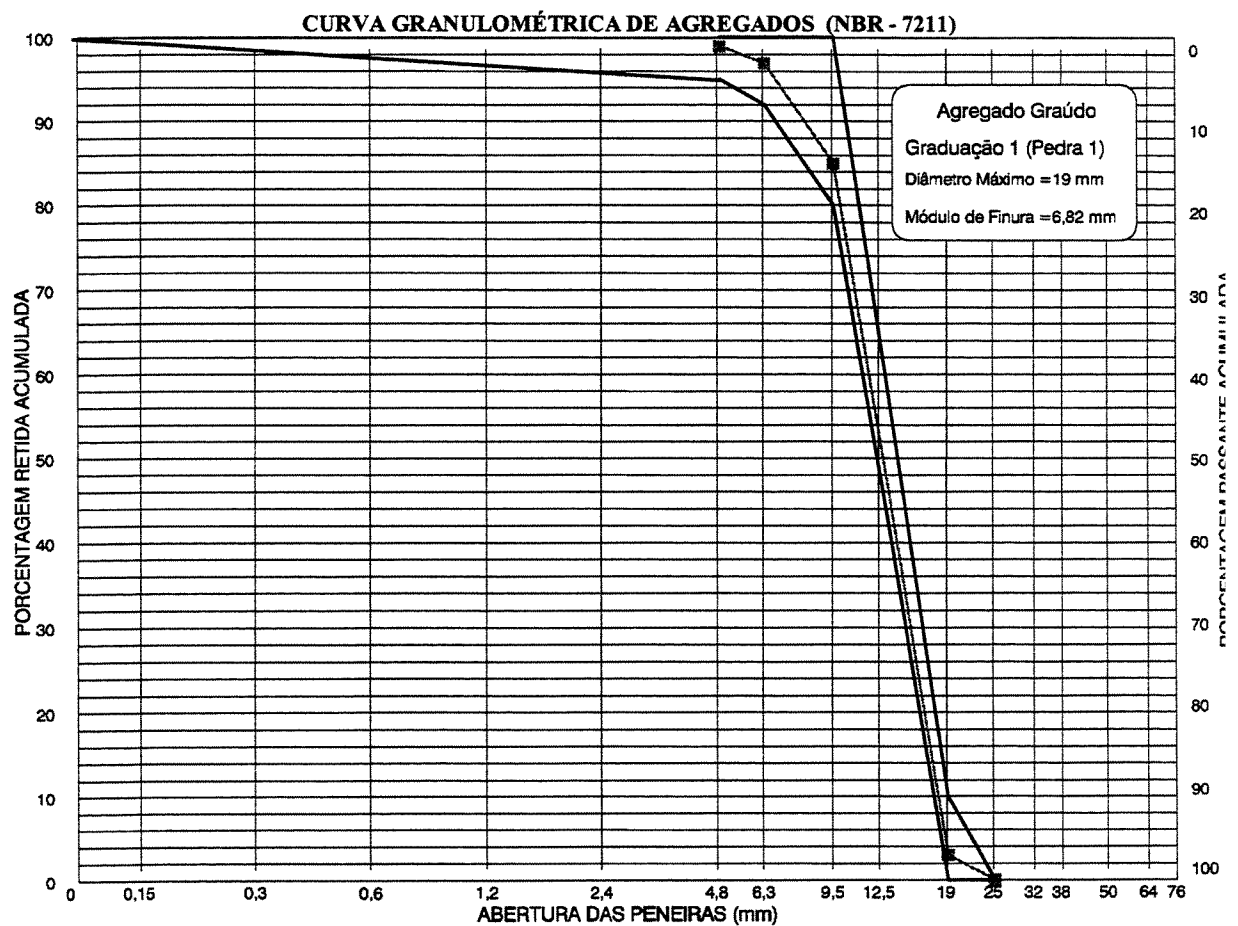


FIGURA 6.9 Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.

O agregado miúdo é constituído de areia fina com módulo de finura igual 2,14 mm e sua análise granulométrica é dada na figura 6.10.

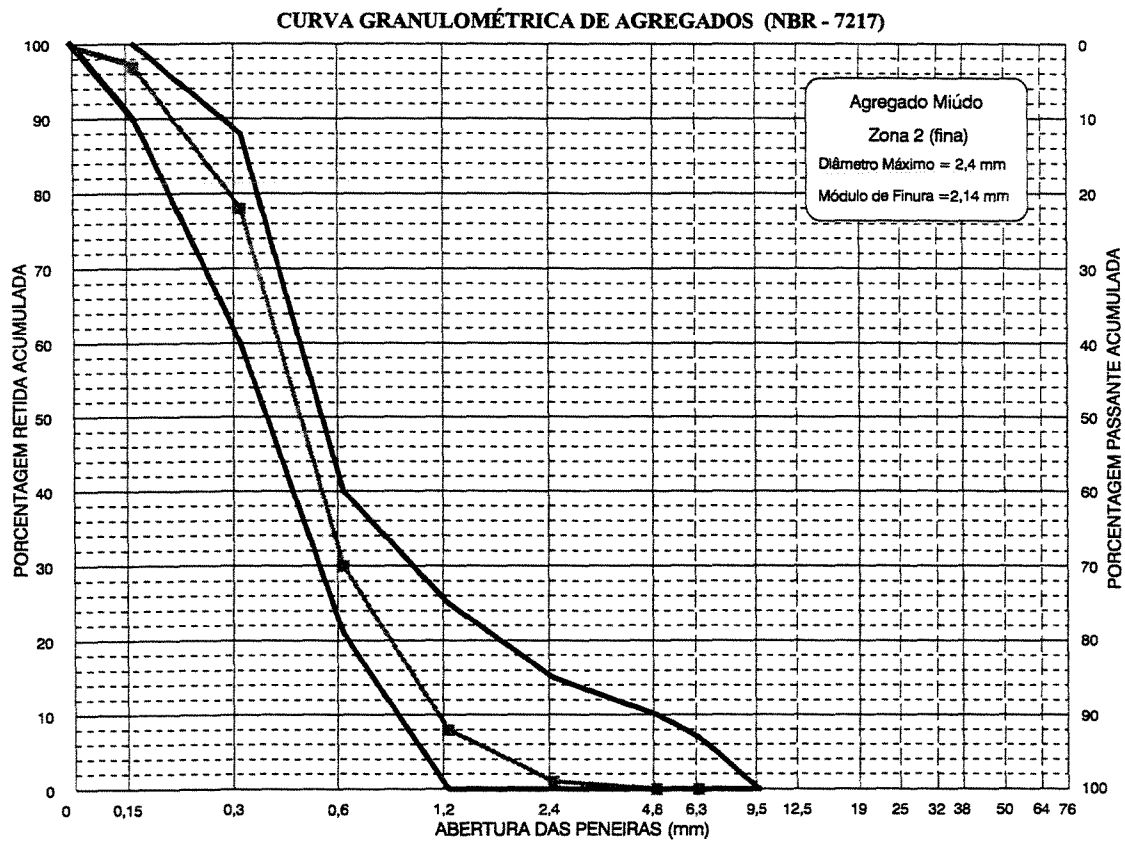
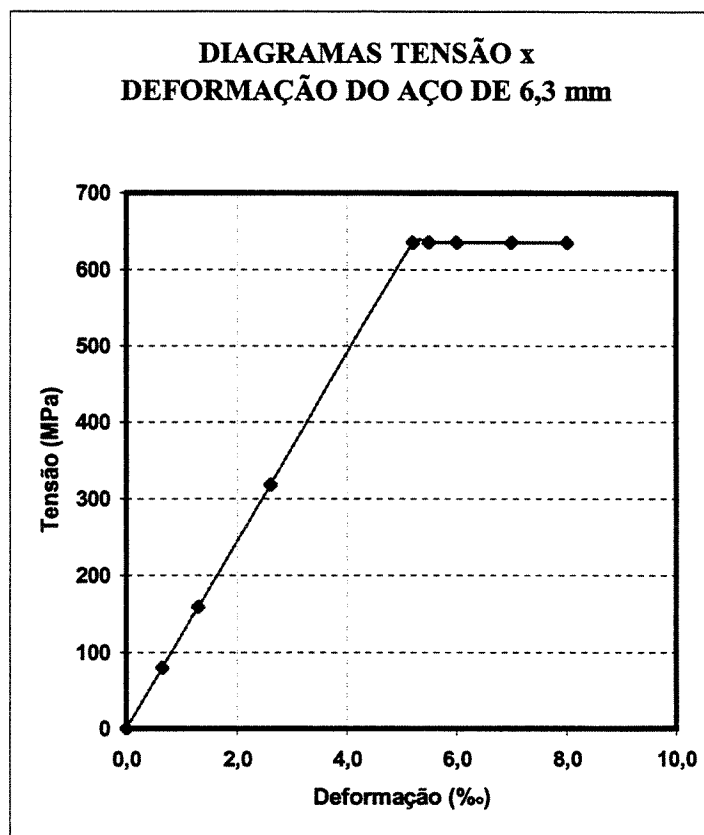


FIGURA 6.10 Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.

6.2.2 CARACTERÍSTICAS DAS ARMADURAS

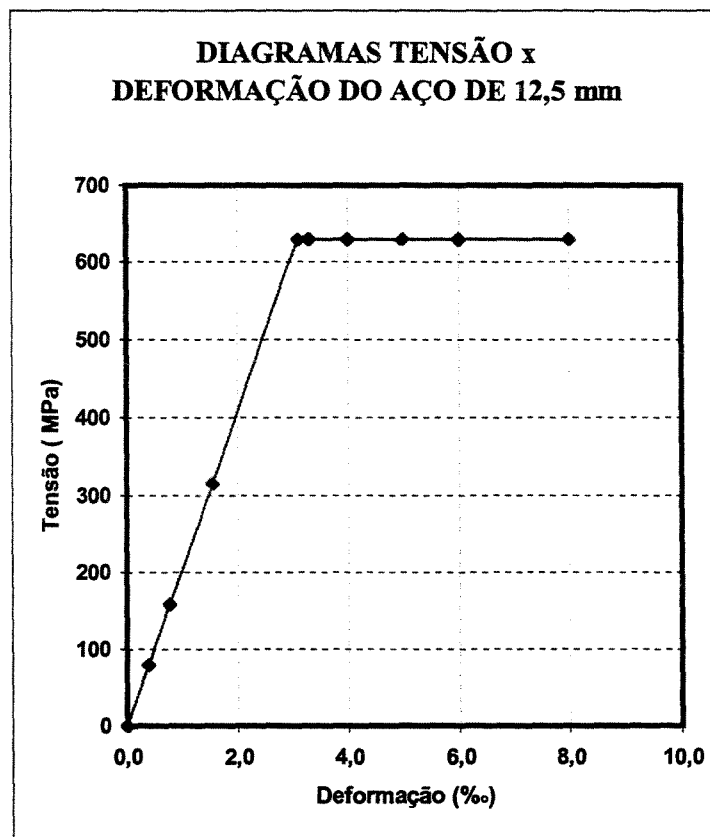
Das barras de aço a serem utilizadas na armadura das vigas foram retiradas quatro amostras por lote. Duas dessas amostras foram ensaiadas à tração e as restantes foram utilizadas para determinar-se características como peso linear, área e diâmetro nominal da barra.

De forma a obter-se o diagrama tensão-deformação, cada amostra ensaiada à tração foi instrumentada com extensômetros com base de medida 100mm. Nas figuras 6.11 e 6.12 são apresentados os diagramas.



$$F_y = 635,4 \text{ MPa} \quad E_s = 202,4 \text{ GPa} \quad \varepsilon_y = 5,2\text{‰}$$

FIGURA 6.11 Diagrama Tensão-Deformação do aço de diâmetro de 6,3 mm.



$F_y = 629,8 \text{ MPa}$ $E_s = 201,6 \text{ GPa}$ $\epsilon_y = 3,1\text{‰}$

FIGURA 6.12 Diagrama Tensão-Deformação do aço de diâmetro de 12.5 mm.

6.2.3 CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO UTILIZADOS

O diagrama tensão x deformação para a folha flexível de fibras de carbono utilizada pode ser visto na figura 6.13.

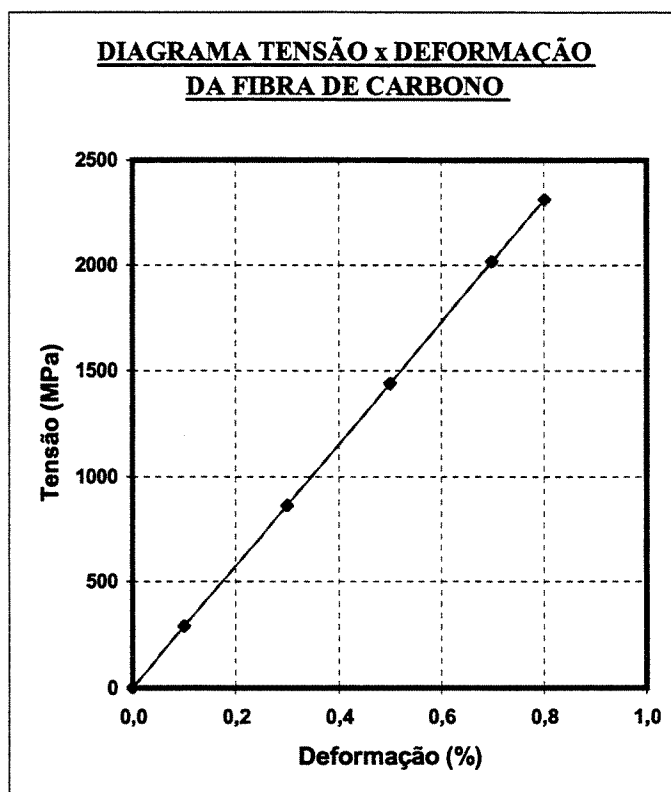


FIGURA 6.13 Diagrama tensão x deformação da fibra de carbono

TABELA 6.1 Características da folha flexível de fibra de carbono ensaiada.

Fibra	Peso (g/m²)	Densidade (g/cm³)	Espessura (mm)	E (N/mm²)	ϵ_u (%)	f_{ult} (N/mm²)
C-240	200	1,70	0,117	288.000	0,802	2310,9

TABELA 6.2 Características da resina epóxi usada para o tamponamento dos poros (Primer).

Característica	Valor
Viscosidade	65s
Sólidos por Volume	100%
Tempo máximo de utilização da mistura	15 minutos
Período de cura	7 dias
Módulo de Elasticidade	724,8 MPa
Resistência à Compressão	45 MPa

TABELA 6.3 Características da resina epóxi utilizada como massa niveladora (Putty).

Característica	Valor
Sólidos por Volume	98%
Tempo máximo de utilização da mistura	60 minutos
Espessura	1 a 2 mm
Descaimento	3 mm
Ponto de Fulgor	93°C

TABELA 6.4 Características da resina epóxi utilizada como saturante (Saturant).

Característica	Valor
Sólidos por Volume	100%
Tempo máximo de utilização da mistura	20 minutos
Viscosidade	60 s
Período de Cura	7 dias
Ponto de Fulgor	72°C
Resistência à compressão	44 MPa

6.3 EXECUÇÃO, DESFORMA E CURA DAS VIGAS

O roteiro a seguir foi usado para todas as vigas que fizeram parte deste estudo.

Após o preparo da armadura, foi feita a limpeza da forma e a aplicação de uma demão de óleo lubrificante sobre toda sua superfície interna, para facilitar a desmoldagem da viga.

Depois disso a armadura foi posicionada e a concretagem foi iniciada com concreto usinado em central.

Também foram moldados 15 corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para cada viga, sendo ensaiados à compressão simples com e sem instrumentação e à compressão diametral, de maneira que foi possível se determinar a resistência à compressão e o módulo de deformação do concreto na data do ensaio.

O adensamento do concreto da viga foi feito com vibrador elétrico de diâmetro 2 cm e os corpos de prova foram vibrados na mesa vibratória. (Fig. 6.14).



FIGURA 6.14 Detalhe do adensamento do concreto da viga V1, com o uso de vibrador.



FIGURA 6.15 Vigas e corpos de prova cobertos por lona plástica durante o processo de cura.

Imediatamente após a moldagem, tanto as vigas quanto os corpos de prova foram cobertos com lona plástica. (Fig. 6.15).

6.4 MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTOS

As armaduras longitudinais e transversais, o concreto e os materiais compósitos utilizados foram instrumentados conforme segue.

6.4.1 NAS ARMADURAS

Nos pontos especificados foram instalados extensômetros elétricos de resistência, (fig. 6.16 e 6.17), de maneira a se obter um controle da evolução das tensões durante o ensaio tanto nas armaduras longitudinais quanto transversais.

Os extensômetros T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 E T8 mediram as tensões na armadura transversal e os extensômetros L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11 e L12 mediram as tensões na armadura longitudinal.

Uma vez preparada a superfície das armaduras através de regularização, lixamento e limpeza; os extensômetros foram colados através do uso de cola a base de cianocrilato e depois foram isolados e protegidos com fita plástica.

A referência zero para as deformações nas armaduras longitudinal e transversal foi tomada estando a viga sem carga, somente sob a ação do peso próprio.

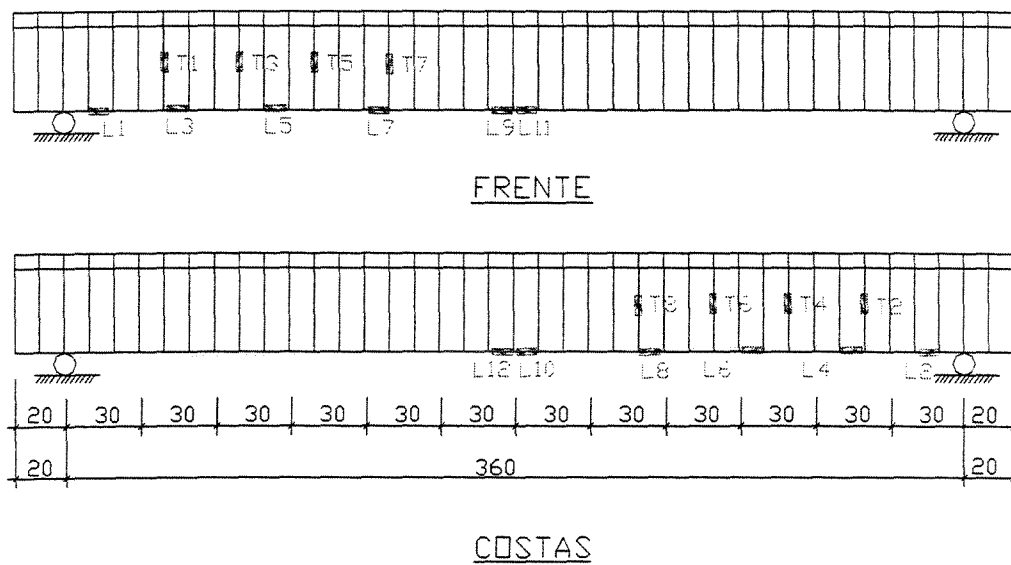


FIGURA 6.16 Posicionamento dos extensômetros nas armaduras longitudinal (L) e transversal (T).

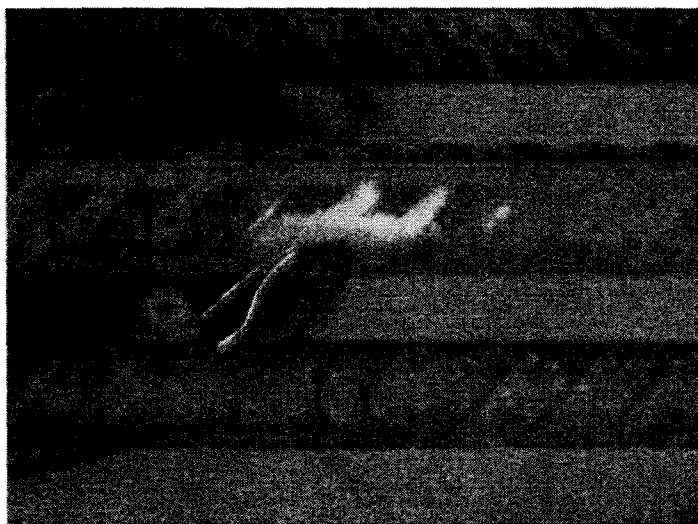


FIGURA 6.17 Detalhe de extensômetro colado numa das barras da armadura longitudinal da viga V2.

6.4.2 NOS COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO

Uma vez aplicados, as folhas flexíveis foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência, em pontos especificados na fig. 6.18. Desta maneira, a evolução das deformações (tensões) nas folhas flexíveis foi avaliada e, por comparação com a evolução das deformações (tensões) na armadura longitudinal da viga testemunho e da viga em questão, foi quantificada a colaboração do reforço para os diferentes sistemas executados.

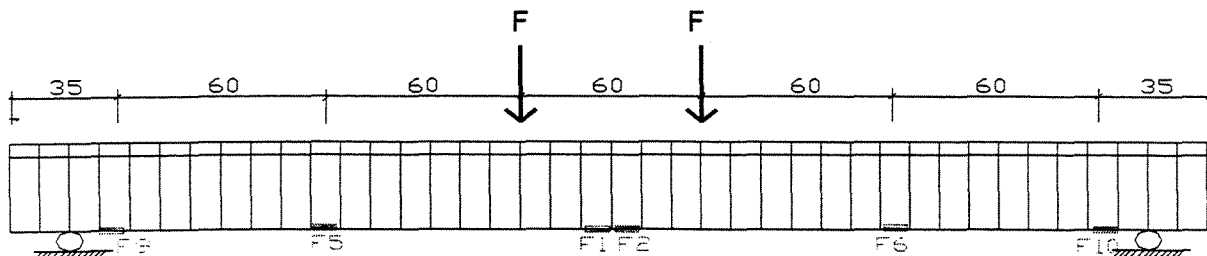


FIGURA 6.18 – Detalhe da instrumentação feita nos compósitos.

6.4.3 NO CONCRETO

Na parte lateral da mesa das vigas foram instaladas “pastilhas” metálicas, coladas à superfície das vigas com adesivo a base de cianocrilato. (Fig. 6.22). Essas pastilhas formaram bases de medida de 50 mm, obtendo-se os valores das deformações nesta região por intermédio de extensômetros mecânicos tipo TENSOTAST, com sensibilidade de 0,001 mm.

Foram feitas duas medições nas laterais da mesa na região do meio do vão (H1 e H4).

A referência zero para as deformações no concreto foi tomada estando a viga sem carga, somente sob a ação do peso-próprio.

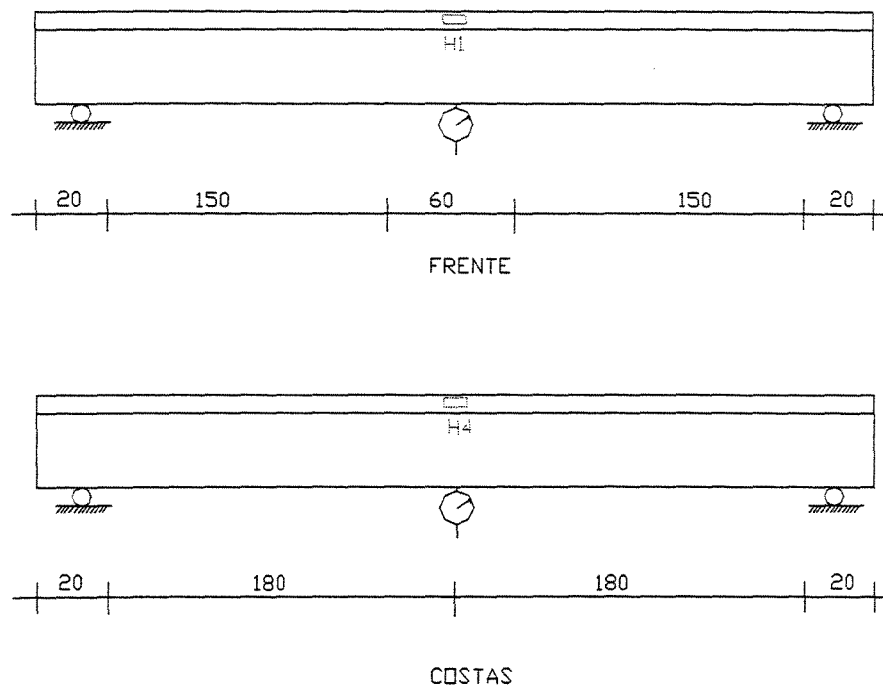


FIGURA 6.19 Posicionamento das pastilhas e do defletômetro.

6.4.4 DESLOCAMENTO VERTICAL

Os deslocamentos verticais foram controlados por intermédio de defletômetro mecânico KAEFER, com curso de 50mm e sensibilidade de 0,01mm, (ver figura 6.20).

O defletômetro foi posicionado no meio do vão da viga, na sua parte inferior, no seu eixo longitudinal.

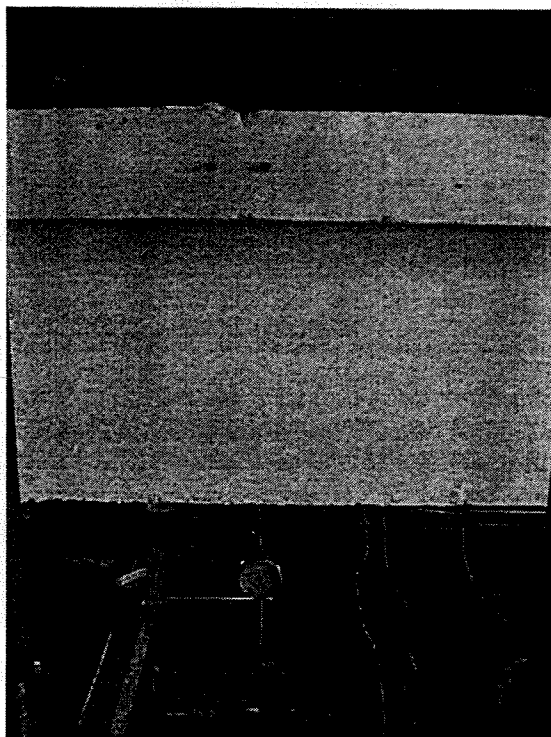


FIGURA 6.20 Detalhe do posicionamento do defletômetro na viga V1.

6.5 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGAS

Foi utilizado um pórtico metálico existente no Laboratório de Estruturas da Unicamp, (fig. 6.21), e o controle da carga durante os ensaios foi todo feito por computador, através da monitoração dos sinais da célula de carga ligada a um aquisitor de dados.

O incremento de carga foi de, aproximadamente, 5 kN.

O panorama de fissuração da viga ensaiada foi evidenciado na superfície da mesma (marcação das fissuras, fig. 6.22), depois de ter sido aplicada uma demão de tinta látex branca.

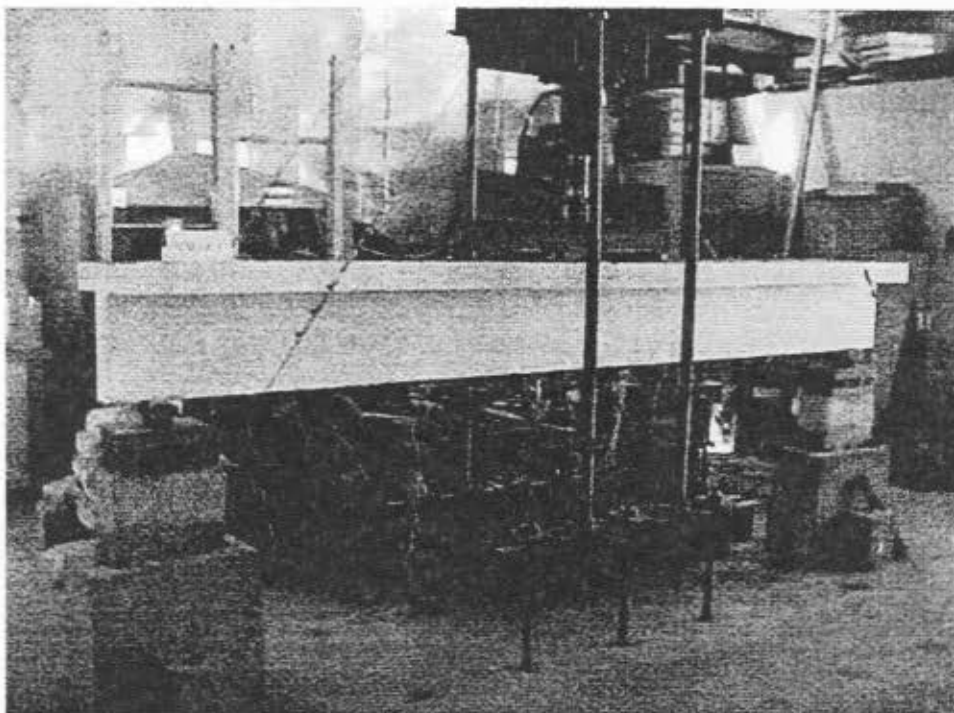


FIGURA 6.21 Detalhe da viga V1 posicionada no pórtico, antes da realização do ensaio.

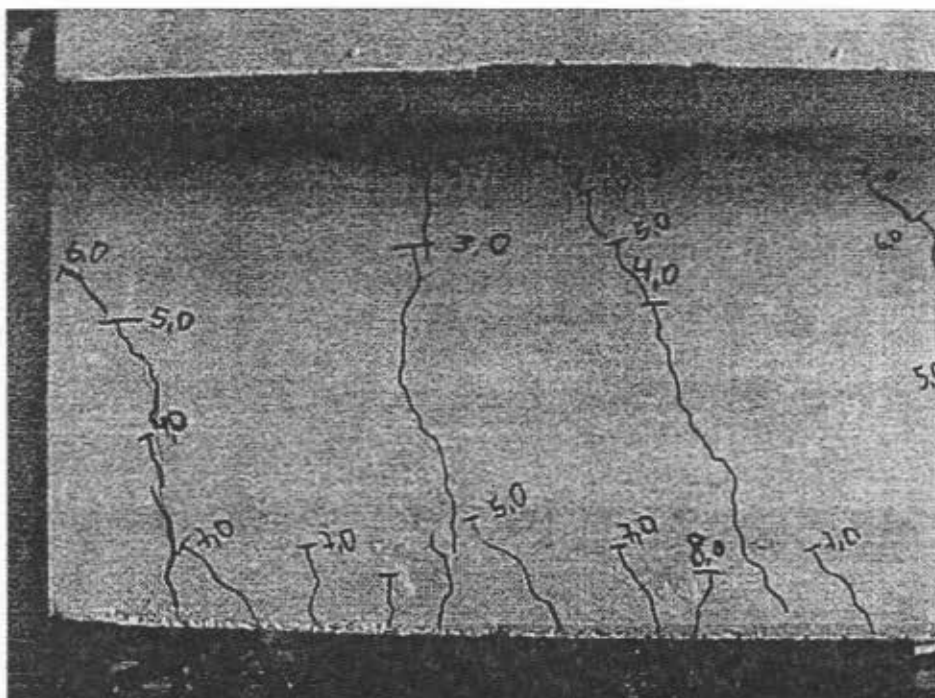


FIGURA 6.22 Detalhe da fissuração da viga V2.

6.6 RESULTADOS ESPERADOS

Para as vigas caracterizadas anteriormente eram esperados os seguintes valores teóricos, calculados de acordo com os modelos propostos no capítulo 5, (tabela 6.5), e especificados abaixo.

TABELA 6.5 Valores teóricos esperados para os ensaios.

Viga	M_{ult} (kN.m)	$M_d^{(3)}$ (kN.m)	$M_a^{(4)}$ (kN.m)	Modo de Ruptura Esperado
1	61,04 ⁽¹⁾	----	----	def. plástica excessiva da armadura
2	76,52 ⁽²⁾	58,91	46,51	arrancamento da camada de cobrimento
3	76,52 ⁽²⁾	58,91	46,51	arrancamento da camada de cobrimento
4	102,12 ⁽²⁾	38,76	29,25	arrancamento da camada de cobrimento
5	102,12 ⁽²⁾	38,76	29,25	ruptura da fibra ⁽⁵⁾
6	126,39 ⁽²⁾	18,49	14,42	ruptura da fibra ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ referente ao estado limite de deformação plástica excessiva da armadura ($\epsilon_{su} = 1 \%$).

⁽²⁾ referente à ruptura da fibra ($\epsilon_{FRPu} = 0,802 \%$).

⁽³⁾ M_d - momento de descolamento calculado conforme item 5.2 deste trabalho.

⁽⁴⁾ M_a - momento de arrancamento calculado conforme item 5.3 deste trabalho.

⁽⁵⁾ Considerando-se a efetividade dos mecanismos de reforço empregados.

O cálculo do valor do momento fletor de descolamento foi feito conforme proposto em 5.2, utilizando-se os seguintes valores:

-Resina:

$$G_a = 278769 \text{ N/mm}^2$$

$$E_a = 724,8 \text{ N/mm}^2$$

$$b_a = 100 \text{ mm}$$

$$t_a = 1,5 \text{ mm}$$

-Folha Flexível:

$$\text{espessura} = 0,117 \text{ mm}$$

$$E = 288000 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{deformação última, } \varepsilon = 0,802 \%$$

a) **M_{descolamento} para a viga V2 e V3 (1 camada de folha flexível):**

$$k_n = 724,8 \times \frac{100}{1,5} = 48320$$

$$I_{fvp} = \frac{100 \times 0,117^3}{12} = 0,0133 \text{ mm}^4$$

$$k_1 = 0,117 \times \left(\frac{48320}{4 \times 288.000 \times 0,0133} \right)^{\frac{1}{4}} = 0,1559$$

$$\tau_{\text{máximo}}^{\text{deslocamento}} = \frac{5,4}{1 + 0,1559 \times 0,6494} = 4,90 \text{ N/mm}^2$$

$$d_{ap} = 20 + \frac{46 + 0,0117}{2} = 43 \text{ cm}$$

Cálculo do valor de τ_0 para comparação com o valor de $\tau_{\text{máximo}}^{\text{descolamento}}$:

$$k_s = 278.769 \times \frac{100}{1,5} = 18584600,00$$

Cálculo da posição da linha neutra (x):

$$R_c = 0,8 \times 45,8 \times 500 \times x = 18.320 \times x$$

$$R_s = 629,8 \times 245 = 154.571,6N$$

$$R_{frp} = 100 \times 0,117 \times 288.000 \times \frac{0,8}{100} = 26.956,8N$$

$$\therefore x = \frac{26.956,8 + 154.571,6}{18320} = 9,91mm$$

$$I_{equivalente} = \frac{23.000 \times 100 \times 9,91^3}{3 \times 288.000} + 245 \times (430 - 9,91)^2 + 100 \times 0,117 \times (460 - 9,91)^2$$

$$= 45609312,6mm^4$$

$$\tau_0 = \left[\frac{P}{2} + \left(\frac{18584600}{288.000 \times 100 \times 0,117} \right)^{\frac{1}{2}} \times 430 \times \frac{P}{2} \right] \times \frac{100 \times 0,117}{45609312,6 \times 100} \times (460 - 9,91)$$

Agora, igualando o valor já calculado de $\tau_{\text{descolamento}}^{\text{máximo}}$ a τ_0 , teremos o valor da carga P máxima que poderá ser aplicada à viga, para que não ocorra o descolamento, sem a consideração da utilização ou não de sistemas de ancoragem.

$$4,5658 = \frac{P}{2} \times (1 + 1009,85) \times 1,15 \times 10^{-6}$$

$$P = 78,55 \text{ kN}$$

$$\text{Momento máximo para o descolamento} = 1,50 \times \frac{P}{2} = 58,91kN.m$$

Podemos notar que trata-se de um valor muito baixo, especialmente se comparado ao valor do momento último, anteriormente calculado. Um dos fatores que mais contribui para esse baixo valor é o módulo de elasticidade da resina empregada no reforço.

b) $M_{\text{descolamento}}$ para as vigas V4 e V5 (3 camadas de folhas flexíveis) :

$$k_n = 724,8 \times \frac{100}{1,5} = 48320$$

$$I_{frp} = \frac{100 \times 0,351^3}{12} = 0,3604 \text{ mm}^4$$

$$k_1 = 0,351 \times \left(\frac{48320}{4 \times 288.000 \times 0,3604} \right)^{\frac{1}{4}} = 0,205$$

$$\tau_{\text{máximo}}^{\text{deslocamento}} = \frac{5,4}{1 + 0,205 \times 0,6494} = 4,77 \text{ N/mm}^2$$

$$d_{ap} = 20 + \frac{46 + 0,0351}{2} = 43 \text{ cm}$$

Cálculo do valor de τ_0 para comparação com o valor de $\tau_{\text{máximo}}^{\text{descolamento}}$:

$$k_s = 278.769 \times \frac{100}{1,5} = 18584600,00$$

Cálculo da posição da linha neutra (x):

$$R_c = 0,8 \times 45 \times 500 \times x = 18.000 \times x$$

$$R_s = 629,8 \times 245 = 154.571,6N$$

$$R_{fp} = 3 \times 100 \times 0,117 \times 288.000 \times \frac{0,8}{100} = 80870,4N$$

$$\therefore x = \frac{80870,4 + 154.571,6}{18000} = 13,08mm$$

$$I_{equivalente} = \frac{23.000 \times 100 \times 13,08^3}{3 \times 288.000} + 245 \times (430 - 13,08)^2 + 100 \times 0,351 \times (460 - 13,08)^2$$

$$= 49603203,1mm^4$$

$$\tau_0 = \left[\frac{P}{2} + \left(\frac{18584600}{288.000 \times 100 \times 0,351} \right)^{\frac{1}{2}} \times 705,2 \times \frac{P}{2} \right] \times \frac{100 \times 0,351}{49603203,1 \times 100} \times (460 - 13,08)$$

Agora, igualando o valor já calculado de $\tau_{\text{descolamento}}^{\text{máximo}}$ a τ_0 , teremos o valor da carga P máxima .

$$4,77 = \frac{P}{2} \times (1 + 583,04) \times 3,2 \times 10^{-6}$$

$$P = 51,69 \text{ kN}$$

$$\text{Momento máximo} = 150 \times \frac{P}{2} = 38,76kN.m$$

c) $M_{\text{descolamento}}$ para a viga V6 (6 camadas de folhas flexíveis) :

Analogamente, temos :

$$P = 24,65 \text{ kN}$$

$$\text{Momento máximo} = 18,49 \text{ kN.m}$$

Nota-se novamente que o valor obtido foi muito baixo, mas o descolamento não era esperado devido ao uso de mecanismo de ancoragem apropriado. O cálculo em questão foi realizado apenas para efeito de comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Como se tratava de vigas bi-apoiadas, o comprimento de ancoragem dos compósitos foi calculado conforme o disposto no item 4.6.1 (eq. 4.1), sendo que o valor obtido para o momento de fissuração foi de:

$$M_{\text{fis}} = \frac{\sigma}{I} \times y$$

σ = tensão na borda inferior da viga tomada como sendo igual à resistência à tração do concreto estimada em 10% da sua resistência à compressão.

y = distância da borda inferior ao centro de gravidade da viga.

$$\sigma = 4,5 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 173.423,53 \text{ cm}^4$$

$$y = 30,34 \text{ cm}$$

$$M_{fis} = \frac{4,5 \times 10^2 \times 173423,53}{30,34} = 2617929 N.cm = 26,17 \text{ kN.m}$$

Com o valor obtido para o momento fletor último, pode-se calcular o ponto no qual houve o valor correspondente ao momento fletor de fissuração.

Indicando o ponto além do qual o comprimento do laminado deve ser prolongado. Este ponto dista 117 cm do meio do vão.

Portanto, o comprimento do compósito na viga V2 ,V3, V4 , V5 e V6 foi de:

$$l = 2 \times (117 + 3 \times 15) = 324 cm$$

Os procedimentos de "corte" propostos pelo ACI 440R - 2000 não implicam numa economia significativa de material, (cortes de 15 em cada extremidade do reforço), frente ao surgimento da necessidade de se ancorar cada camada isoladamente, já que teriam comprimentos diferentes. Devido a esse fato, todas as camadas empregadas nas vigas tiveram o mesmo comprimento, sendo que a viga V6 recebeu dois laços de ancoragem e a viga V5 somente um.

7 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios das vigas através de sua instrumentação, detalhada no capítulo 6.

7.1 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO DAS VIGAS

Na tabela 7.1 são apresentados os resultados do concreto de cada uma das vigas ensaiadas.

TABELA 7.1 Características do concreto das vigas.

	f_{cj} (N/mm ²)	f_{tj} (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
VIGA V1	45,84	3,76	23.129
VIGA V2	45,33	3,63	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 da viga. A resistência à tração, f_{tj} , foi obtida através da média da resistência à tração de 2 corpos de prova (10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura), ensaiados no mesmo dia do ensaio.

O valor de E_c , apresentado na tabela acima, refere-se ao módulo de deformação longitudinal do concreto tangente na origem, valor esse retirado dos diagramas tensão-deformação do concreto de cada uma das vigas.

7.2 COMPORTAMENTO DAS VIGAS DURANTE OS ENSAIOS

Na tabela 7.2 tem-se algum dos resultados obtidos nos ensaios das vigas.

TABELA 7.2 Resultados dos ensaios das vigas.

	VIGA V1	VIGA V2	VIGA V3	VIGA V4	VIGA V5	VIGA V6
f_c (N/mm ²)	45,84	45,33	46,23	46,80	45,12	44,83
f_t (N/mm ²)	3,76	3,63	4,01	3,9	3,60	3,58
E_c (N/mm ²)	23.129	27.311	27.413	27.509	25.614	25.369
$V_{última}$ (kN)	39,25	36,94	37,83	45,57	44,98	56,26
$V_{máxima}$ (kN)	40,94	44,80	48,21	55,62	70,58	79,13
Modo de ruptura*	A	B	B	B	C	D
ϵ_c última (‰)	1,92	1,20	1,88	0,79	1,15	1,10
ϵ_s , longitudinal, máxima (‰)	3,7	9,6	10,0	6,1	9,8	10,81
ϵ_s , transversal, máxima (‰)	0,97	1,68	0,61	0,72	0,71	1,23
Flecha máxima (mm)	17,95	14,17	17,30	20,05	25,08	18,18

*A = Deformação plástica excessiva da armadura; B = Descolamento da camada de reforço; C = Ruptura da fibra; D = Rompimento da fibra do sistema de ancoragem, com posterior descolamento da camada de reforço.

A viga de referência V1, alcançou o Estado Limite Último por deformação plástica excessivo da armadura longitudinal, conforme esperado. (Fig. 7.1).

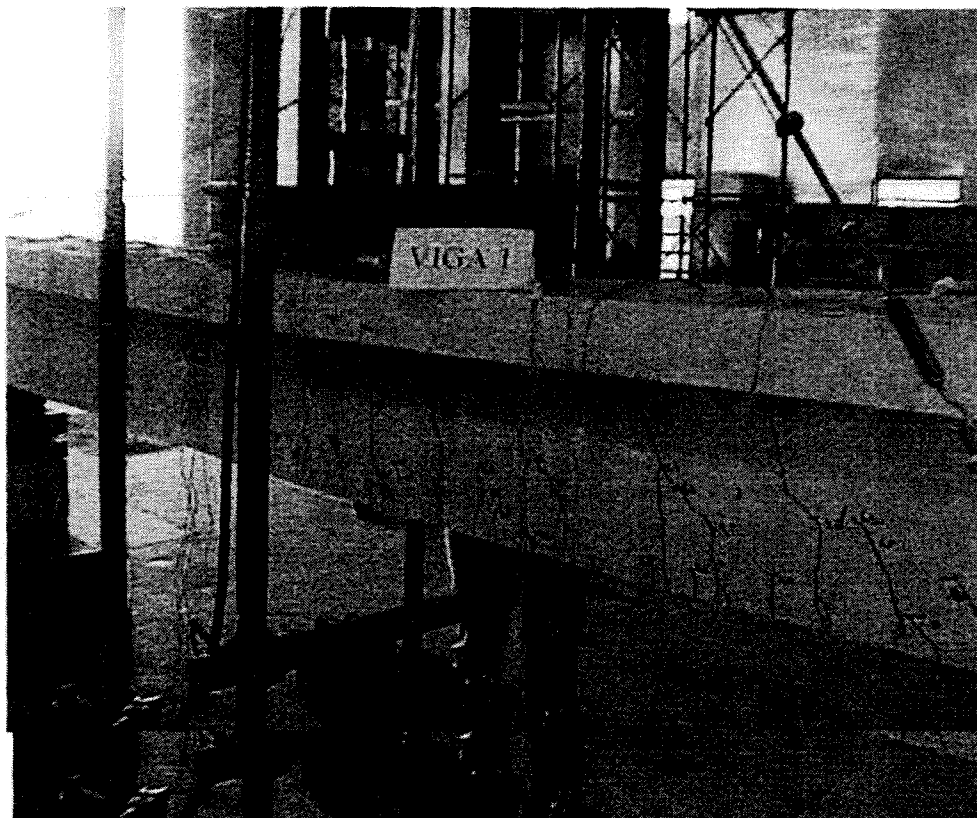


FIGURA 7.1 Detalhe da viga V1 logo após o término do ensaio.

O modo de ruptura da viga V2 se deu pelo descolamento da camada de compósito como pode ser visto na fig. 7.2. Um detalhe de seu padrão de fissuração pode ser visto na fig. 7.3.

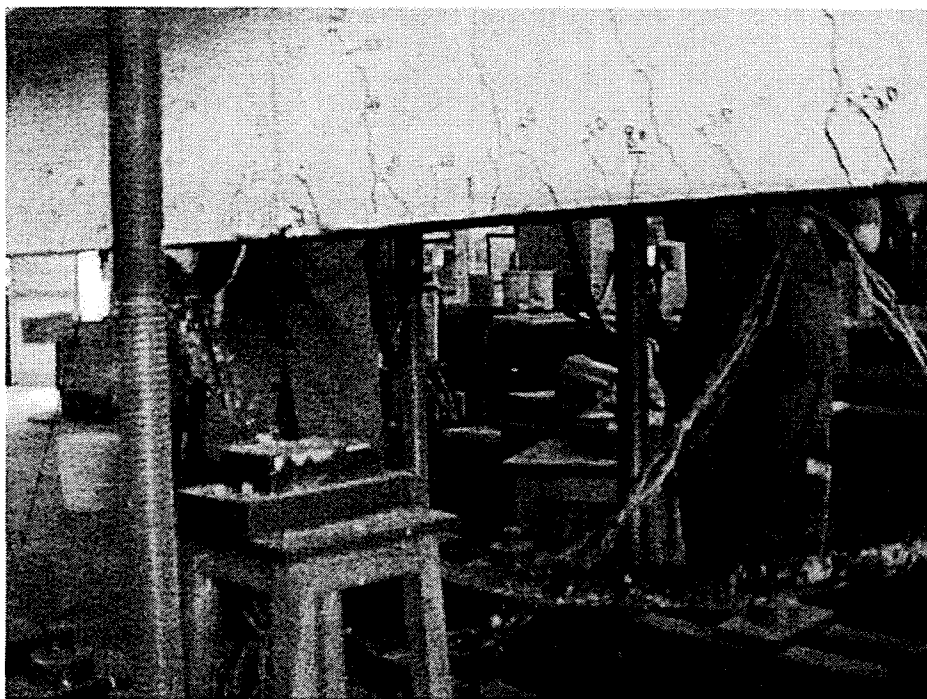


FIGURA 7.2 Detalhe do descolamento da camada de compósito na viga V2.

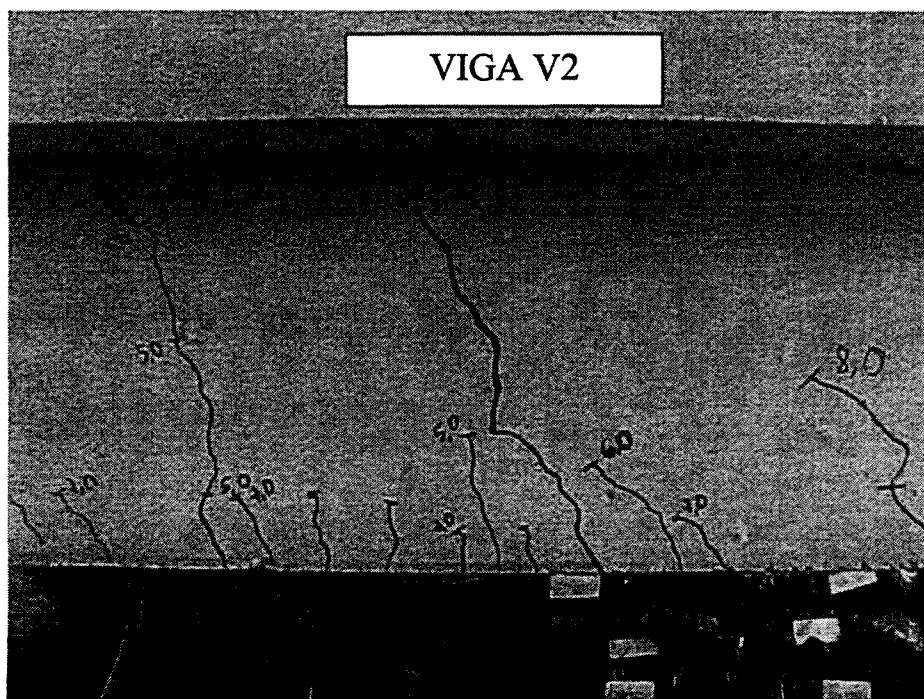


FIGURA 7.3 Detalhe do padrão de fissuração obtido para a viga V2.

A viga V3 apresentou arrancamento de parte do substrato da alma da viga juntamente com o compósito usado no reforço, demonstrando uma adesão maior do que a verificada para a viga V2. Em detalhe nas figura 7.4 e 7.5.

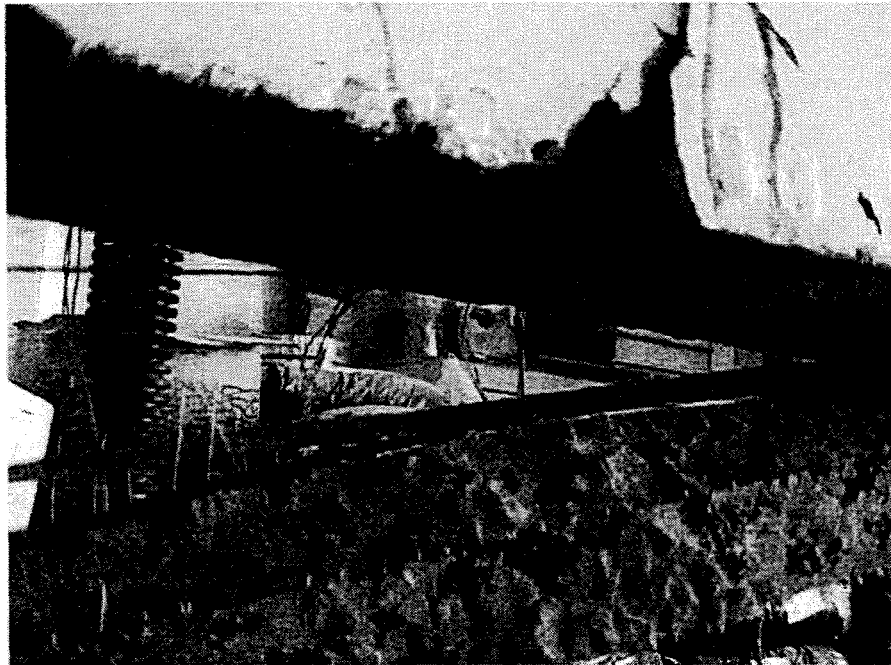


FIGURA 7.4 Detalhe do descolamento do reforço, apresentado pela viga V3.

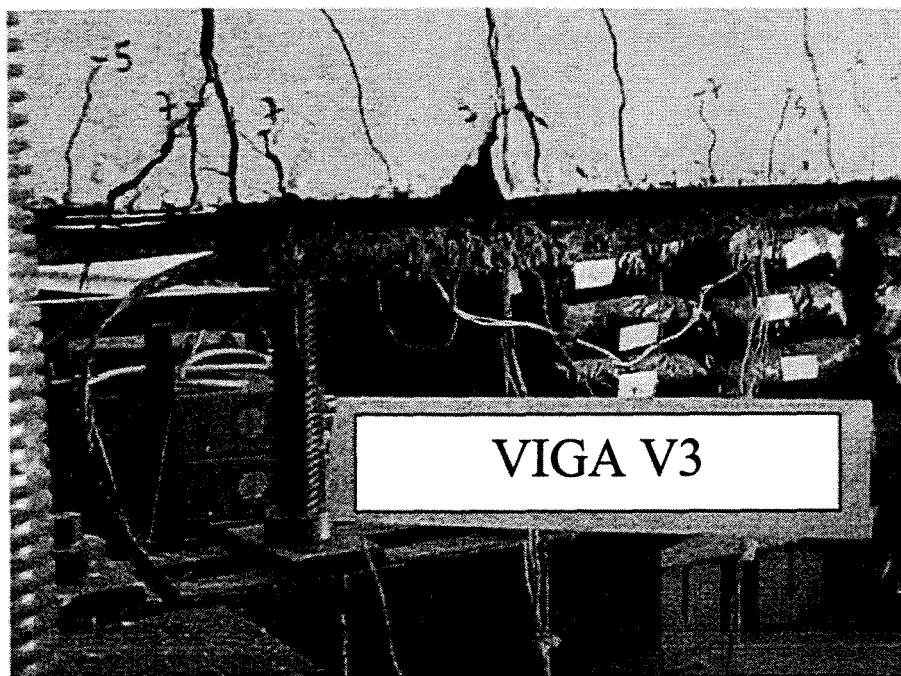


FIGURA 7.5 Detalhe da Ruptura da Viga V3.

A ruptura da viga V4 ocorreu com o descolamento da camada de reforço, figuras 7.6 e 7.7.

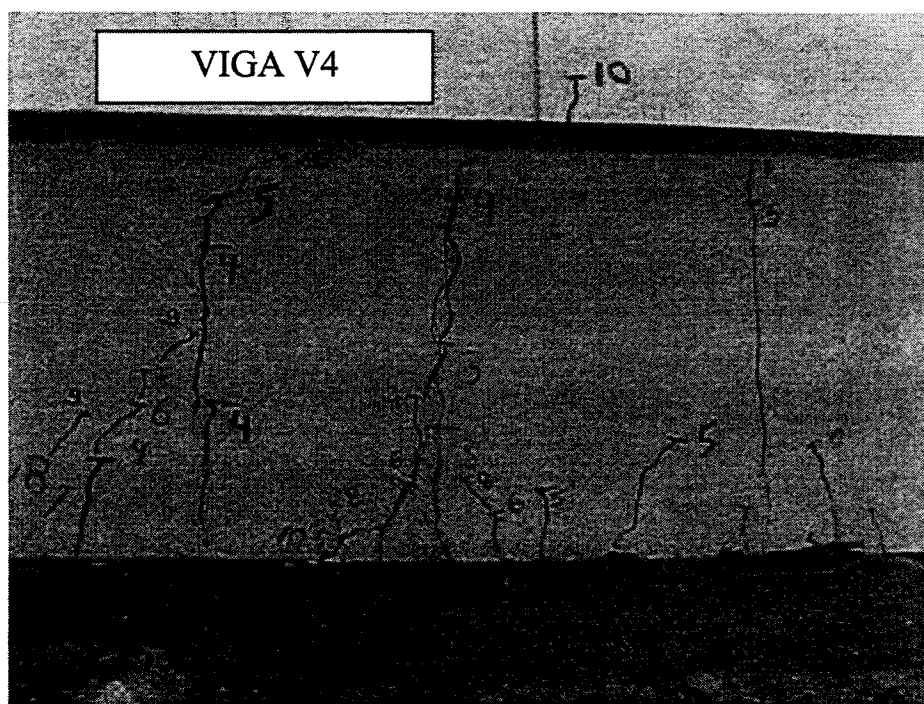


FIGURA 7.6 Detalhe da Fissuração da Viga V4.

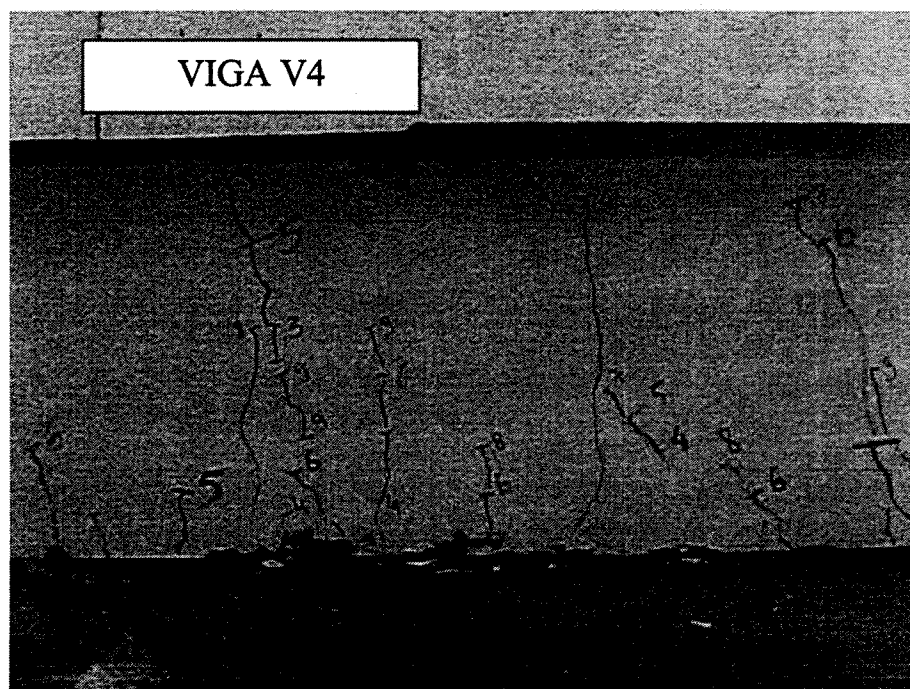


FIGURA 7.7 Detalhe da Fissuração da Viga V4.

Na viga V5, ocorreu a ruptura da camada de reforço utilizada, demonstrando uma maior participação do sistema na absorção dos esforços e a eficácia do sistema de ancoragem empregado. Na figura 7.8 temos o posicionamento da viga no pórtico, durante a realização do ensaio.

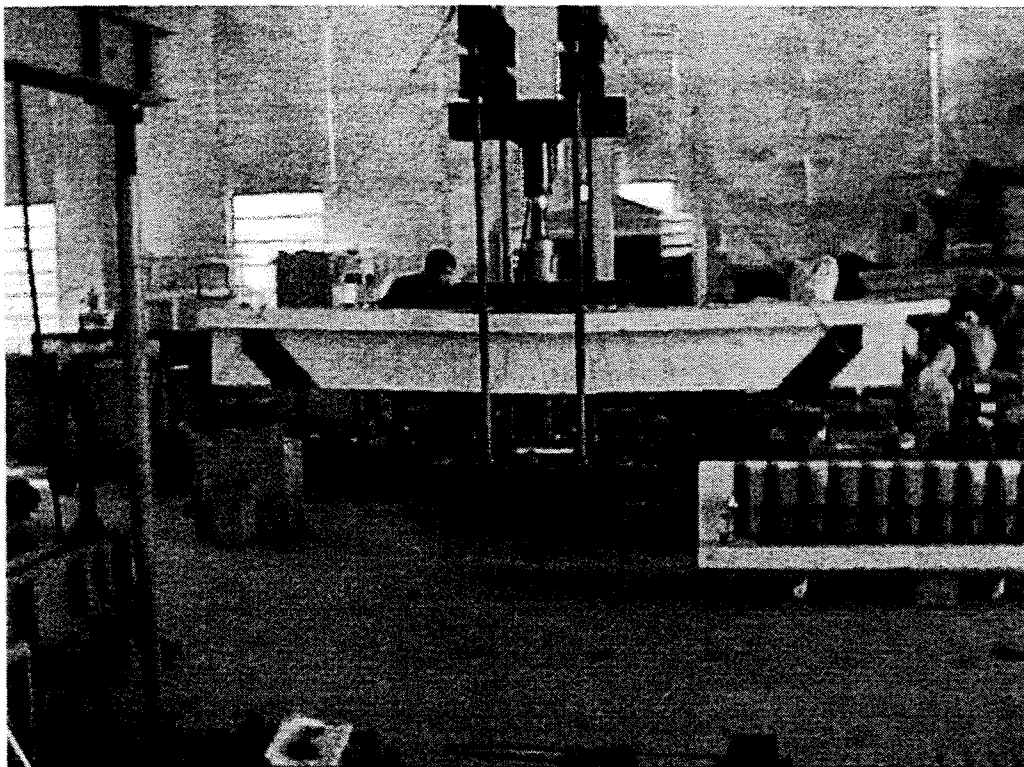


FIGURA 7.8 Posicionamento da viga V5 no pórtico durante o ensaio.

Na figura 7.9 podemos notar a ruptura do reforço que ocorreu na região do meio do vão, como era previsto devido à maior concentração de esforços de flexão no local. Depois da ruptura do reforço, as fissuras de flexão apresentaram desenvolvimento progressivo e brusco, resultando em grandes aberturas como visto na figura 7.10 e 7.11.

A viga V5 foi a que apresentou maiores valores para flecha, conforme visto na tabela 7.2.

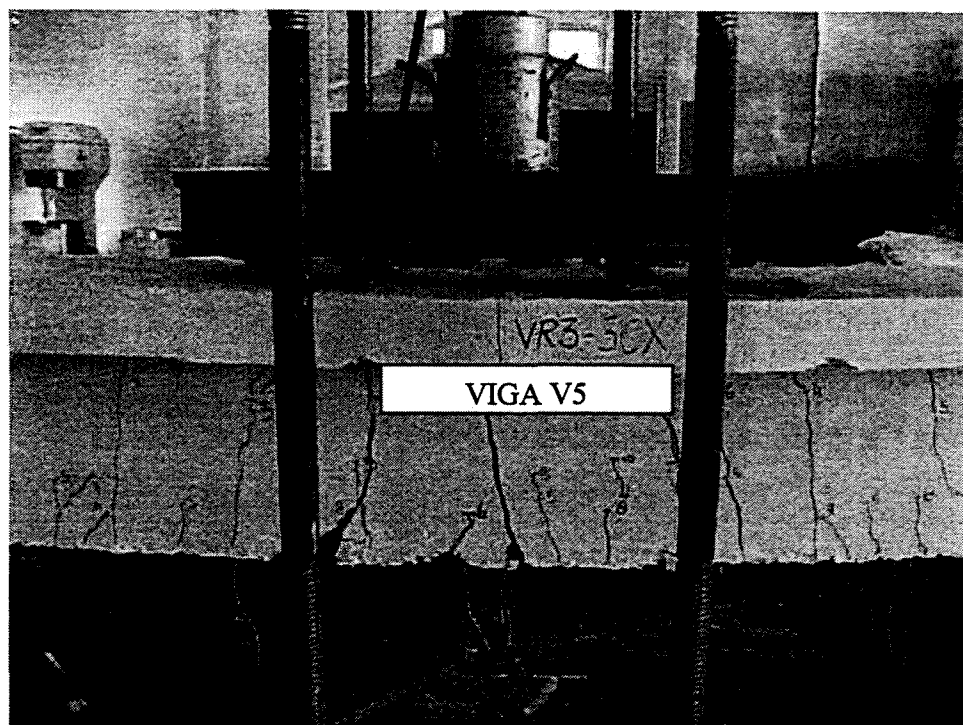


FIGURA 7.9 Detalhe da Ruptura do reforço na região do meio do vão.

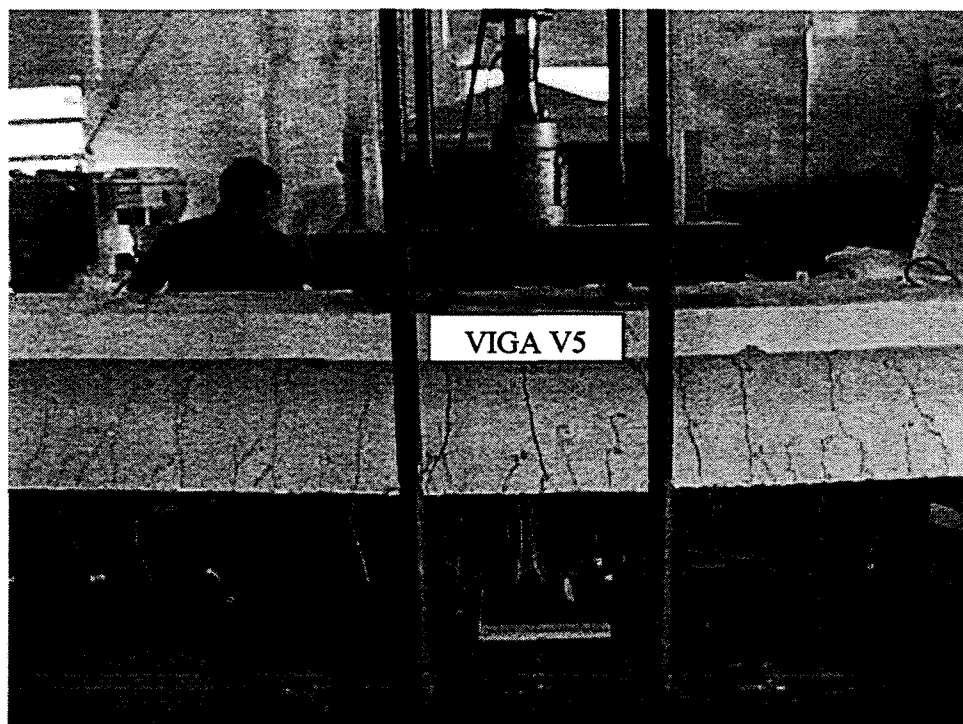


FIGURA 7.10 Detalhe da fissuração apresentada pela viga V5 durante o ensaio.

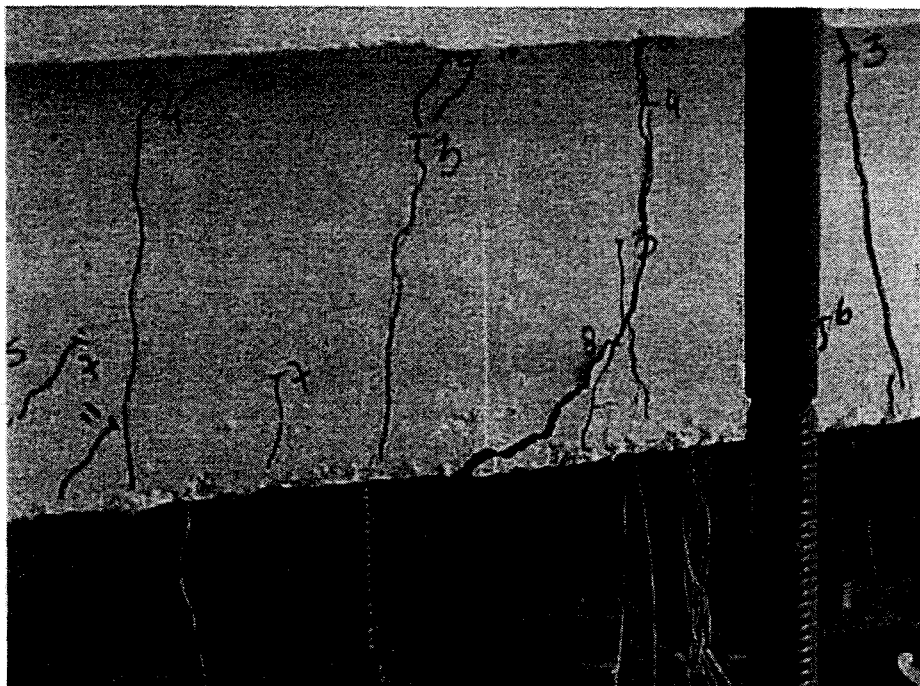


FIGURA 7.11 Detalhe da abertura de fissuras apresentada pela viga V5 após a ruptura do reforço.

A viga V6, apresentou a ruptura do laço de ancoragem utilizado, seguida do descolamento da camada de reforço, porém depois de alcançados valores maiores pra a cortante última, em comparação às demais vigas. Nas figuras 7.12 e 7.13 temos o posicionamento da viga no pórtico, durante a realização do ensaio e um detalhe do colapso do sistema de reforço.

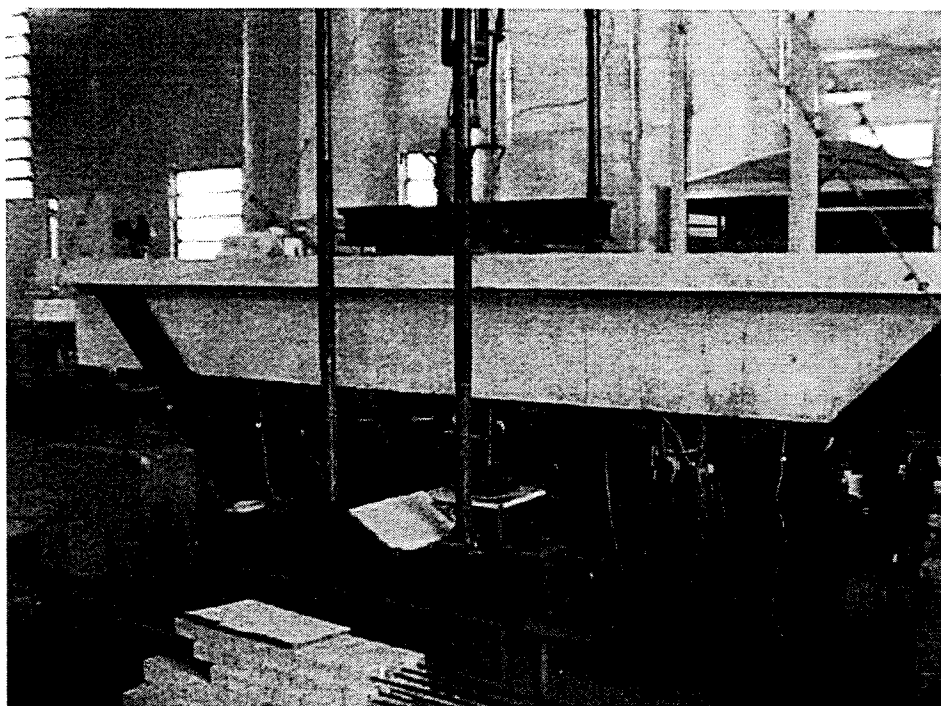


FIGURA 7.12 Detalhe do posicionamento da viga V6 no pórtico.

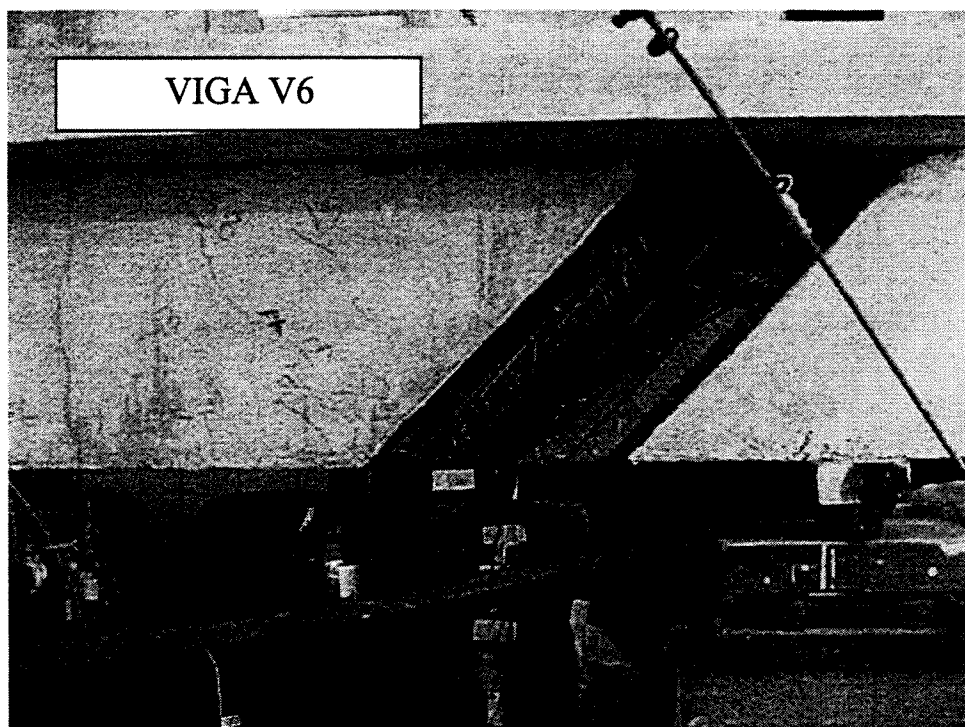


FIGURA 7.13 Detalhe do rompimento da ancoragem e descolamento da camada de reforço da viga V6.

7.3 TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

A evolução individual das tensões nos pontos instrumentados por T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T8, indicados em 6.20 está indicada na figura 7.14.

Nesta figura, a ausência de representação da evolução das tensões em algum dos pontos instrumentados significa que o extensômetro posicionado nesse ponto apresentou problemas, provavelmente devido a danos causados durante a concretagem da viga, que impossibilitaram o seu funcionamento.

7.4 TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

A evolução individual das tensões nas armaduras longitudinais instrumentadas por L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11 e L12, indicados em 6.18, está indicada nas figuras 7.15. A apresentação das tensões é feita em duas figuras para que pudessem ser representados os valores lidos nos extensômetros colocados na mesma direção, mas em barras diferentes (L9 e L10, L11 e L12).

Nestas figuras, a ausência de representação da evolução das tensões em algum dos pontos instrumentados significa que o extensômetro posicionado nesse ponto apresentou problemas, provavelmente devido a danos causados durante a concretagem da viga, que impossibilitaram o seu funcionamento.

A evolução da tensão nas fibras, obtida através da instrumentação na camada de compósitos especificada na figura 6.19 está especificada nas figuras 7.16, para as vigas V2, V3, V4, V5 e V6.

7.5 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

A evolução individual da deformação no concreto, instrumentado nos pontos H1, H2, H3 e H4, indicados em 6.20, estão representadas nas figuras 7.17, representando respectivamente as leituras de H2, H4 e H3; e H2, H1 e H3.

7.6 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

A evolução individual dos deslocamentos verticais, medidos no meio do vão de acordo com o esquema mostrado na figura 6.22, para todas as vigas está representada nas figuras 7.18.

VIGA V1 - TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

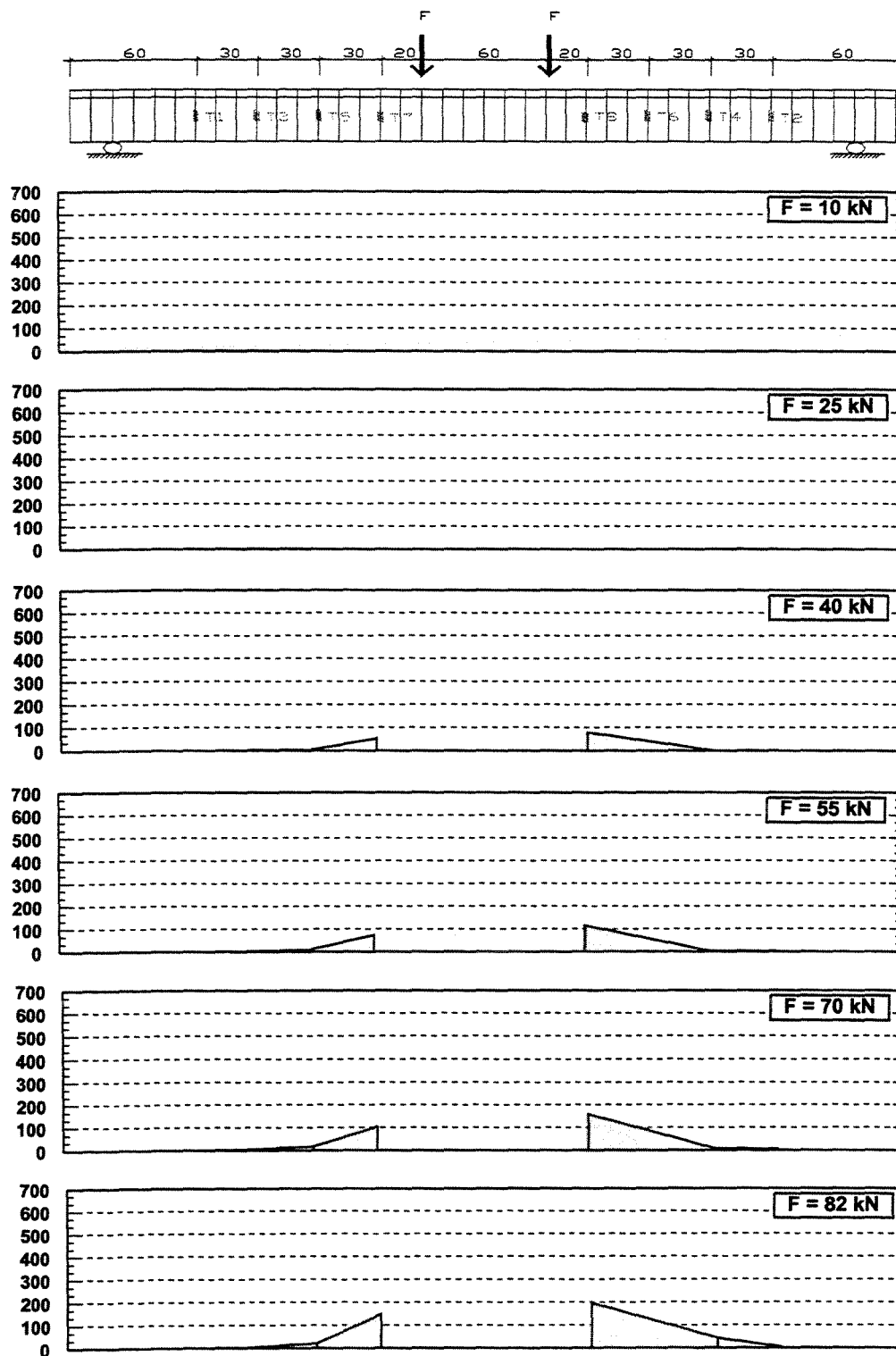


FIGURA 7.14A Tensões na armadura transversal da viga V1.

VIGA V2 - TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

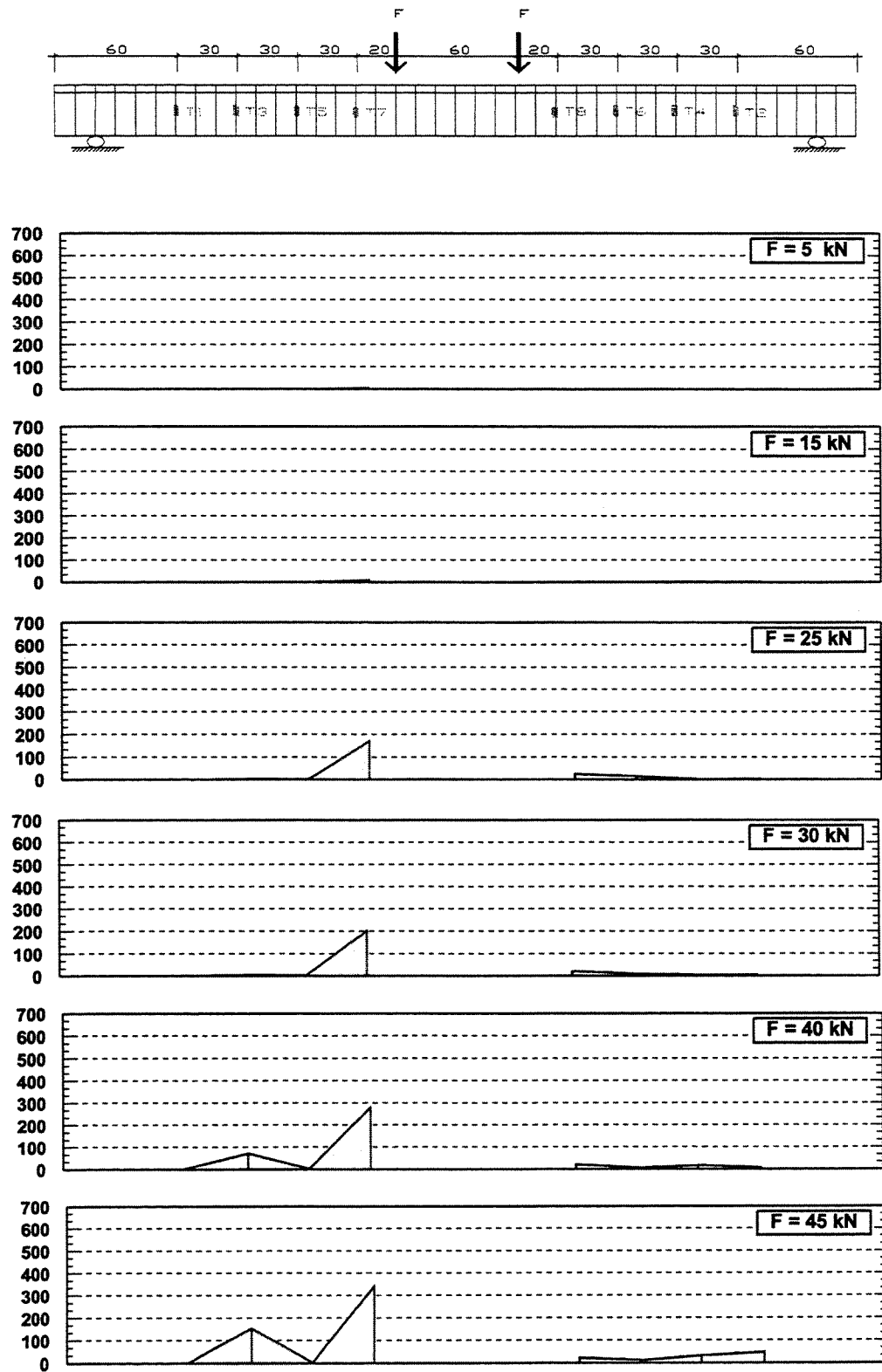


FIGURA 7.14B Tensões na armadura transversal da viga V2.

VIGA V3 - TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

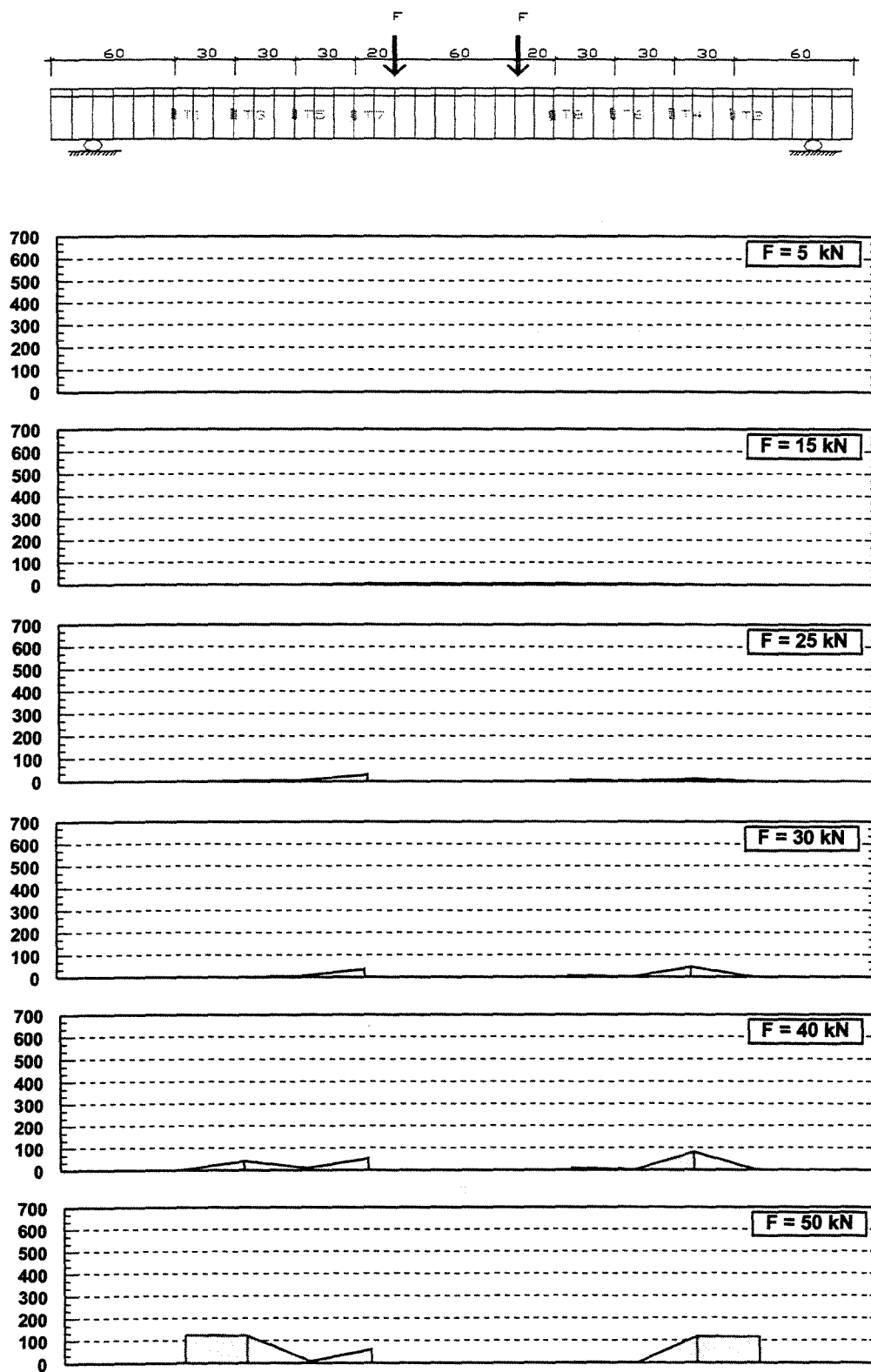


FIGURA 7.14C Tensões na armadura transversal da viga V3

VIGA V4 - TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

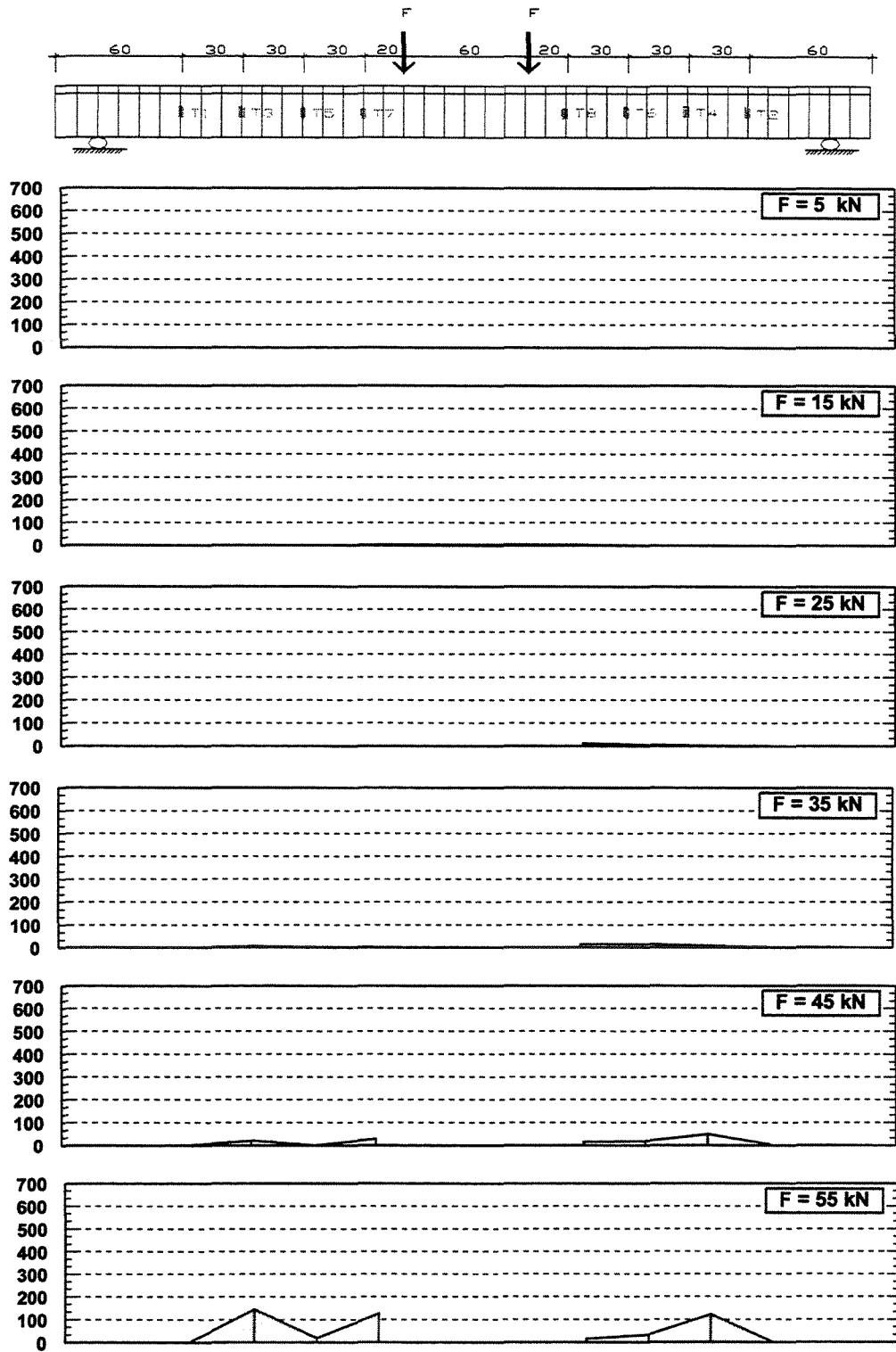


FIGURA 7.14D Tensões na armadura transversal da viga V4.

VIGA V5 - TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

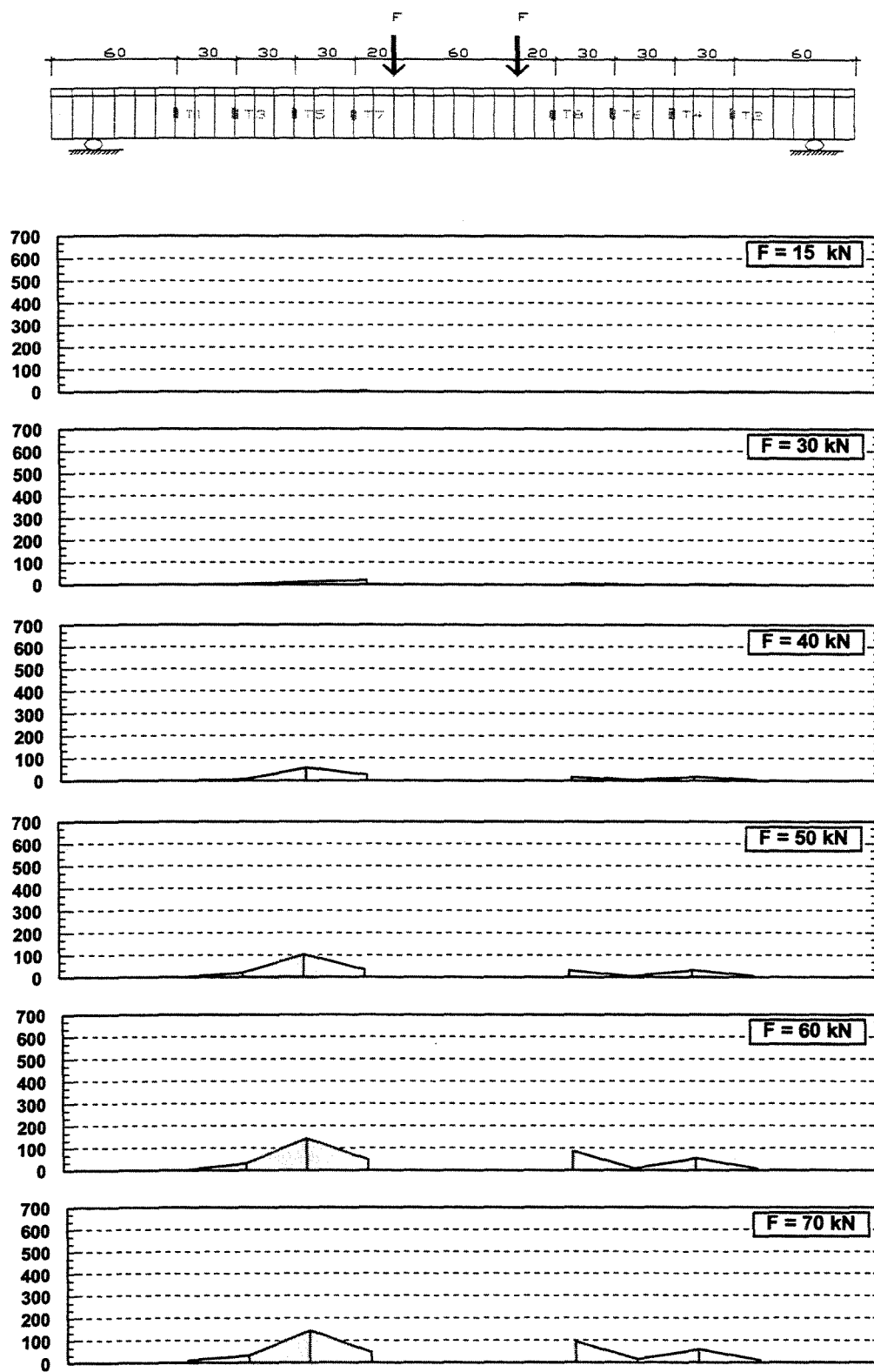


FIGURA 7.14E Tensões na armadura transversal da viga V5.

VIGA V6 - TENSÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

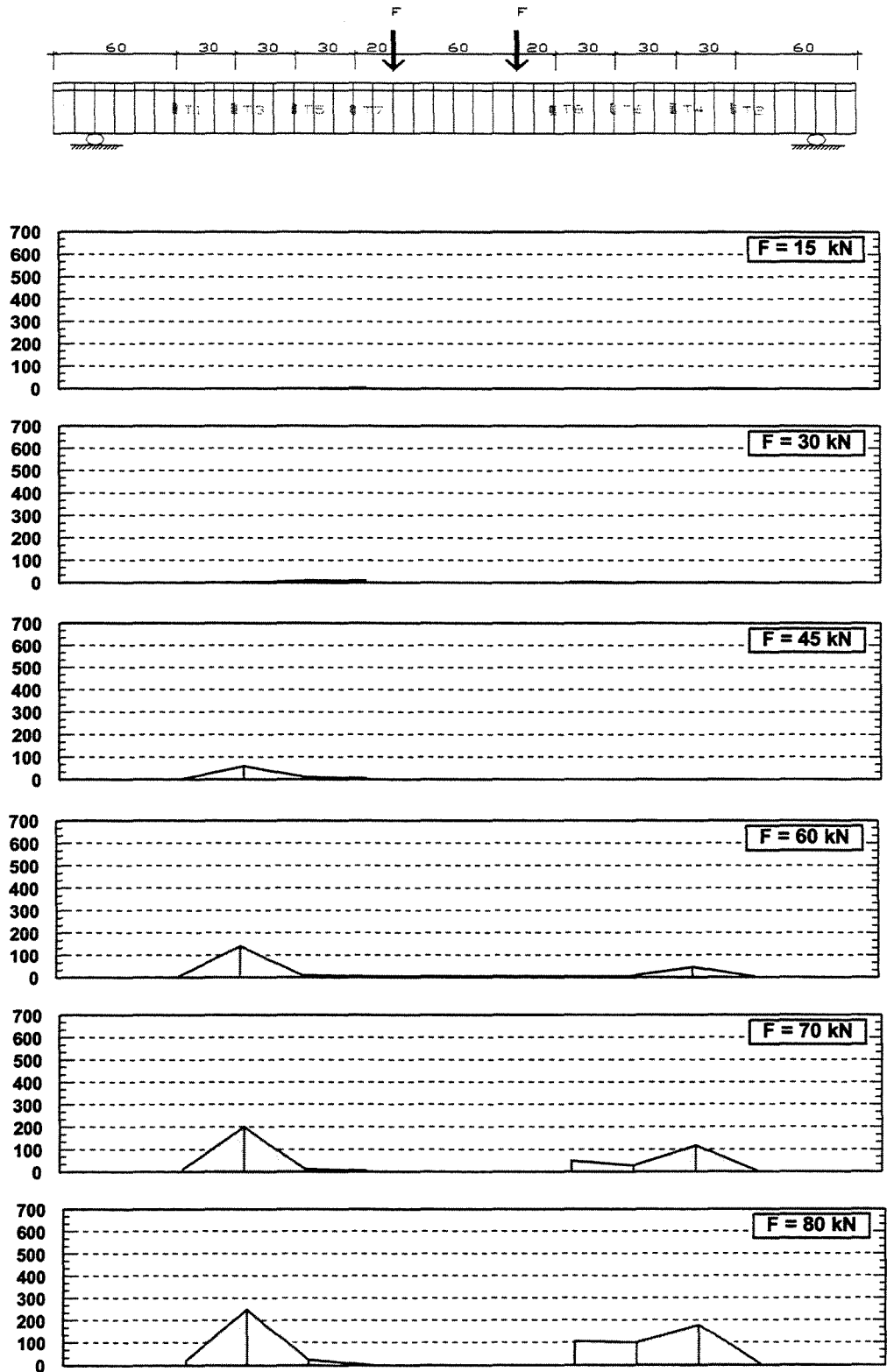


FIGURA 7.14F Tensões na armadura transversal da viga V6.

VIGA V1 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

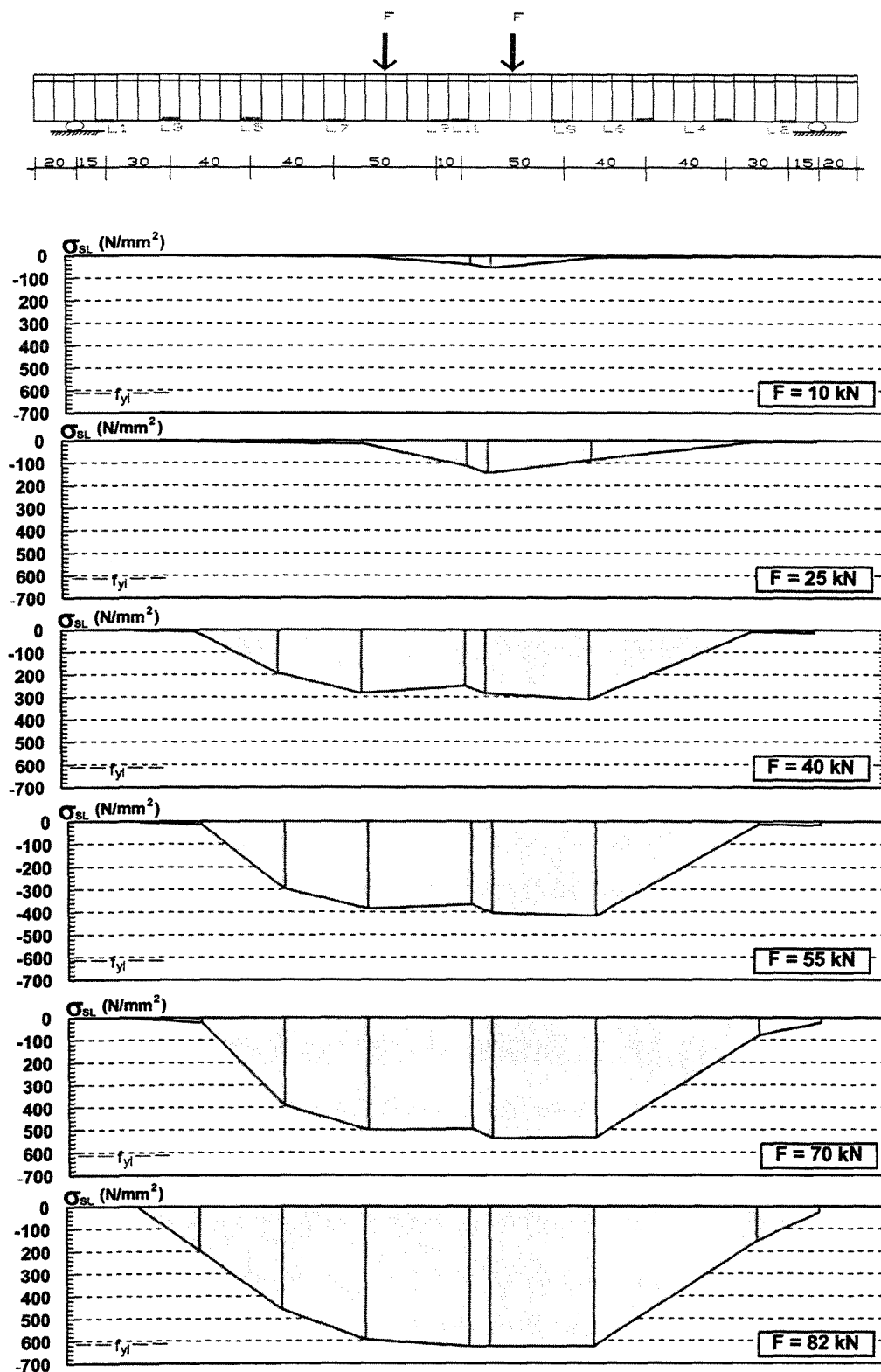


FIGURA 7.15A Tensões na armadura longitudinal da viga V1.

VIGA V1 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

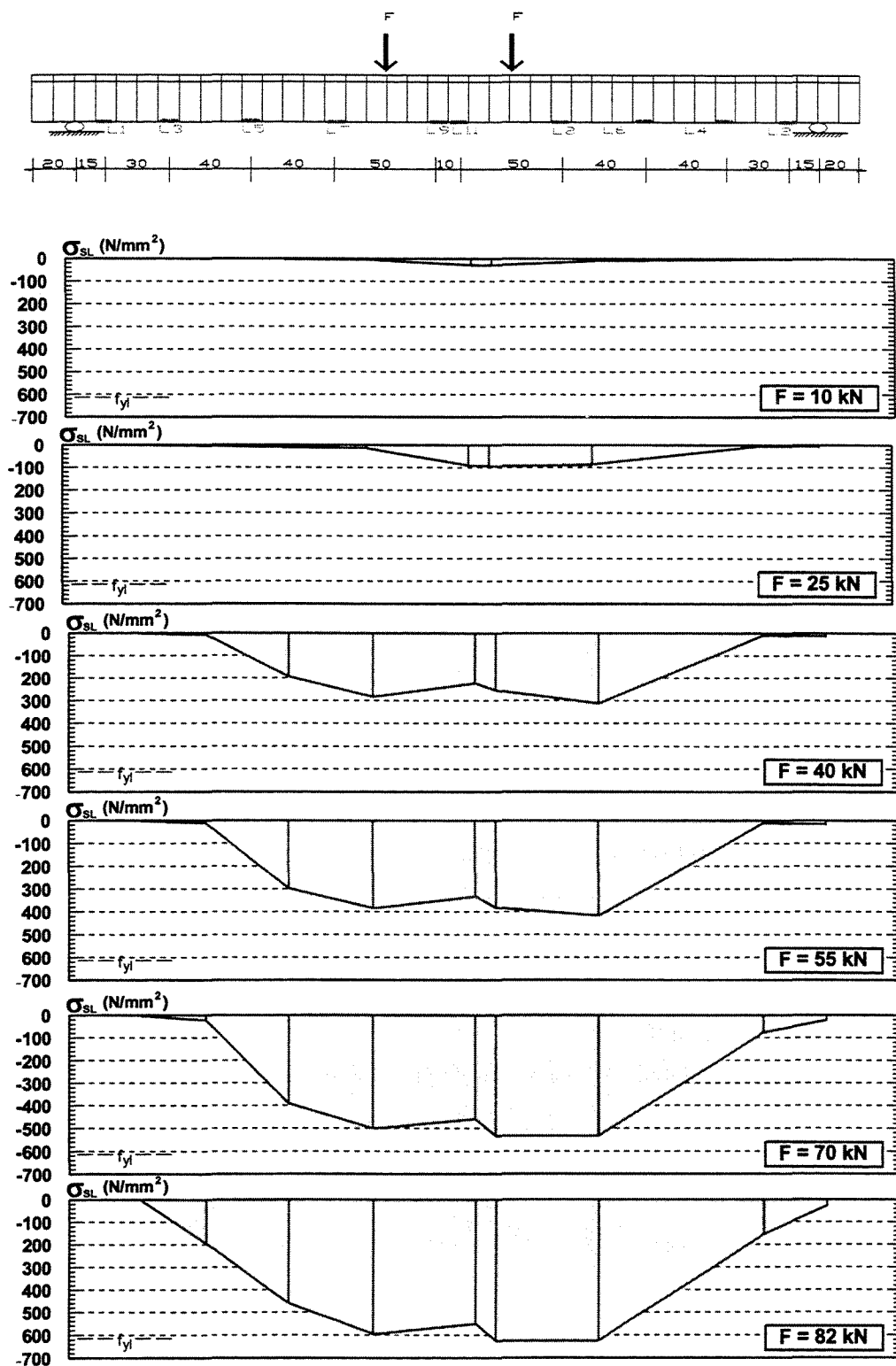


FIGURA 7.15B Tensões na armadura longitudinal da viga V1.

VIGA V2 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

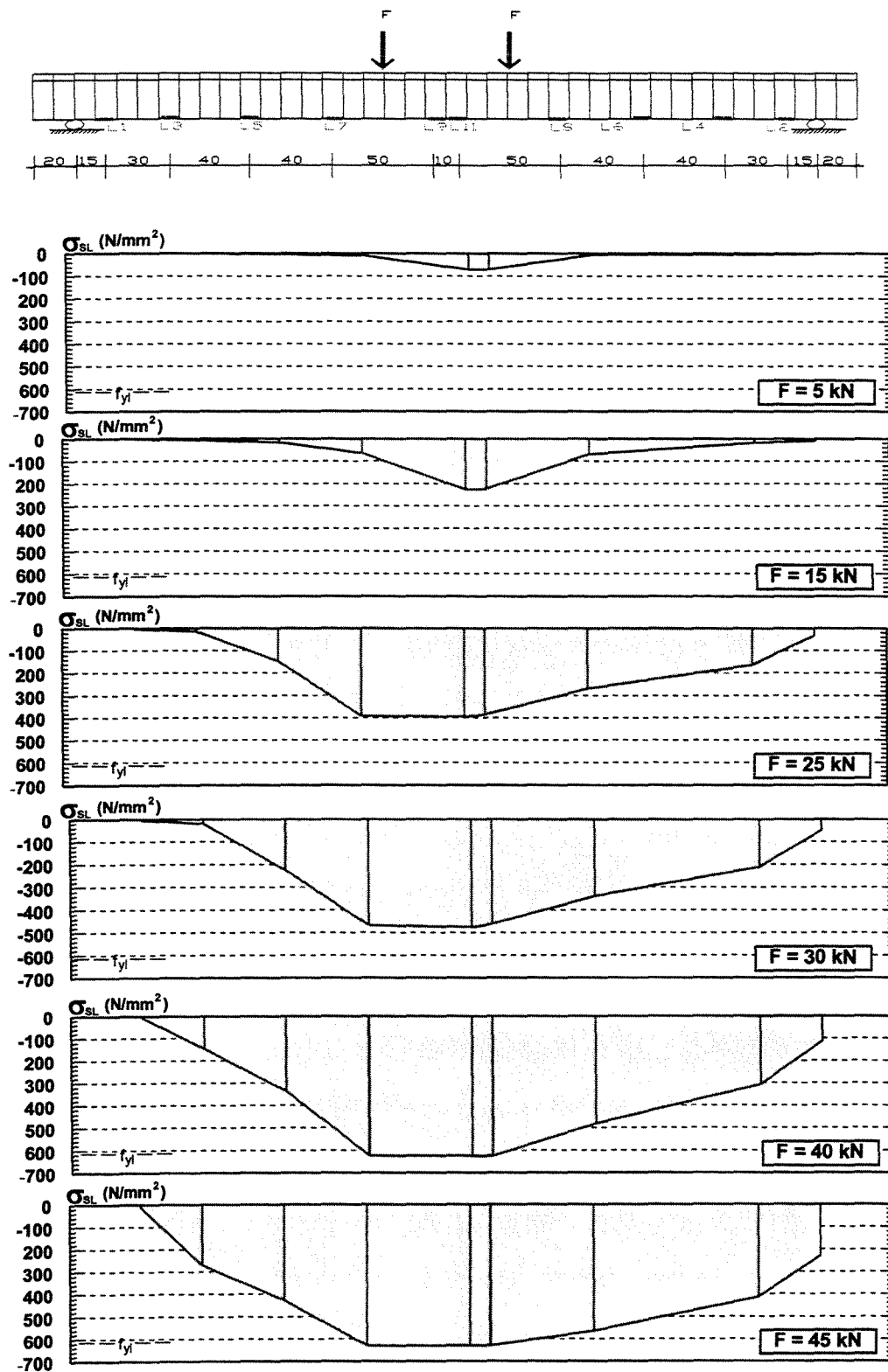


FIGURA 7.15C Tensões na armadura longitudinal da viga V2.

VIGA V2 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

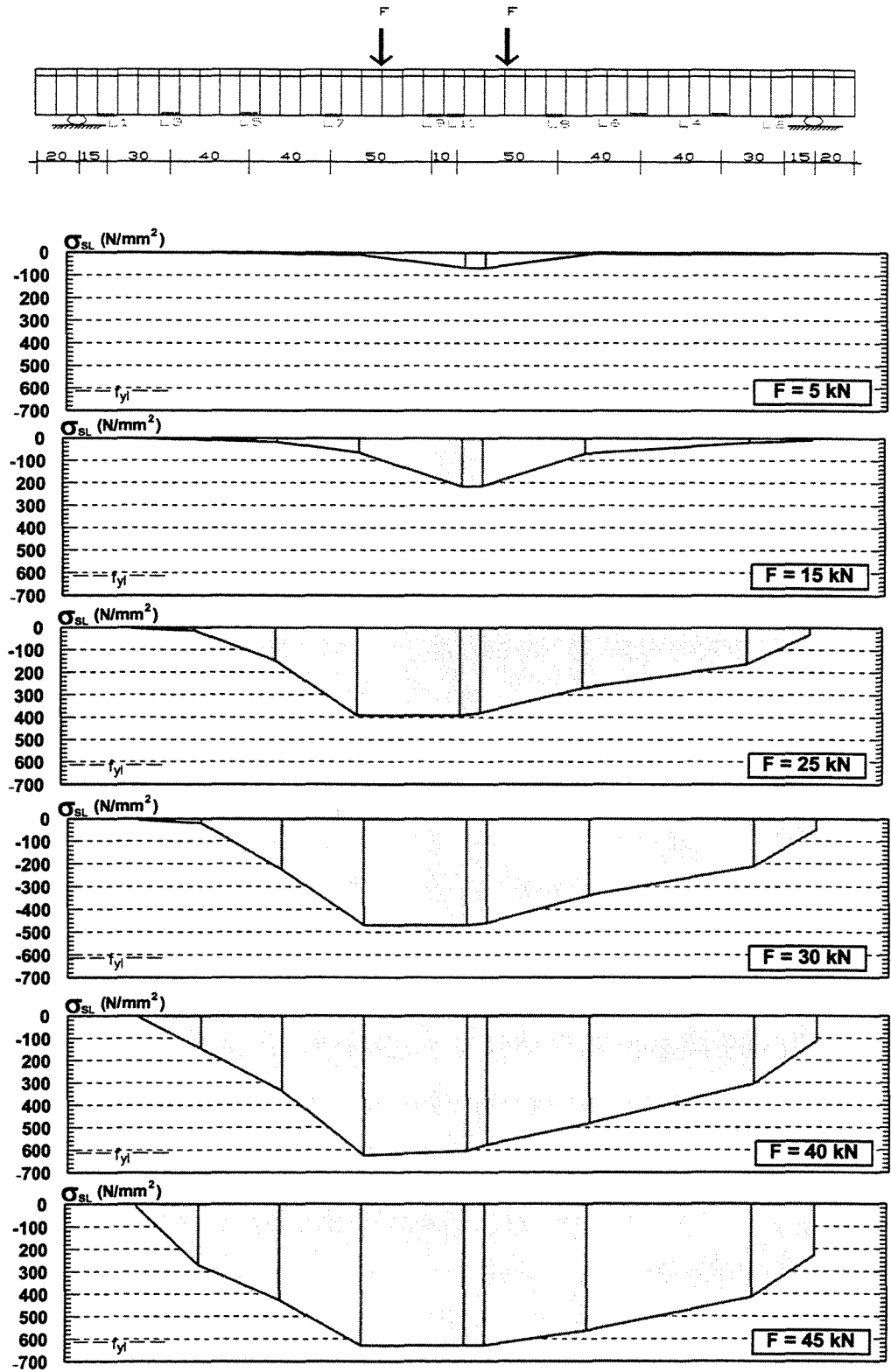


FIGURA 7.15D Tensões na armadura longitudinal da viga V2.

VIGA V3 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

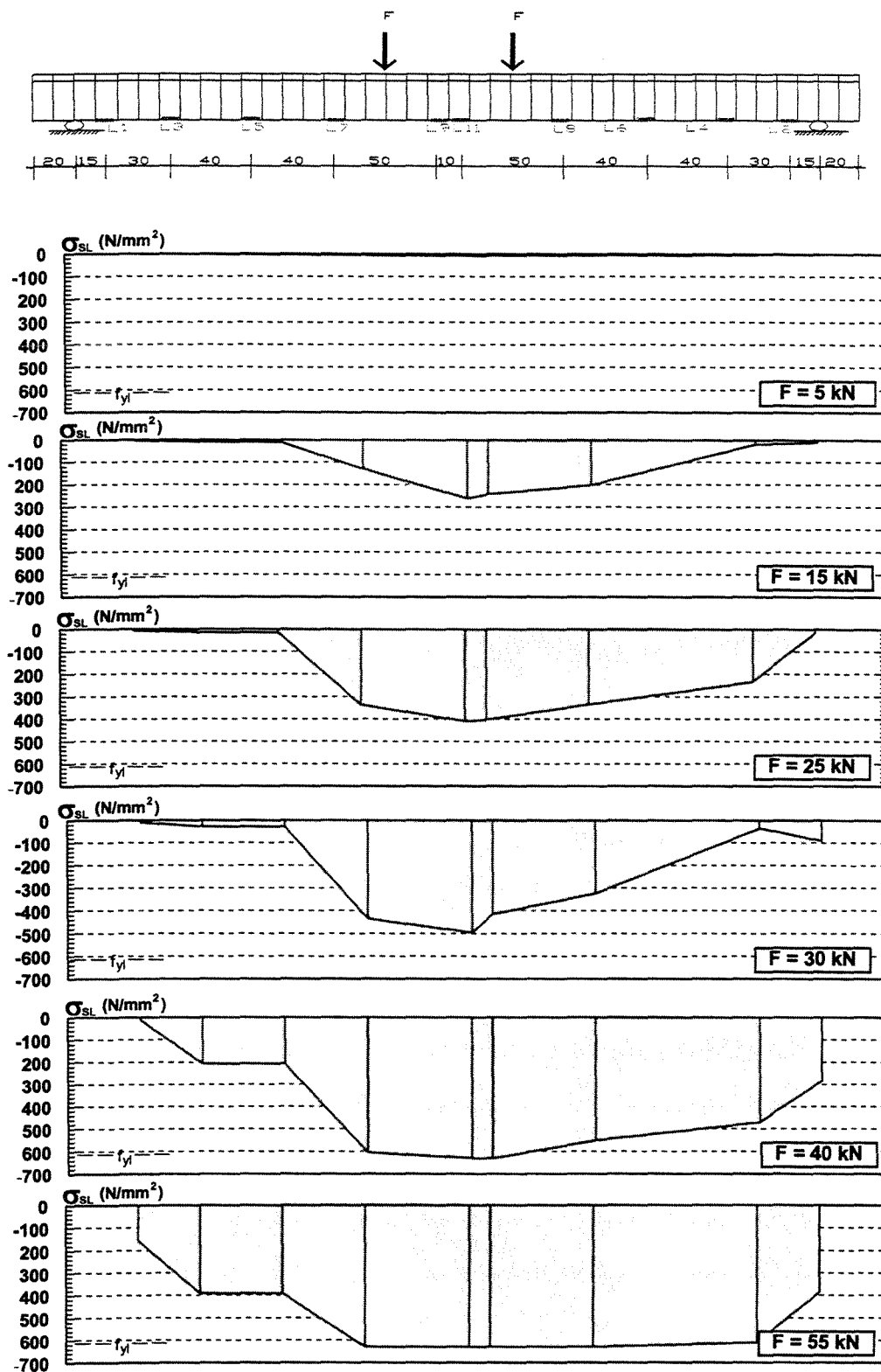


FIGURA 7.15E Tensões na armadura longitudinal da viga V3.

VIGA V3 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

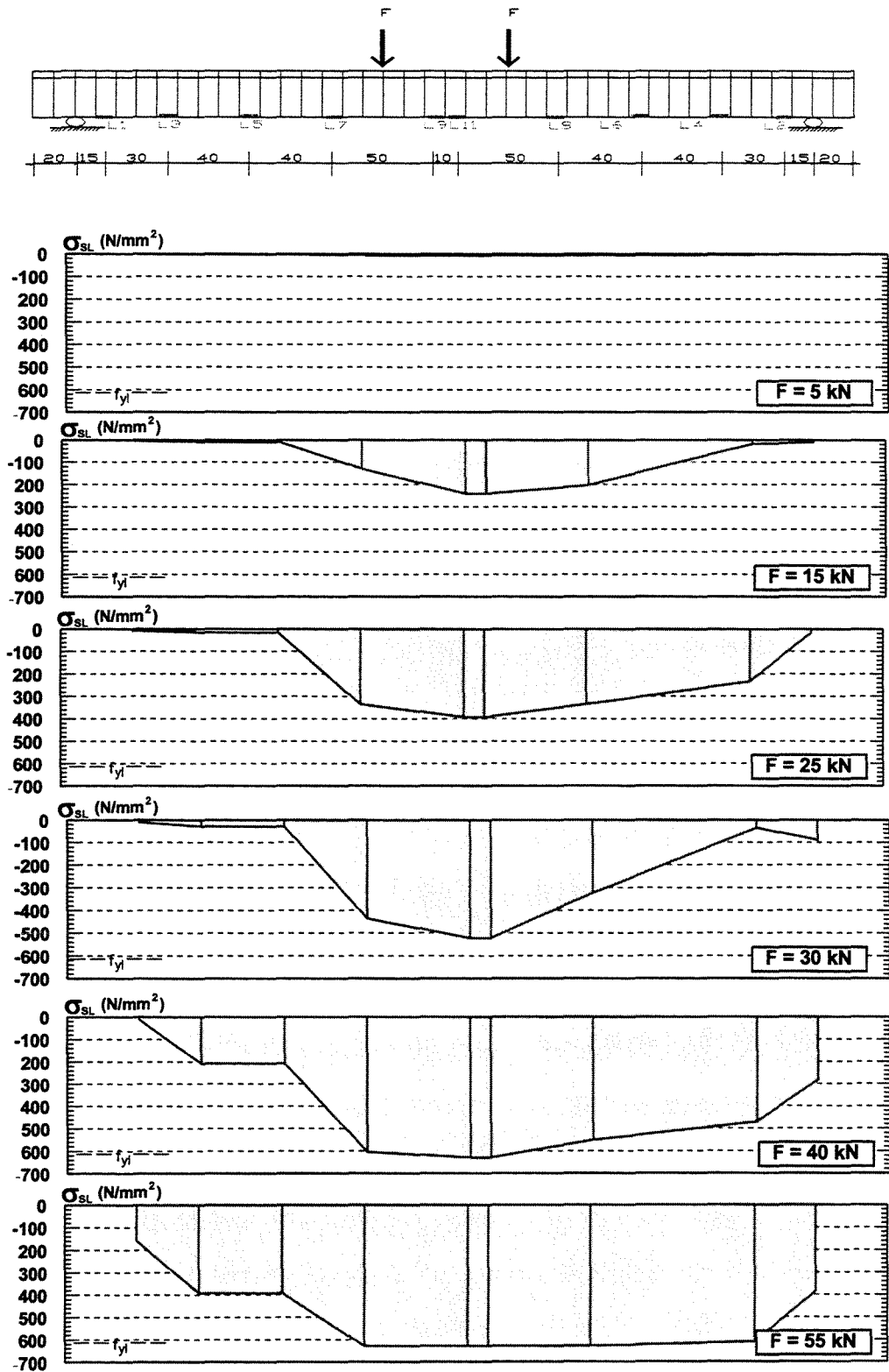


FIGURA 7.15F Tensões na armadura longitudinal da viga V3.

VIGA V4 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

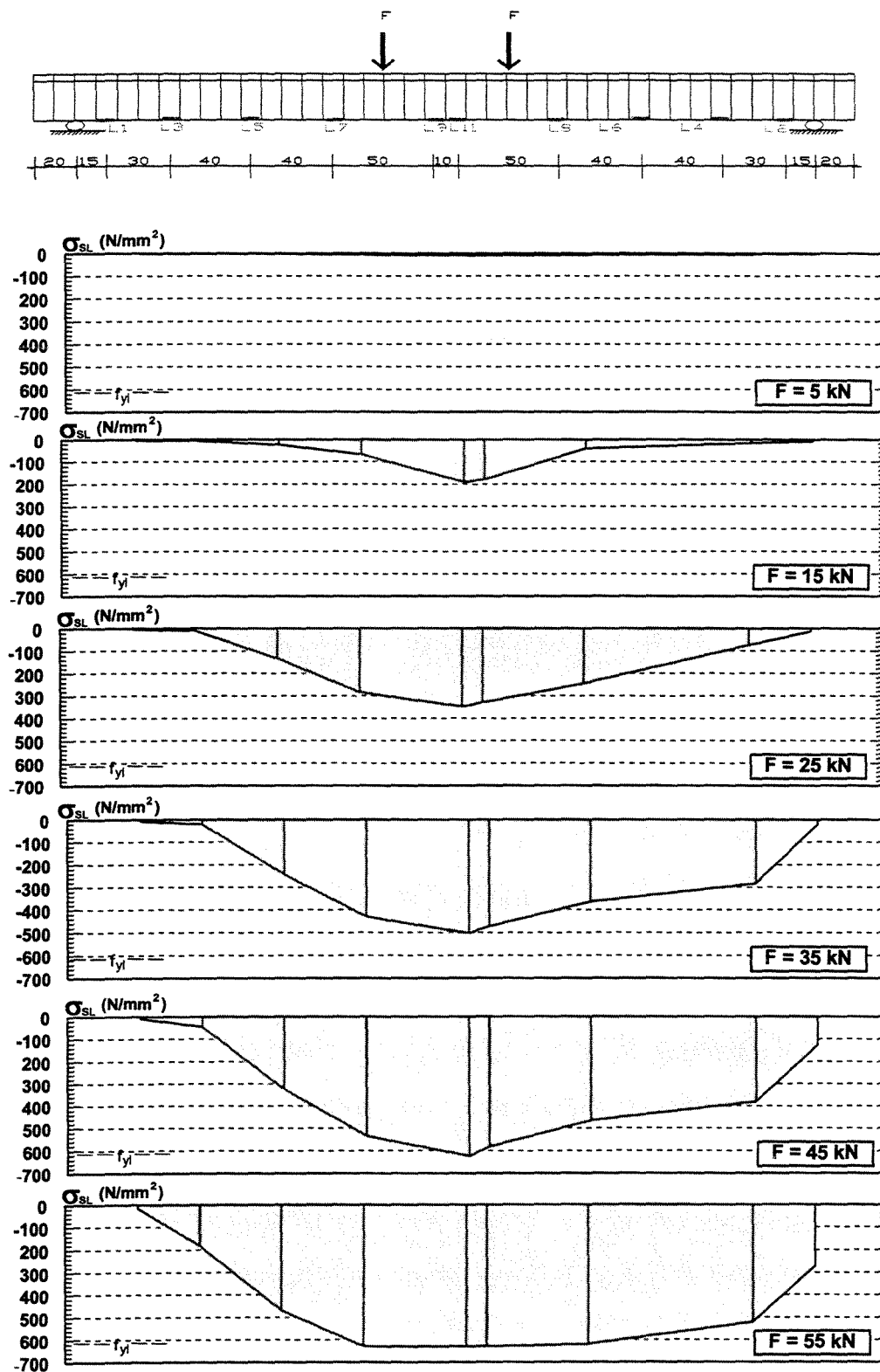


FIGURA 7.15G Tensões na armadura longitudinal da viga V4.

VIGA V4 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

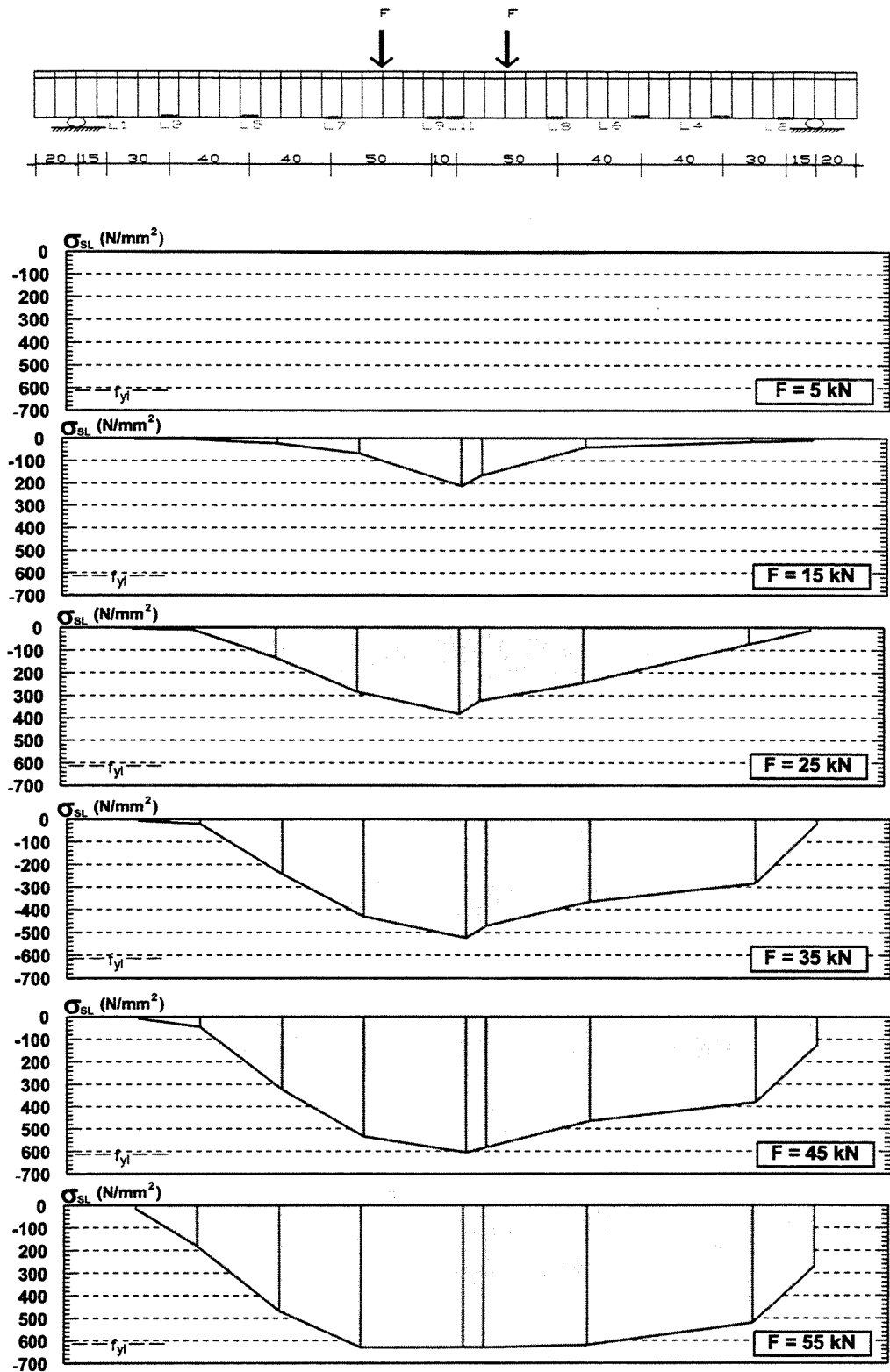


FIGURA 7.15H Tensões na armadura longitudinal da viga V4.

VIGA V5 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

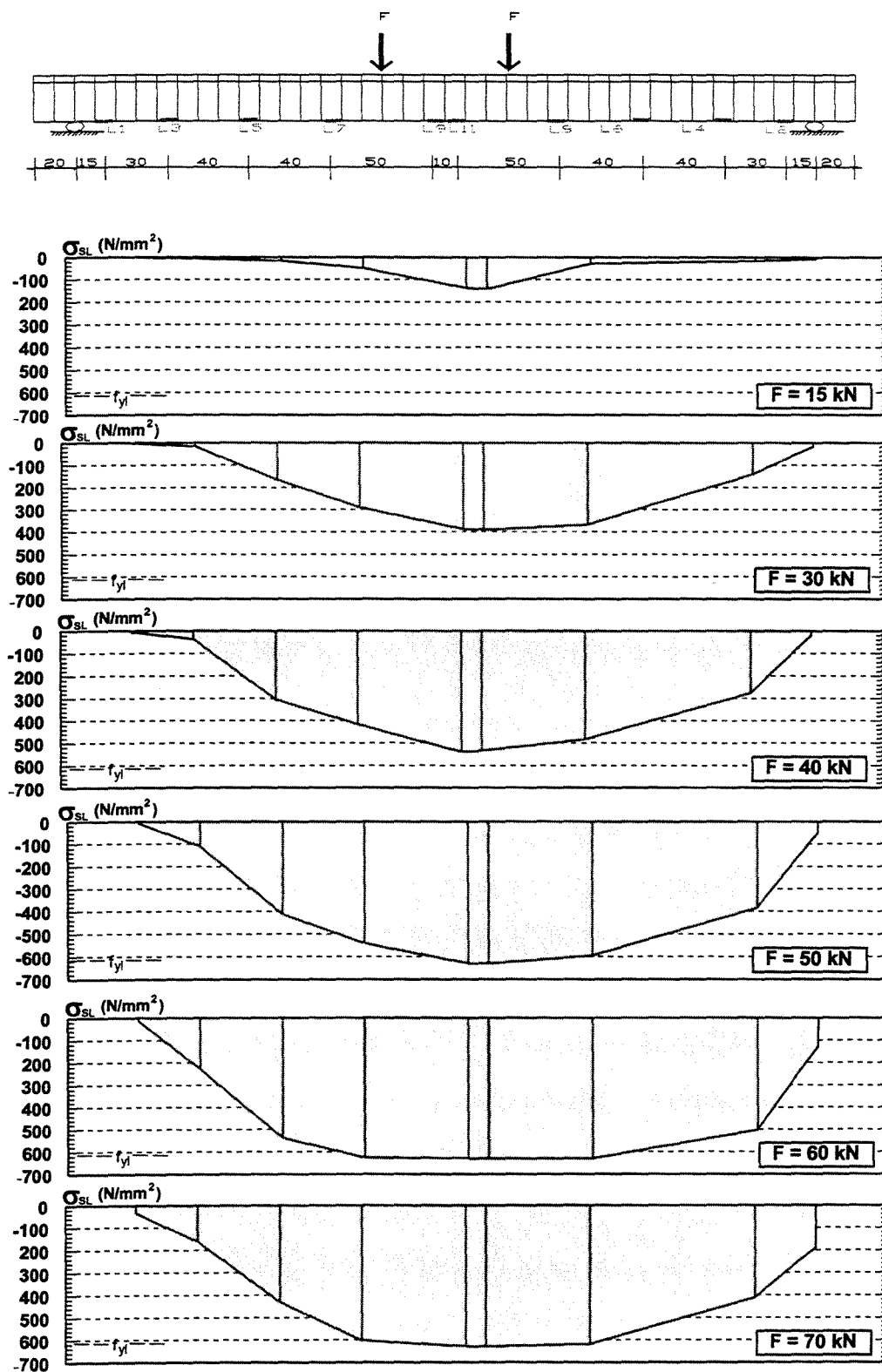


FIGURA 7.15I Tensões na armadura longitudinal da viga V5.

VIGA V5 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

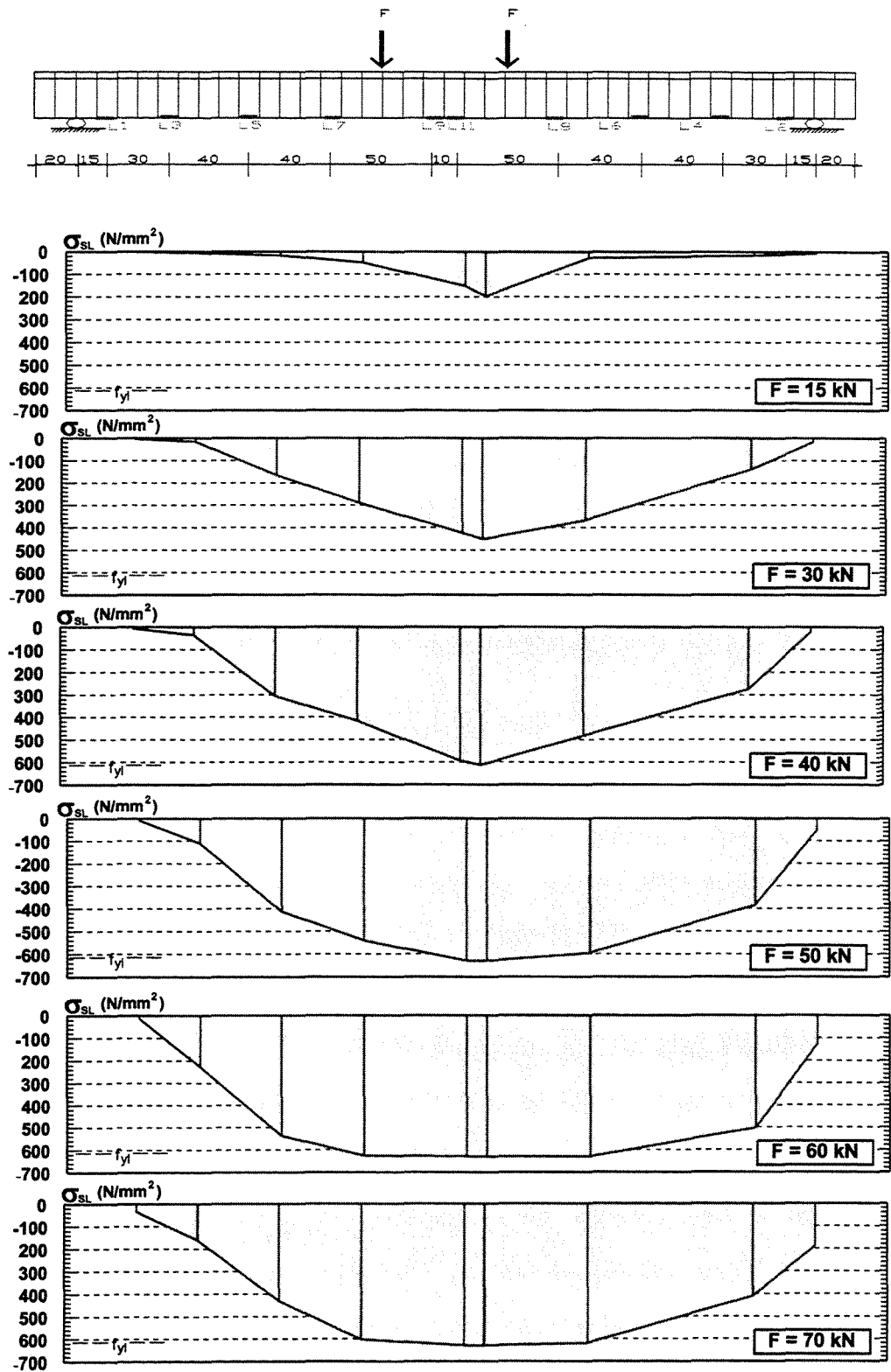


FIGURA 7.15J Tensões na armadura longitudinal da viga V5.

VIGA V6 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

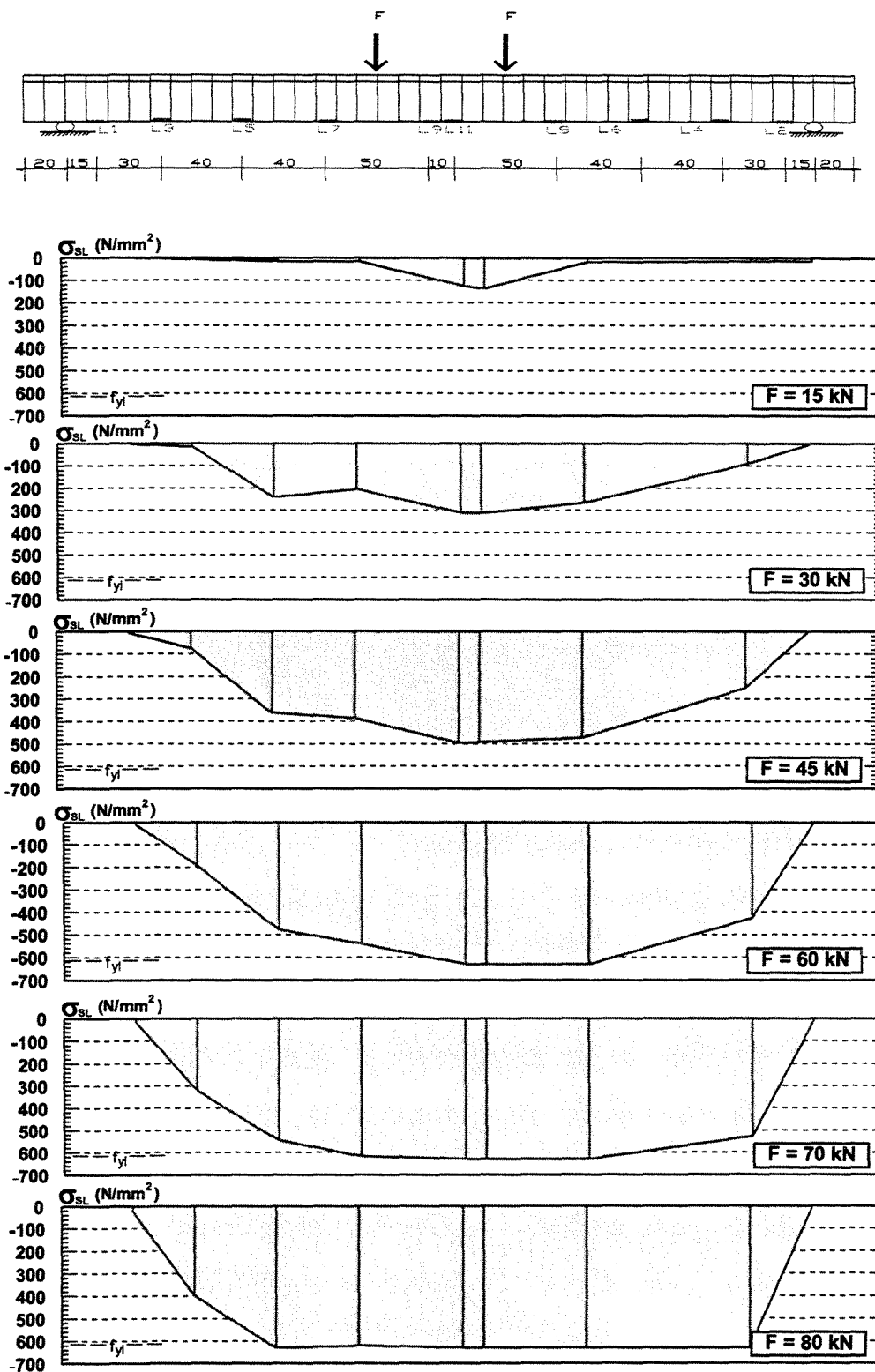


FIGURA 7.15K Tensões na armadura longitudinal da viga V6.

VIGA V6 - TENSÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

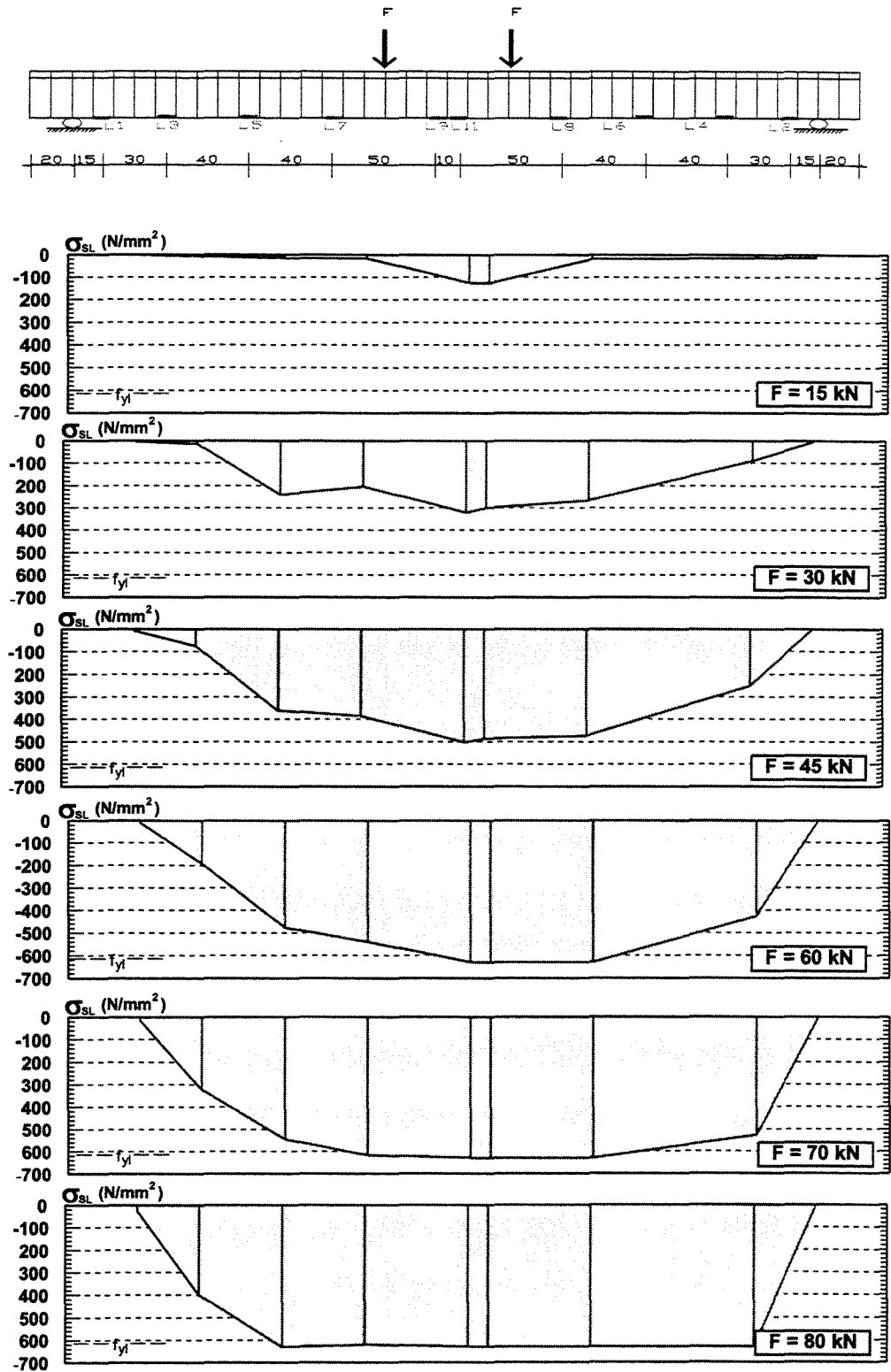


FIGURA 7.15L Tensões na armadura longitudinal da viga V6.

VIGA V2 TENSÕES NAS FIBRAS

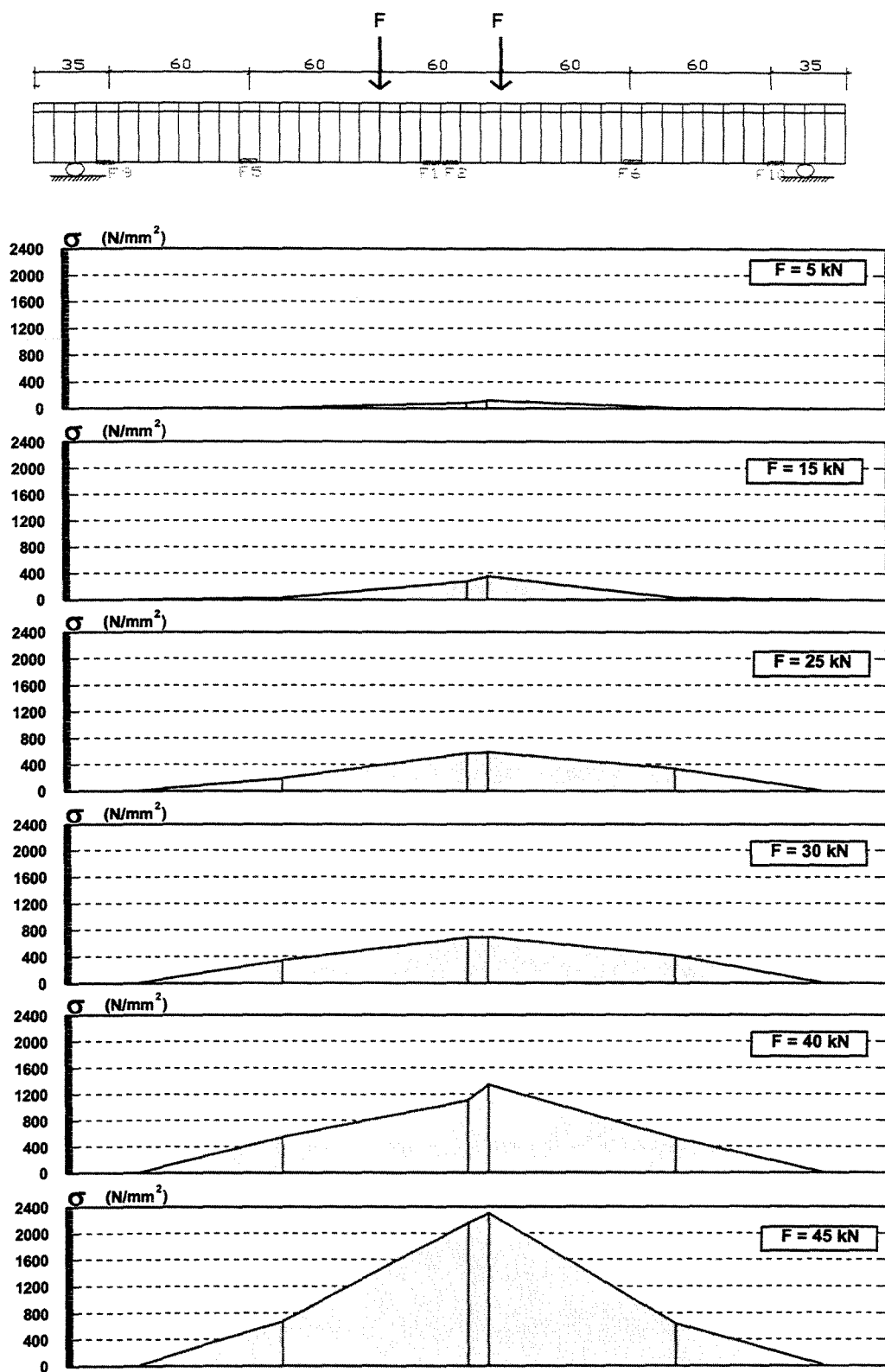


FIGURA 7.16A Tensões nas fibras da viga V2.

VIGA V3 TENSÕES NAS FIBRAS

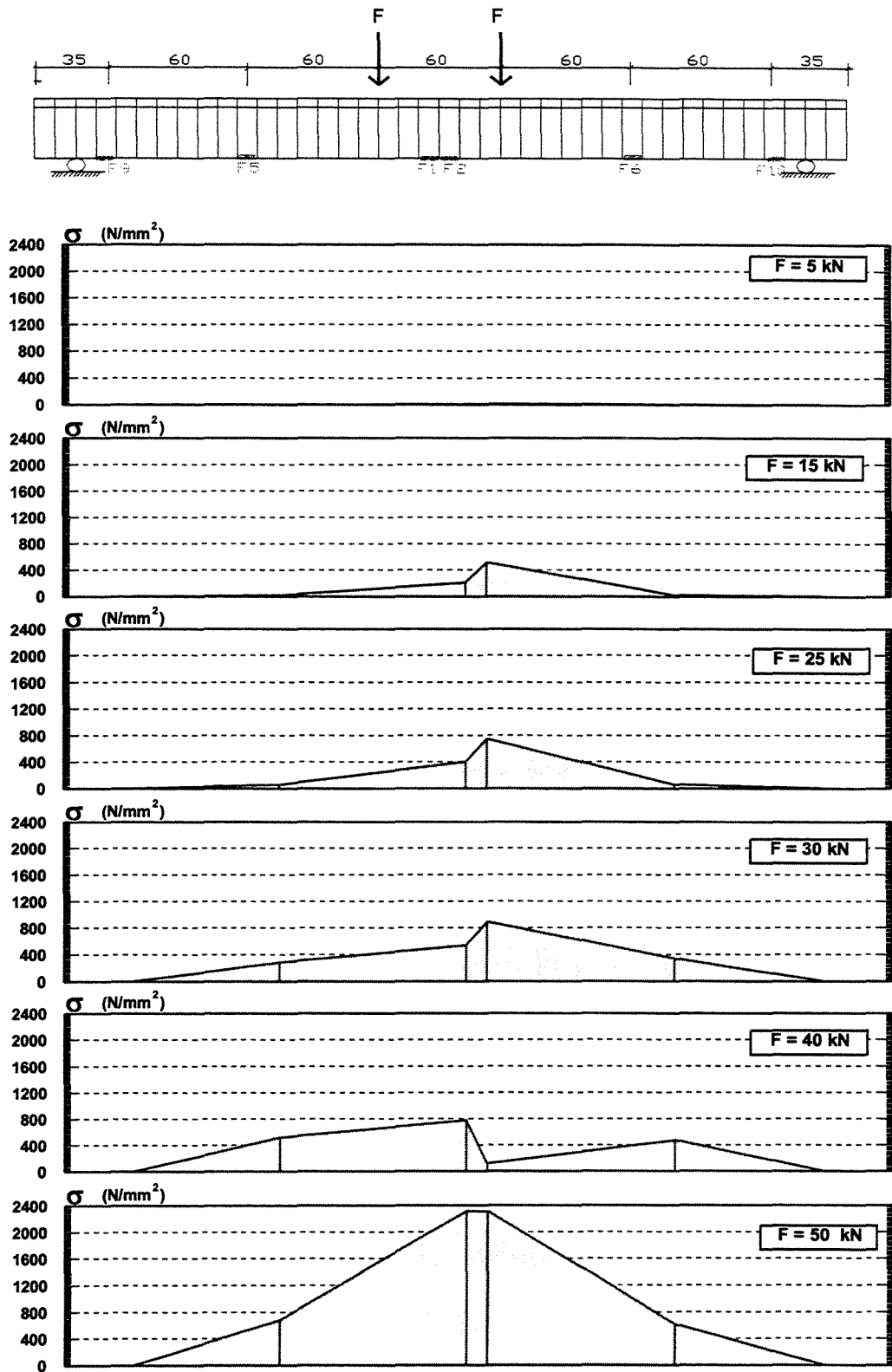


FIGURA 7.16B Tensões nas fibras da viga V3.

VIGA V4 TENSÕES NAS FIBRAS

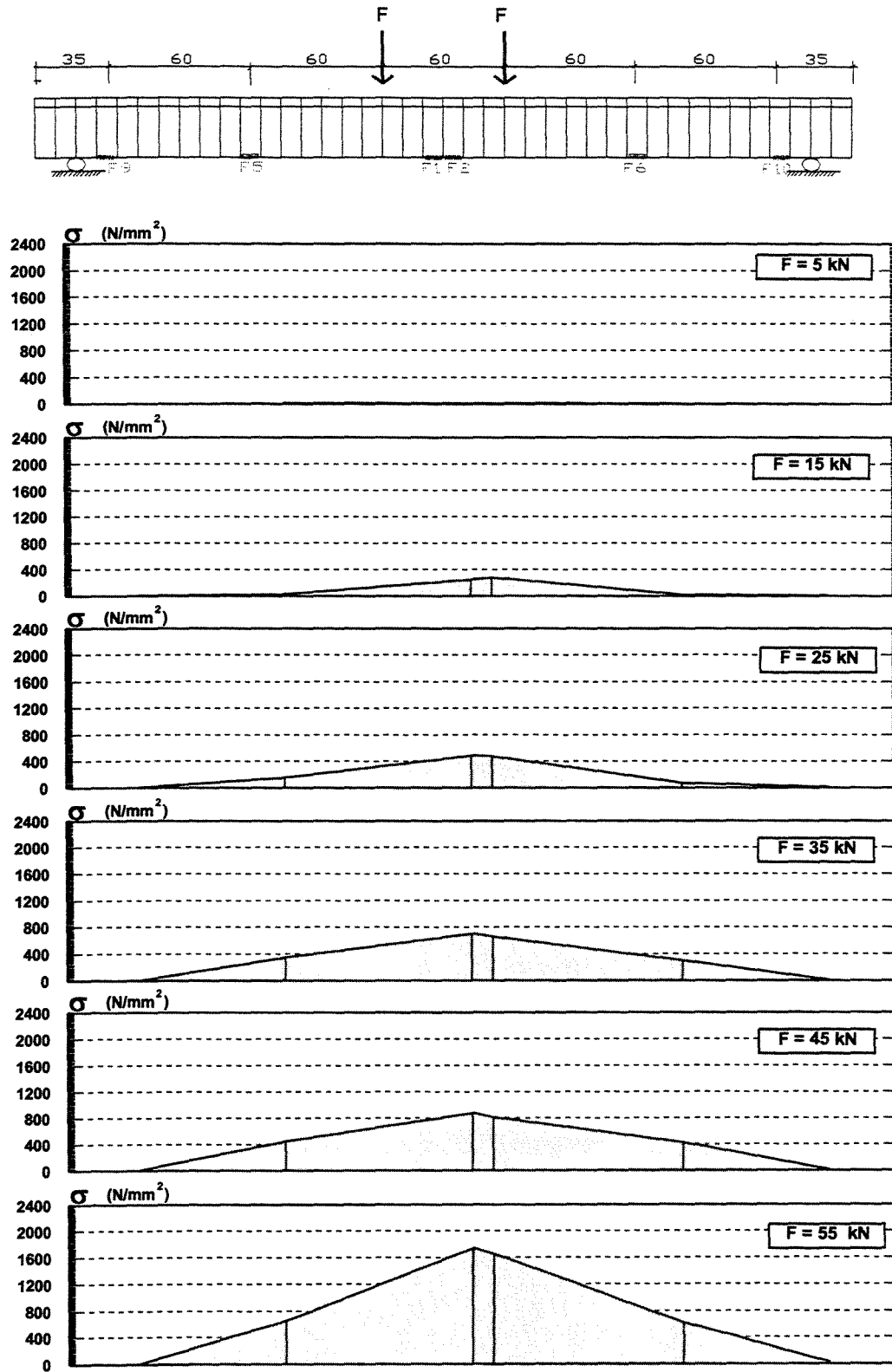


FIGURA 7.16C Tensões nas fibras da viga V4.

VIGA V5 TENSÕES NAS FIBRAS

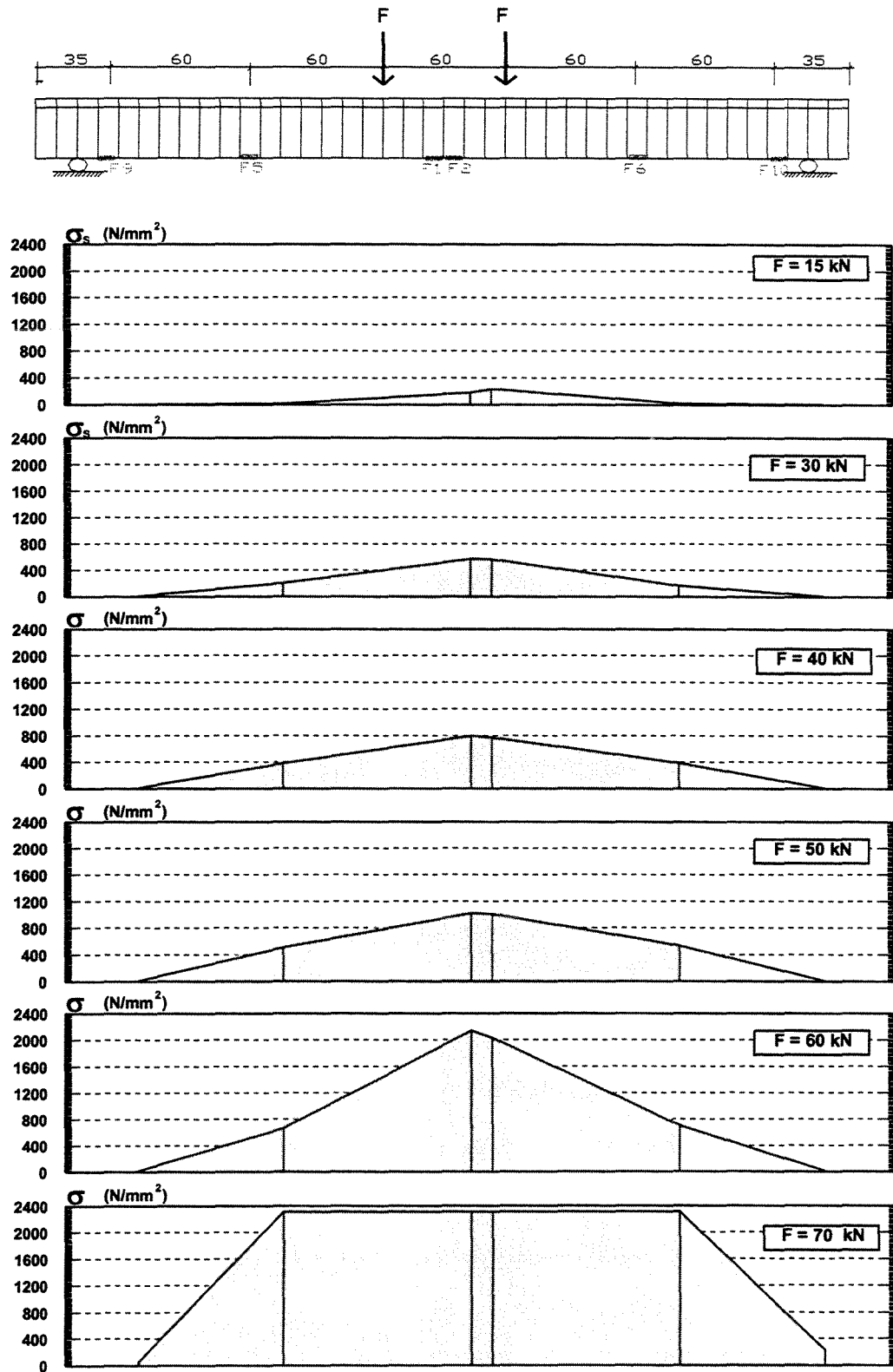


FIGURA 7.16D Tensões nas fibras da viga V5.

VIGA V6 TENSÕES NAS FIBRAS

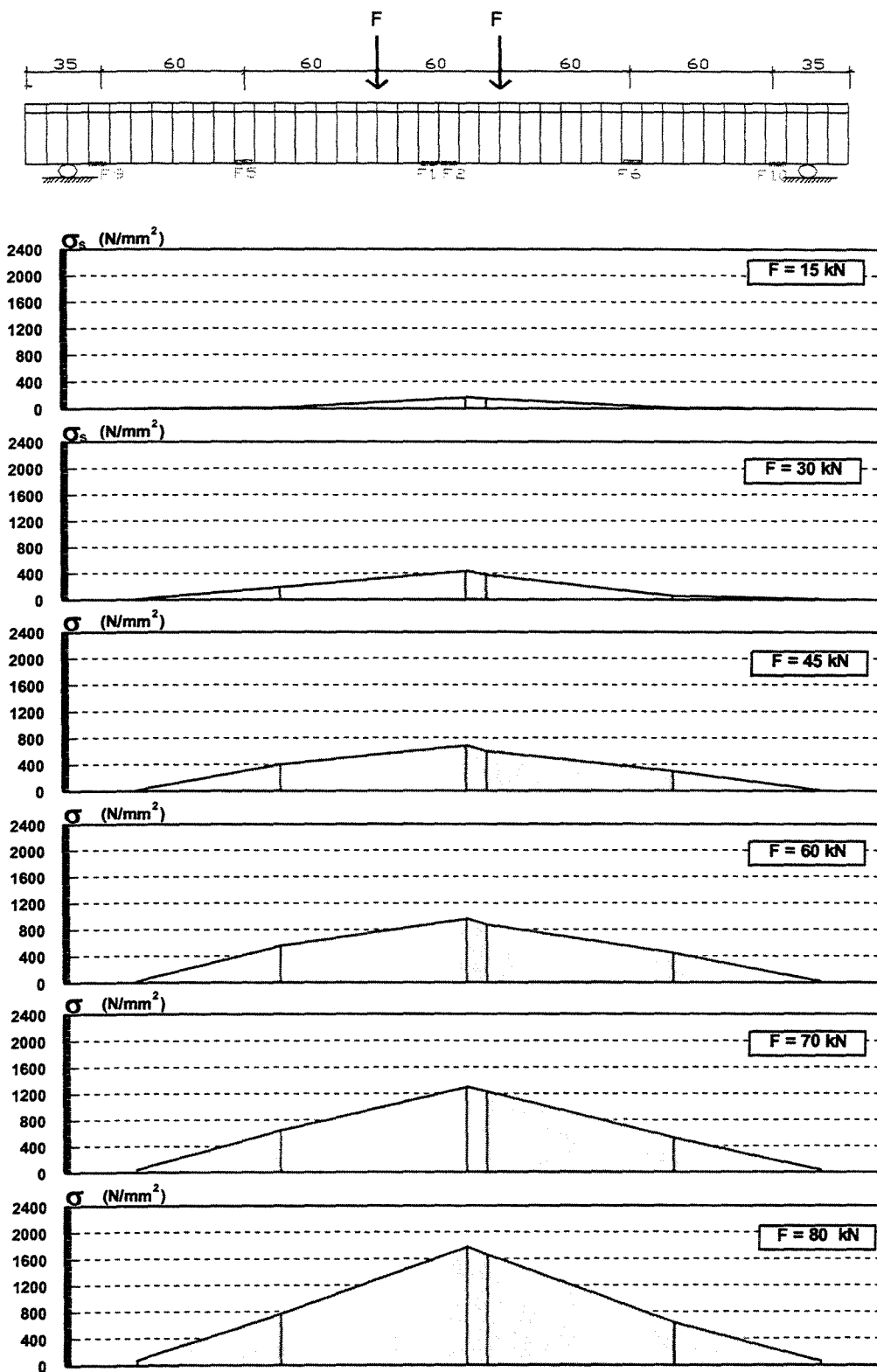


FIGURA 7.16E Tensões nas fibras da viga V6.

VIGAS V1 E V2 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

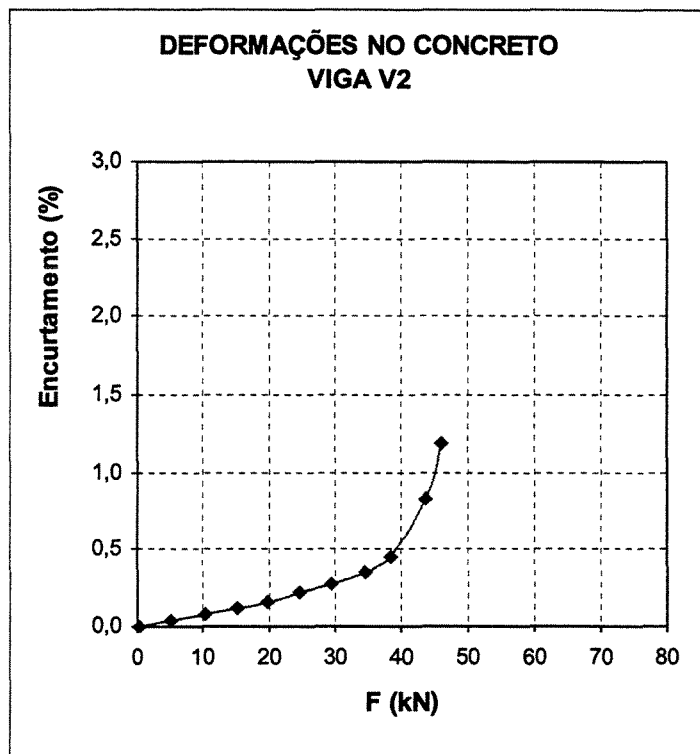
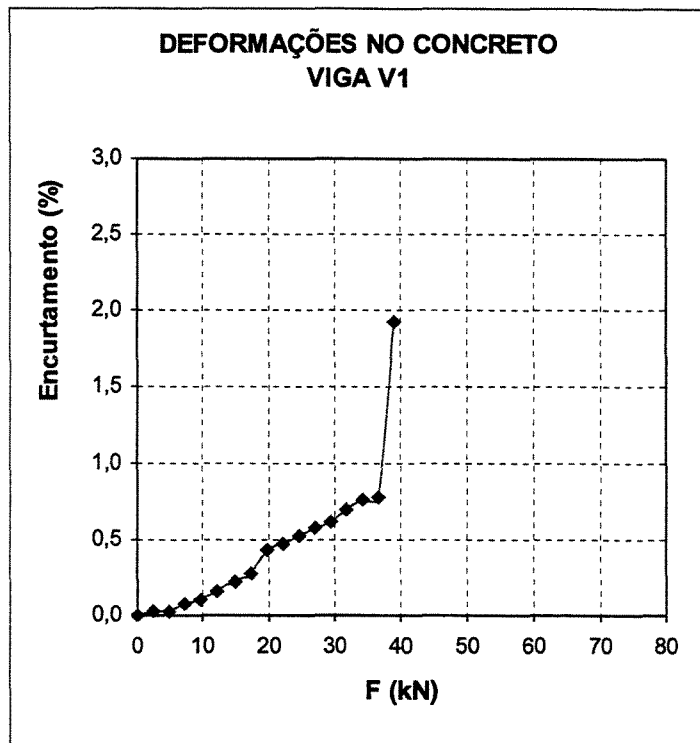


FIGURA 7.17A Deformações no concreto das vigas V1 e V2.

VIGAS V3 E V4 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

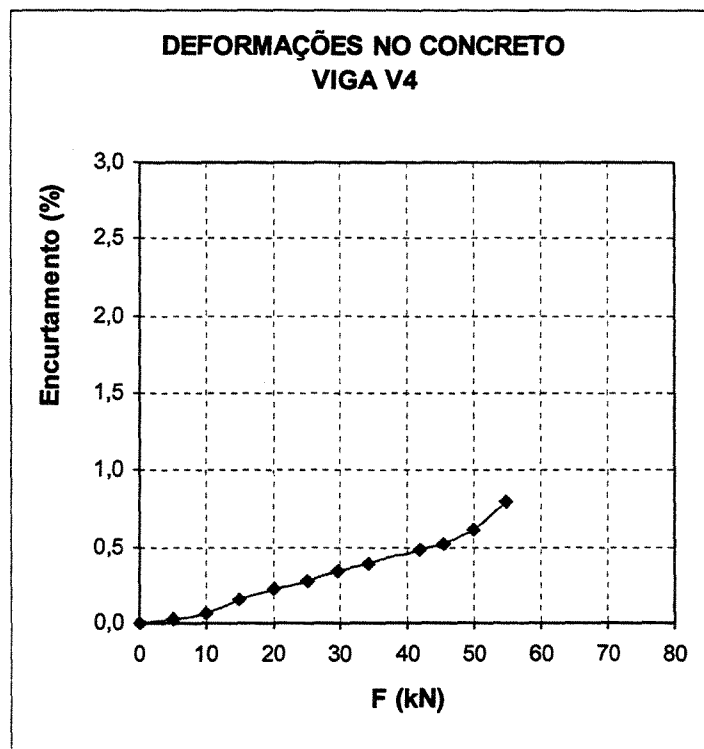
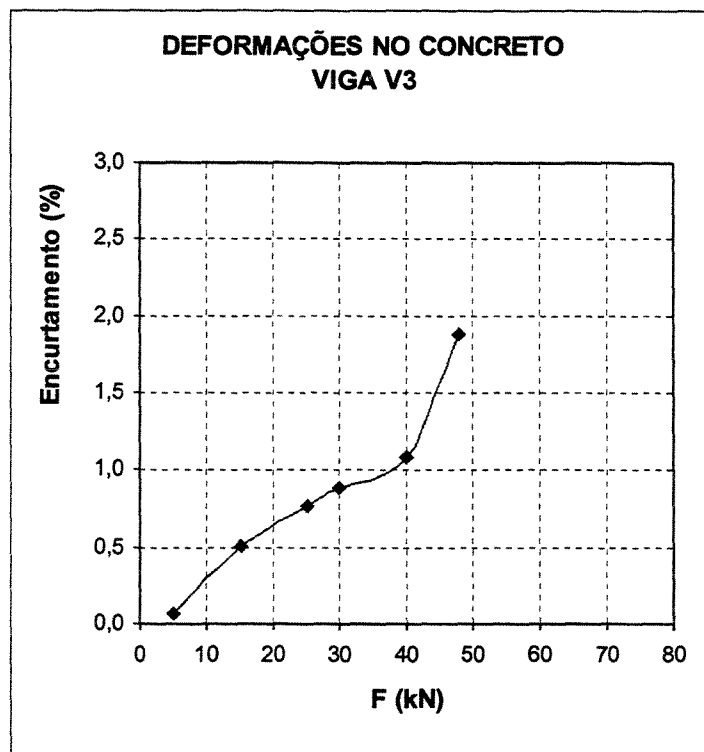


FIGURA 7.17B Deformações no concreto das vigas V3 e V4.

VIGAS V5 E V6 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

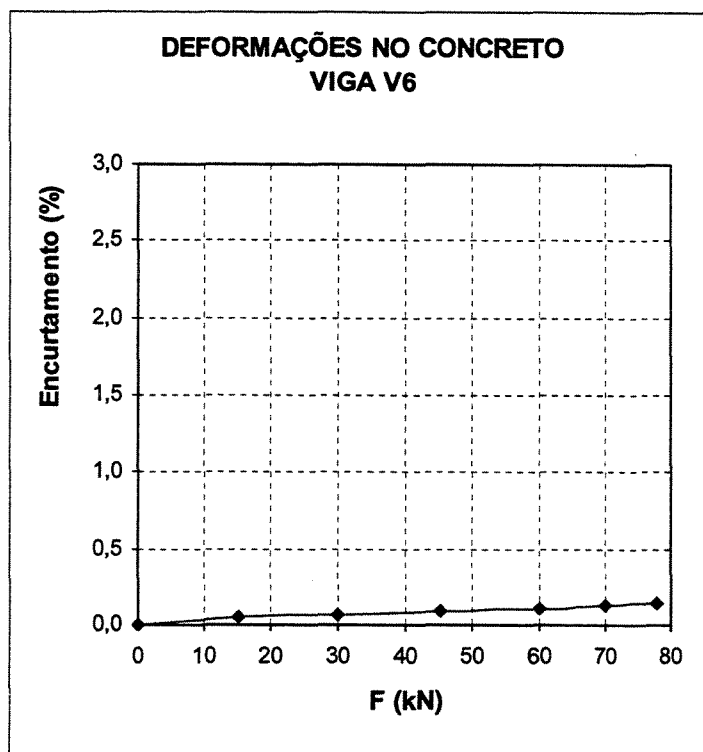
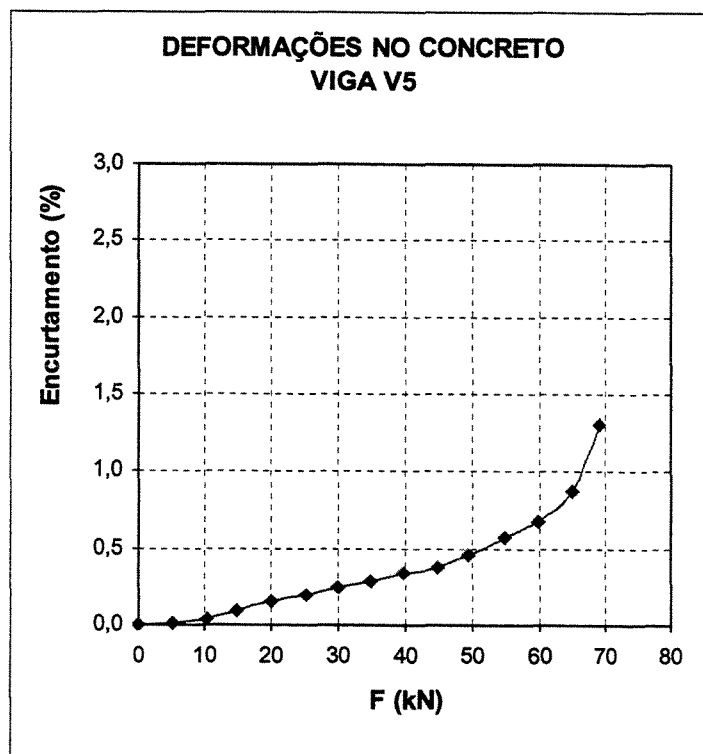


FIGURA 7.17C Deformações no concreto das vigas V5 e V6.

VIGAS V1 E V2 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

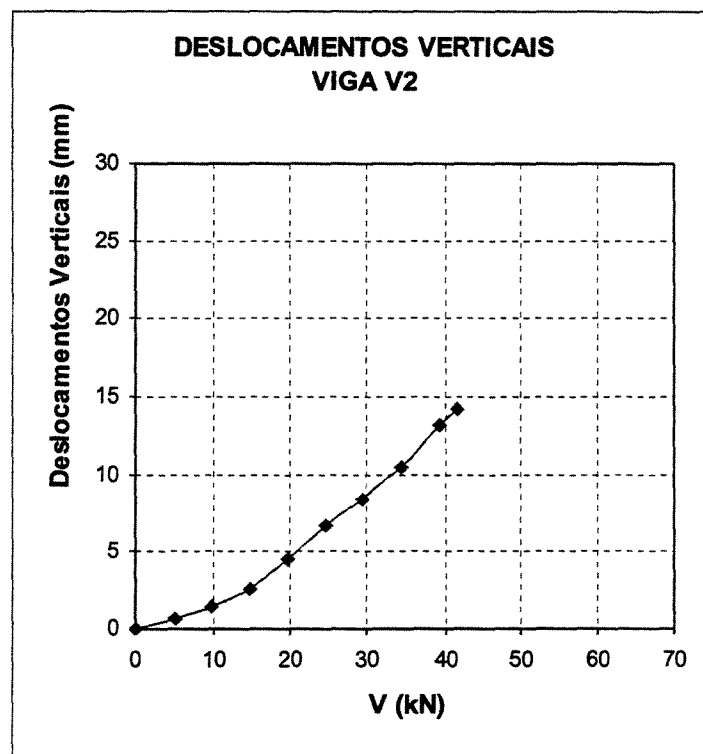
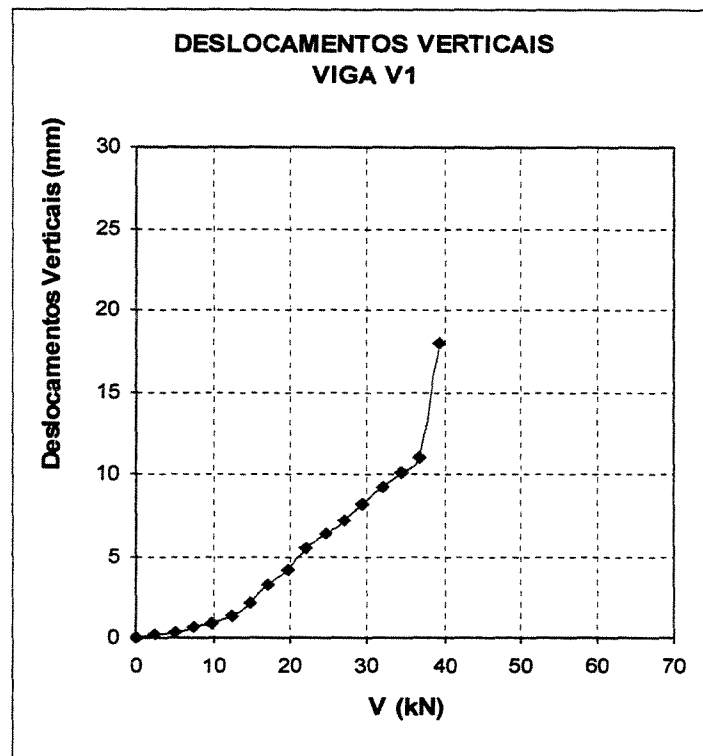


FIGURA 7.18A Diagrama dos deslocamentos verticais das vigas V1 e V2.

VIGAS V3 E V4 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

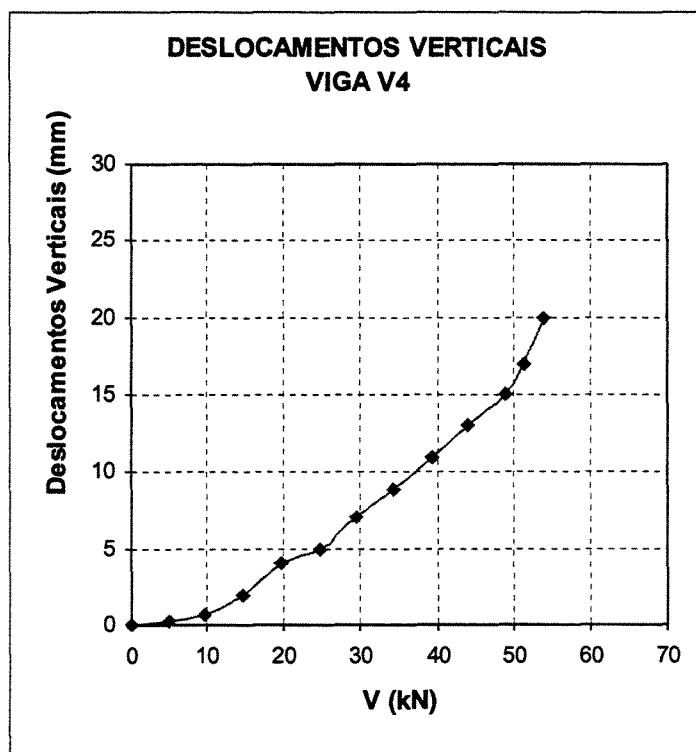
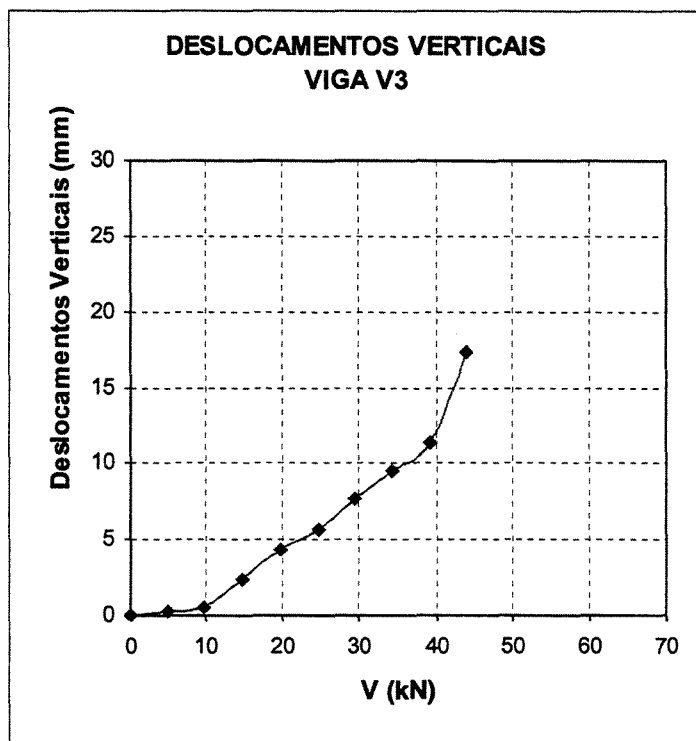


FIGURA 7.18B Diagrama dos deslocamentos verticais das vigas V3 e V4.

VIGAS V5 E V6- DESLOCAMENTOS VERTICAIS

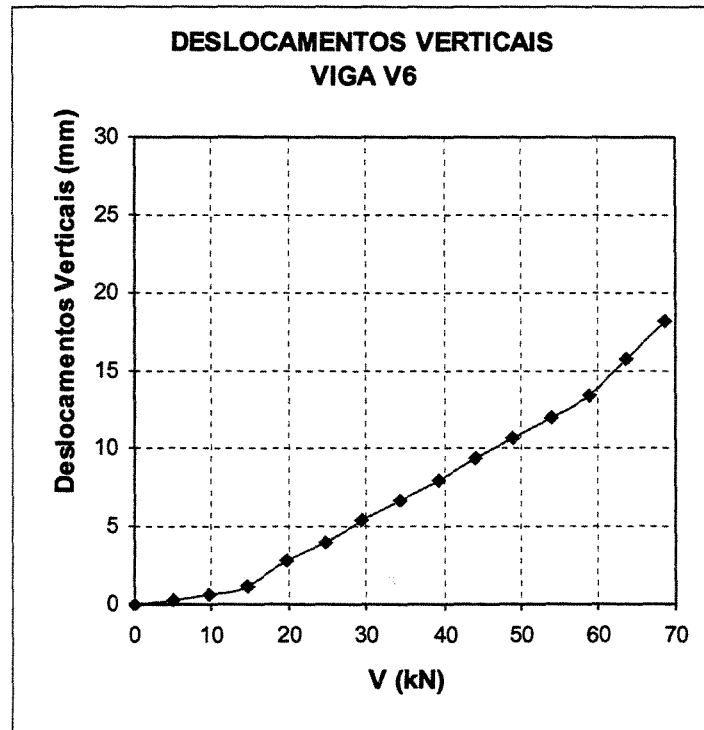
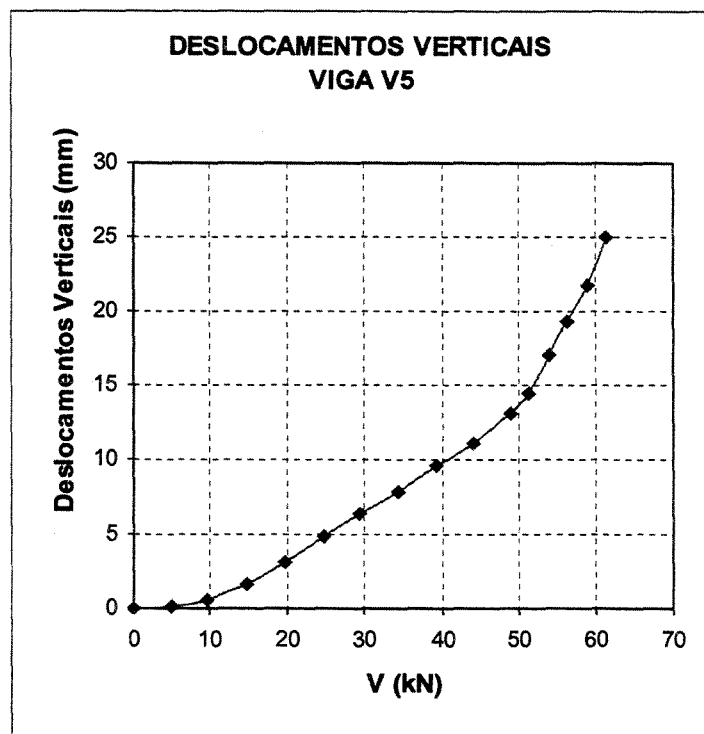


FIGURA 7.18C Diagrama dos deslocamentos verticais da viga V5 e V6.

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na tabela 8.1 abaixo são apresentados os valores, teórico e experimental, das cortantes últimas para cada uma das vigas ensaiadas. Enquanto que na tabela 8.2 é mostrado o acréscimo no valor da cortante última para cada uma das vigas reforçadas.

TABELA 8.1 Comparação entre o resultado teórico e o experimental

Viga	V_{últ}, ruptura da fibra (kN)	V_{últ}, descolamen -to (kN)	V_{últ}, experimental (kN)	Modo de Ruptura Esperado (teórico)	Modo de Ruptura Observado
V1	40,69	---	39,25	def. plástica exc. da armadura longitudinal	def. plástica exc. da armadura longitudinal
V2	50,56*	39,27	36,94	arrancamento da camada de cobrimento	descolamento do reforço
V3	50,56*	39,27	37,83	arrancamento da camada de cobrimento	descolamento do reforço
V4	66,52*	25,84	45,57	arrancamento da camada de cobrimento	descolamento do reforço
V5*	66,52*	25,84	44,98	ruptura da fibra	ruptura da fibra
V6*	82,33	12,33	56,26	ruptura da fibra	ruptura da ancoragem/descolamento do reforço

* é importante lembrar que as viga V5 e V6 possuíam mecanismos de ancoragem e por isso, não era esperado o descolamento do reforço.

TABELA 8.2 Acréscimo na cortante última para cada uma das vigas reforçadas

Viga	V _{última} , viga sem reforço (kN)	V _{última} (kN)	Diferença (%)
V2		36,94	-5,89
V3		37,83	-3,62
V4	39,25	45,57	+16,10
V5		44,98	+14,60
V6		56,26	+43,33

Pela análise das tabelas 8.1 e 8.2, podemos notar que as vigas V4, V5 e V6 apresentaram acréscimos no valor de $V_{última}$ em relação à viga de referência, apesar dos resultados terem sido inferiores aos valores previstos pela teoria.

As vigas V2 e V3 apresentaram valor de $V_{última}$ bem próximos do valor da viga de referência, demonstrando a ineficiência do sistema de reforço aplicado em apenas 1 camada de compósito, sem a utilização de mecanismos de ancoragem.

Na viga V2 isso ocorreu devido ao descolamento da camada de folha flexível de carbono aderida, de acordo com o previsto através do cálculo do momento de descolamento no item 6.6.

Para se confirmar o problema do descolamento ocorrido para a viga V2, procedeu-se com o mesmo sistema (colagem de 1 camada de reforço), para a viga V3, com a espera de um período de cura do sistema por um dia a mais na etapa de execução, conforme novas orientações recebidas do fabricante.

Entretanto, apesar da viga V3 apresentar um modo de ruptura diferente de V2, com o arrancamento da camada de cobertura juntamente com o reforço; os valores obtidos para a carga e o momento últimos foram muito pouco maiores do que os apresentados por V2, além de também ter ocorrido o descolamento. Isso indica a falha existente na adesão da camada de reforço com a superfície da viga, demonstrando a necessidade do uso de uma resina de aderência

com melhores propriedades adesivas e maior módulo de elasticidade ou do uso de um sistema de ancoragem adequado.

Os valores obtidos para a cortante última das vigas V2 e V3 apresentaram diferenças de $-5,93\%$ e $-3,67\%$, respectivamente, em relação aos valores calculados no capítulo 6, em que haveria o descolamento do reforço. Esses resultados indicaram que o cálculo se mostra bastante adequado para o caso do emprego de uma camada de compósito como reforço e demonstra a importância do uso de um sistema de ancoragem para que se garanta a efetividade do reforço.

As propriedades insuficientes apresentadas pela resina também refletiram negativamente no cálculo do momento de descolamento que apresentou valores muito baixos, chegando a 20 % do valor calculado para o momento último. Mas é importante ressaltar que o cálculo do Momento de descolamento não leva em consideração a existência de sistemas de ancoragem, como o aplicado na viga V5.

Os momentos de descolamento calculados para as vigas V4, V5 e V6 não foram verificados experimentalmente, provavelmente devido a uma maior quantidade de resina aplicada, pois foram utilizadas mais camadas de compósitos, garantindo uma maior adesão à viga de concreto.

Apesar dos valores obtidos para a cortante última terem sido maiores do que os previstos no caso de um descolamento, não foram verificados os valores últimos previstos pela teoria, para o caso de não haver o descolamento. Isso indica que o uso de um número maior de camadas implica na necessidade da utilização de um fator que reduza a resistência global do sistema de reforço. Por exemplo, não será obtida uma resistência três vezes maior, se forem utilizadas três camadas de reforço.

A viga V6 foi a que apresentou os maiores valores para cortante última, devido à utilização de um número maior de camadas de reforço.

Na tabela 8.3 temos uma comparação entre os valor teórico e o experimental obtido para o momento último das vigas.

TABELA 8.3 Comparação entre o valor teórico e experimental do momento último para as vigas.

Resultados			
Viga	M_{último} (kN.m)		
	Teórico	Experimental	Diferença (%)
V1	61,04	58,88	-3,7
V2	76,52	55,41	-27,59
V3	76,52	56,75	-25,84
V4	102,12	68,35	-33,07
V5	102,12	67,47	-33,93
V6	126,39	84,40	-33,22

A viga V6 foi a que apresentou maior incremento no valor do momento último em relação à viga de referência, apesar de ter apresentado uma diferença (33,22%) em relação ao valor teórico, esperado. A viga V5 foi a que apresentou maiores diferenças entre o valor teórico e o experimental, em relação ao momento último.

A diferença principal no comportamento das duas vigas se deu devido ao número de camadas utilizadas, que foi o dobro na V6 em relação à V5. Além disso, conforme citado, ocorreu o rompimento da ancoragem na viga V6 e o rompimento da camada de reforço na viga V5, demonstrando um melhor aproveitamento do sistema de reforço.

A viga V1 atingiu o Estado Limite Último pelo escoamento da armadura longitudinal, conforme era esperado. Esse escoamento foi verificado inicialmente nos pontos instrumentados por L9, L11 e L12, correspondentes à região do meio do vão.

Para a viga V1, o valor do momento último experimental foi ligeiramente inferior ao valor previsto teoricamente, apresentando uma diferença de 3,7 %, conforme indicado na tabela 8.3.

Os valores obtidos experimentalmente podem ter sido abaixo dos valores teóricos devido à falta de capacidade solidária do reforço de atuar frente à absorção de esforços enquanto a armadura longitudinal ainda não esteja escoando. Essa falta de comportamento solidário na absorção dos esforços demonstra a necessidade do aperfeiçoamento das resinas utilizadas, principalmente no que se refere as suas propriedades adesivas. Nota-se, também, a necessidade da utilização de um fator de eficiência, que diminua a capacidade do reforço, como já foi sugerido anteriormente por outros pesquisadores, (citado no capítulo 5).

Nas figuras 8.1 a 8.5, a seguir, é mostrada uma comparação entre os valores verificados no ensaio de cada viga em seus pontos mais solicitados.

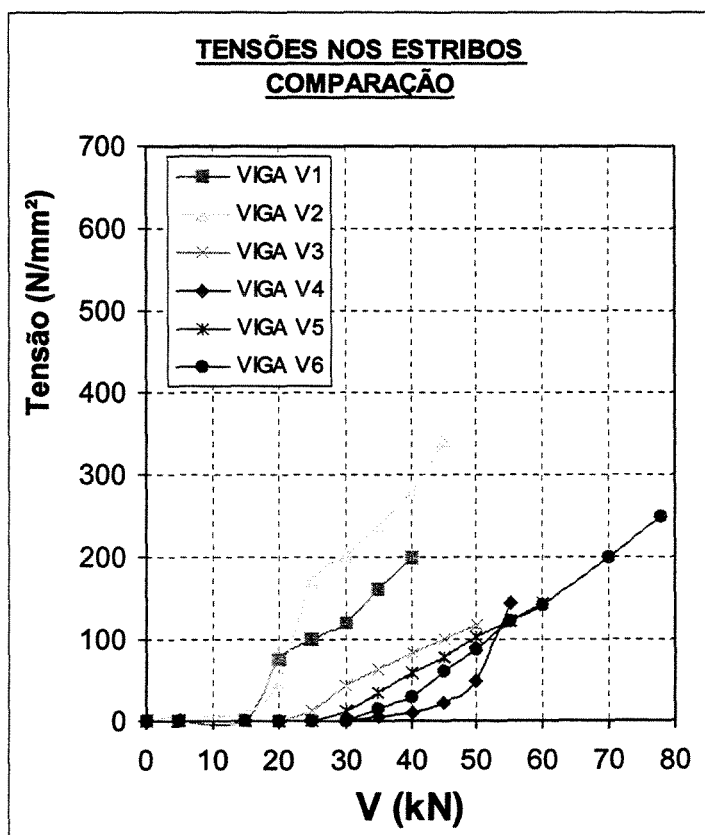


FIGURA 8.1 - Tensões nos estribos mais solicitados em cada viga.

As tensões na armadura transversal mantiveram-se em valores muito abaixo da tensão de escoamento, demonstrando uma pequena solicitação desta armadura, para todas as vigas, sendo que a viga V2 apresentou valores um pouco maiores do que as demais, (fig. 8.1).

Como a viga V2 apresentou o descolamento da camada de reforço, conclui-se que o reforço, apesar de ser idealizado para absorver esforços de flexão, também colabora na absorção de esforços cortantes.

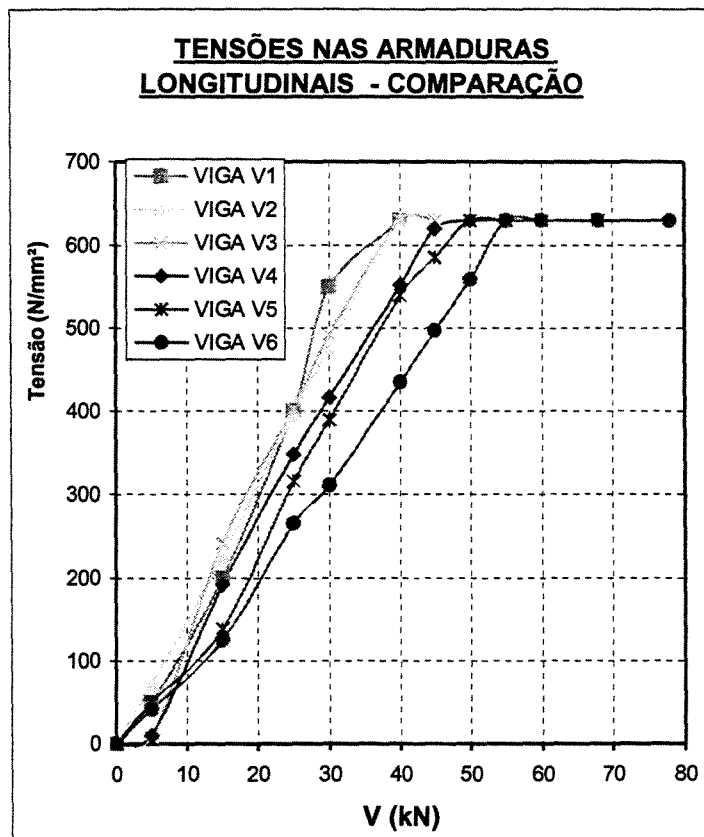


FIGURA 8.2 - Tensões nas armaduras longitudinais mais solicitadas em cada viga.

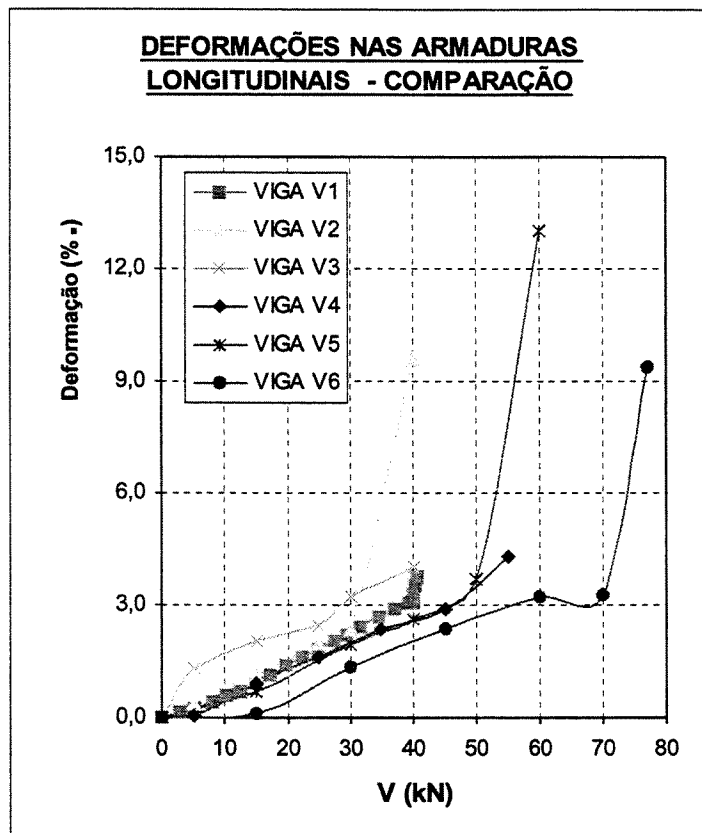


FIGURA 8.3 - Deformações nas armaduras longitudinais mais solicitadas em cada viga.

Da análise da figura 8.2, pode-se notar um retardamento no alcance da tensão de escoamento para as armaduras longitudinais das vigas reforçadas V4, V5 e V6 em relação à viga de referência, indicando o comportamento solidário do reforço na absorção dos esforços de flexão.

As vigas V2 e V3, por terem apresentado o descolamento da camada de reforço, não apresentaram incremento no valor da carga última, apesar de apresentarem incremento no valor da carga máxima de 9,43% e 17,76%, respectivamente.

Da análise da figura 8.3 pode-se notar um aumento brusco no valor das deformações na armadura longitudinal, depois de alcançada a deformação de escoamento, de 3,1 ‰.

Nota-se que a colaboração do reforço para a capacidade portante das vigas é efetiva a partir do momento em que a armadura longitudinal, por ter escoado, não é mais capaz de resistir aos esforços de flexão, portanto devemos analisar o incremento no valor da carga máxima das vigas reforçadas em relação à viga de referência, (tabela 8.4).

TABELA 8.4 Incremento no Valor da Carga Máxima para as Vigas Reforçadas.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6
$V_{\text{máxima}}$ (kN)	40,94	44,80	48,21	55,62	70,58	79,13
Incremento (%)	-----	+9,43	+17,76	+35,86	+72,40	+93,28

Da tabela 8.4 pode-se notar o aumento progressivo na capacidade última das vigas reforçadas, conforme os diferentes métodos de reforço foram empregados, sendo o melhor desempenho o apresentado pela viga V6, onde foi empregado um maior número de camadas.

Nota-se o melhor desempenho da viga V3 em relação à viga V2 (com problemas na etapa de execução). Também podemos perceber o aumento significativo obtido com o emprego de três camadas de reforço (vigas V4, V5 e V6) ao invés de apenas uma camada (vigas V2 e V3).

Através da análise destes valores, fica evidente a colaboração da ancoragem no aumento da capacidade última da viga, já que sua presença foi a única diferença na execução dos reforços das vigas V4 e V5/V6.

Foi possível alcançar o valor da deformação limite na fibra de 0,8% com $f_{\text{últi}}$ igual a 2310 n/mm^2 , para a viga V3, apenas na região do meio do vão; e para a viga V5 numa região que se estendeu até 1,2m do meio do vão, demonstrando o melhor aproveitamento da capacidade do reforço., até a sua ruptura.

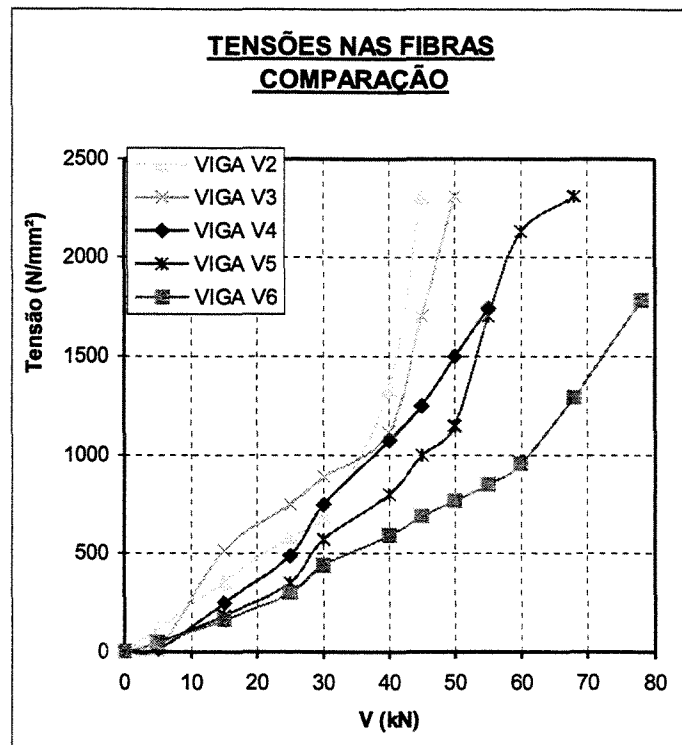


FIGURA 8.4 - Tensões nas fibras mais solicitadas em cada viga.

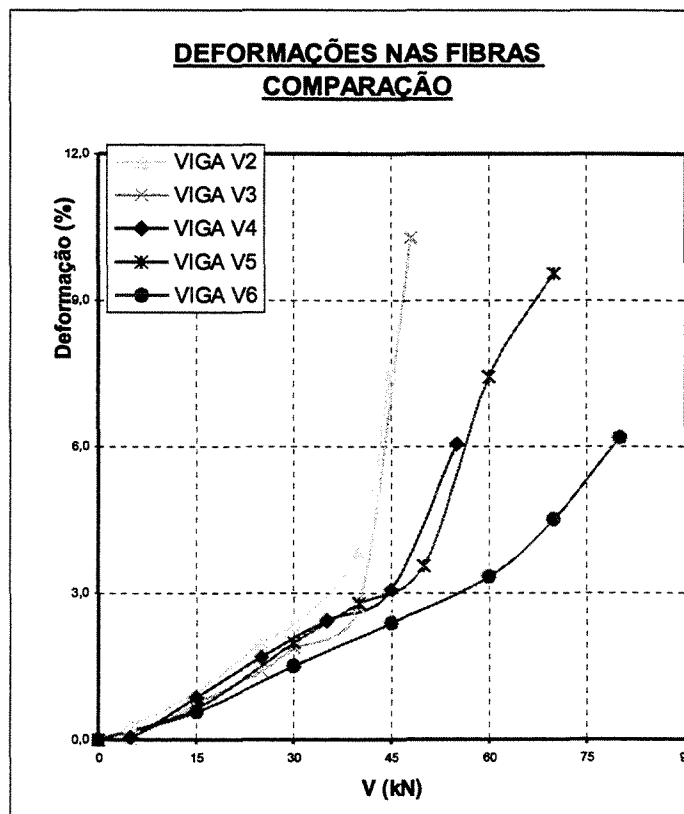


FIGURA 8.5 Deformações nas fibras mais solicitadas em cada viga.

Pela comparação das figuras 8.4 e 8.5 com a figura 8.2 pode-se perceber que o valor da tensão nas fibras apresentou grande evolução no seu crescimento a partir do escoamento da armadura longitudinal. Sendo essa evolução mais brusca para as vigas com uma camada de reforço e mais gradual para as vigas com 3 camadas de reforço.

As deformações no concreto também apresentaram valores de encurtamento bem inferiores ao valor último, conforme vemos na figura 8.6, sendo que a viga V6 apresentou os menores valores e a viga V2 apresentou brusca evolução a partir do momento do descolamento do reforço.

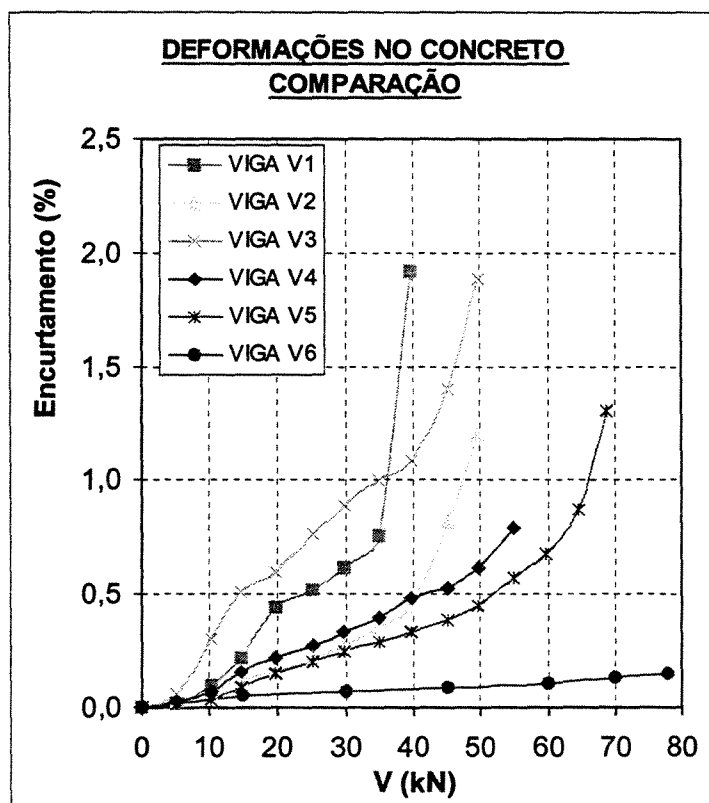


FIGURA 8.6 - Deformações no concreto em cada viga.

A figura 8.7 mostra uma comparação na evolução dos deslocamentos verticais para as vigas ensaiadas.

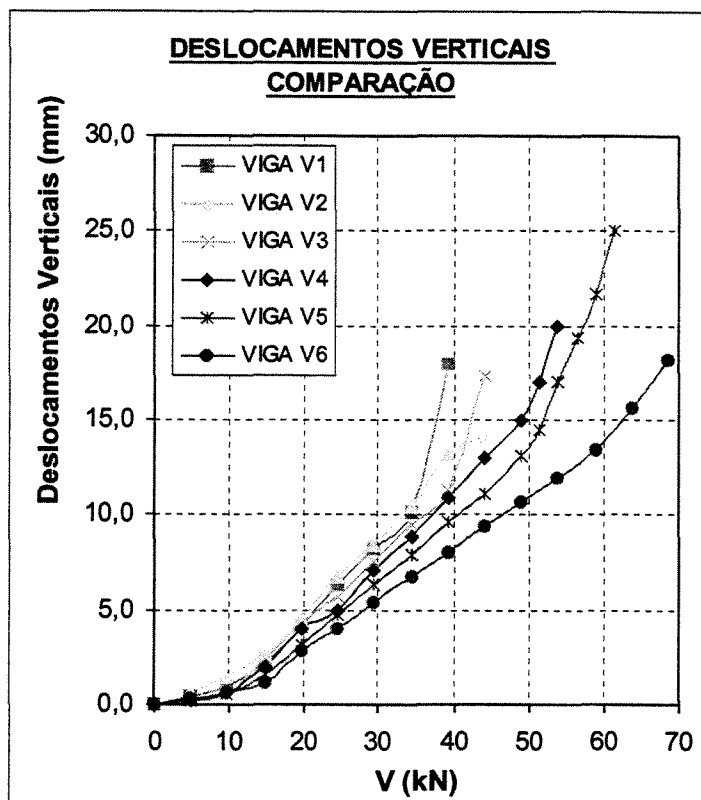


FIGURA 8.7 Deslocamentos Verticais em cada viga.

O deslocamento vertical da viga V1 aumentou rapidamente a partir do carregamento de 39,25 kN, indicando uma maior perda de rigidez, a partir do momento do escoamento da armadura longitudinal.

As demais vigas apresentaram uma evolução praticamente constante, mas ainda abaixo daquela apresentada pela viga de referência.

As vigas V4 e V5 demonstraram um crescimento maior (maior inclinação na curva) no valor do deslocamento vertical a partir da carga de 50 kN.

9 CONCLUSÕES

Do estudo desenvolvido sobre o uso de polímeros reforçados com fibras de carbono como material de reforço à flexão de vigas de concreto armado foram obtidas as seguintes conclusões:

A técnica apresenta um procedimento de execução bastante simples, principalmente quando comparado ao uso de chapas de aço coladas e/ou aparafusadas. No entanto, é necessária a supervisão de um técnico especializado para que se garanta a qualidade do sistema de reforço.

Para as vigas de concreto reforçadas com uma camada do compósito acima citado, conclui-se que estão sujeitas à ruptura prematura devido ao descolamento do reforço, antes que se atinja sua capacidade última e com a subutilização da sua capacidade resistente.

O cálculo proposto para a obtenção do valor do momento de descolamento apresentou-se satisfatório para as vigas com uma camada de compósito, sem o uso de mecanismos específicos de ancoragem. Entretanto, nota-se um subaproveitamento do compósito, não justificando o seu emprego como técnica de reforço, se um sistema de ancoragem não for utilizado.

As vigas V4 e V5 reforçadas com três camadas de compósito apresentaram valores de momento último muito semelhantes entre si (diferença de 1,29%), apesar do uso do sistema de ancoragem em apenas uma delas (V5). Apesar disso, o valor obtido para carga máxima na viga V5 foi 26,9% maior do que o obtido para a viga com mesmo sistema de reforço, mas sem ancoragem.

Também ocorreu uma solicitação maior das fibras do reforço das vigas com ancoragem, onde pôde-se verificar seu escoamento em quase todo o comprimento.

Portanto, para o emprego de reforço utilizando-se três camadas de folhas flexíveis reforçadas com fibras de carbono, o uso da ancoragem será mais importante para o acréscimo na carga máxima suportada pela viga, não apresentando diferenças significativas em relação ao valor do momento último. Isso ocorre porque as propriedades resistentes do reforço começam a se efetivar a partir do escoamento da armadura longitudinal.

A metodologia de cálculo indicada para o cálculo do momento último, para reforços que utilizem mais de uma camada de compósito, não se mostrou adequada, dado que os valores obtidos teoricamente não foram verificados experimentalmente, ficando sempre cerca de 33% acima destes.

Existe a necessidade de se estudar um fator de eficiência a ser utilizado no cálculo do momento de descolamento para reforços com mais de uma camada de compósito, pois os valores obtidos situaram-se entre os valores de descolamento e os valores de momento último teóricos. Isso também demonstra uma capacidade maior do conjunto formado pelas diversas camadas de compósito de resistir aos esforços que causam o descolamento, além de uma capacidade inferior de resistir aos esforços de flexão, do que teriam se tivessem sua capacidade portante analisada individualmente.

O reforço pelo emprego de seis camadas de compósito foi o que se mostrou mais eficiente no aumento do valor do momento último da viga. Entretanto, o uso de ancoragem se torna imprescindível devido aos valores muito baixos do momento de descolamento.

A técnica de reforço à flexão proposta é eficiente, desde que sejam empregados mecanismos específicos de ancoragem, mas o cálculo do valor do momento último para as vigas reforçadas necessita da aplicação de um fator de eficiência capaz de se garantir a segurança para o caso de uma ruptura brusca.

O uso de sistemas de ancoragem é indicado para um melhor aproveitamento da capacidade do reforço.

Sugere-se o uso de resinas com maior módulo de elasticidade e capacidade de transferir esforços da viga para o compósito, para que se evite o descolamento prematuro e se estabeleça um maior aproveitamento da capacidade do reforço, antes mesmo do início do escoamento da armadura longitudinal.

É importante citar que as conclusões obtidas com este trabalho ainda necessitam de um estudo teórico e experimental mais aprofundado, que abranja um maior número de variáveis e de protótipos analisados.

Espera-se que este trabalho possa contribuir com o meio científico, no estudo de procedimentos de reforço, incentivando a busca pelo conhecimento e o desenvolvimento da engenharia civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AN, Wei, SAADATMANESH, Hamid e EHSANI, Mohammad R. RC Beams Strengthened with FRP Plates. II: Analysis and Parametric Study. **Journal of Structural Engineering**. v.117, n.11, p. 3434-3455, nov. 1991.
- 2 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440R-96- **“State – of – the – art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures”**, ACI, USA, 1996.
- 3 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440R-2000- **“Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”** ACI, USA, 2000.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 ARDUINI, Marco, DI TOMMASO, Angelo e NANNI, Antonio. Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams. **ACI Structural Journal**. v.94, n.4, p.363-371, jul./aug. 1997.

- 7 ARDUINI, Marco e NANNI, Antonio. Parametric Study of Beams With Externally Bonded FRP Reinforcement. **ACI Structural Journal**, Detroit, v. 94, n. 5, p.493-501, sep./oct. 1997.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado**. NBR6118-RJ_1982.
- 9 BEBER, Andriei José, CAMPOS FILHO, Américo e CAMPAGNOLO, João Luiz. Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Lâminas de Fibra de Carbono. **In V Congresso Iberoamericano de Patologia de Las Construcciones – VII Congresso de Control de Calidad**. Montevideo, p. 855-862, oct. 1999.
- 10 CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 1ª edição. São Paulo: Editora PINI, 1998. p.281-370.
- 11 CHAALLAL, O., NOLLET, M. J. e PERRATON, D. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced-Plastic Plates: Design Guidelines for Shear and Flexure. **Canadian Journal Civil Engineering**, Montreal, v.2, n.25, p.692-704, mar./apr. 1998.
- 12 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. 1996.
- 13 CUSTÓDIO, V. M. S, RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª edição. São Paulo: PINI, 1998.
- 14 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.
- 15 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.

- 16 HARTLEY, A., MULLINS, G. e SEM, R. Repair of concrete masonry block walls using carbon fiber. **Advanced composite materials in bridges and structures**. Montreal, p. 11-14, aug. 1996.
- 17 HELENE, Paulo & Oliveira, P.S.F. **Proteção e Manutenção das Estruturas de Concreto**. Engenharia, 1991.
- 18 HELENE, Paulo. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. 1ª edição. São Paulo: Editora PINI, 1992.
- 19 IMBROGNO, M. e APICELLA, F. Close in on Approval. **Civil Engineering**. v.70, n. 2, p.42-45, feb. 2000.
- 20 JONES, R., SWAMY, R. N., CHARIF, A. Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates. **The Structural Engineer**. v.66, n. 11, p.85-94. 1988.
- 21 KLAIBER, F., DUNKER, K. F., WIPF, T. J. et al. Methods of Strengthening Existing Highway Bridges Report nº 293. **Transportation Research Board**. Washington, sept. 1987.
- 22 MALEK, Amir M., SAADATMANESH, Hamid e EHSANI, Mohammad R. Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End. **ACI Structural Journal**. v.95, n.1, jan./feb. 1998.
- 23 MCKENNA, J. K., ERKI, M. A. Strengthening of Reinforced Concrete Flexural Members Using Externally Applied Steel Plates and Fibre Composite Sheets – a Survey. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v. 21, p. 16-24. 1994.

- 24 MEIER, U., DEURING, M., MEIER, H. et al. Strengthening of Structures with CFRP Lamminates: Research and Applications in Switzerland. **Advanced Composite Materials in Bridges and Structures – Canadian Society for Civil Engineering.** p. 243-251. 1992.
- 25 MEIER, U. Carbon Fiber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering. **Structural Engineering International.** v.2 n.1, p.7-12, feb. 1992.
- 26 MIYAUCHI, Katsuyuki, INOUE, Shoichi, NISHIBAYASHI, Shinzo et al. Shear behavior of Reinforced Concrete Beam Stregthened with CFRP Sheet. **Transactions of the Japan Concrete Institute.** v. 19, p. 97-104. 1997.
- 27 MUSZYNSKI, L. C. e SIERAKOWISKI, R. L. Fatigue Strength of Externally Reinforced Concrete Beams. **Proceedings of the Materials Engineering Conference.** v.1, p. 648-656. 1996.
- 28 NANNI, A. (coord.) ACI Committe 440 State-of-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, ACI 440R-96. **American Concrete Institute**, Detroit, 1996, 68p.
- 29 NANNI, A. Concrete Repair With Externally Bonded FRP Reinforcement. **Concrete International.** p.22-25, jun. 1995.
- 30 NANNI, A. CFRP Strengthening. **Concrete International.** p.19-23, jun. 1997.
- 31 NEALE, K. W. e LABOSSIERE, P. Fiber Composite Sheets in Cold Climate Rehab. **Concrete International.** v.20, n. 6, p.22-24, june. 1998.
- 32 NORRIS, Tom, SAADATMANESH, Hamid e EHSANI, Mohammad R. Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets. **ASCE, Journal of Structural Engineering**, Arizona, v.123, n.7, july. 1997.

- 33 PICARDI, André, MASSICOTTE, Bruno e BOUCHER, Eric. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Composite Materials: Theoretical Study. **Composites Structures**. Quebec, v.33, p. 63-75. 1995.
- 34 RIPPER, Thomaz e MOREIRA DE SOUZA, Vicente Custódio. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª edição. São Paulo: Editora PINI, 1998. p.142-161.
- 35 RITCHIE, Philip A., THOMAS, David A., LU, Le-Wu et al. External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics. **ACI Structural Journal**, Atlanta, v.88, n.4, july/aug. 1991.
- 36 ROBERTS, T. M. Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams. **The Structural Engineer**. v.67, n. 12, p. 229-233, june. 1989.
- 37 ROSS, Allen C., JEROME, David M., TEDESCO, Joseph W. et al. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates. **ACI Structural Journal**. v. 96, n.2, p. 212-220, mar./apr. 1999.
- 38 SAADATMANESH, H. e EHSANI, M. R. Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams. **Concrete International Design &Construction**. v.12, n.3, p. 65-71, mar. 1990.
- 39 SAADATMANESH, Hamid e EHSANI, Mohammad R. RC Beams Strengthened with GFRP Plates, I-Experimental Study. **ASCE, Journal of Structural Engineering**, Arizona, v.117,n.11, nov. 1991.
- 40 SAADATMANESH, H. e MALEK, A. M. Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates. **Journal of Composites for Construction**. v.2, n.4, p.158-164, nov. 1998.

- 41 SWAMY, R. N., JONES, R., BLOXHAM, J. W. Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates. **The Structural Engineer.** p. 59-68, fev. 1987.
- 42 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.
- 43 TRIANTAFILLOU, T. C., DESKOVIC, N. Innovative Prestressing with FRP Sheets: Mechanics of Short-Term Behavior. **ASCE Journal of Engineering Mechanics.** v.117, n. 7, p. 1652-1672. 1991.
- 44 TRIANTAFILLOU, T. C., DESKOVIC, N., DEURING, M. Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets. **ACI Structural Journal.** v. 89, n. 3, p. 235-244, may/june. 1992.
- 45 TOUTANJL. Houssam. A. e GOMEZ, Wiliam. Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composite Sheets. **Cement and Concrete Composites.** Inglaterra, v.19, p.351-358, july. 1997.

ABSTRACT

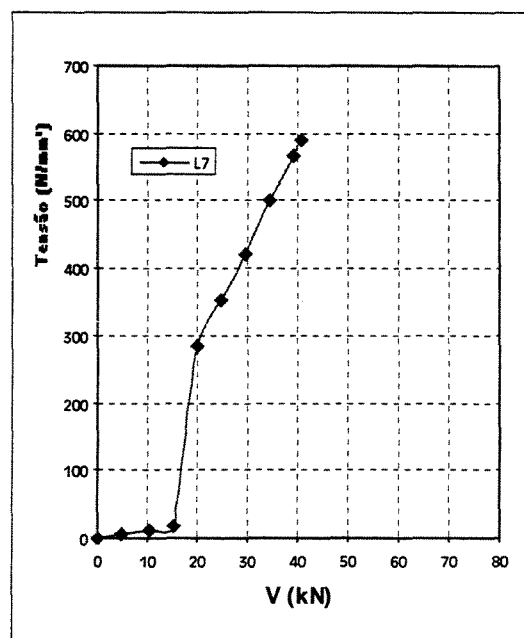
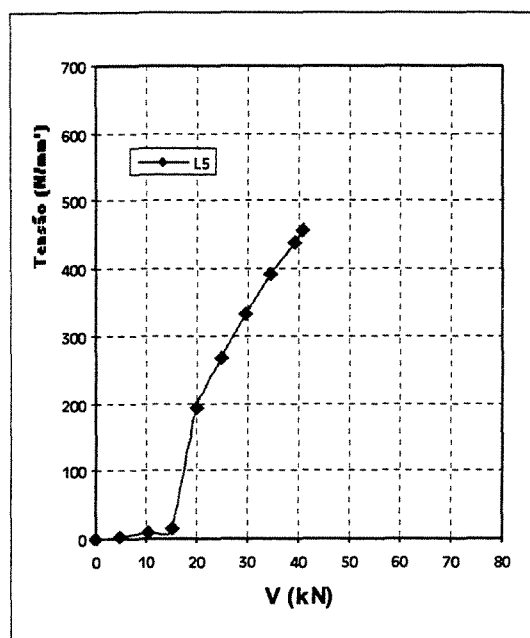
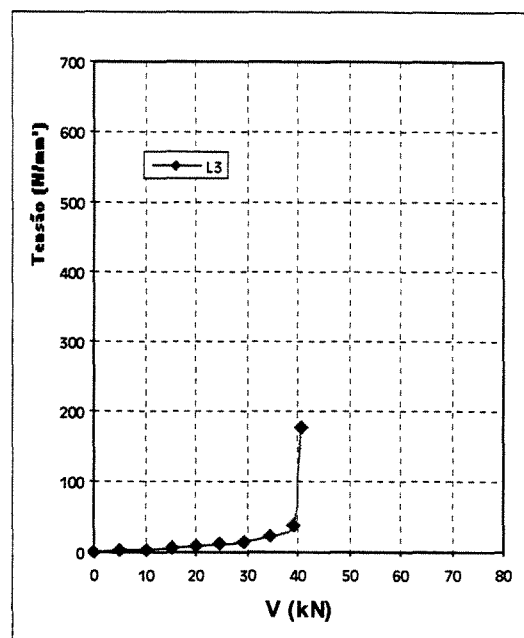
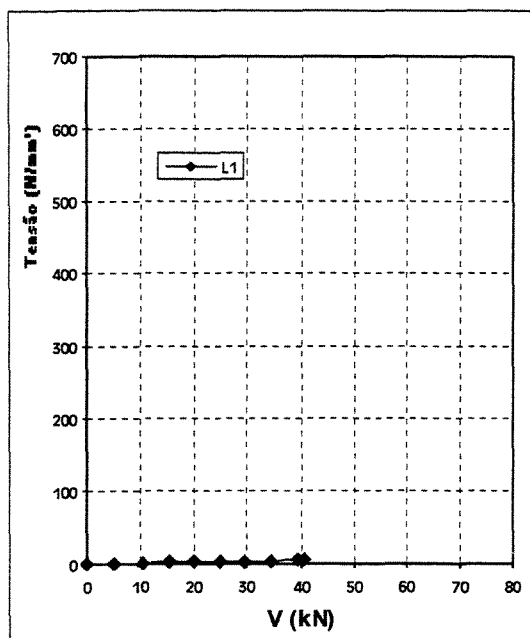
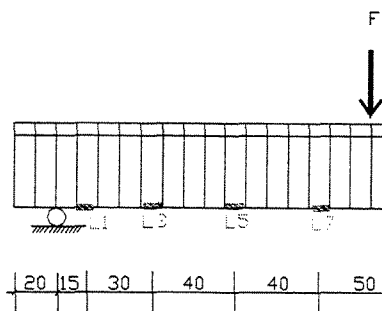
The structural repair and retrofit area has presented great development, since innovative techniques surged, like the use of carbon fibers reinforced composites. This paper will investigate the behavior of flexural strengthened reinforced concrete beams by the use of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). Six reinforced concrete beams with identical reinforcement and concrete compressive strength, but strengthened by different ways with respect to the number of layers utilized and the anchorage, will be analyzed. The results will be compared with those of the control beam, with none flexural strengthening system.

keywords: flexure, carbon fibers, repair, retrofit, beam.

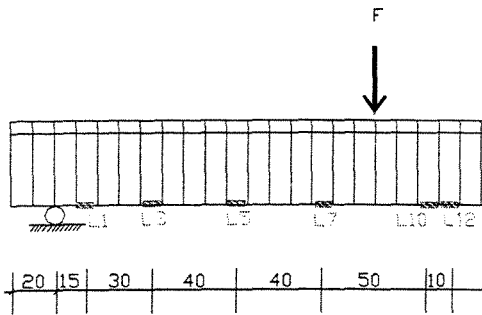
ANEXO A

OBS: a ausência de diagrama de um determinado ponto instrumentado significa a ocorrência de algum problema na etapa de coleta de dados.

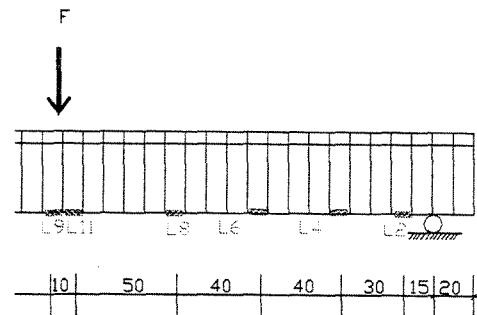
VIGA V1 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO ESQUERDO



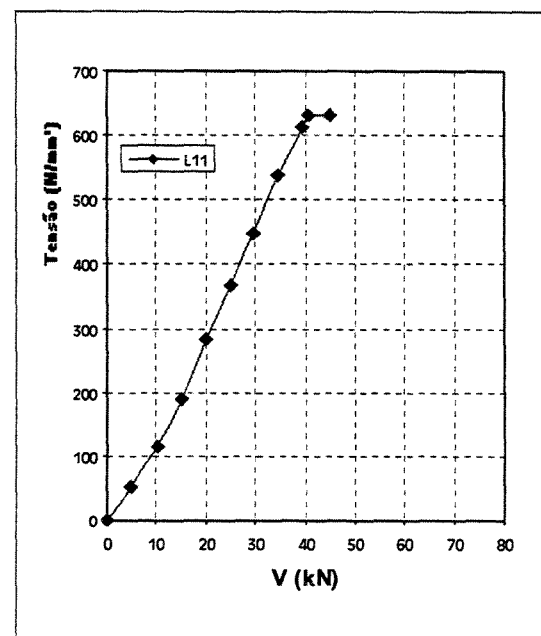
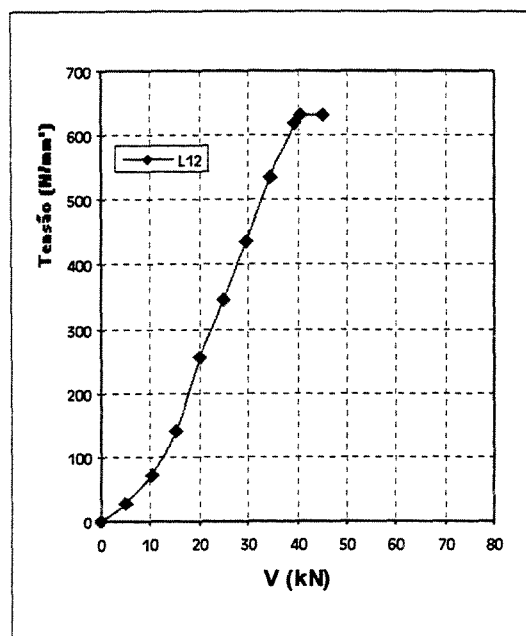
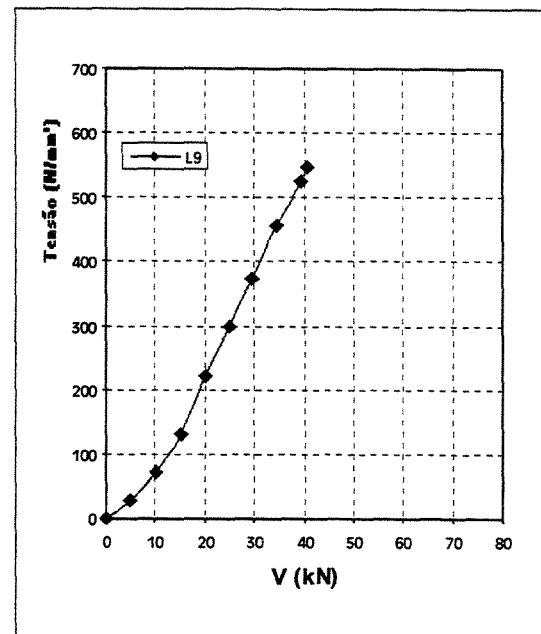
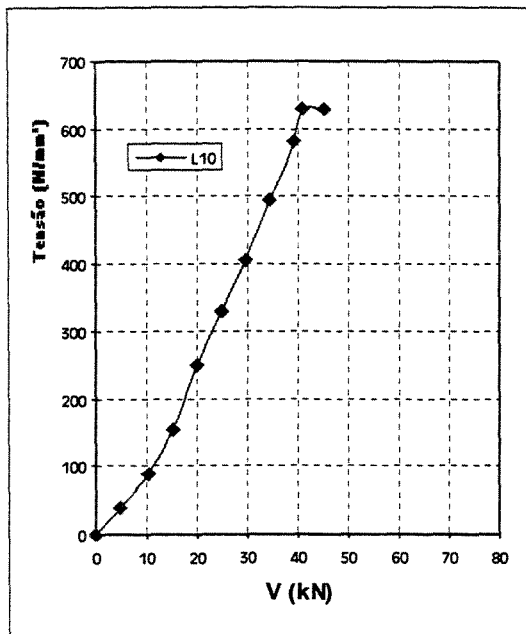
VIGA V1 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - MEIO DO VÃO



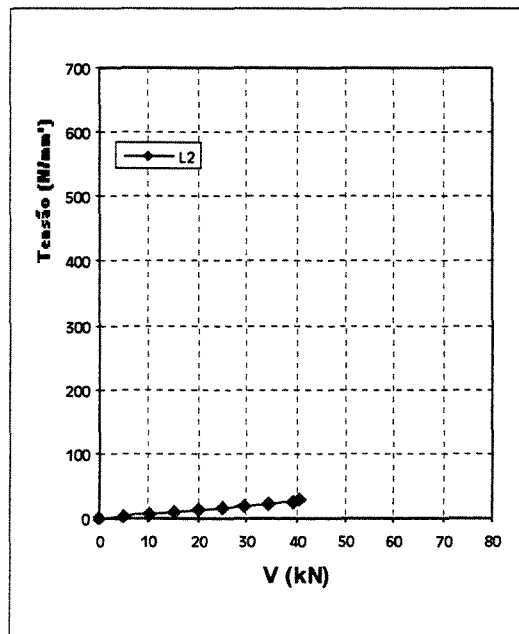
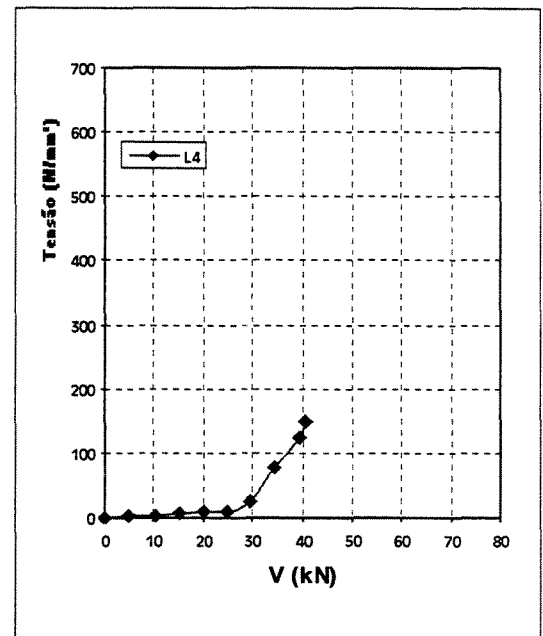
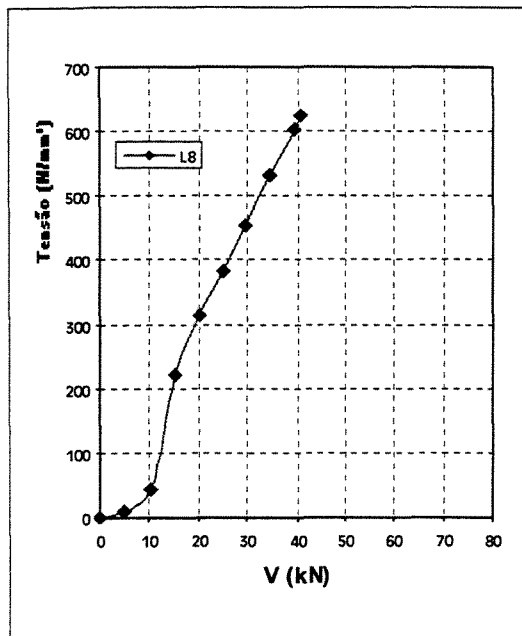
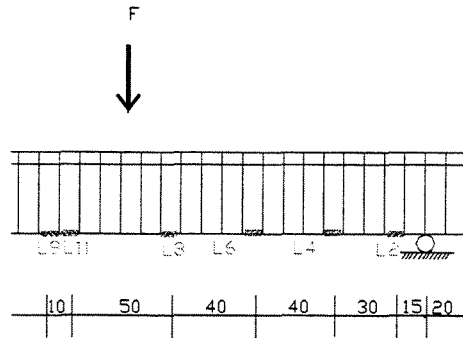
FRETE



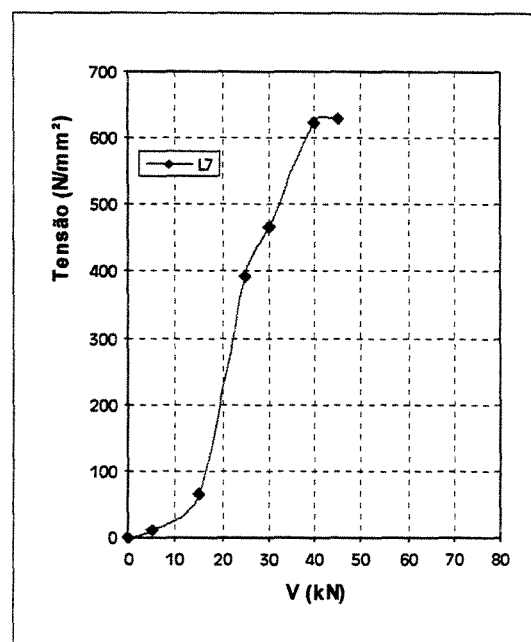
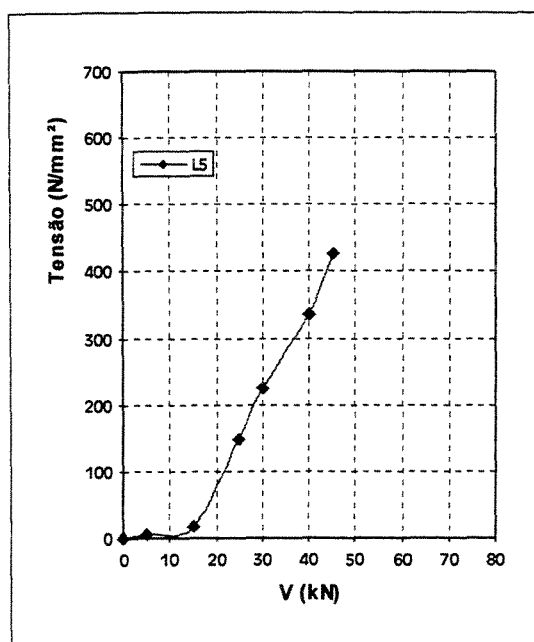
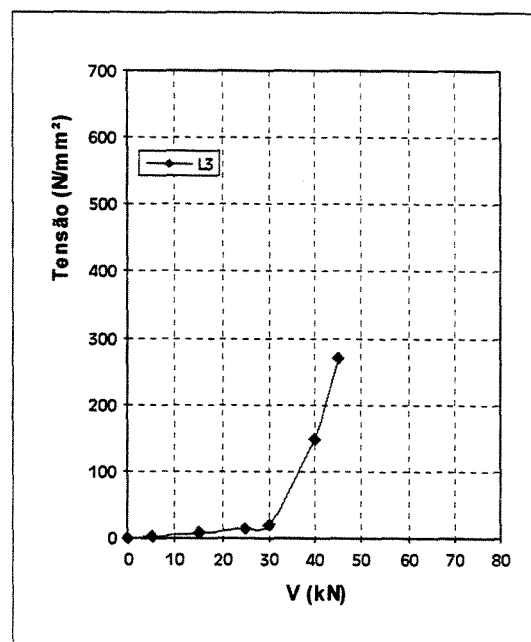
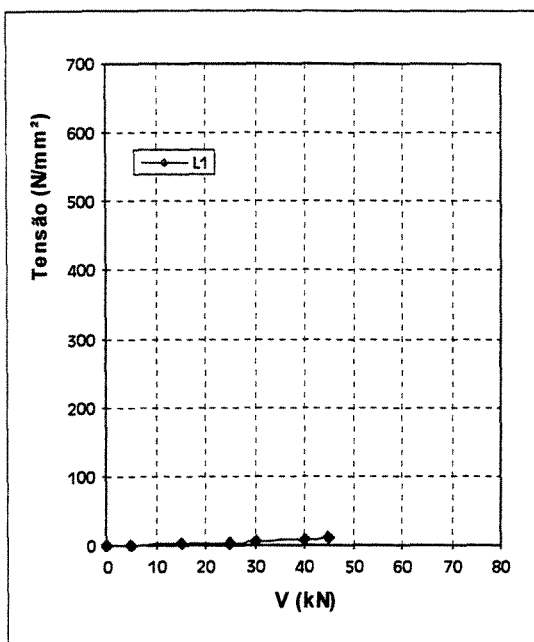
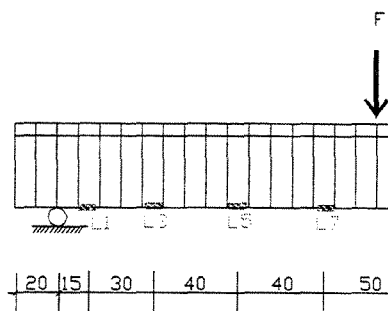
COSTAS



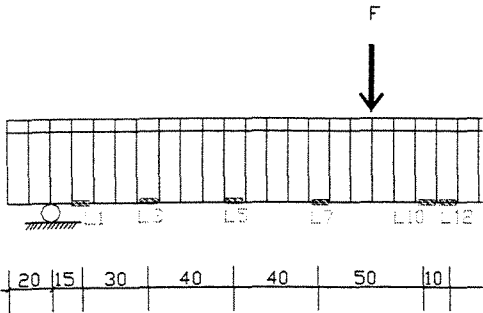
VIGA V1 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO DIREITO



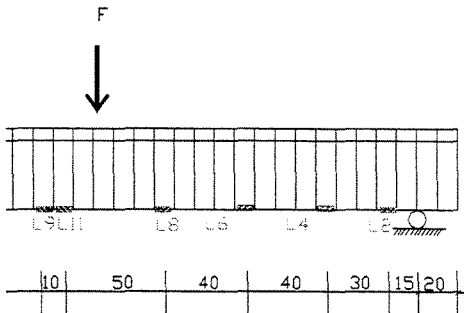
VIGA V2 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO ESQUERDO



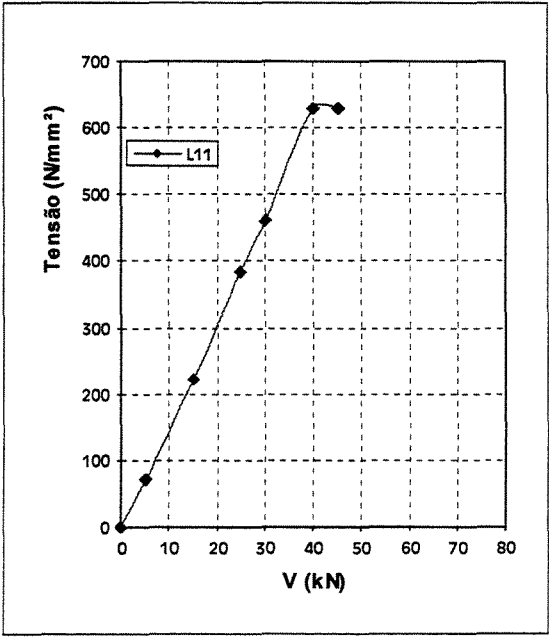
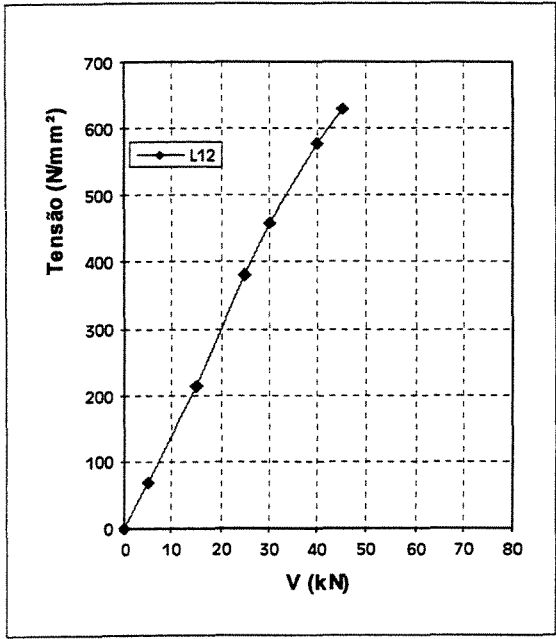
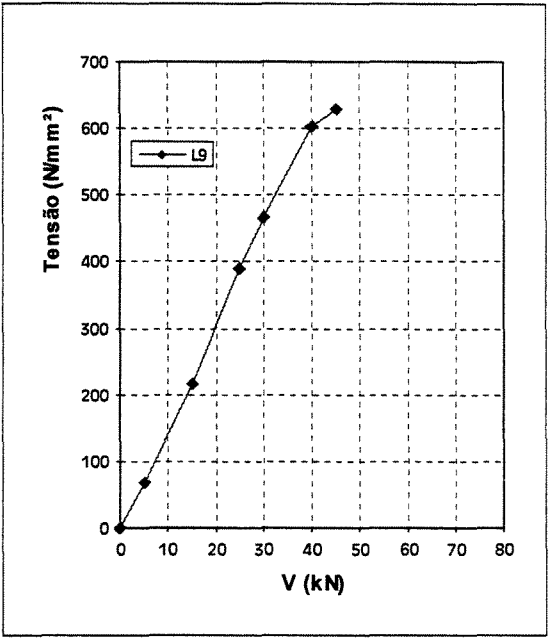
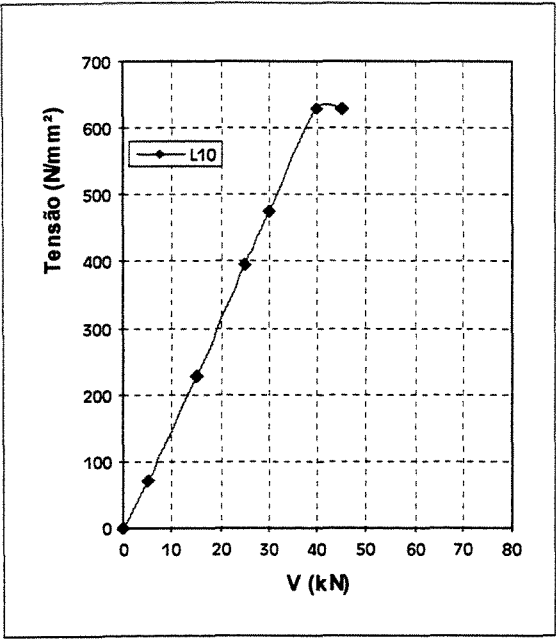
VIGA V2 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - MEIO DO VÃO



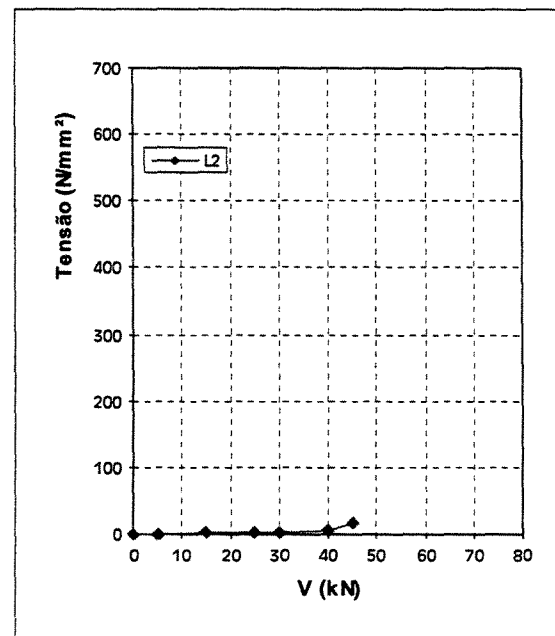
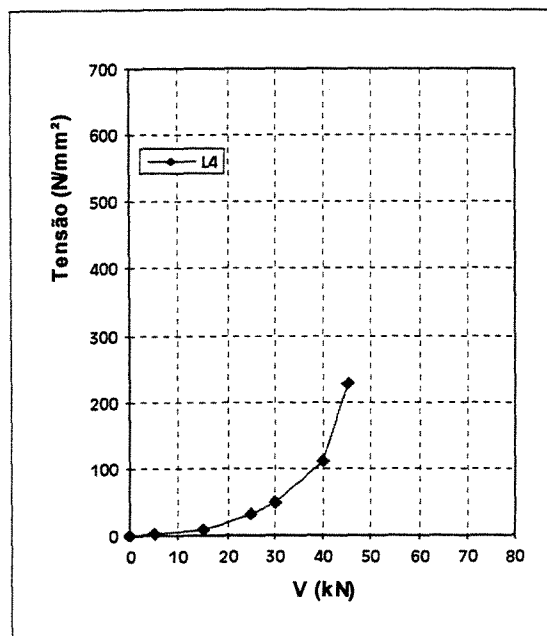
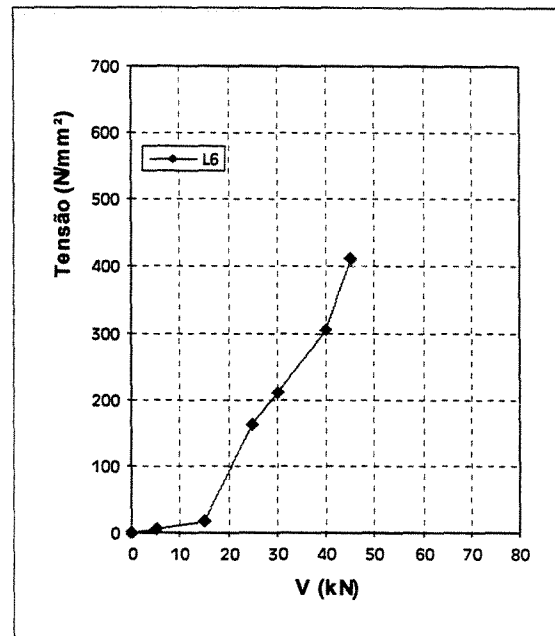
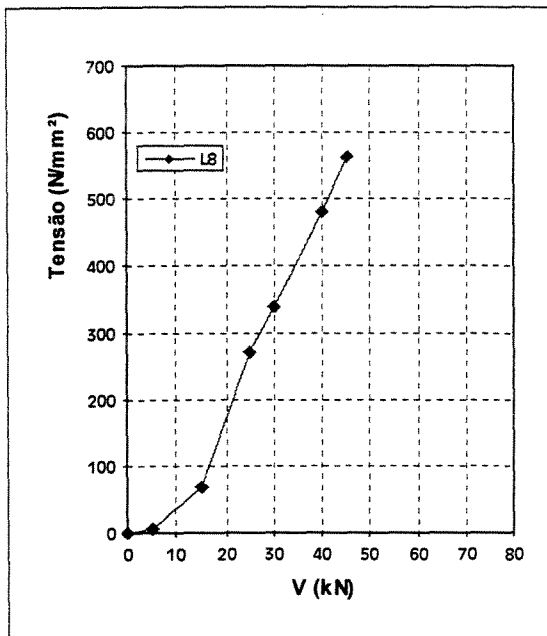
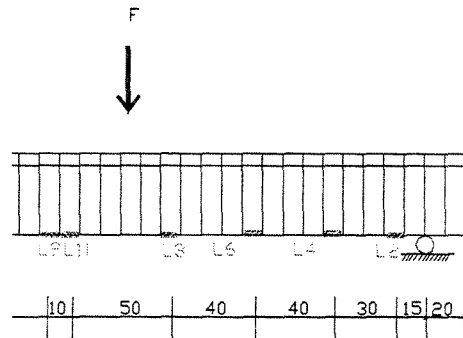
FRETE



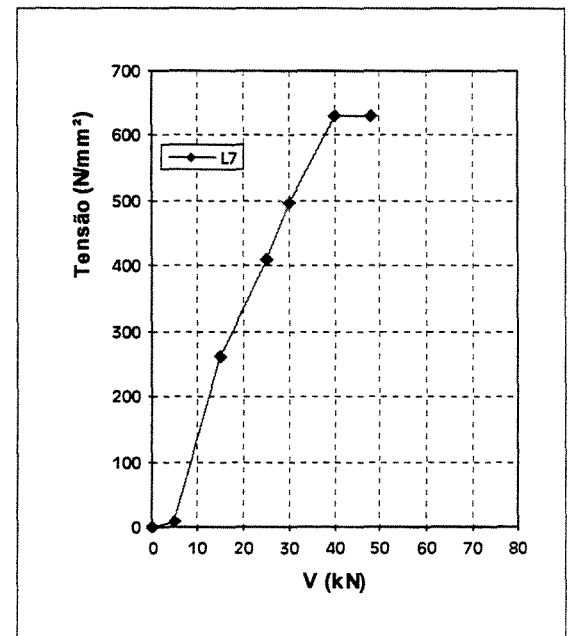
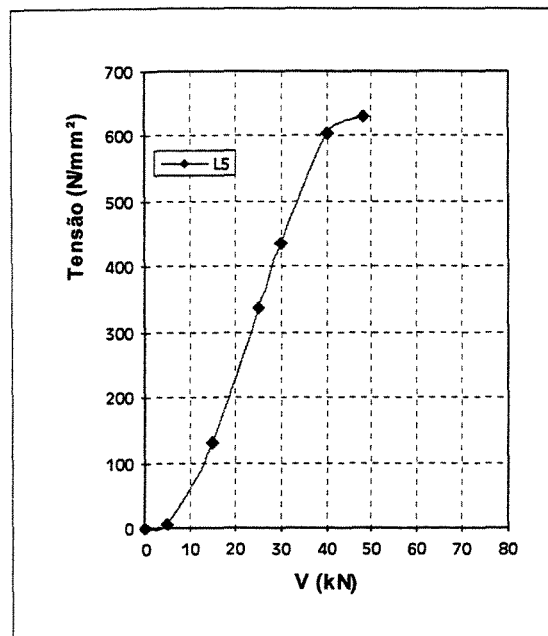
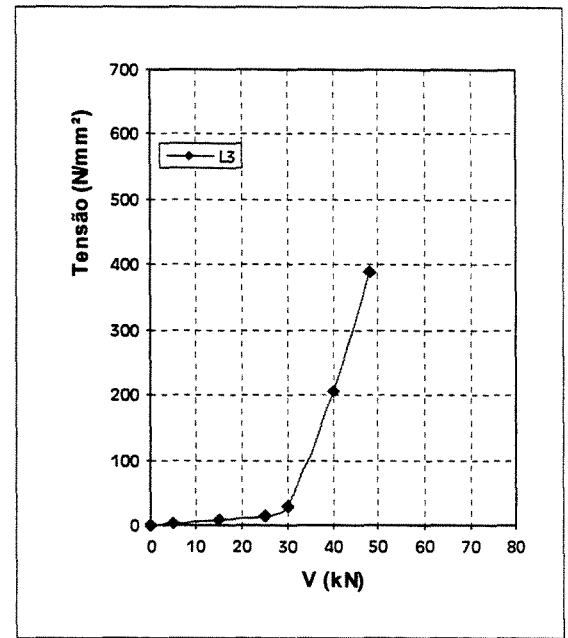
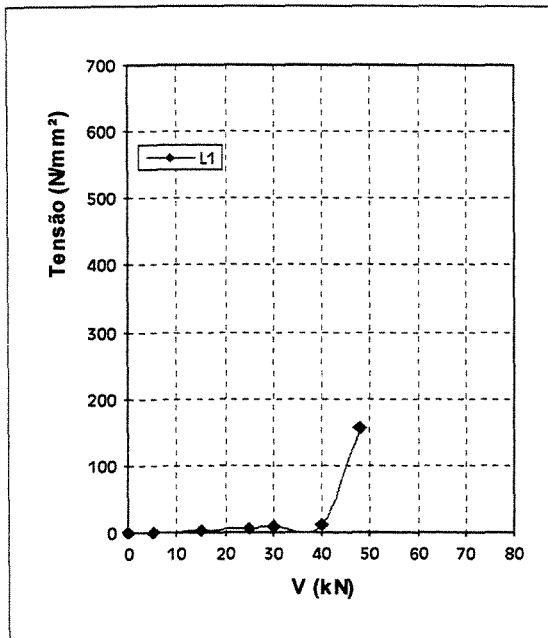
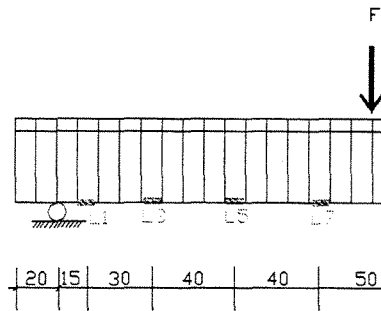
COSTAS



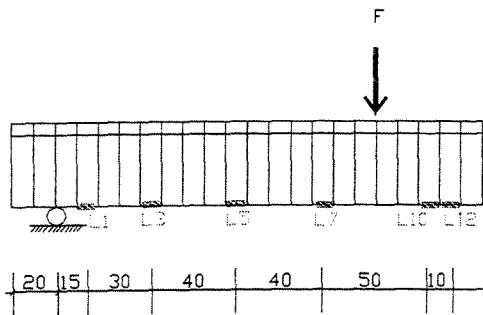
VIGA V2 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO DIREITO



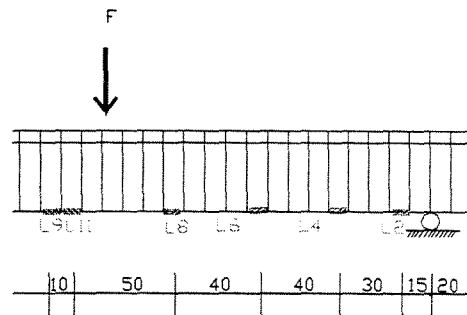
VIGA V3 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO ESQUERDO



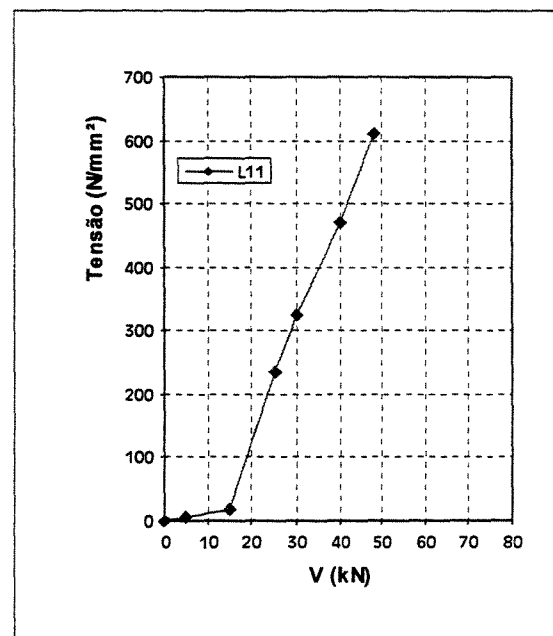
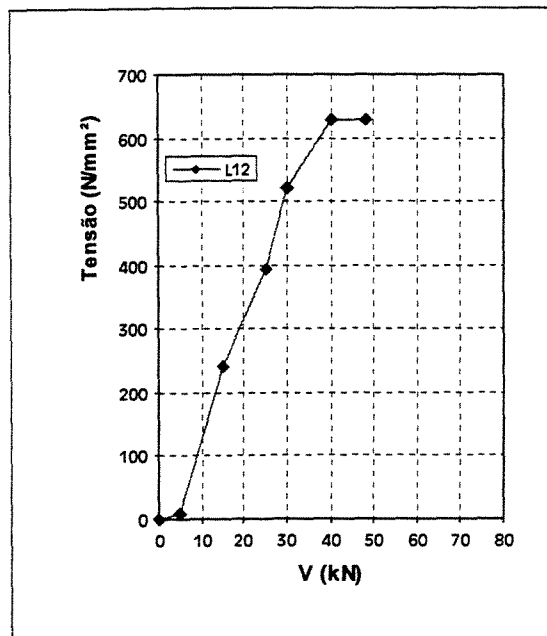
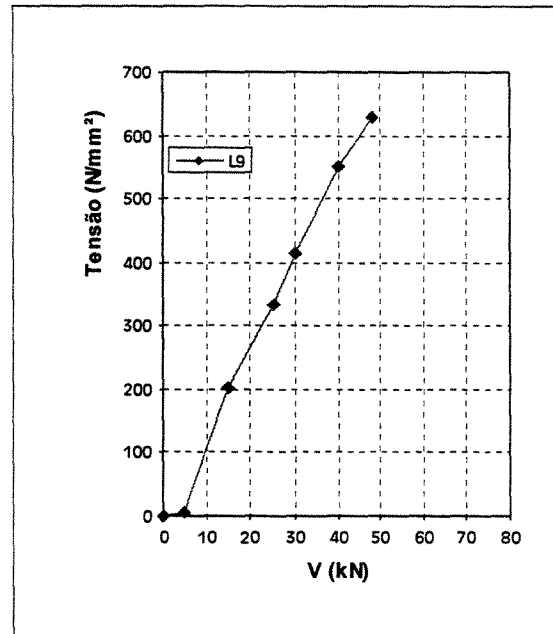
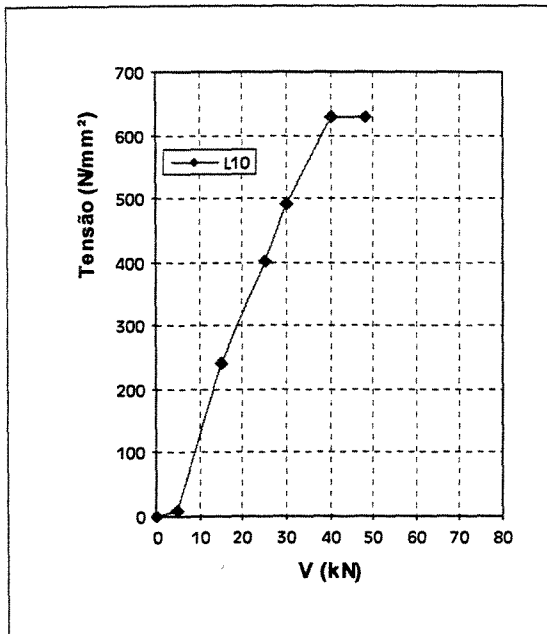
VIGA V3 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - MEIO DO VÃO



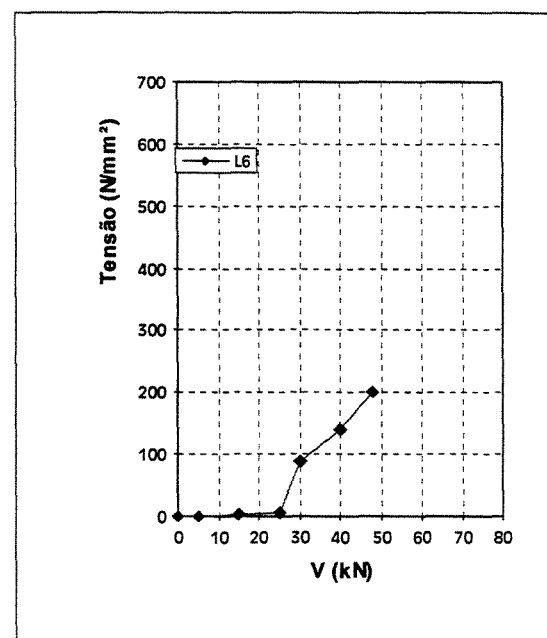
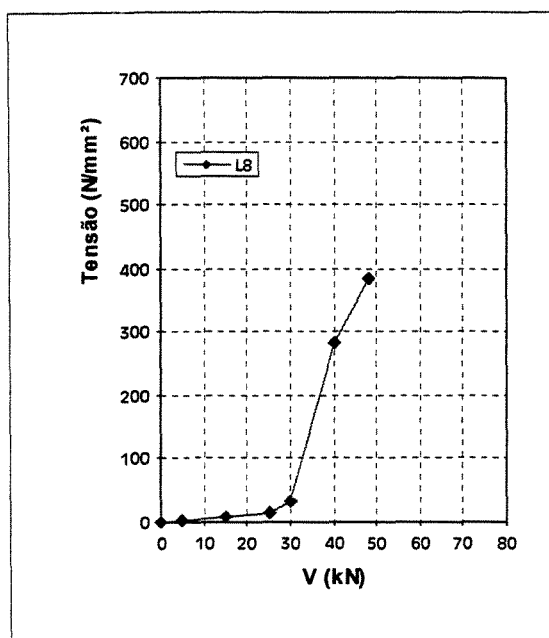
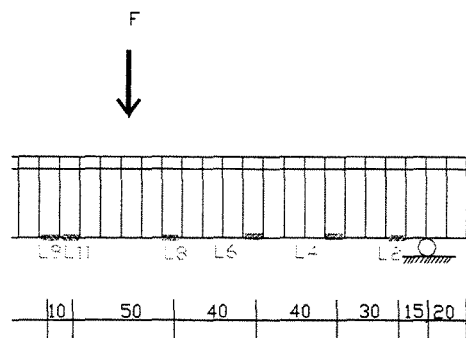
FRETE



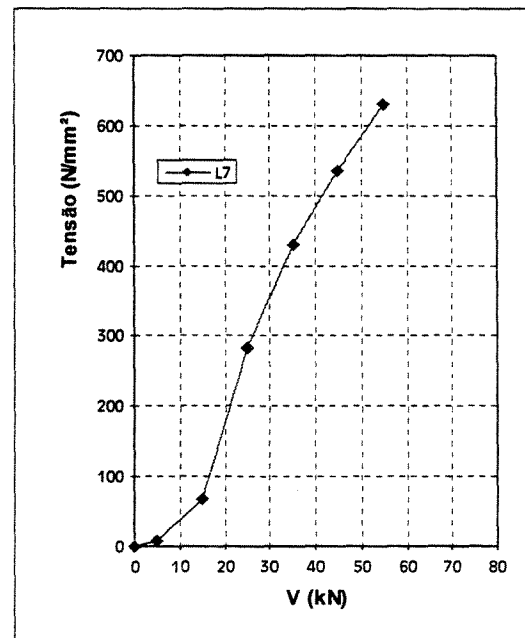
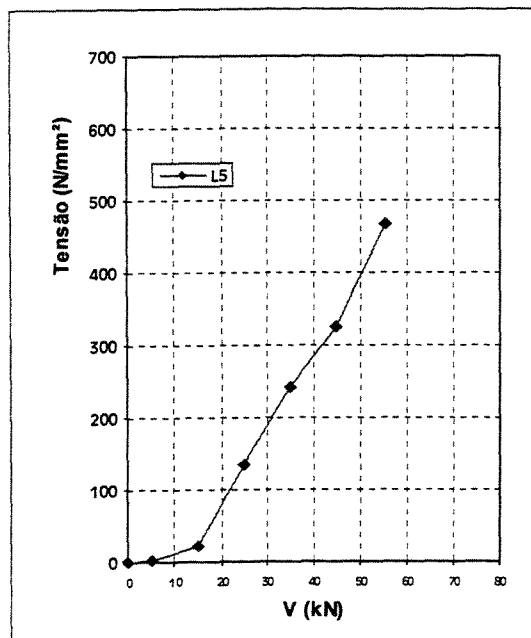
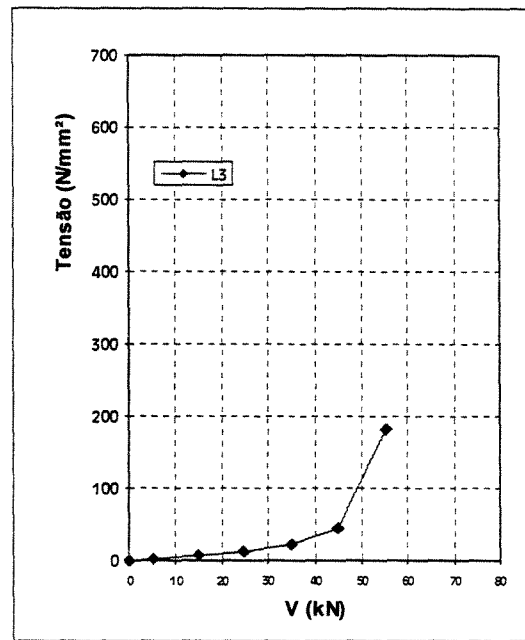
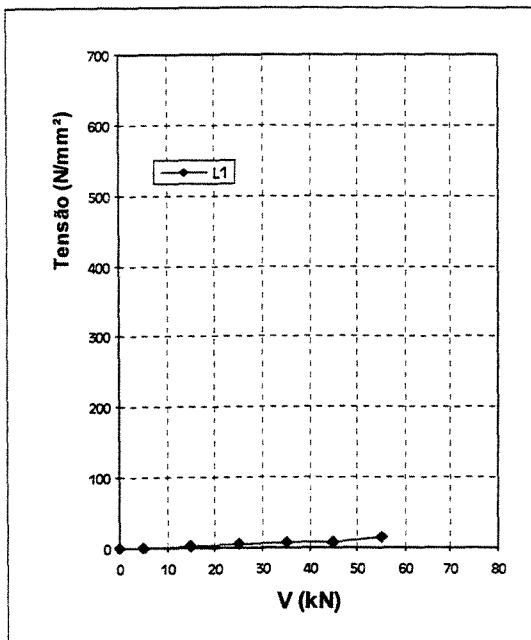
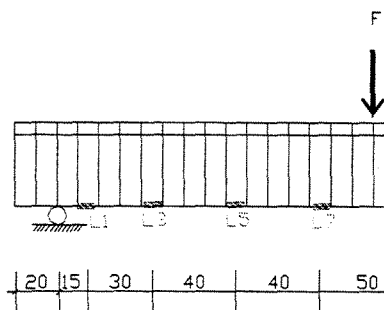
COSTAS



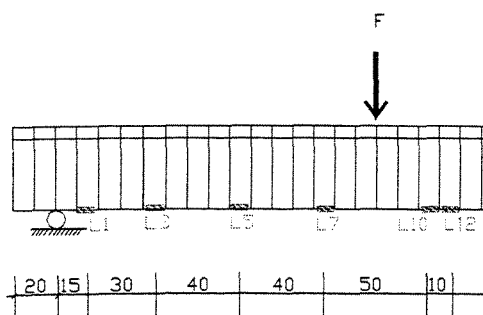
VIGA V3 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO DIREITO



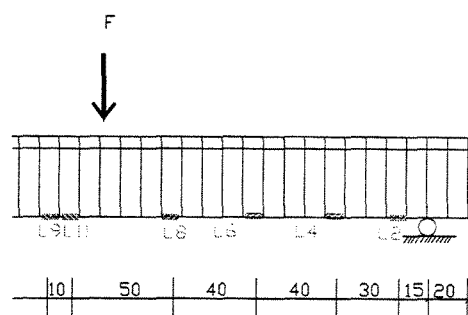
VIGA V4 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO ESQUERDO



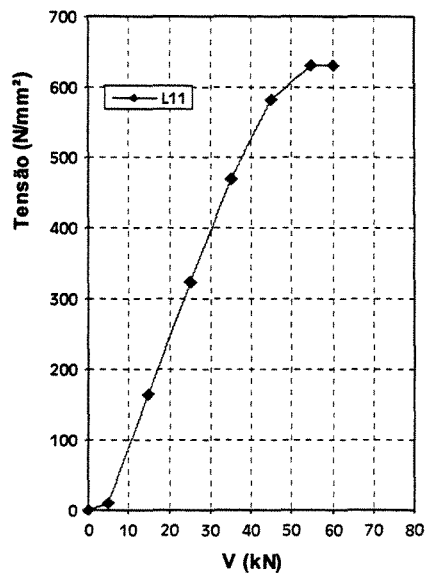
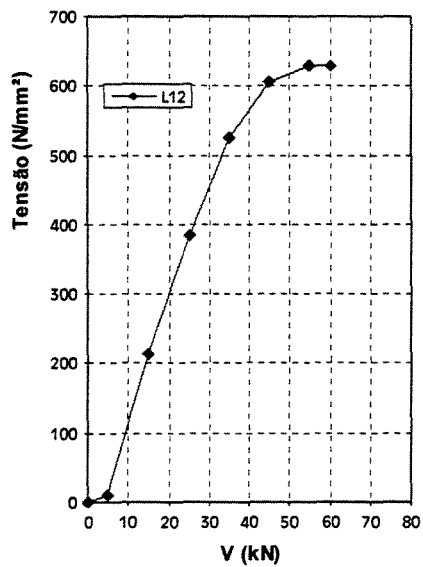
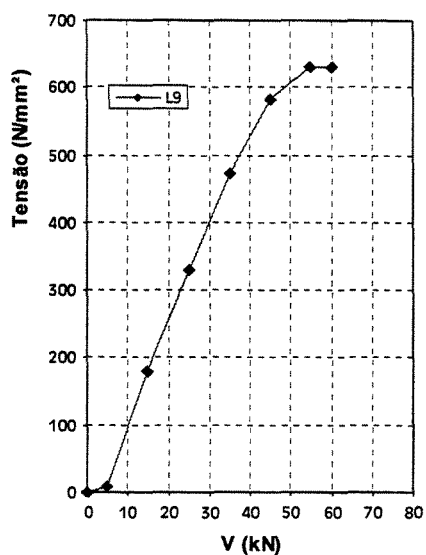
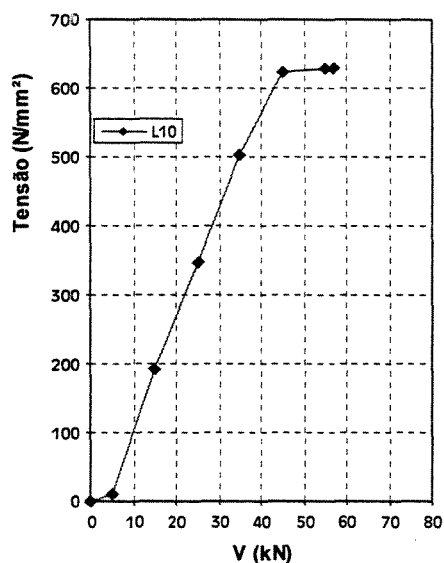
VIGA V4 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - MEIO DO VÃO



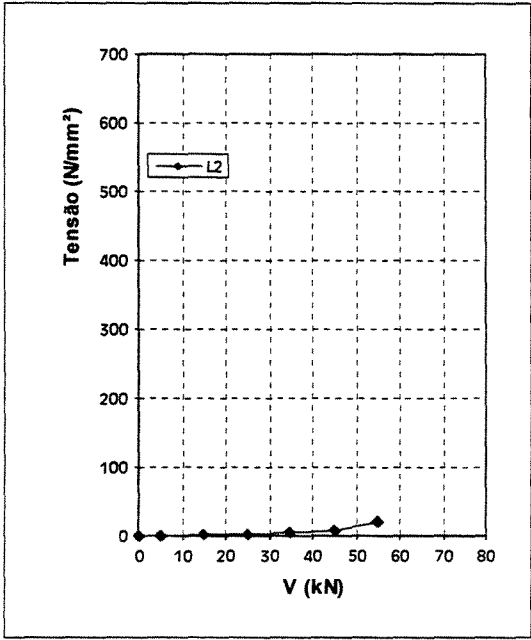
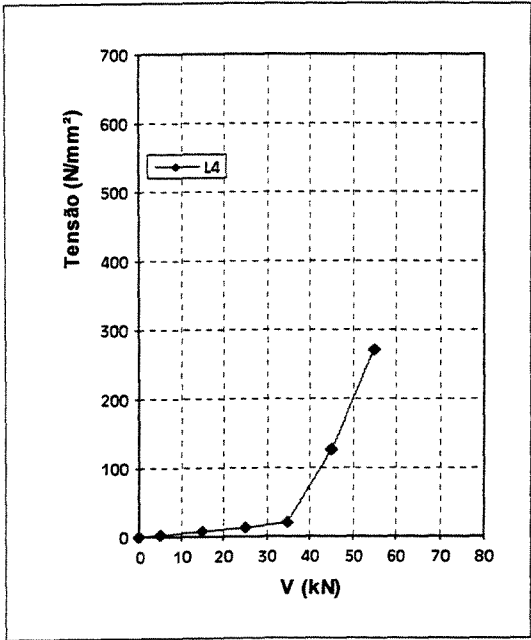
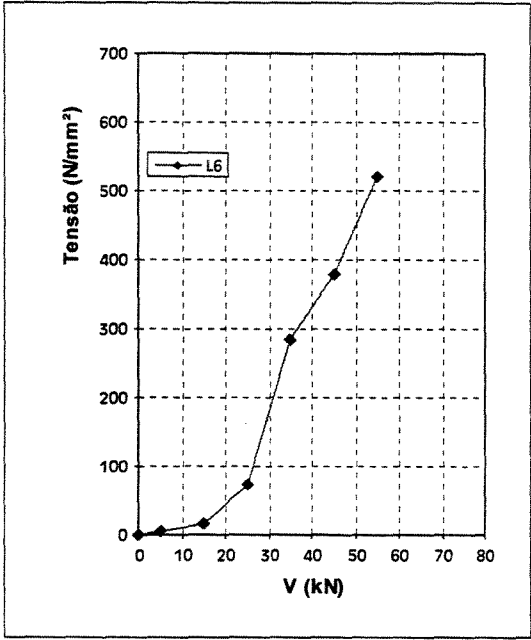
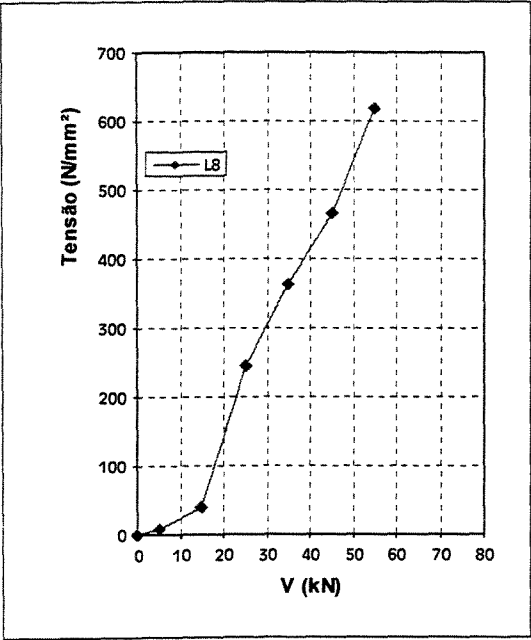
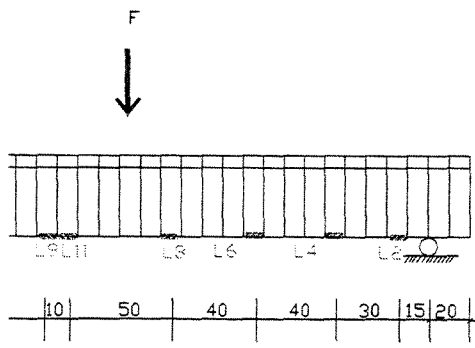
FRETE



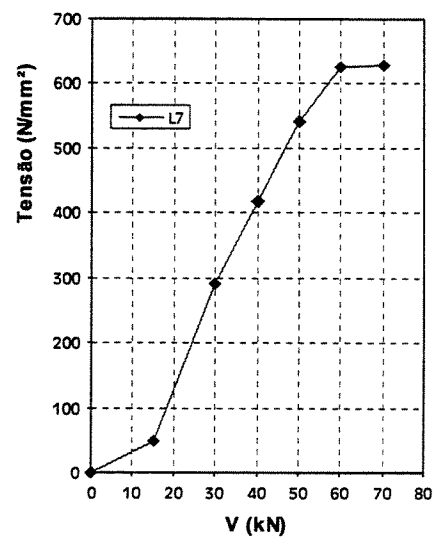
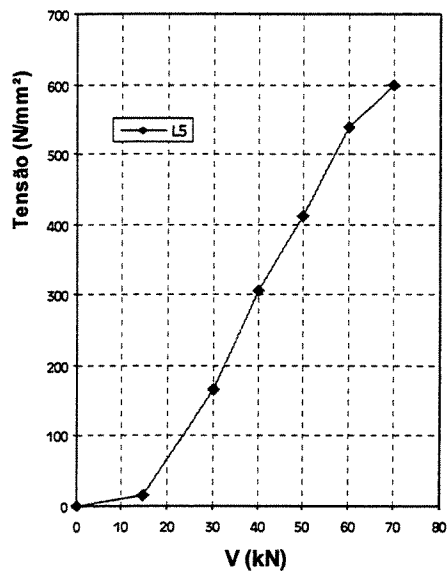
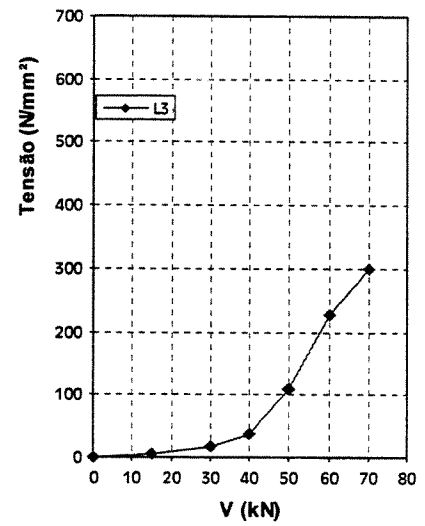
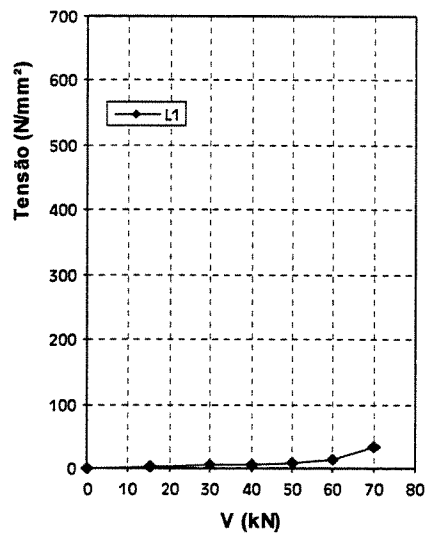
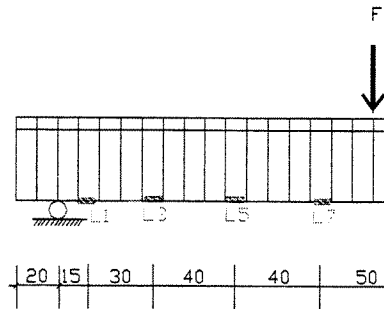
COSTAS



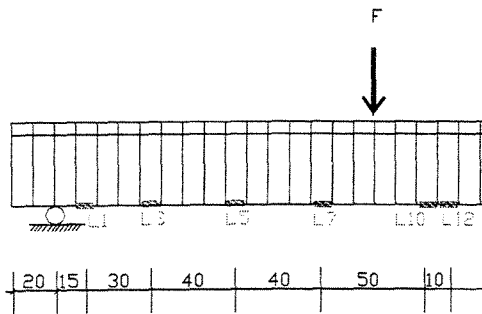
VIGA V4 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO DIREITO



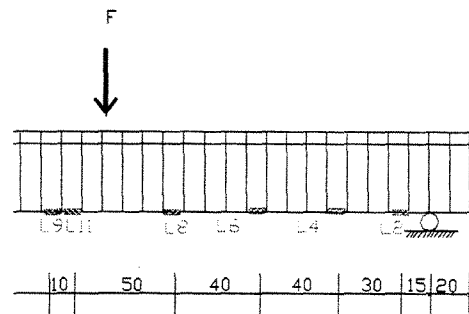
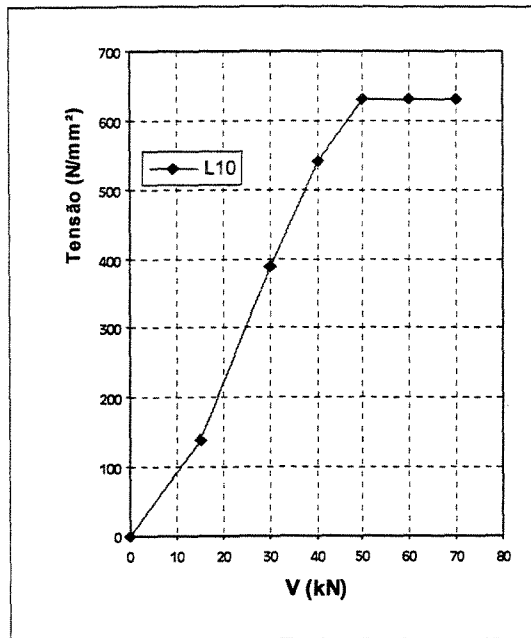
VIGA V5 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO ESQUERDO



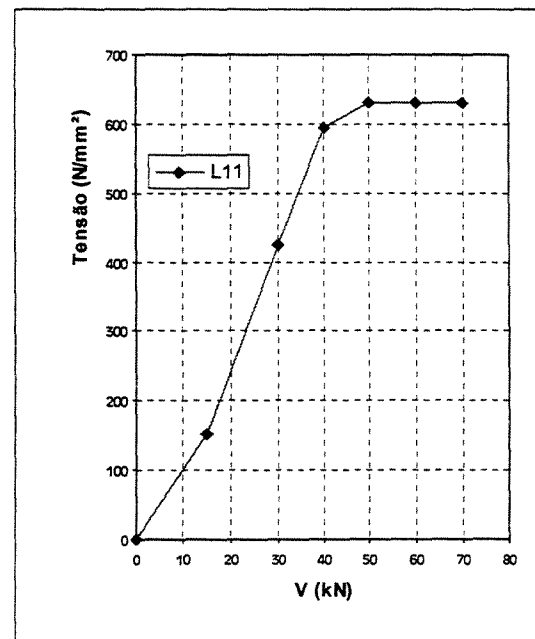
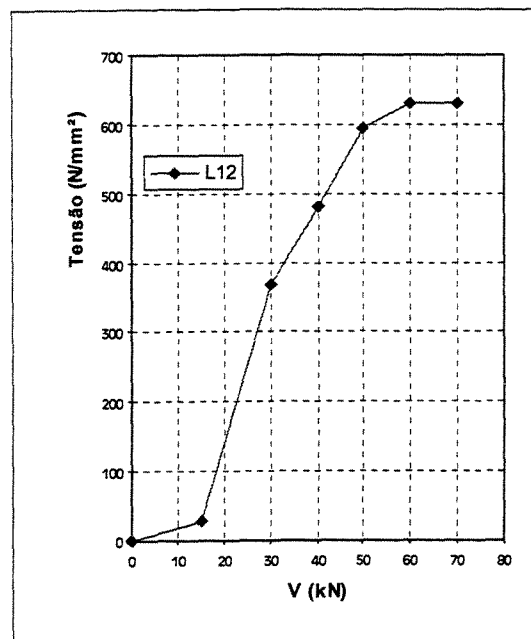
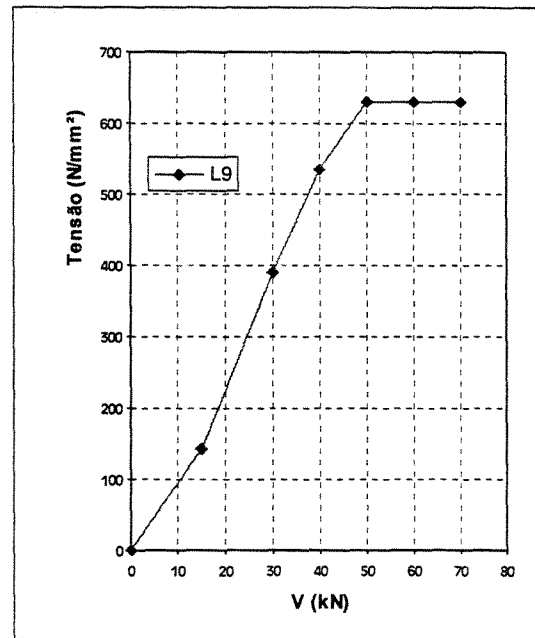
VIGA V5 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - MEIO DO VÃO



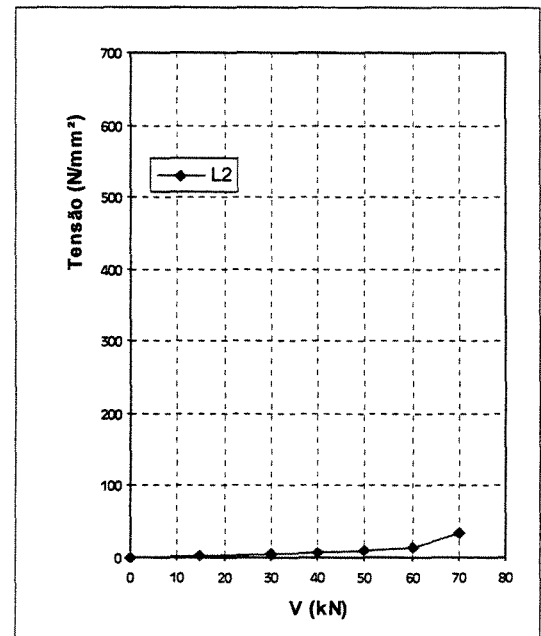
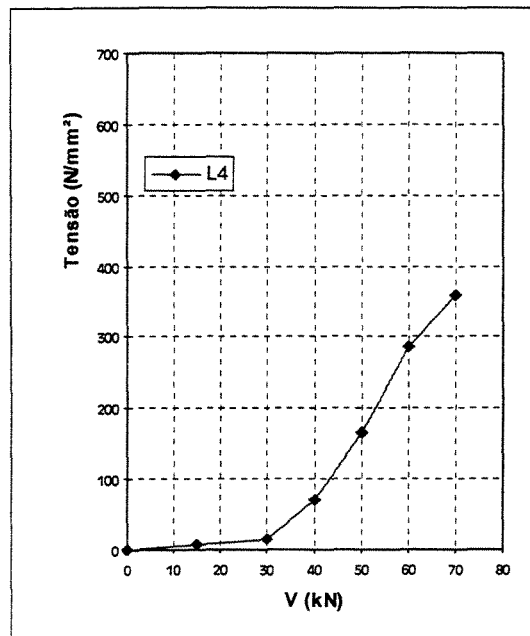
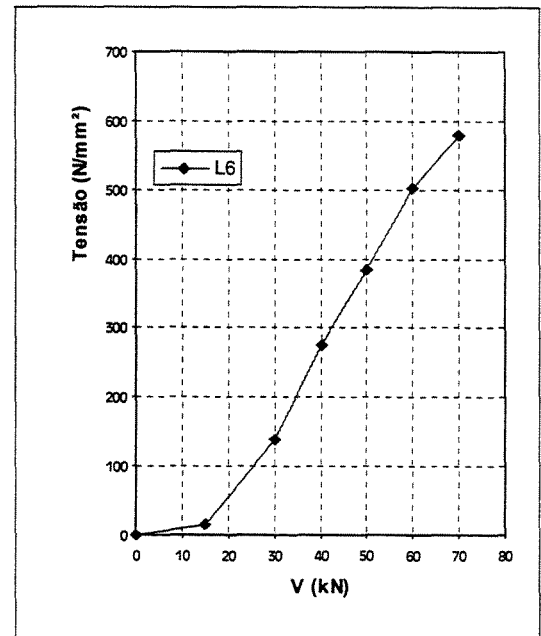
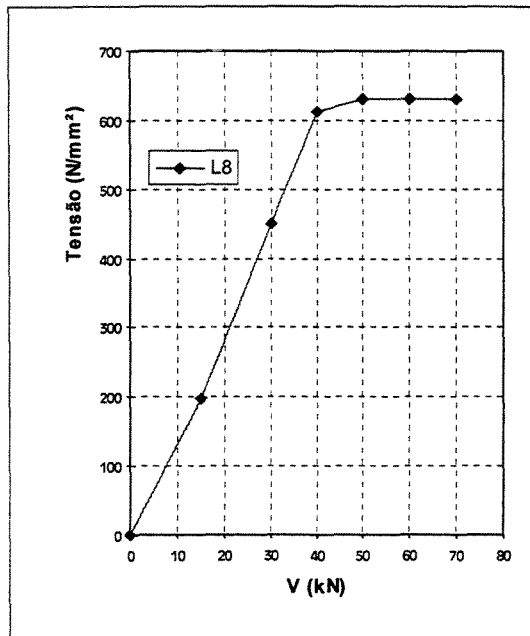
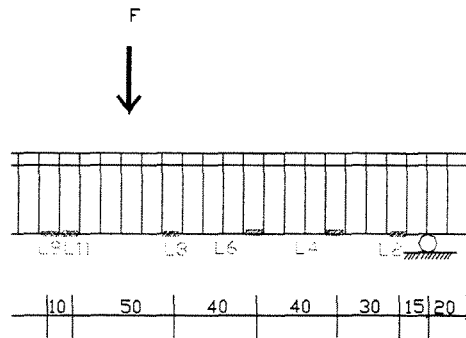
FRETE



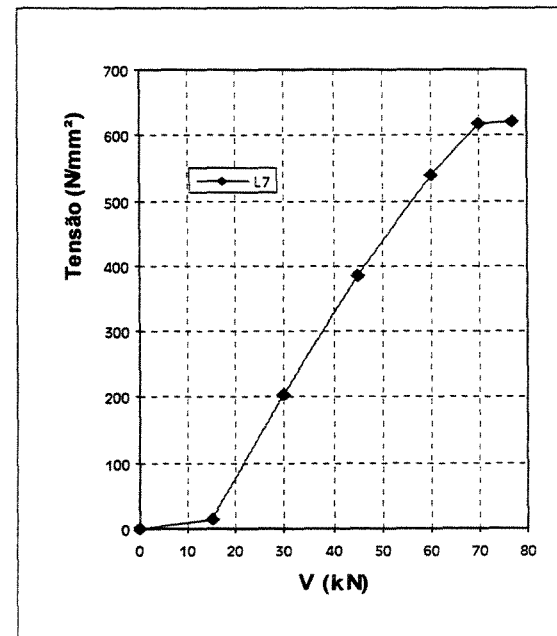
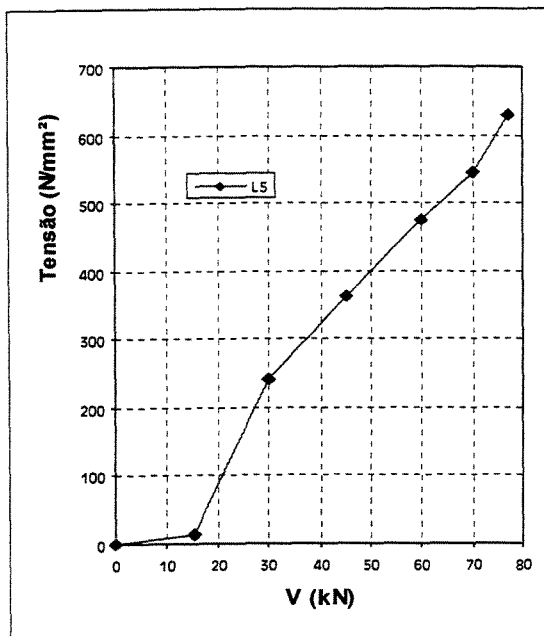
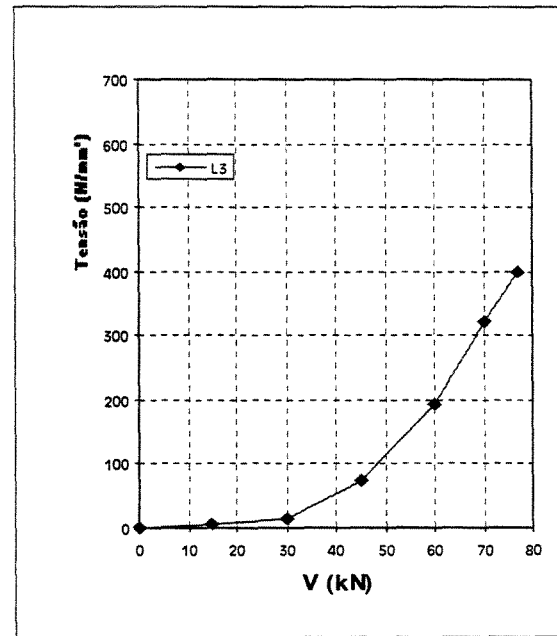
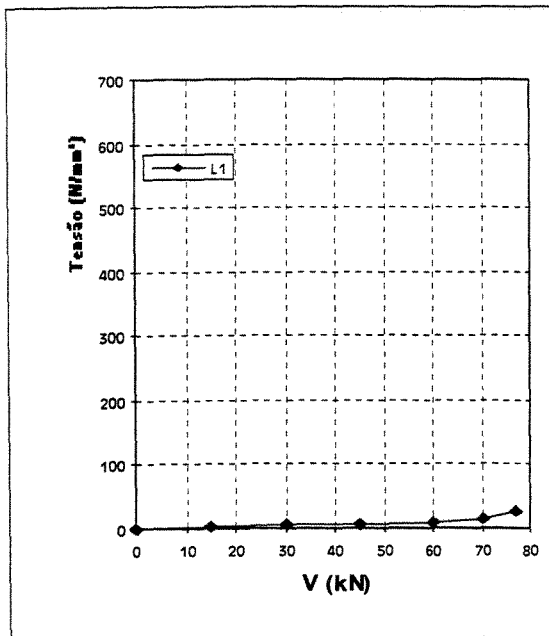
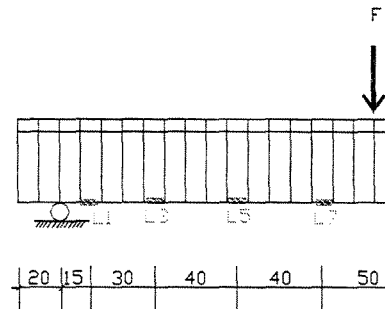
COSTAS



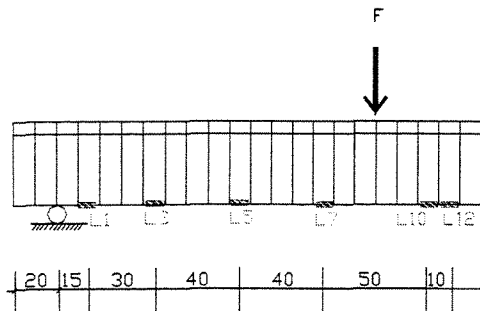
VIGA V5 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO DIREITO



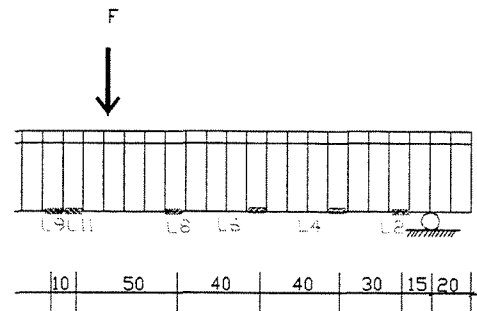
VIGA V6 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO ESQUERDO



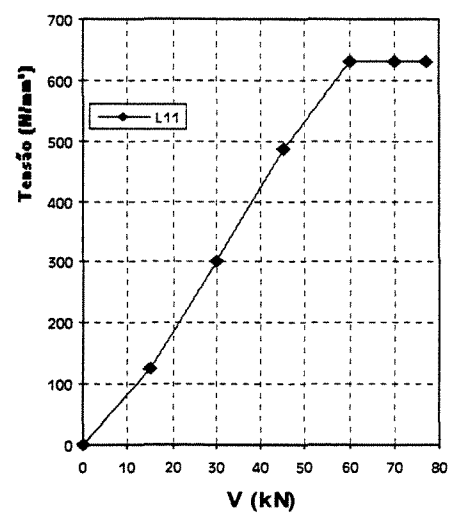
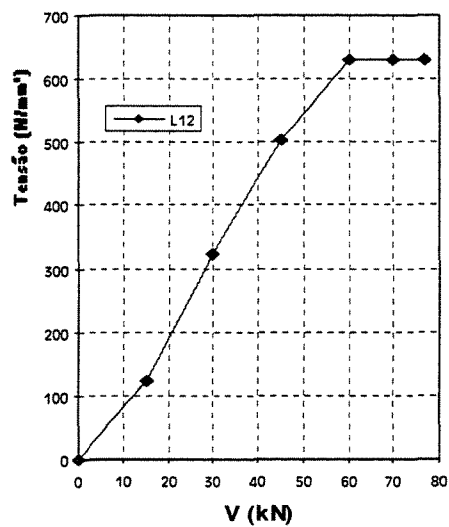
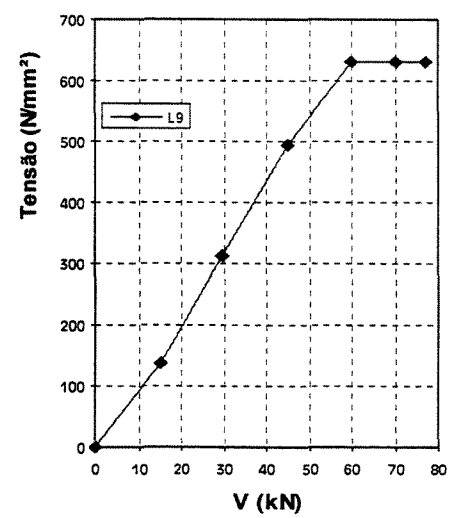
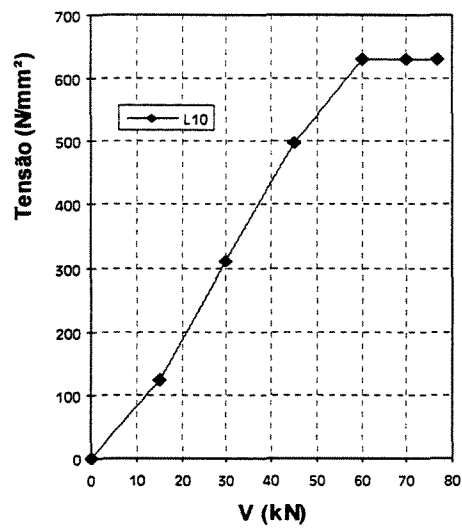
VIGA V6 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - MEIO DO VÃO



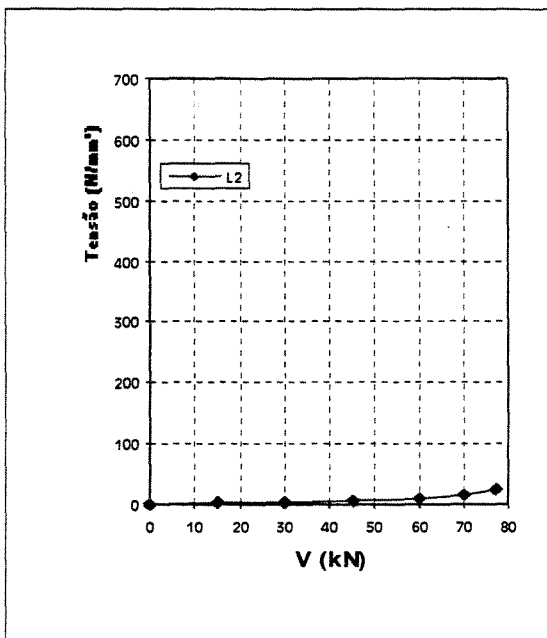
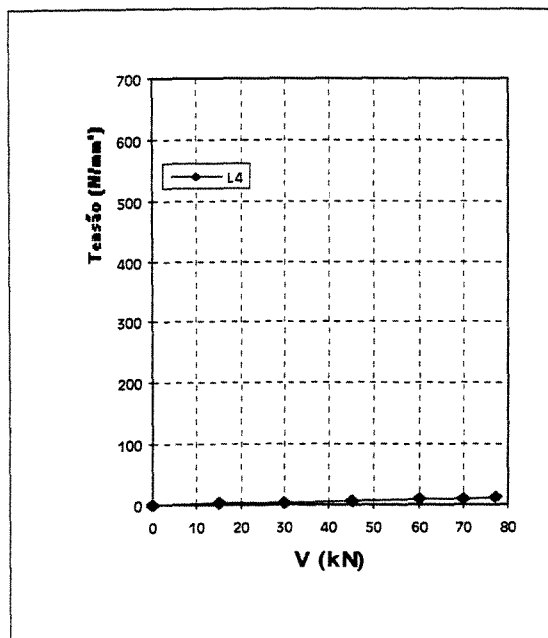
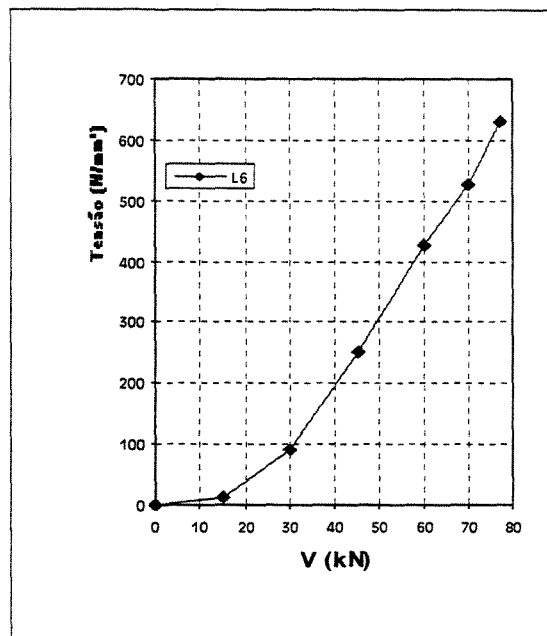
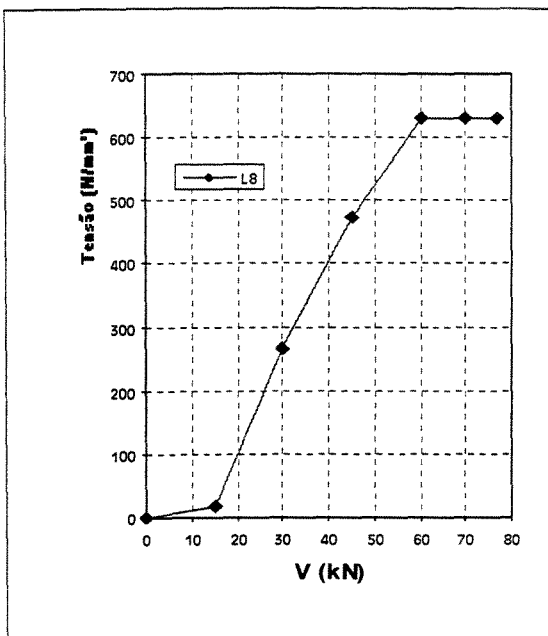
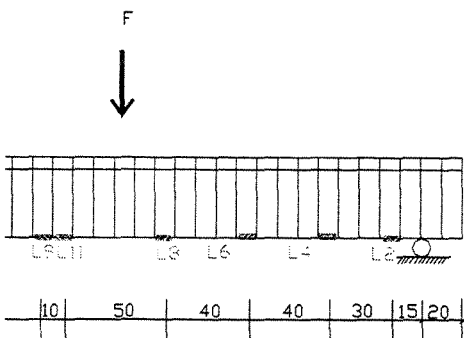
FRETE



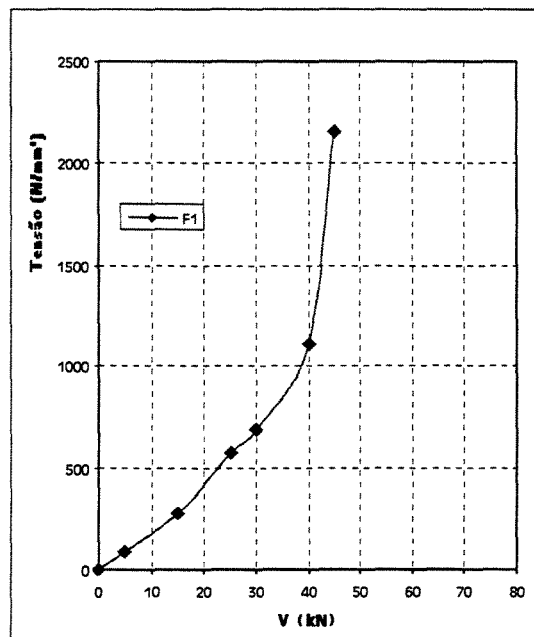
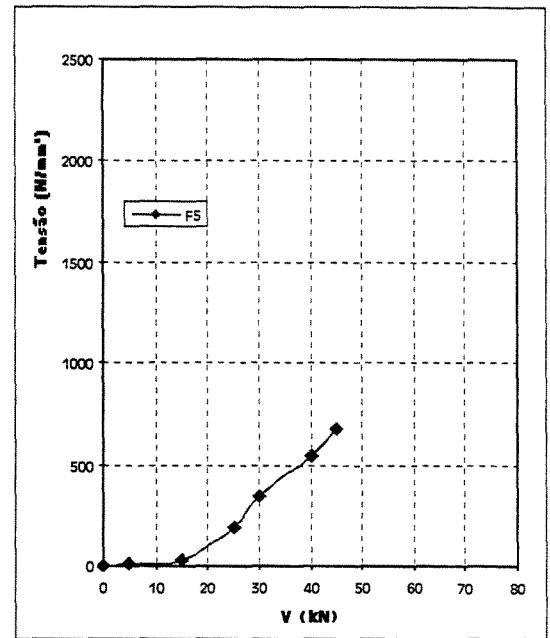
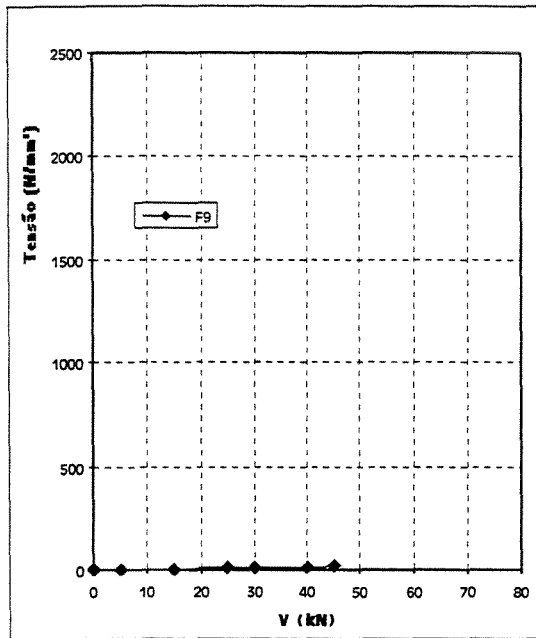
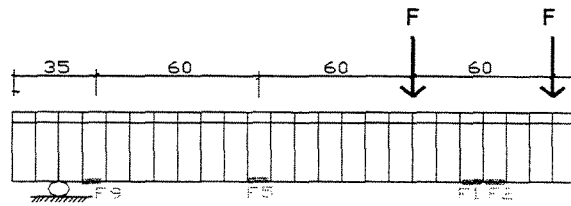
COSTAS



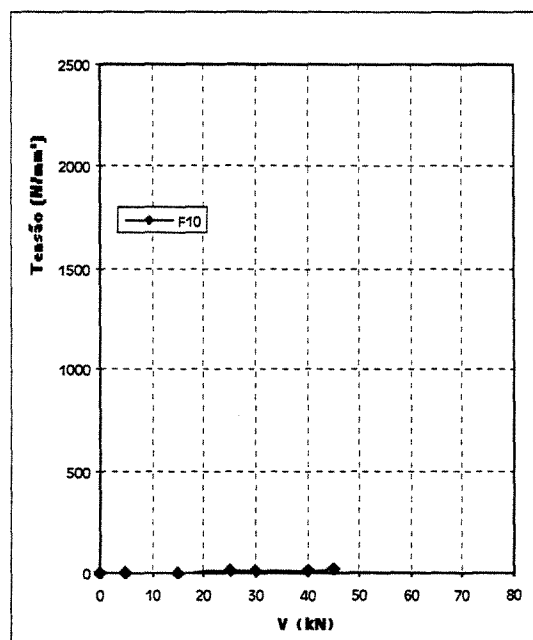
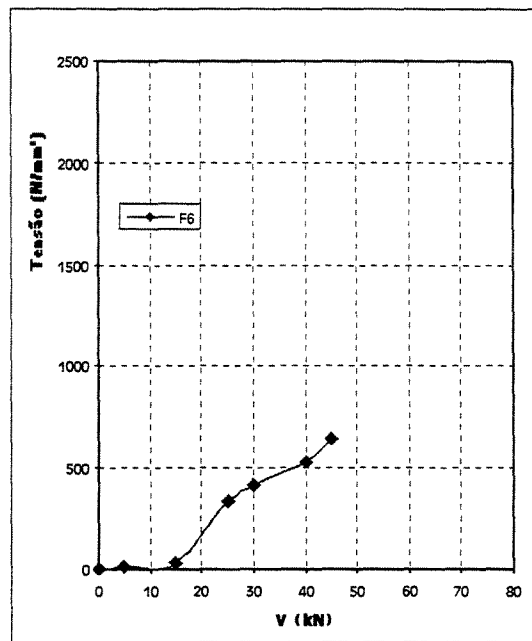
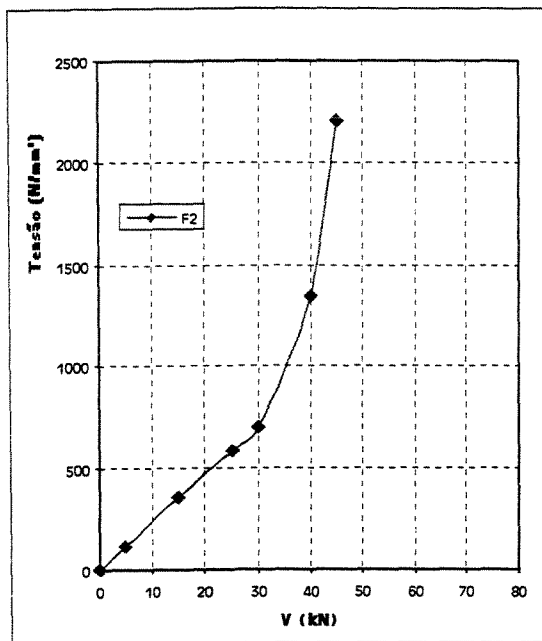
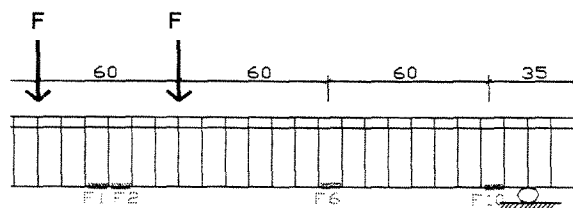
VIGA V6 - TENSÕES NAS ARMADURAS LONGITUDINAIS - LADO DIREITO



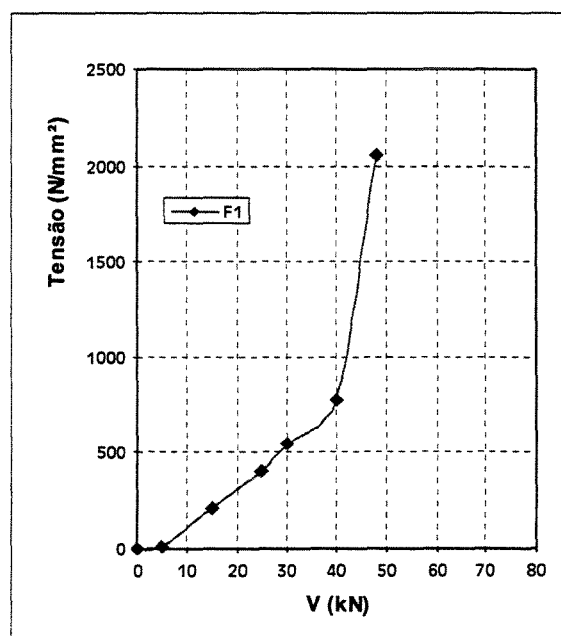
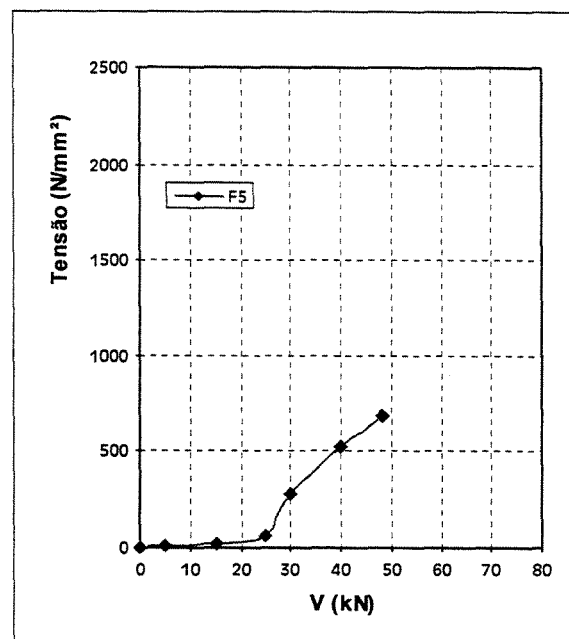
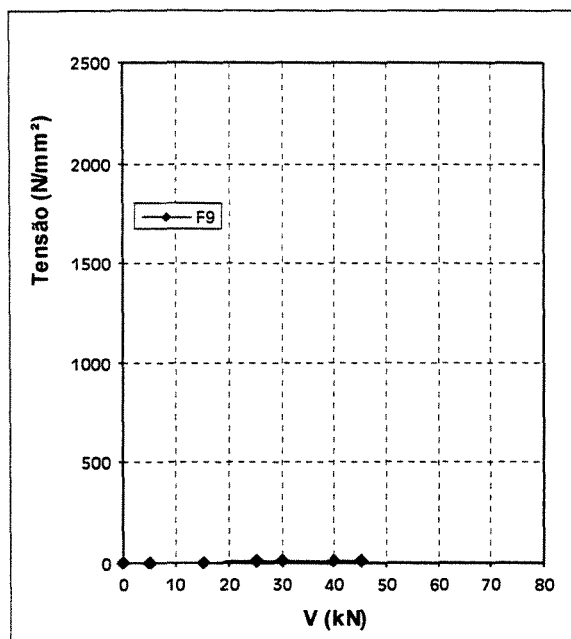
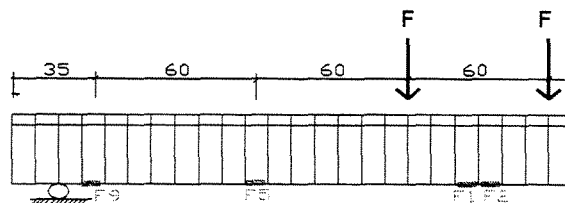
VIGA V2 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



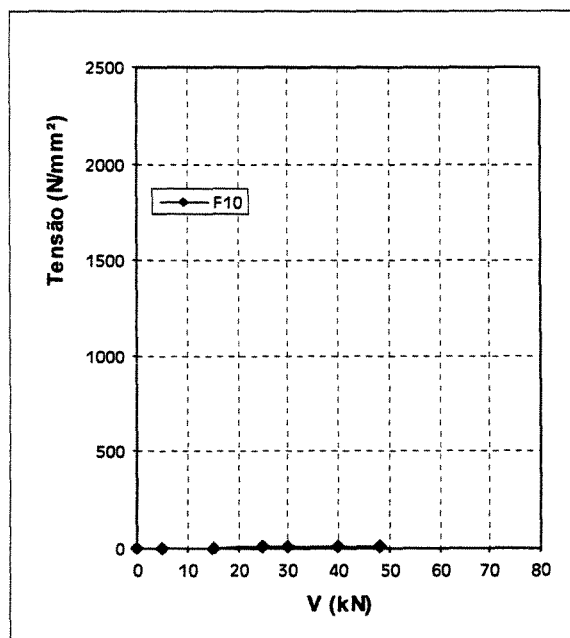
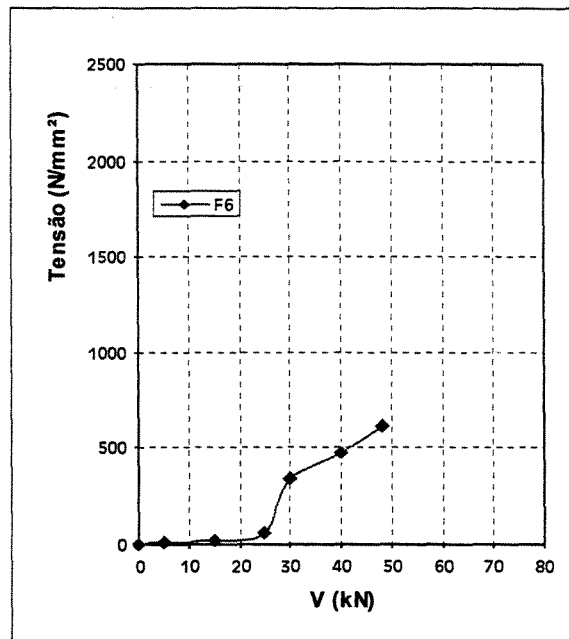
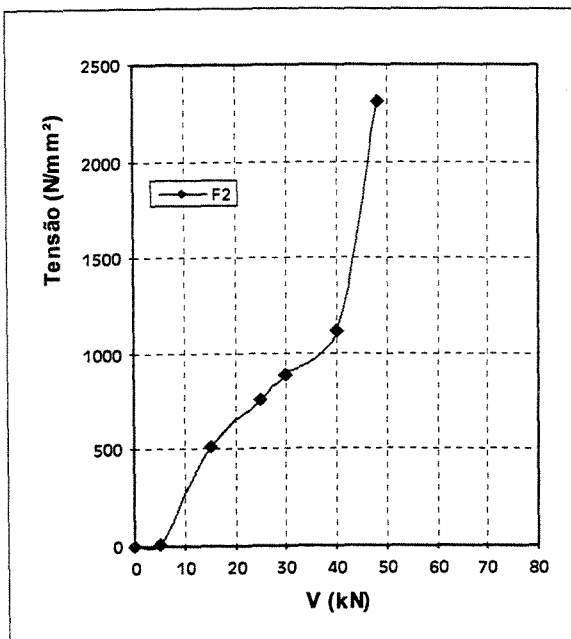
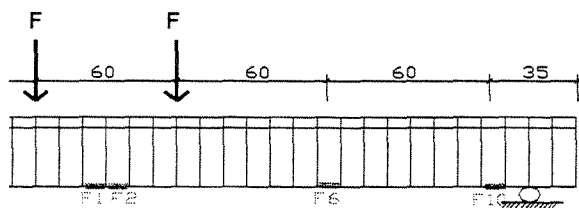
VIGA V2 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



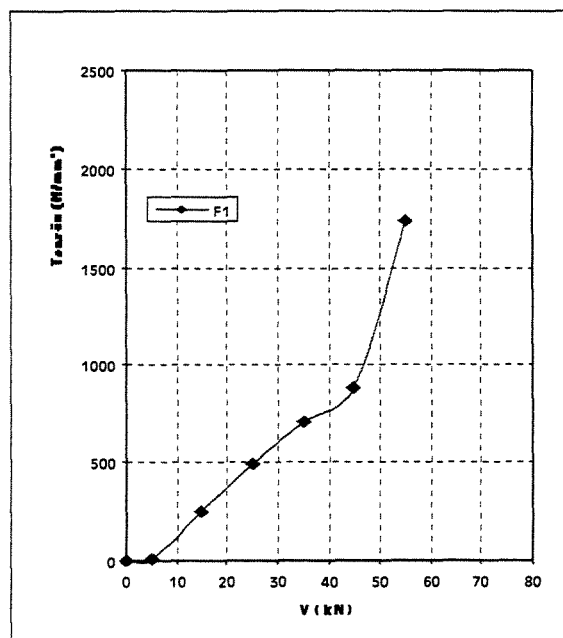
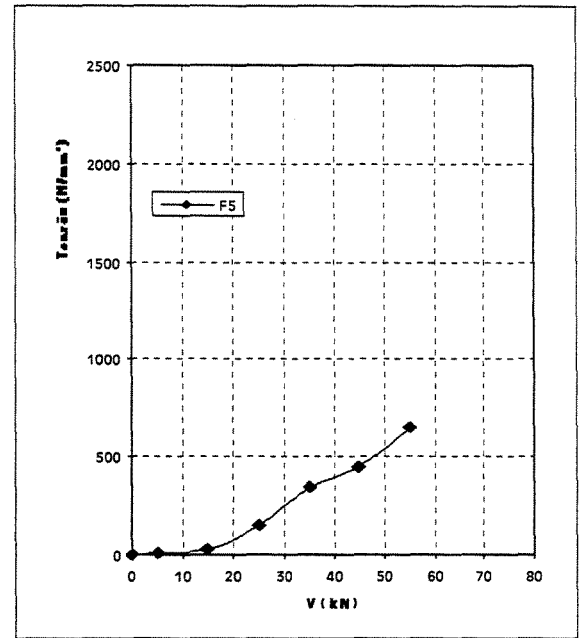
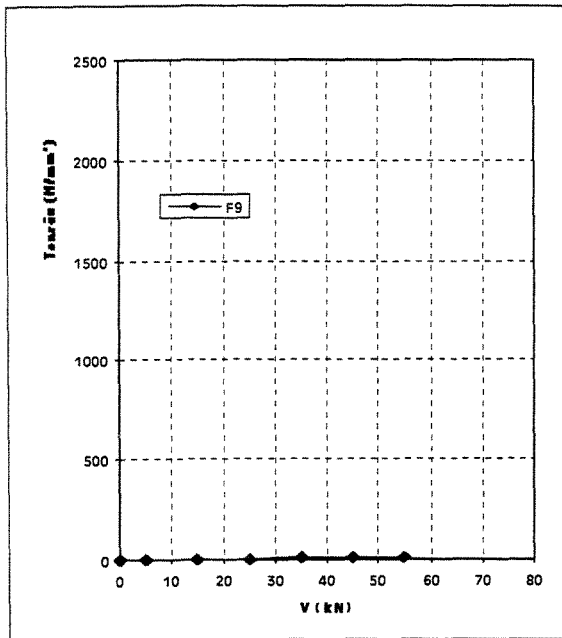
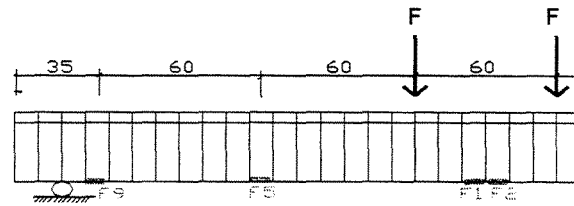
VIGA V3 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



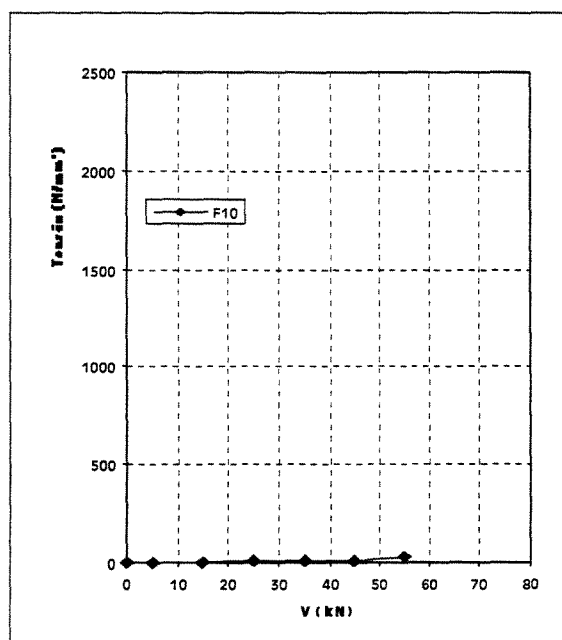
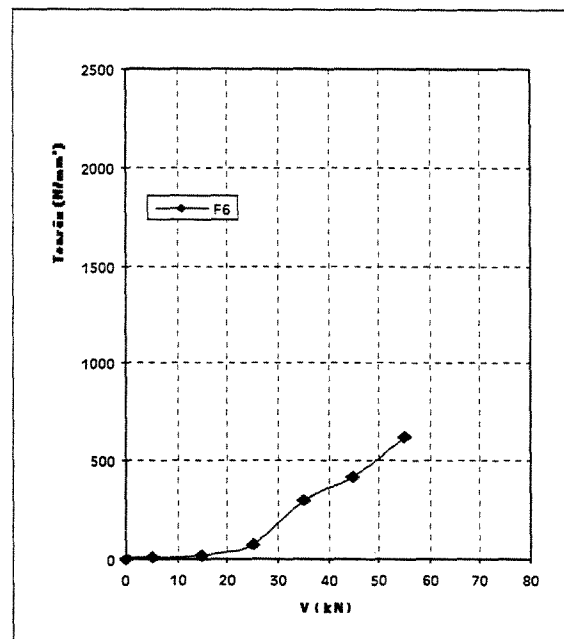
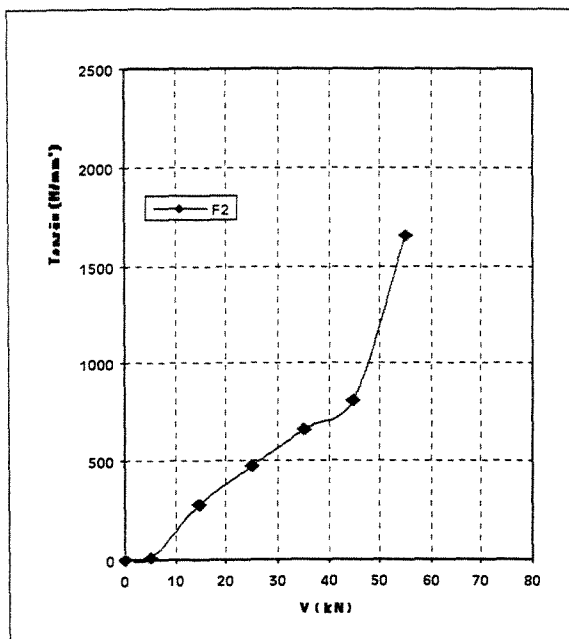
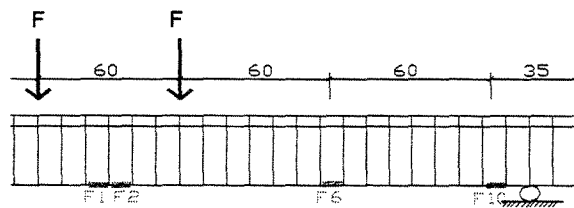
VIGA V3 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



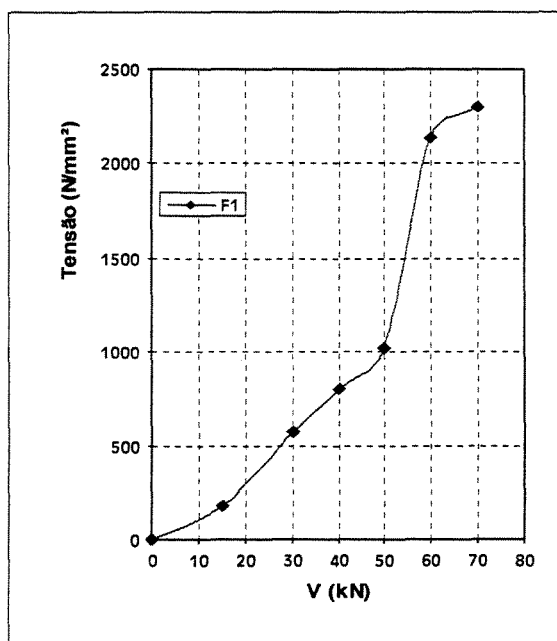
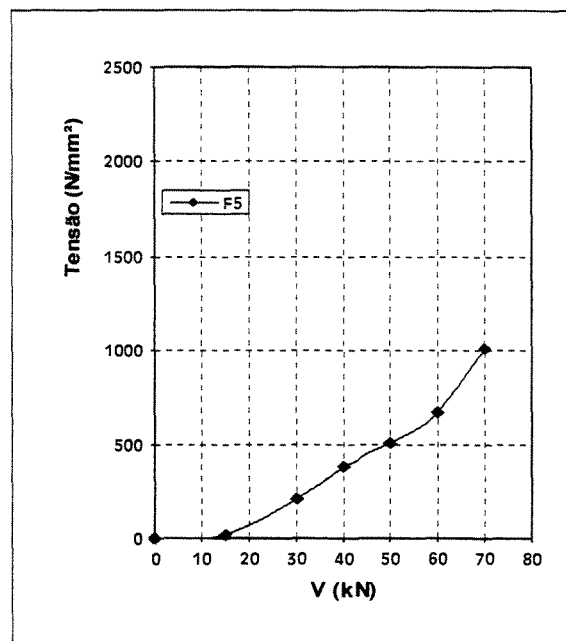
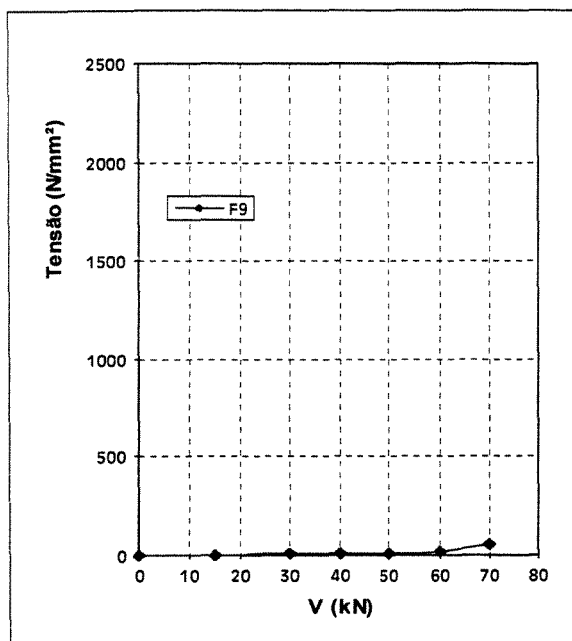
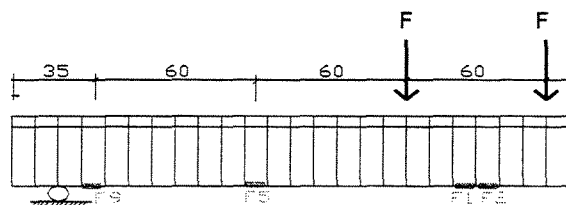
VIGA V4 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



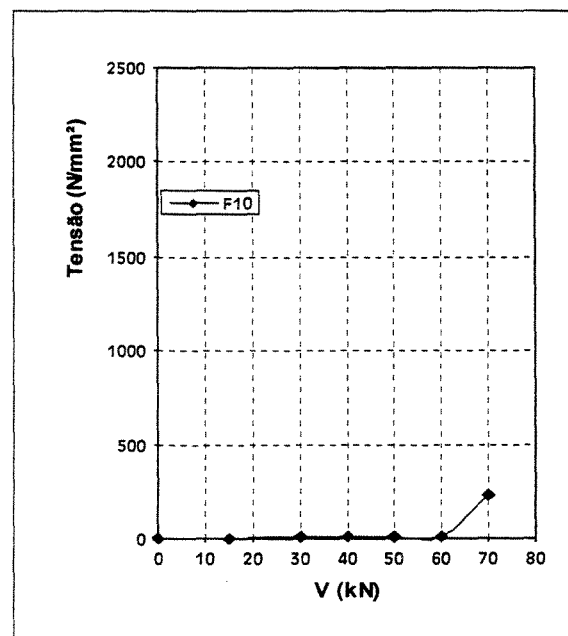
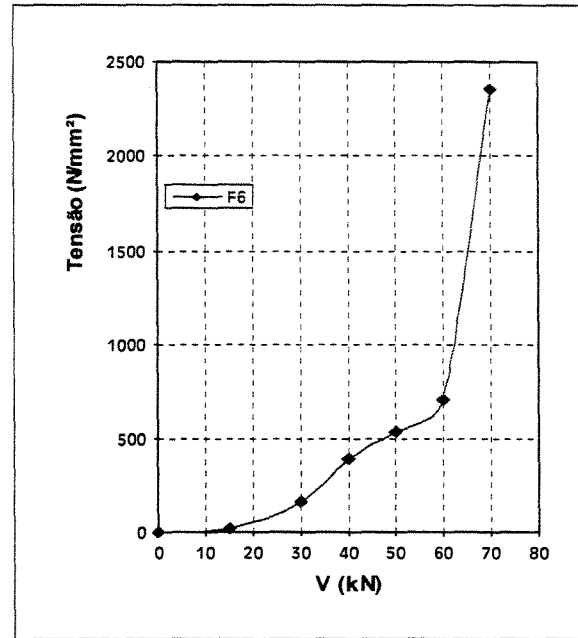
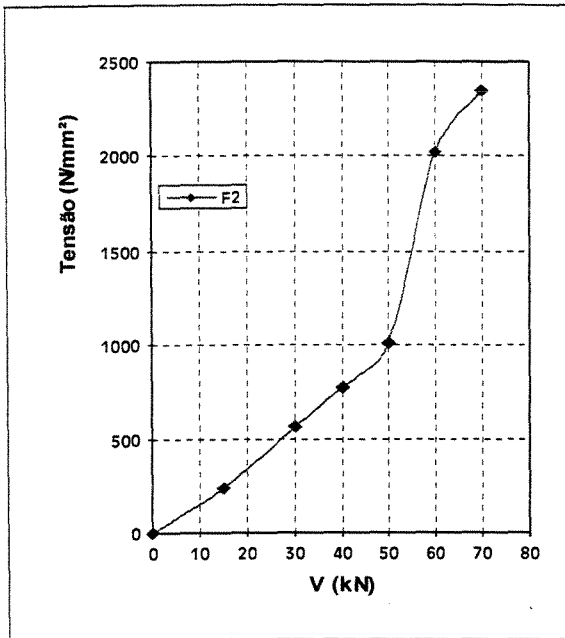
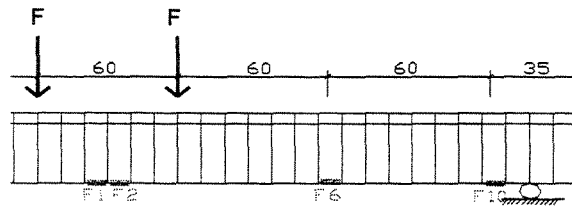
VIGA V4 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



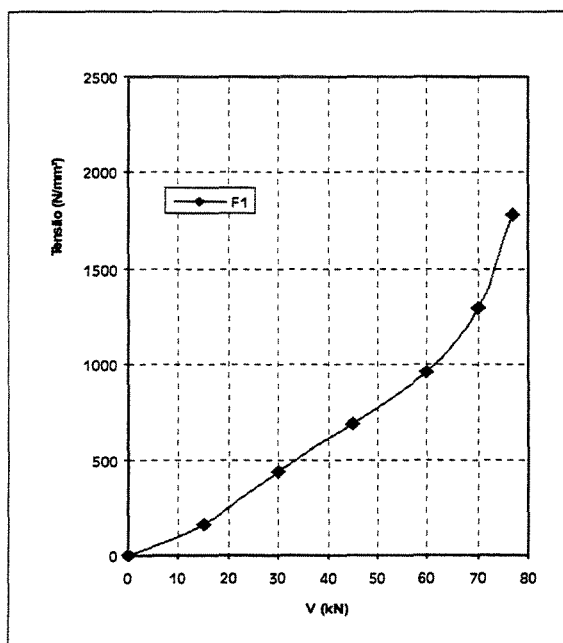
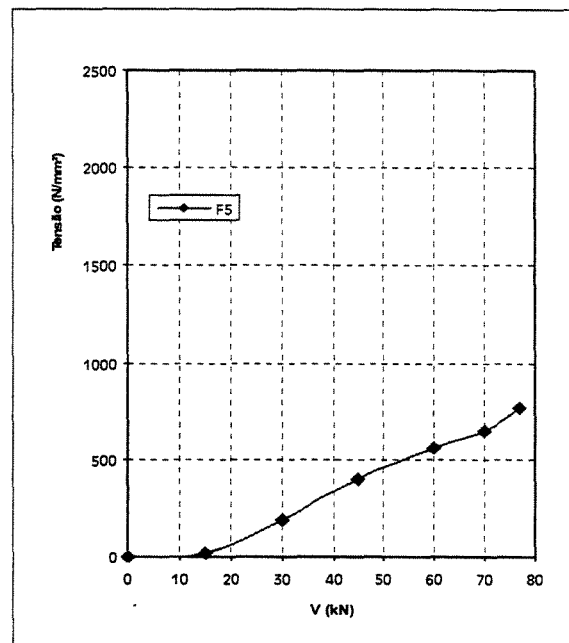
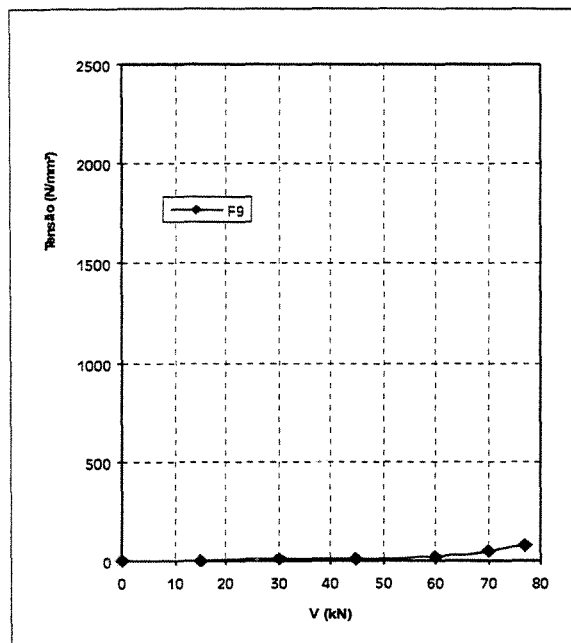
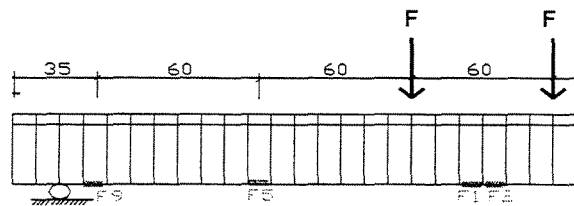
VIGA V5 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



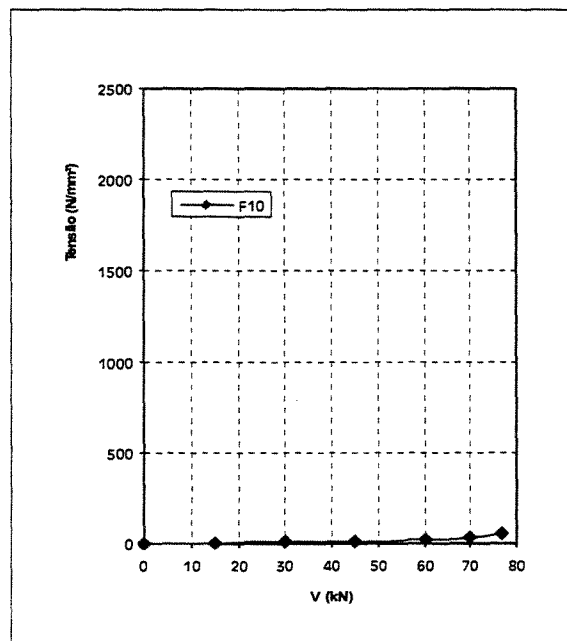
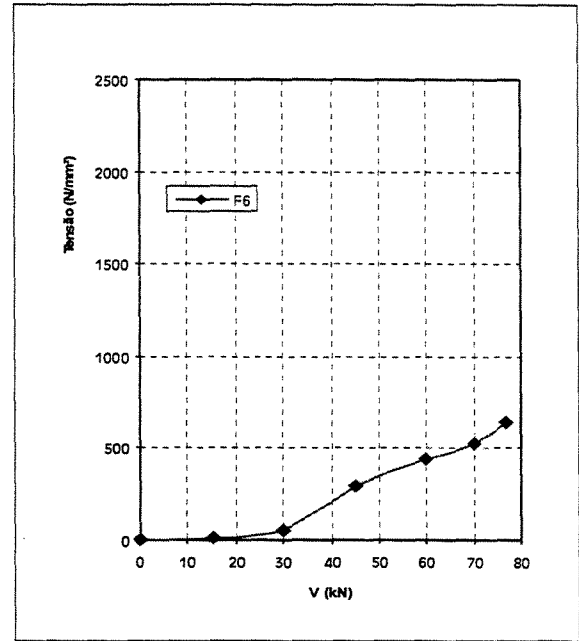
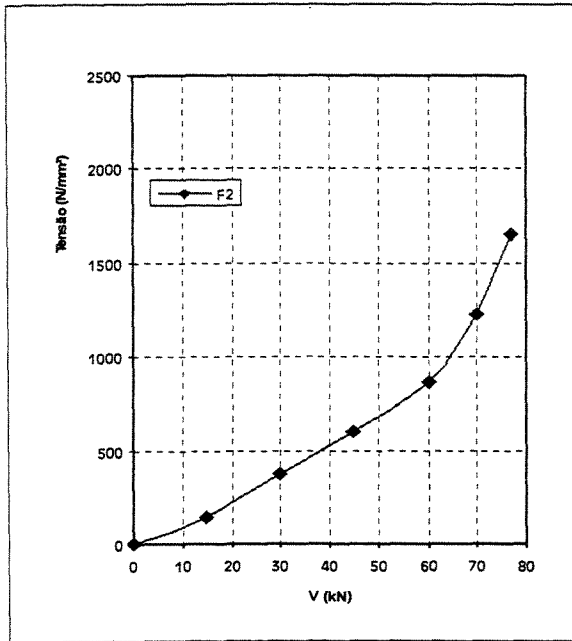
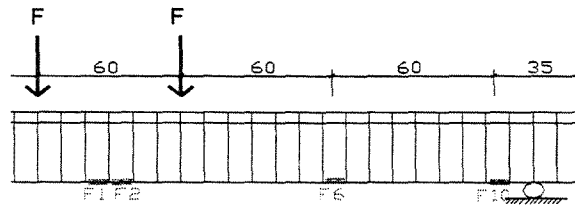
VIGA V5 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



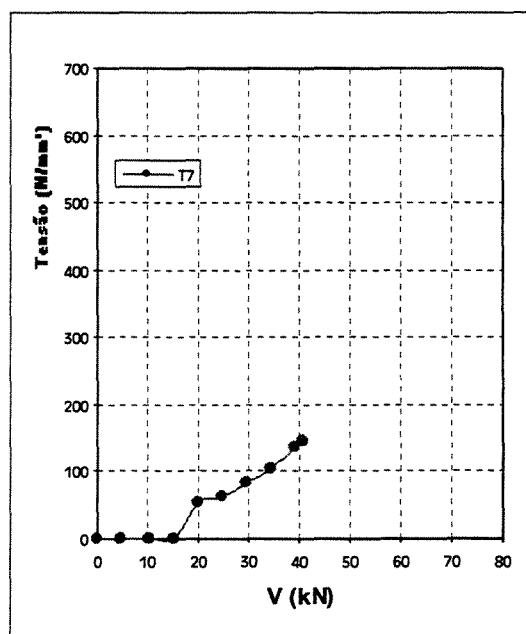
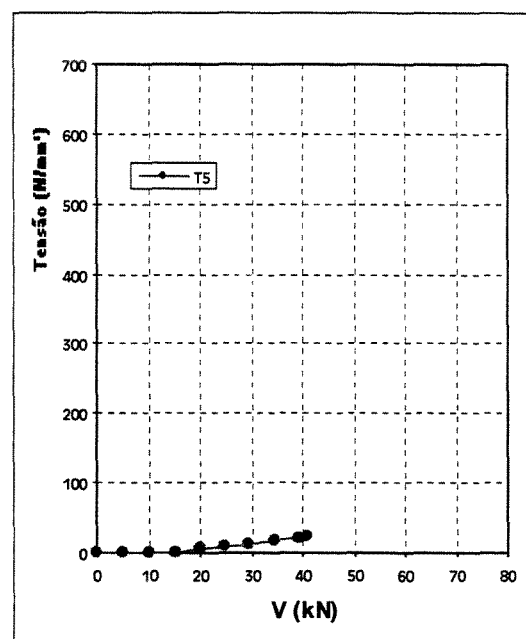
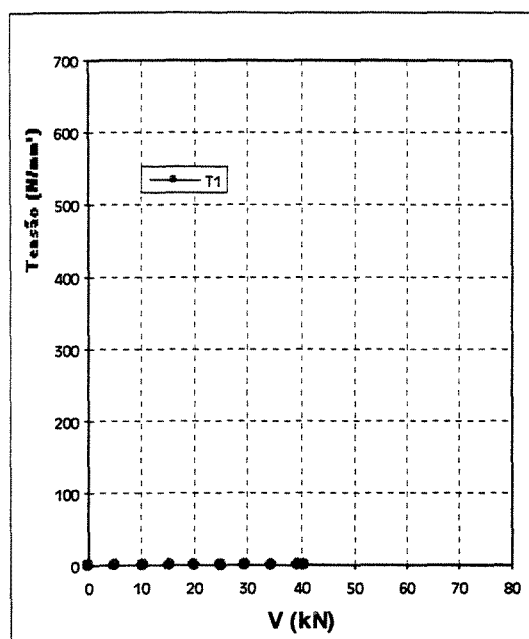
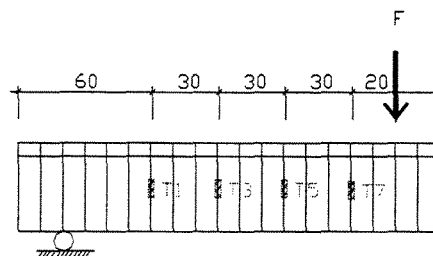
VIGA V6 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO ESQUERDO



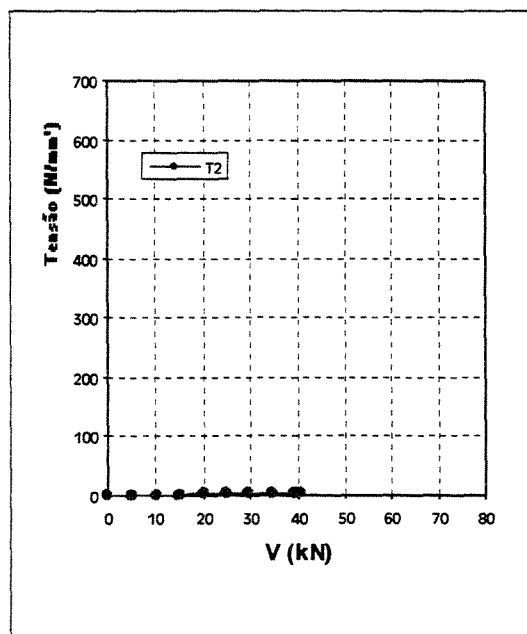
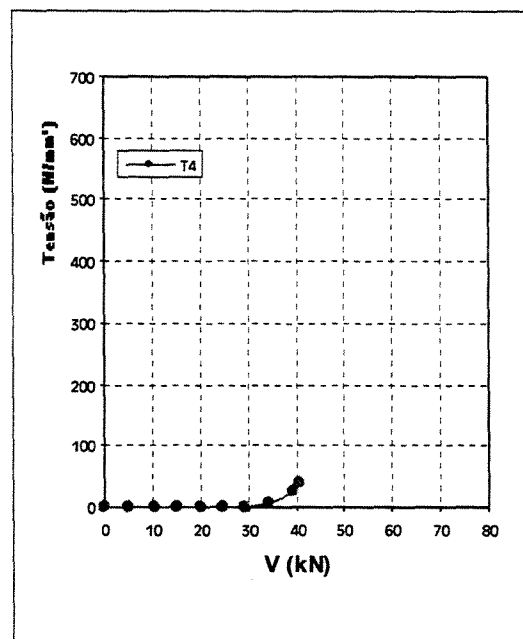
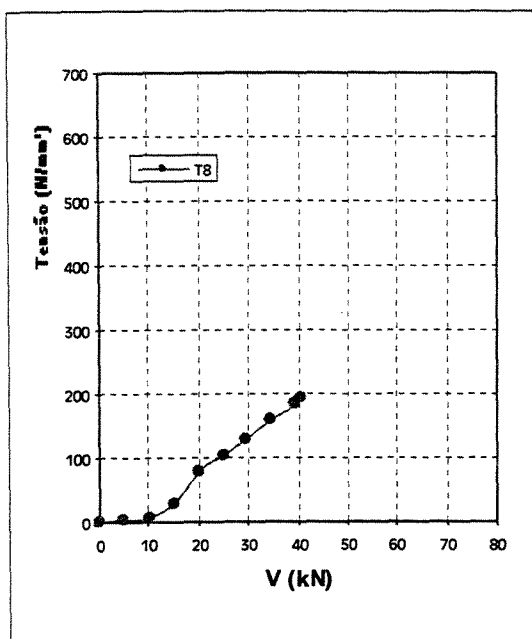
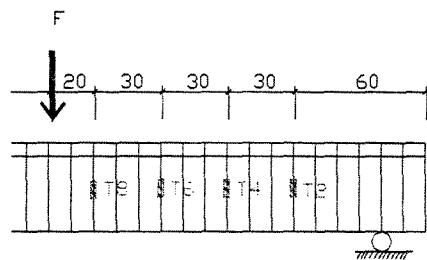
VIGA V6 - TENSÕES NAS FIBRAS - LADO DIREITO



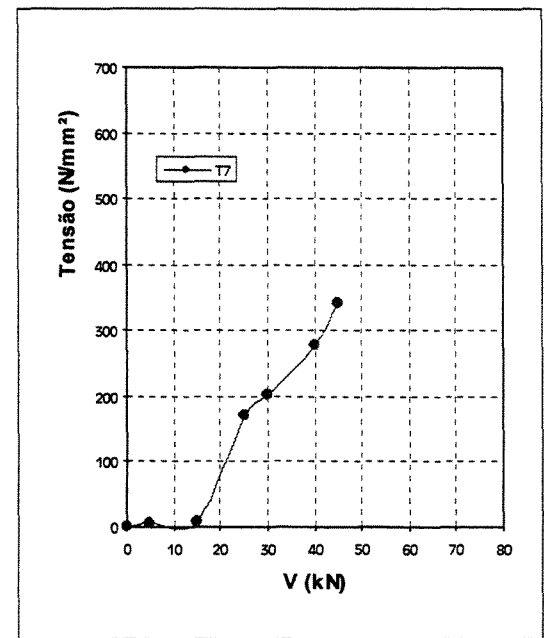
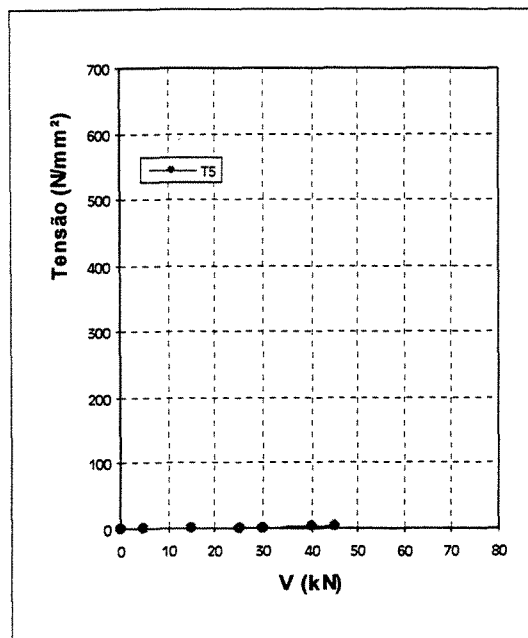
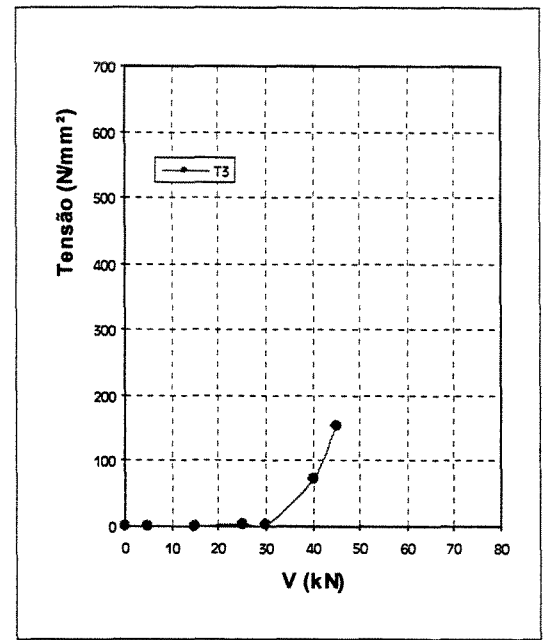
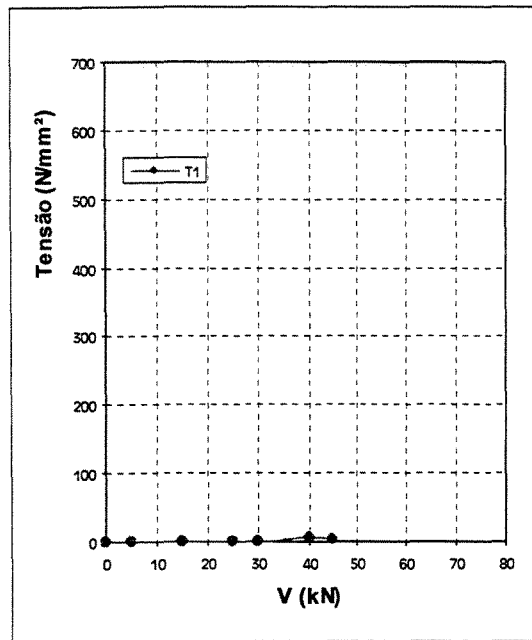
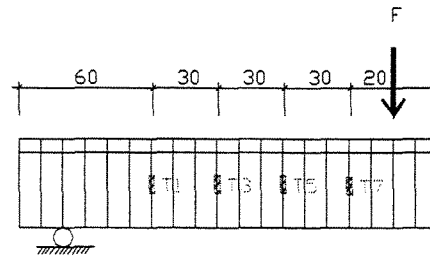
VIGA V1 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO ESQUERDO



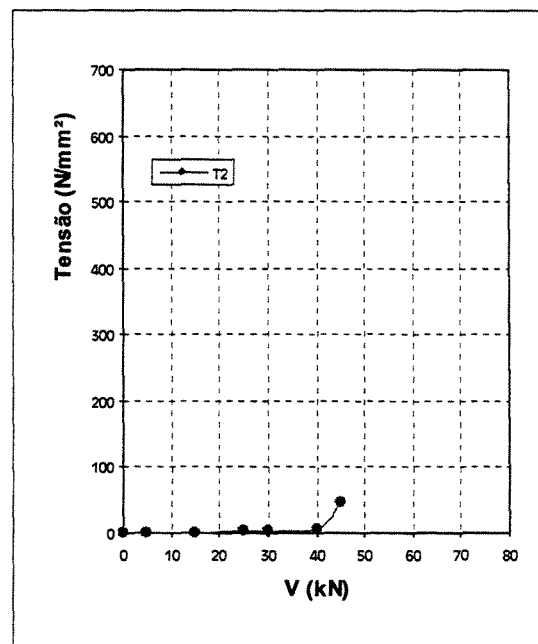
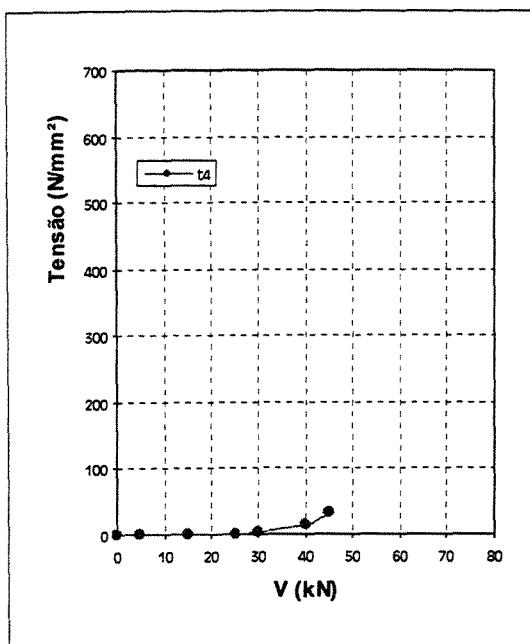
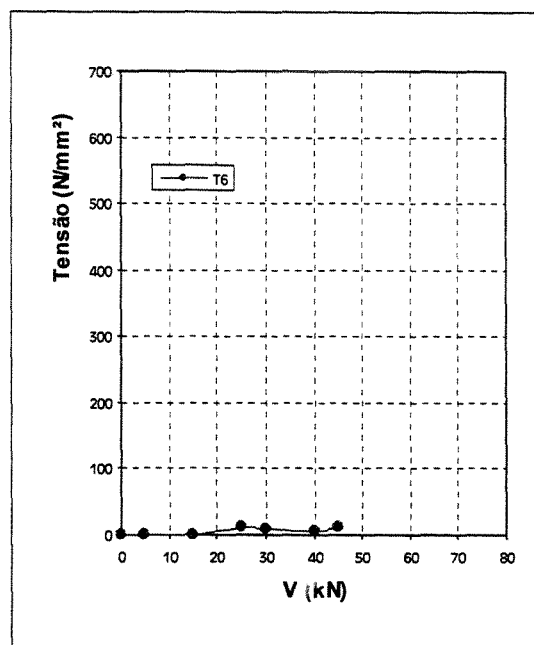
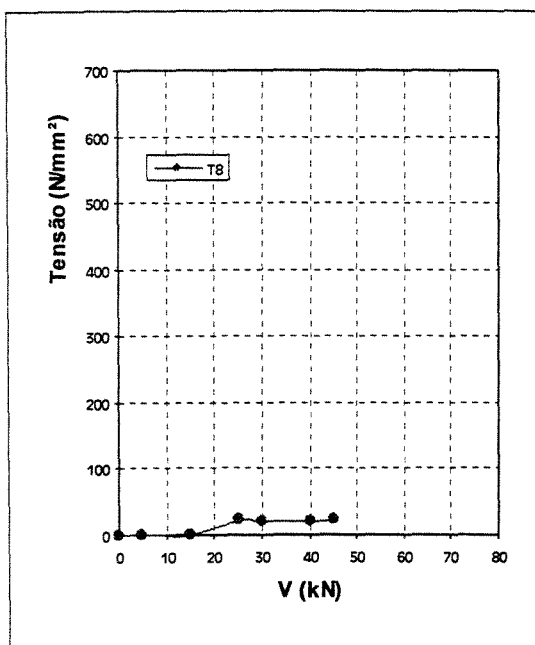
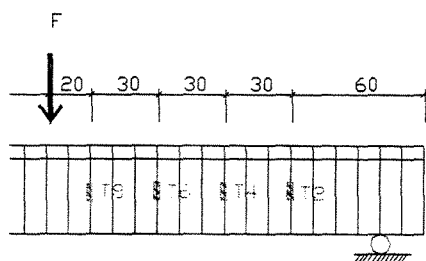
VIGA V1 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO DIREITO



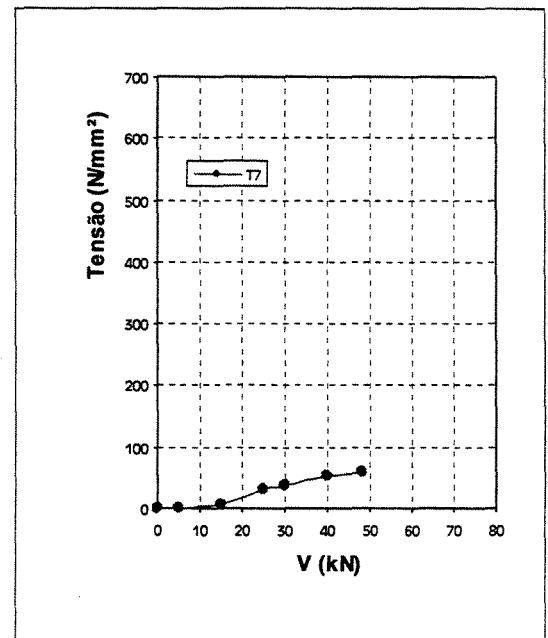
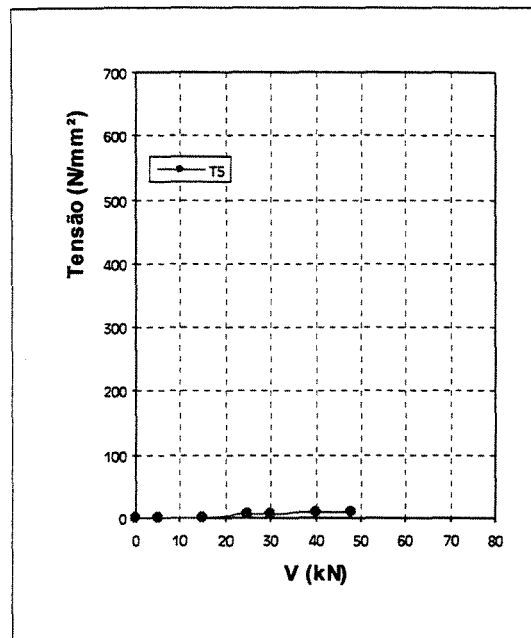
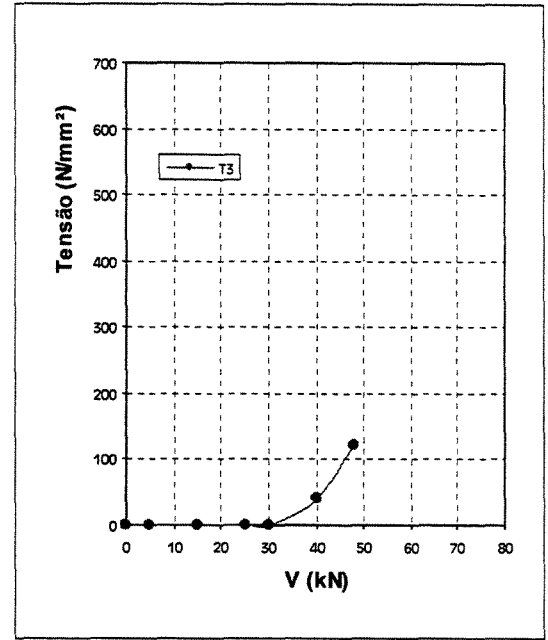
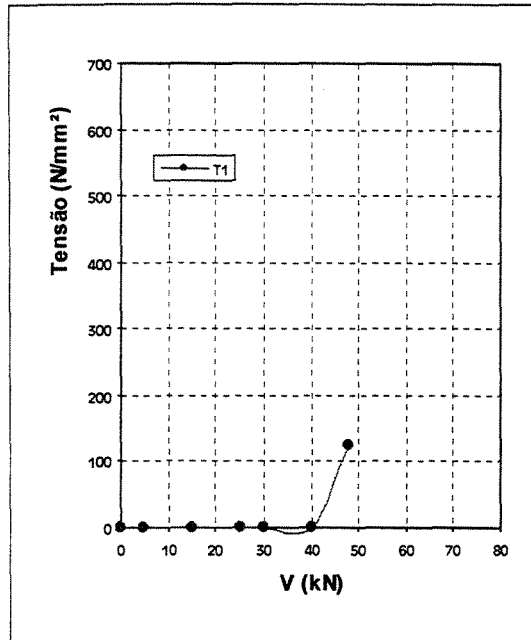
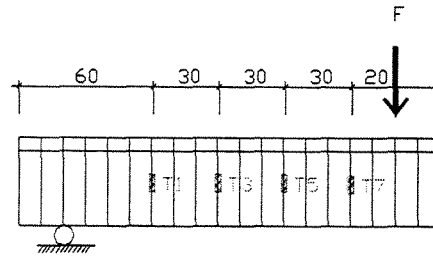
VIGA V2 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO ESQUERDO



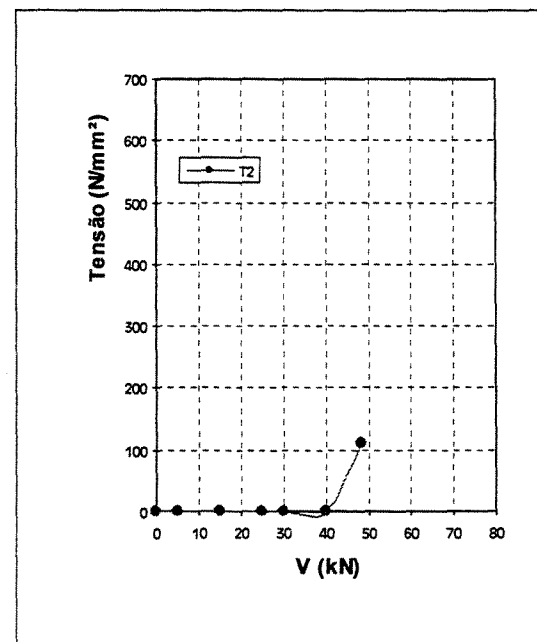
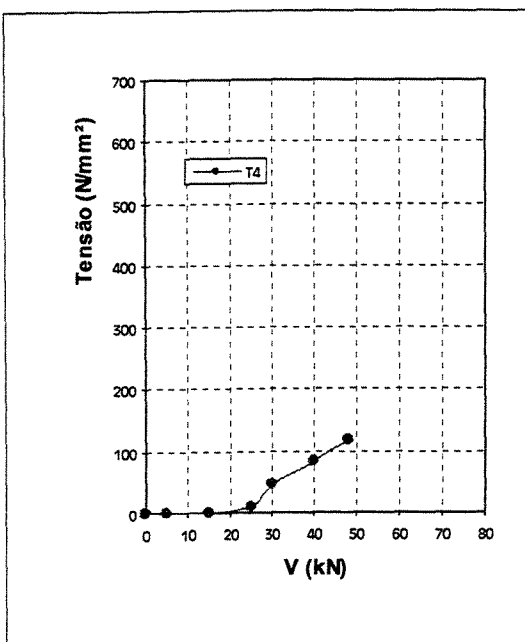
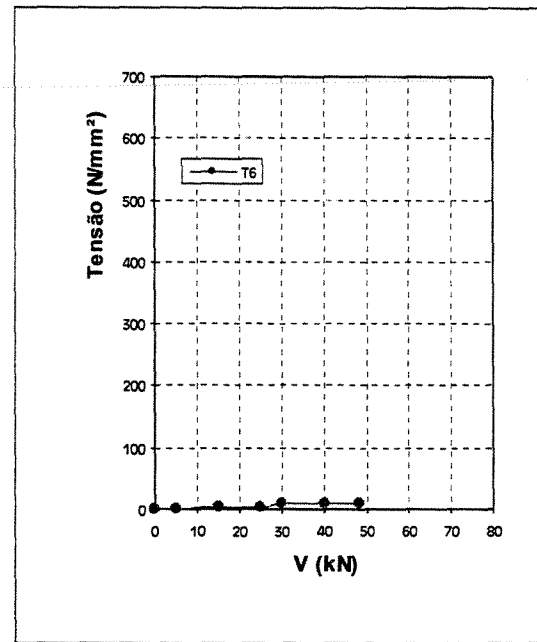
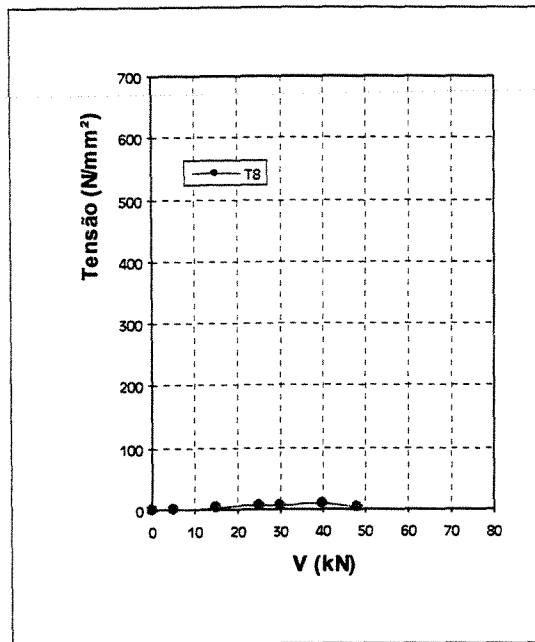
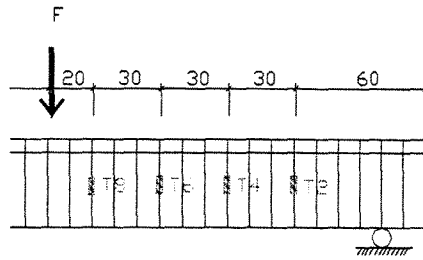
VIGA V2 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO DIREITO



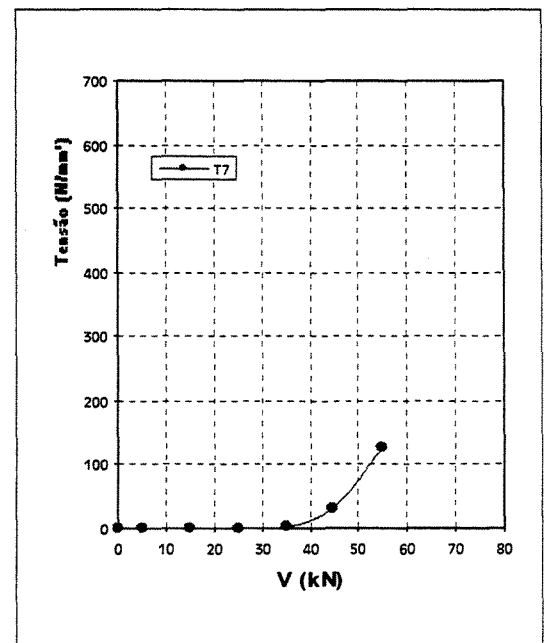
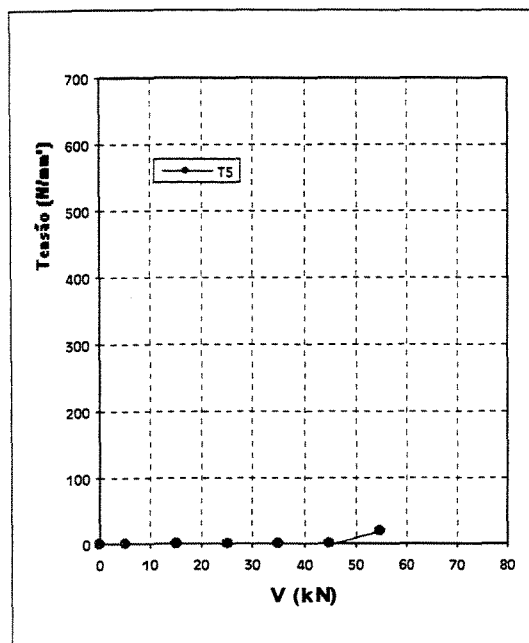
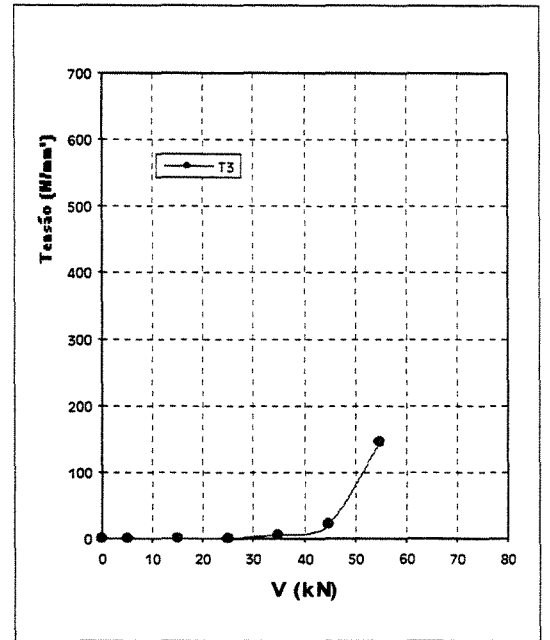
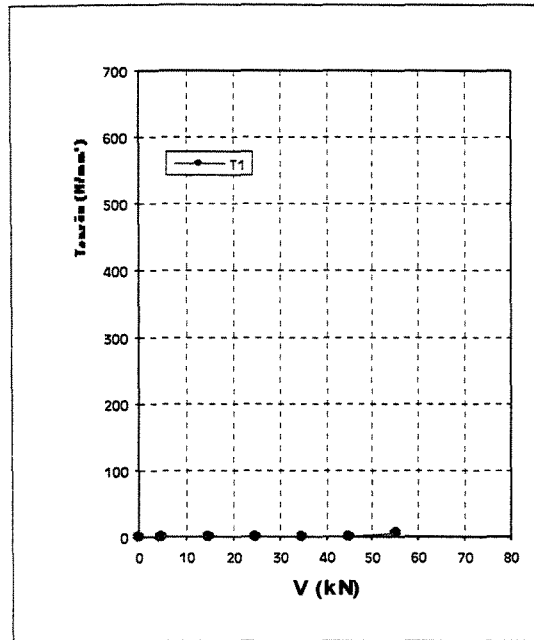
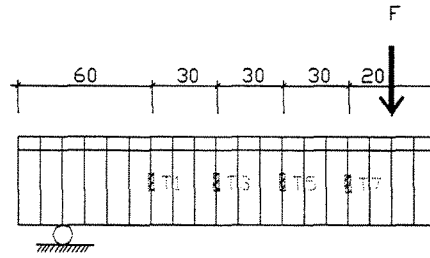
VIGA V3 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO ESQUERDO



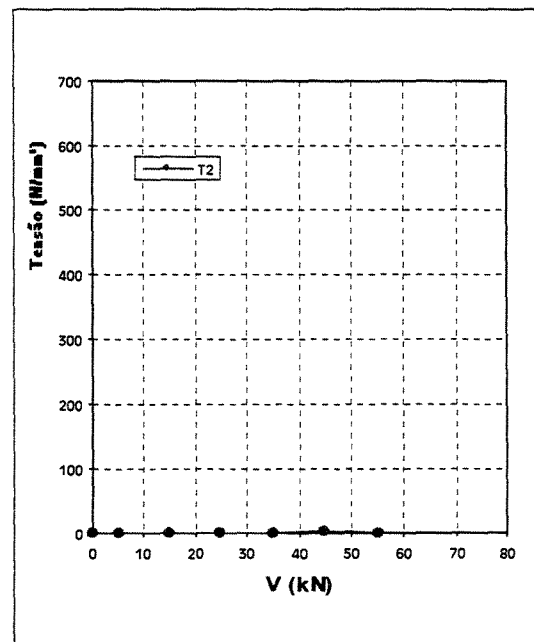
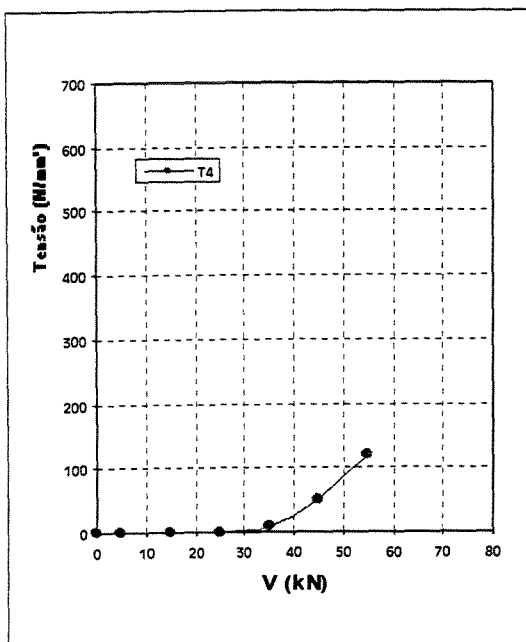
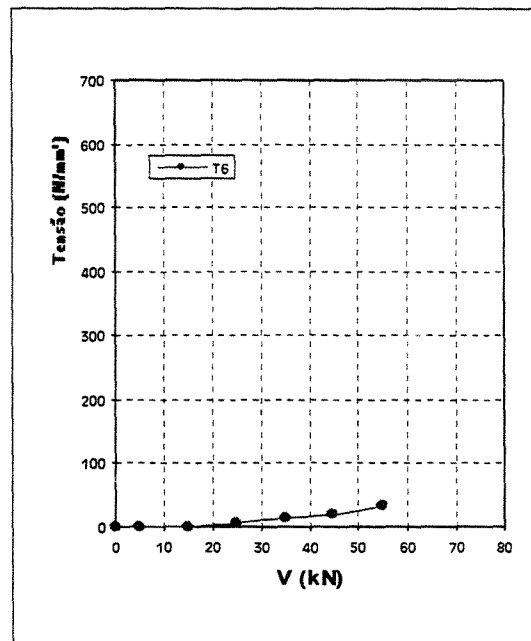
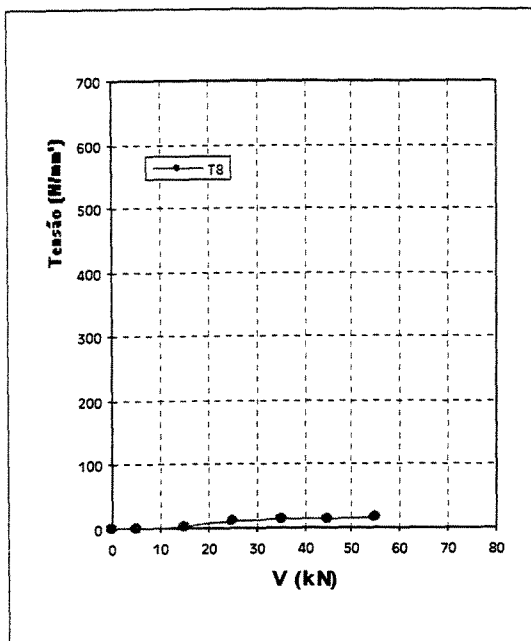
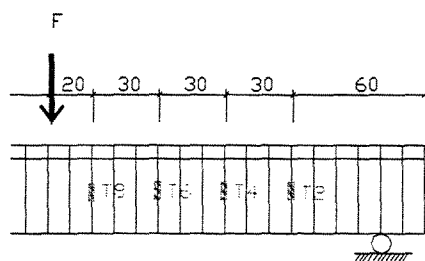
VIGA V3 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO DIREITO



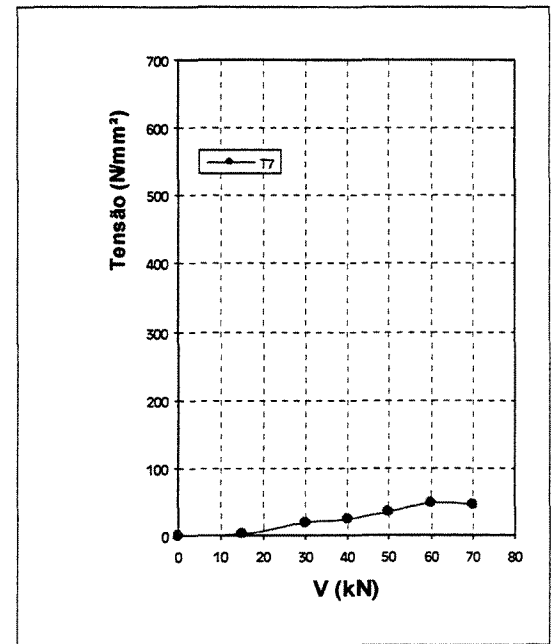
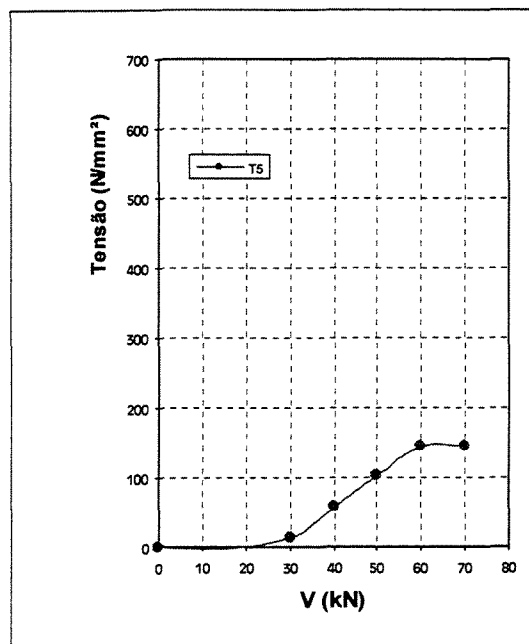
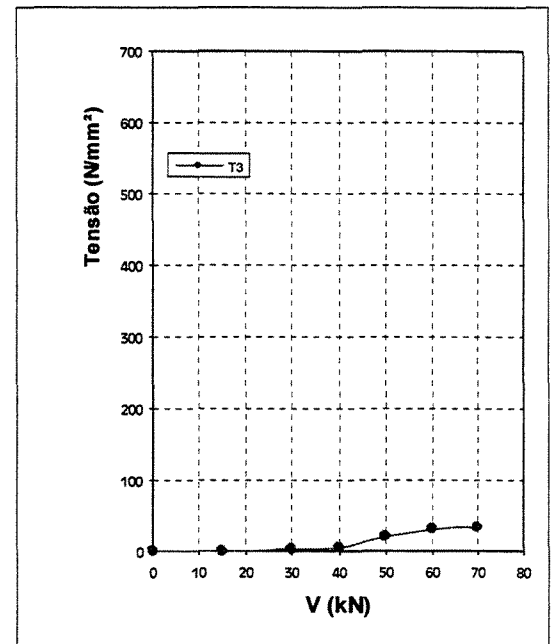
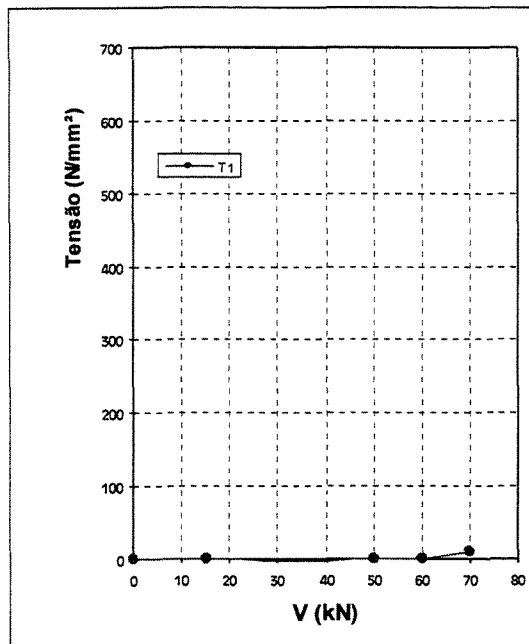
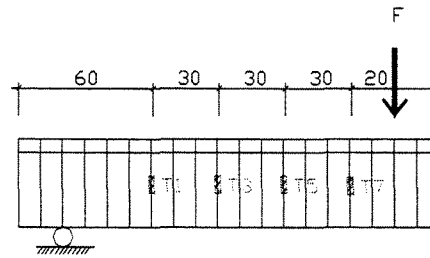
VIGA V4 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO ESQUERDO



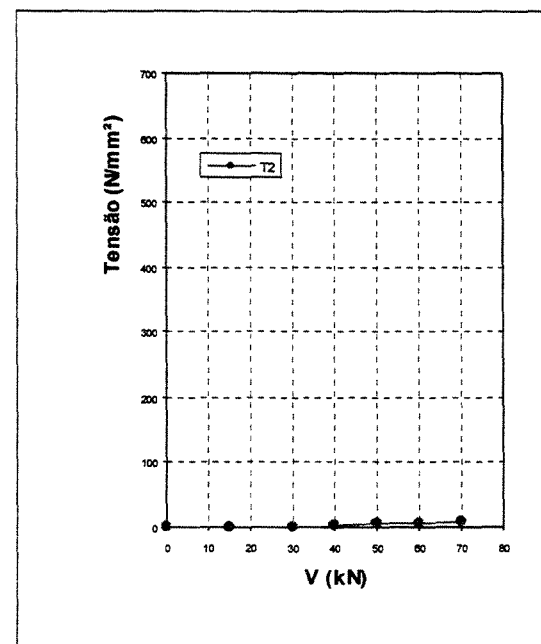
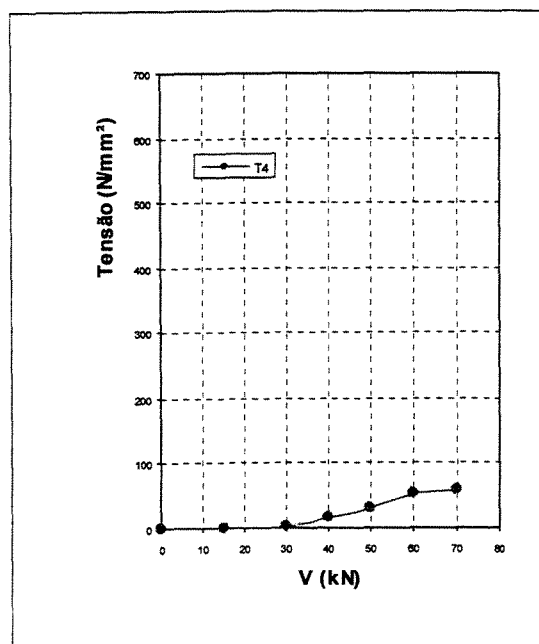
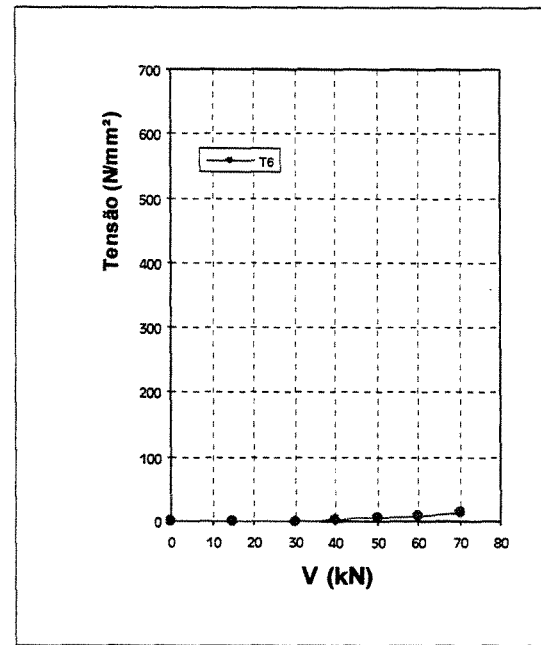
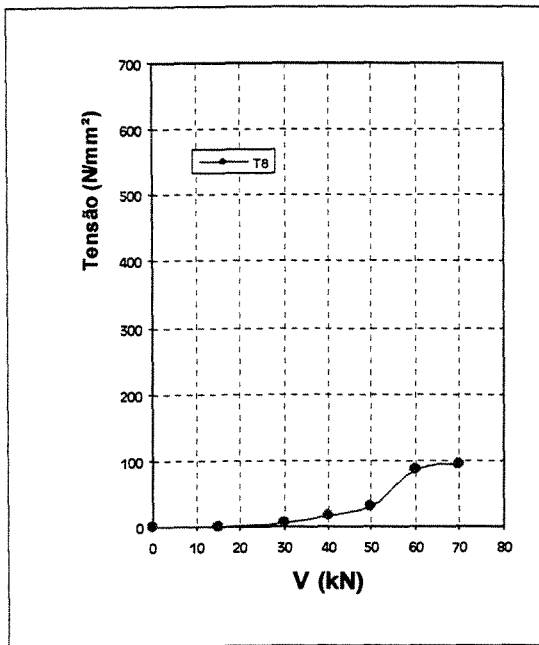
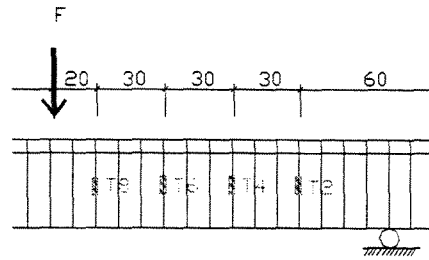
VIGA V4 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO DIREITO



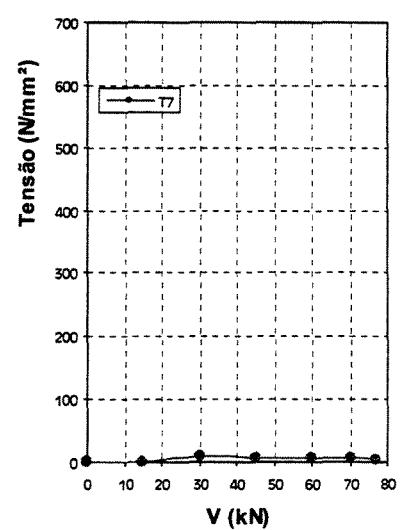
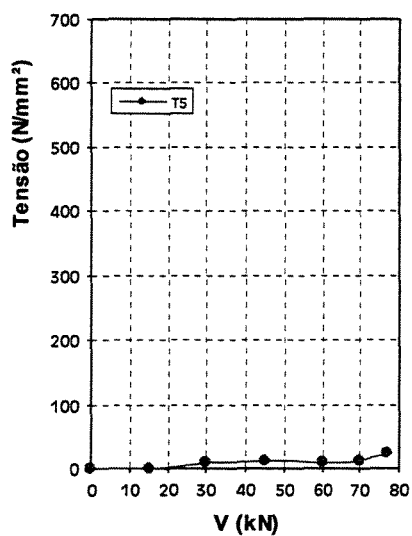
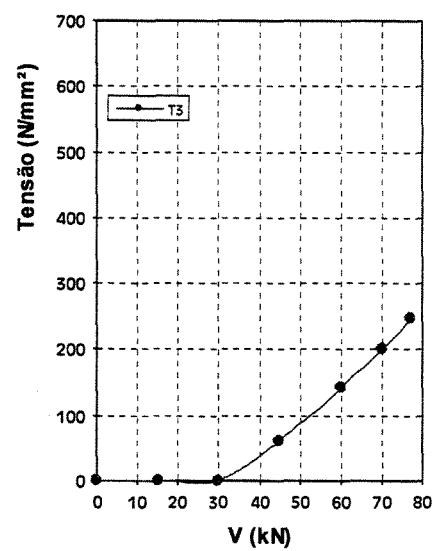
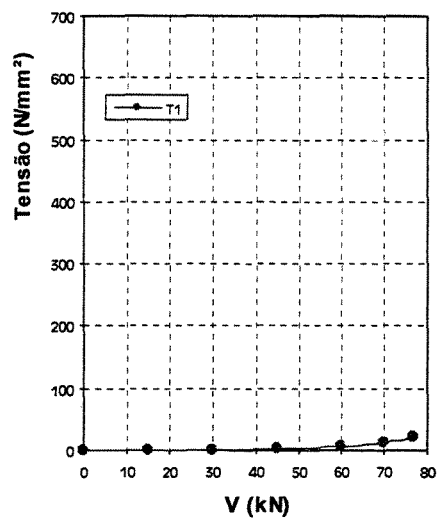
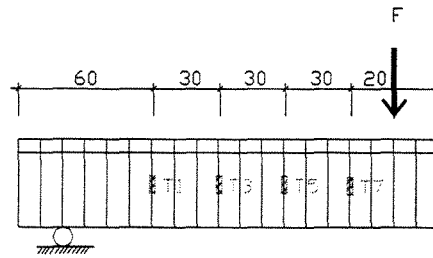
VIGA V5 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO ESQUERDO



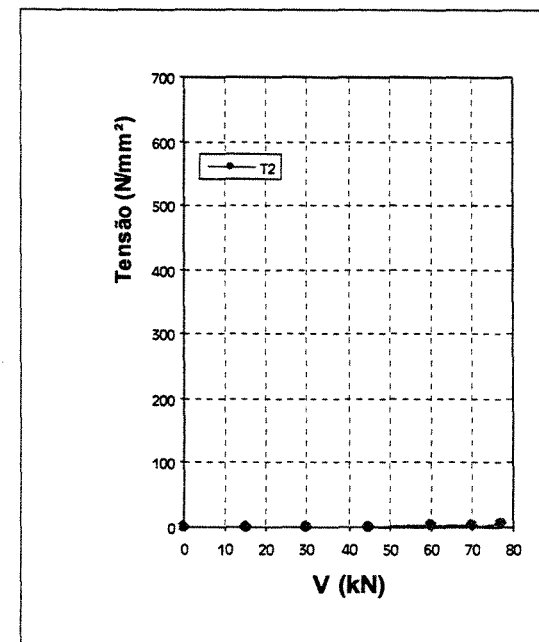
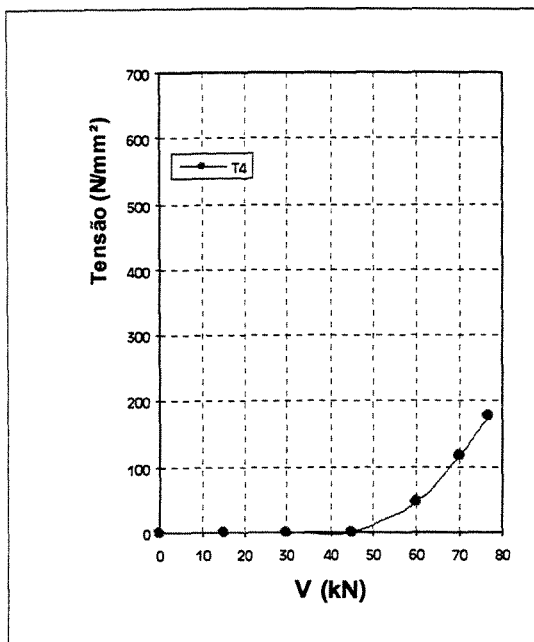
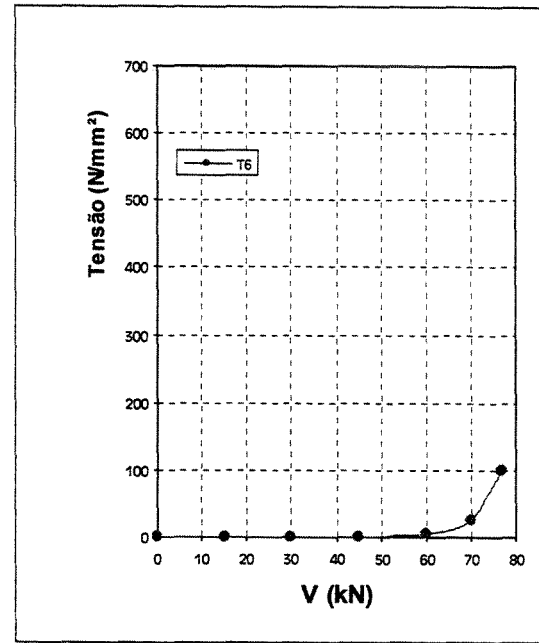
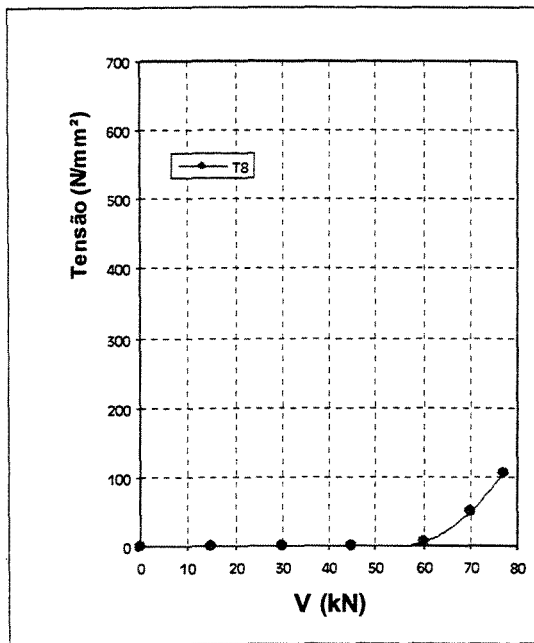
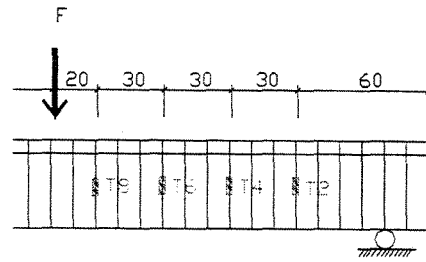
VIGA V5 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO DIREITO



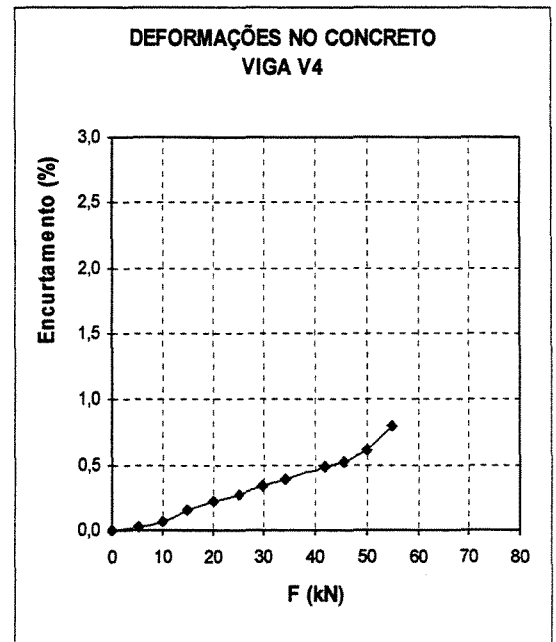
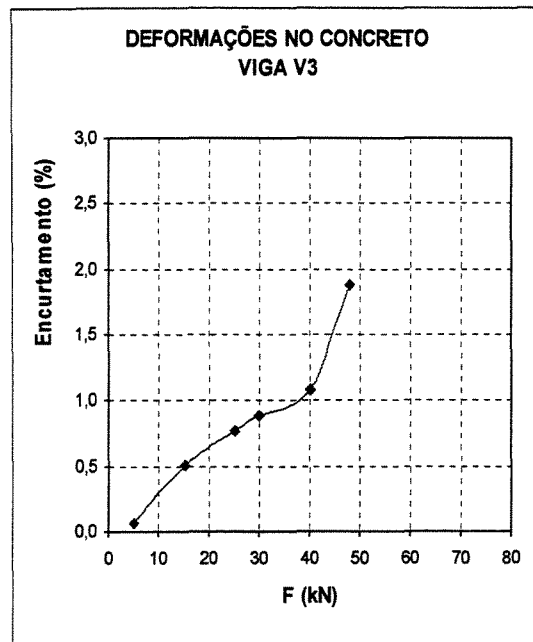
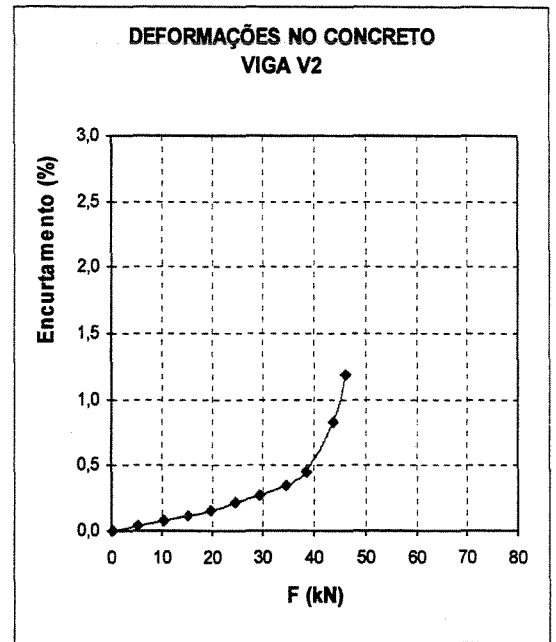
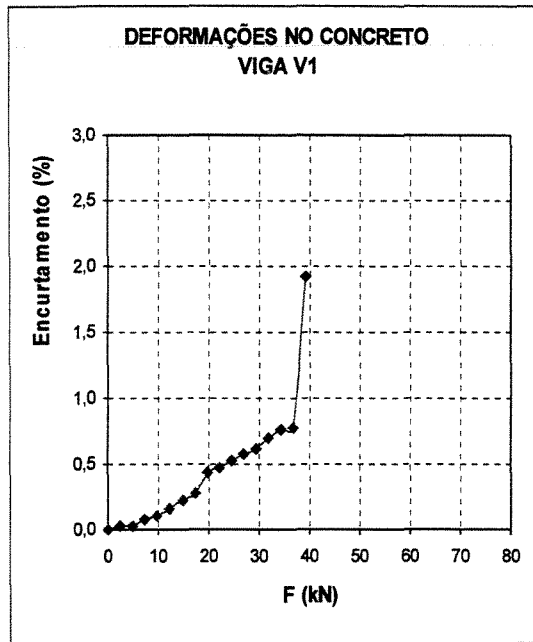
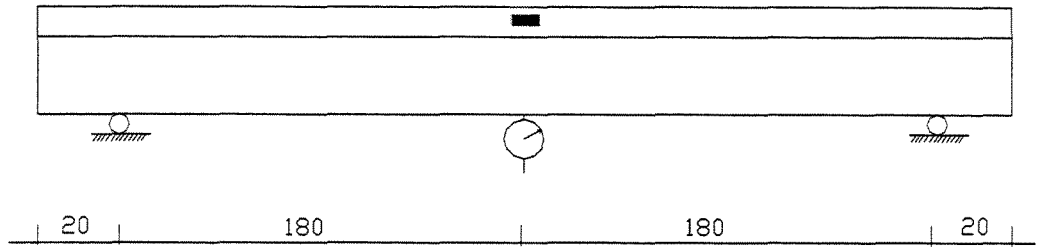
VIGA V6 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO ESQUERDO



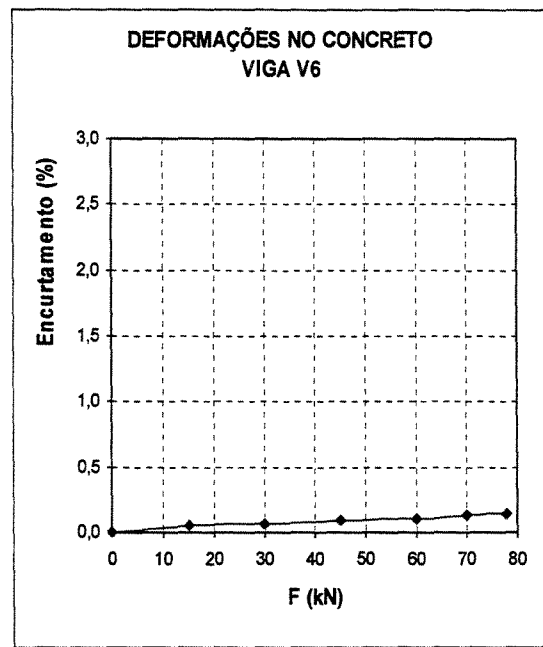
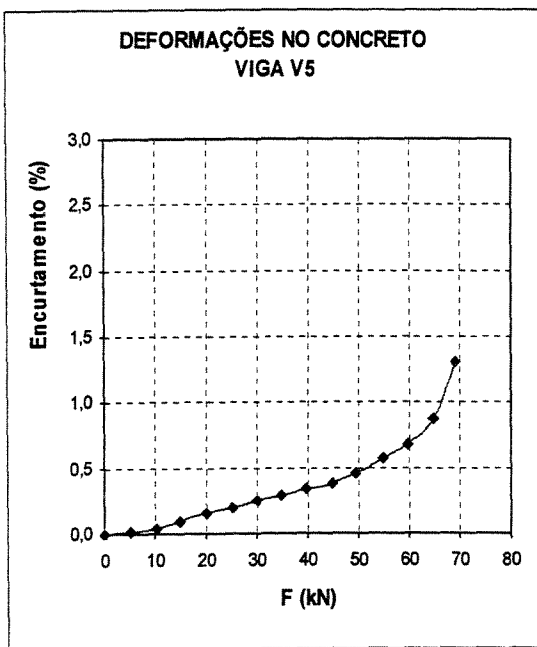
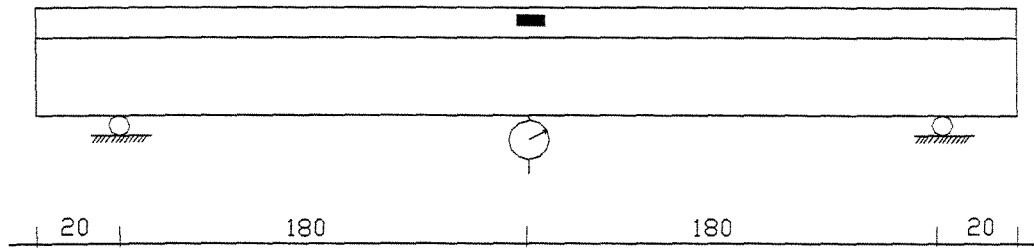
VIGA V6 - TENSÕES NAS ARMADURAS TRANSVERSAIS - LADO DIREITO



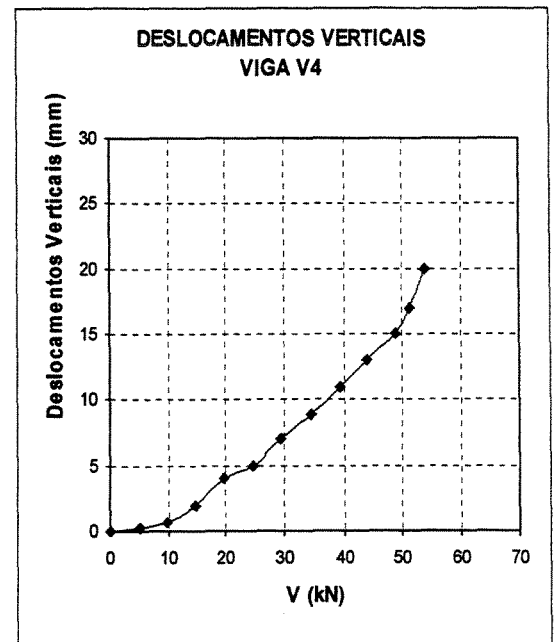
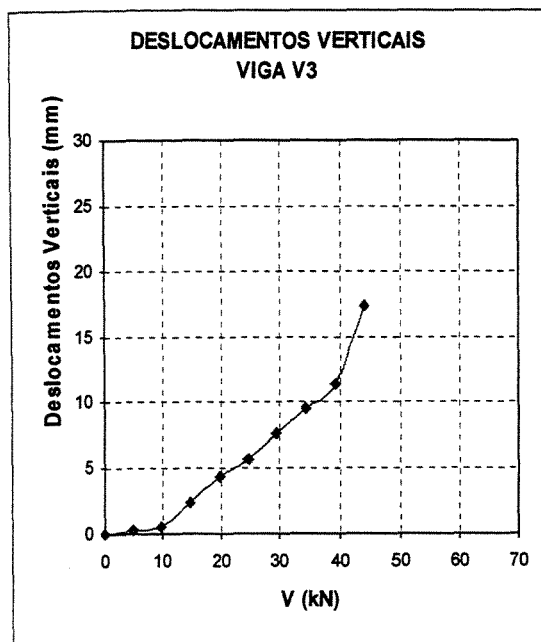
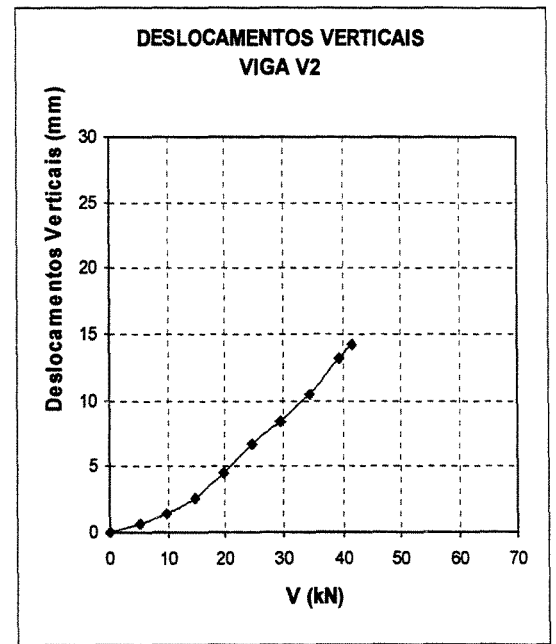
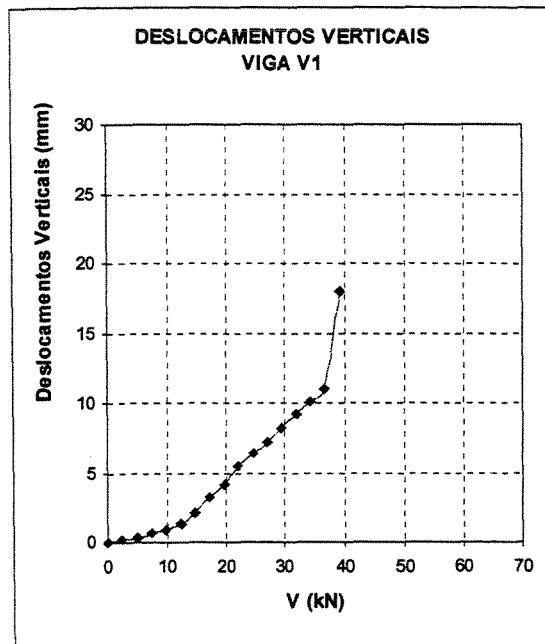
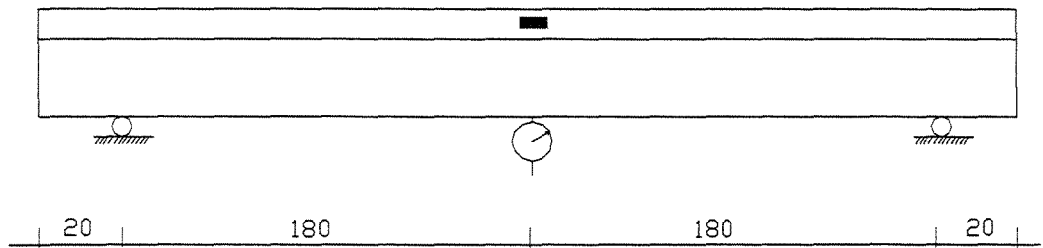
VIGAS V1,V2,V3 E V4 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO



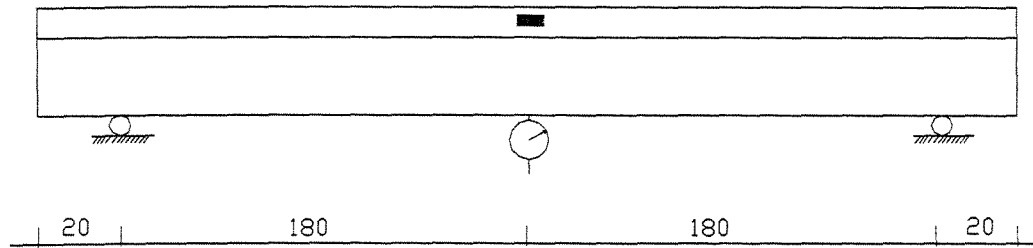
VIGAS V5 E V6 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO



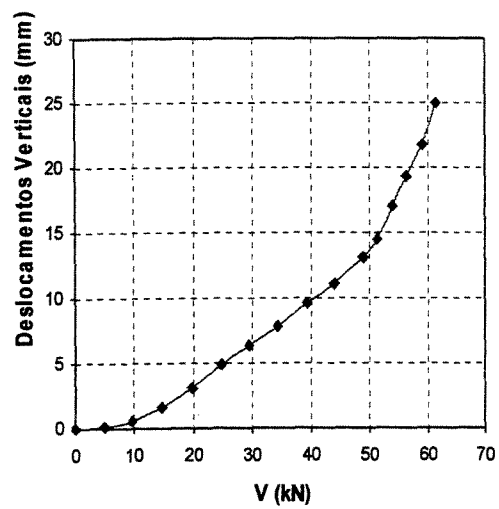
VIGAS V1,V2,V3 E V4 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS



VIGAS V5 E V6 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS



**DESLOCAMENTOS VERTICAIS
VIGA V5**



**DESLOCAMENTOS VERTICAIS
VIGA V6**

