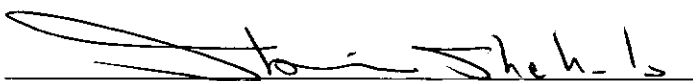


REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
COM FIBRAS DE CARBONO

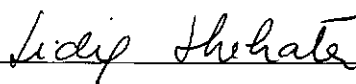
Cristina Travessa Martins Pereira Pinto

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

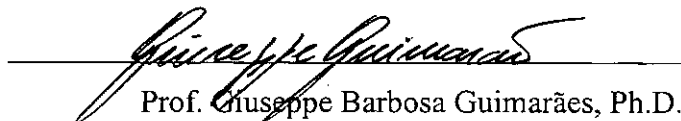
Aprovada por :



Prof. Ibrahim Abd El Malik Shehata, Ph.D.



Prof.^a Lídia da Conceição Domingues Shehata, Ph.D



Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2000

PINTO, CRISTINA TRAVESSA MARTINS
PEREIRA

Reforço à Flexão de Vigas de Concreto
Armado Com Fibras de Carbono [Rio de
Janeiro] 2000

XII, 142 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 2000)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Reforço Estrutural
2. Fibras de Carbono
3. Flexão

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela dedicação, compreensão e incentivo prestados.

Aos meus amigos pelo apoio e companheirismo nas horas dedicadas a este trabalho.

Ao professor Ibrahim, pelos ensinamentos prestados ao longo destes dois anos, pela incessante atenção dedicada e pela orientação segura.

À professora Lídia, pelas revisões e sugestões indispensáveis para a melhoria deste trabalho, pelos importantes ensinamentos e pela atenção dedicada.

À minha amiga de turma de pós-graduação Eliete, pelo companheirismo e pela ajuda prestada na execução dos ensaios.

Aos funcionários do laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, Santiago, José Carlos, José Maria, Osvaldo, Manoel, Anísio e Vicente pelos serviços prestados na execução dos ensaios.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido.

À SIKA S.A., pelo fornecimento de material indispensável para a realização do programa experimental.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM FIBRAS DE CARBONO

Cristina Travessa Martins Pereira Pinto

Abril/2000

Orientadores: Ibrahim Abd El Malik Shehata

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho visou o estudo do comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão, ou a flexão e cisalhamento simultaneamente, com lâminas de fibra de carbono coladas com resina epóxica.

O programa experimental consistiu no ensaio de três vigas, duas reforçadas à flexão com duas ou três lâminas de fibra de carbono coladas, e uma viga reforçada simultaneamente à flexão, com cinco lâminas de fibra de carbono, e ao cisalhamento, com lâminas coladas nas faces laterais da viga a 90^0 ou 45^0 com o eixo da mesma.

O comportamento estrutural dessas vigas, que foram pré-carregadas e reforçadas sob carregamento constante, foi avaliado em termos de flecha, deformações do concreto e das armaduras internas e de reforço, e carga de ruptura.

Os resultados mostraram que a técnica de reforço estudada pode ser usada de maneira eficiente, aumentando a resistência e a rigidez das vigas, e que a teoria de flexão simples pode ser utilizada para avaliar a resistência à flexão de vigas reforçadas, desde que a deformação do reforço seja limitada a valor compatível com o sistema de reforço usado.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FLEXURAL STRENGTHENING OF CONCRETE BEAMS
WITH CFRP PLATES

Cristina Travessa Martins Pereira Pinto

April/2000

Adivisors: Ibrahim Abd El Malik Shehata

Department: Civil Engineering

This work aimed to study the structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened in bending and in bending and shear simultaneously with bonded CFRP plates.

The experimental program comprised tests of three beams, two beams strengthened in bending, with two or three CFRP plates, and one beam strengthened both in bending, with five plates, and shear, with plates bonded on the lateral face of beam at 90° or 45° with its longitudinal axis.

The structural behaviour of these beams, initially loaded and strengthened while under load, was evaluated in terms of deflection, concrete, steel (and CFRP plates) strain, and ultimate load.

The results showed that the studied strengthening techniques can be used efficiently, increasing the resistance and the stiffness of the beams, and that the bending theory can be used to evaluate flexural resistance of strengthened beams, provided the strain of the bonded plates is limited to adequate values.

NOTAÇÕES

LETRAS ROMANAS

A	Área de contato da lâmina de fibra de carbono com o concreto
A_f	Área da seção transversal da lâmina de fibra de carbono
A_s	Área da seção da armadura longitudinal de tração interna
A'_s	Área da seção da armadura longitudinal interna de compressão
A_{sw}	Área da seção de um estribo interno no comprimento s
b	Largura da seção
b_f	Largura da lâmina de fibra de carbono
c	Cobrimento
d	Altura útil da seção
d_f	Altura útil da seção relacionada às lâminas de fibra de reforço
e_f	Espessura da lâmina de fibra
E_a	Módulo de elasticidade do adesivo
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_f	Módulo de elasticidade da lâmina de fibra
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f_{cm}	Resistência do concreto à compressão média
f_c	Resistência do concreto à compressão
f_t	Resistência do concreto à tração
f_{td}	Resistência do concreto à tração de cálculo
f_{ff}	Resistência da lâmina de fibra à tração
f_{tm}	Resistência do concreto à tração média
f_{yw}	Tensão de escoamento dos estribos internos
f_y	Tensão de escoamento da armadura longitudinal

f_{st}	Resistência à tração da armadura
h	Altura da viga
L_f	Comprimento da lâmina de fibra
L_f	Comprimento da lâmina de fibra situada entre a placa de aplicação de carga e a extremidade da lâmina
M_u	Momento de ruptura
P_a	Carga acidental
P_p	Carga permanente
P_u	Carga de ruptura
s	Espaçamento entre os estribos internos
s_f	Espaçamento entre os estribos externos de lâminas de fibra
V_c	Parcela da força cortante resistida pelo concreto
V_f	Parcela da força cortante resistida pelo reforço de lâminas de fibra
V_R	Força cortante resistente
V_s	Parcela da força cortante resistida pelos estribos internos
x_e	Altura da linha neutra elástica
x_p	Altura da linha neutra plástica
z	Braço de alavanca

LETRAS GREGAS

$\varepsilon_{c,g}$	Deformação específica do concreto devido ao carregamento permanente
$\varepsilon_{c,r}$	Deformação específica do concreto devido ao carregamento após o reforço
ε_{cu}	Deformação específica última do concreto
ε_f	Deformação específica da lâmina de fibra
ε_s	Deformação específica do aço em um estágio de carregamento
$\varepsilon_{s,g}$	Deformação específica do aço devido ao carregamento permanente
$\varepsilon_{s,r}$	Deformação específica do aço devido ao carregamento após o reforço
ε_{su}	Deformação específica na ruptura do aço
ε_y	Deformação específica de escoamento do aço
ε_y^*	Deformação específica de escoamento do aço correspondente ao diagrama tensão-deformação bilinear
ϕ	Diâmetro nominal
ϕ_e	Diâmetro efetivo
θ	Ângulo de inclinação da diagonal comprimida com o eixo longitudinal da viga
α	Ângulo de inclinação da diagonal tracionada com o eixo longitudinal da viga
ρ	Taxa de armadura longitudinal de tração interna
σ_f	Tensão na lâmina de fibra
σ_{fw}	Tensão no estribo de lâmina de fibra
σ_s	Tensão no aço longitudinal de tração
σ'_s	Tensão no aço longitudinal de compressão
τ_{fw}	Tensão cisalhante na interface concreto/adetivo/lâminas do reforço ao cisalhamento

τ_{ff}	Tensão cisalhante na interface concreto/adetivo/lâminas do reforço à flexão
μ_D	Índice de ductilidade

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - Introdução	3
2.2 - Causas de Problemas Estruturais	3
2.3 - Técnicas de Reparo e Reforço	4
2.3.1 - Técnica de Chapas de aço e compósitos Colados	5
2.3.1.1 - Chapas de Aço	5
2.3.1.2 – Lâminas e tecidos de Fibras	7
2.3.2 - Técnica de Estribos Externos Pré-Tracionados	8
2.3.3 - Técnica de Encamisamento com Concreto ou Argamassa	9
2.3.4 - Técnica de Protensão Exterior com Cordoalhas	9
2.3.5 - Técnica de Vergalhões Colados	10
2.4 - Estudos Existentes sobre técnicas de Reforço	10
2.4.1 - Estudos de Vigas	10
2.4.1.1 – SHARIF et al. (1994)	10
2.4.1.2 – ARDUINI, TOMMASO e NANNI (1997)	14
2.4.1.3 – APPLETON, RIPPER e SOUZA (1998)	16
2.4.1.4 – GANGARAO e VIJAY (1998)	19
2.4.1.5 – ROSS, JEROME, TEDESCO e HUGHES (1998)	24
2.4.1.6 – GRACE, SAYED, SOLIMAM e SALEH (1999)	27
2.4.1.7 – NGUYEN, CHAN, CHEONG (1999)	31
2.4.1.8 – BEBER, CAMPOS FILHO, CAMPAGNOLO (1999)	33
2.4.1.9 – RIPPER, SCHERER (1999)	34
2.4.1.10 – GEMERT, AHNED, BROSENS (1999)	36
2.4.2 – Estudos de Aderência	39
2.4.2.1 – SOUZA (1998)	39
2.4.3 – Modelos de Cálculo	42
2.4.3.1 – Modelo de Cálculo Proposto Pelo Fabricante	43

2.4.3.2 – Modelo de Cálculo Proposto Por Master Builders Technologies	46
2.5 - Conclusão	48
CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	
3.1 - Introdução	50
3.2 - Confeção de vigas	51
3.2.1 - Concreto	51
3.2.2 - Aço	52
3.2.3 - Fibras	56
3.2.4 - Adesivo	57
3.2.5 - Fôrmas	58
3.3 - Descrição das Vigas sem Reforço	58
3.3.1 - Características Geométricas e Estruturais	58
3.3.2 - Resistência Teórica das vigas sem Reforço	66
3.3.2.1 - Resistência à Flexão	66
3.3.2.2 - Resistência ao Cisalhamento	69
3.4 – Concretagem	72
3.5 - Tipos de Reforço	72
3.6 - Instrumentação	73
3.6.1 - Extensômetros Elétricos de Resistência	73
3.6.2 - Extensômetros Mecânicos	76
3.6.3 - Deflectômetros Elétricos	76
3.6.4 – Fissurômetro	76
3.7 - Execução dos Ensaio	79
3.8 - Execução dos Reforços e Resistência das Vigas Reforçadas	80
3.8.1 - Reforço à Flexão	84
3.8.1.1 – Resistência à Flexão Teórica das vigas Reforçadas	84
3.8.2 - Reforço ao Cisalhamento	89
3.8.2.1 – Resistência ao Cisalhamento Teórica da viga Reforçada	89
3.9 - Resultados dos Ensaio	92

3.9.1 - Flechas	92
3.9.2 - Deformação Longitudinal na Seção no meio do Vão	94
3.9.3 - Deformação das Armaduras Internas e de Reforço	94
3.9.4 - Cargas e Modos de Ruptura	95
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	
4.1 - Introdução	104
4.2 – Flechas	104
4.3 – Deformação da Seção Transversal no Meio do Vão	105
4.4 – Deformação das Armaduras Longitudinais Internas e de Reforço	106
4.5 – Avaliação da Resistência à Flexão das Vigas Reforçadas	111
4.6 – Comparação das Vigas Ensaaiadas com a Viga de Referência	116
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
ANEXO A - FOTOS	124
ANEXO B – TABELAS DE RESULTADOS	135

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O projeto e a execução de reparo/e ou reforço em estruturas de concreto armado deve ser elaborado com o conhecimento necessário da técnica mais adequada a ser utilizada em determinado problema estrutural.

A opção por um determinado tipo de reparo e/ou reforço deve ser baseada em dados que comprovem sua eficácia. Apesar de vários estudos terem sido realizados sobre este assunto, ele está longe de ser esgotado. Surgem novos materiais a serem usados que, combinados de diferentes maneiras, podem alcançar resultados bem satisfatórios.

Como uma alternativa aos sistemas de reforço tradicionais, surge a utilização de compósitos armados com fibras de carbono (CFRP) ou de vidro (GFRP) no reforço de estruturas de concreto armado.

O reforço pela adição de plásticos armados com fibras de carbono, tanto para o aumento da ductilidade como da capacidade resistente de elementos estruturais de concreto armado, embora de uso recente (desde 1991), já foi empregado em várias pontes, viadutos e edifícios.

Essa técnica, além de praticamente não alterar as dimensões da peça, representa grande atrativo pela excepcional resistência a ataques químicos, ótimo comportamento quanto à fadiga e à atuação de cargas cíclicas, leveza, extraordinária rigidez e estabilidade térmica e reológica.

Dando continuidade a uma série de estudos sobre reparo e/ou reforço realizados na COPPE, neste trabalho investiga-se a aplicação da técnica de reforço à flexão e flexão e cisalhamento com lâminas de fibras de carbono coladas com resina epóxica.

O trabalho objetivou a obtenção de conhecimento sobre reforço com lâminas de fibra de carbono coladas com resina epóxica, verificar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com este material, e adequar o modelo de

cálculo baseado na teoria de flexão simples para avaliar a resistência à flexão destas vigas.

O segundo capítulo apresenta, de forma sucinta, uma revisão bibliográfica sobre os principais tipos de técnicas de reparo e /ou reforço, alguns estudos realizados sobre reforço com lâminas ou tecidos de fibras de vidro e de carbono colados com resina epóxica e dois modelos de cálculo propostos.

No terceiro capítulo, detalha-se o programa experimental desenvolvido neste trabalho, que compreendeu o ensaio de três vigas de concreto armado simplesmente apoiadas. Antes de serem reforçadas, estas vigas foram submetidas a carregamento que provocou considerável deformação, e o reforço foi executado com as vigas sob carga, visando simular condições de reforço na prática.

A análise dos resultados obtidos das vigas ensaiadas é realizada no quarto capítulo, por meio de comparações entre os valores das grandezas medidas nas diferentes vigas e nestas vigas e numa ensaiada por outro autor considerada como de referência. São feitas também comparações entre cargas de ruptura das vigas reforçadas determinadas segundo o método de cálculo proposto neste trabalho, com diferentes considerações.

O quinto capítulo apresenta as principais conclusões deste trabalho e algumas sugestões para estudos futuros sobre o assunto nele tratado.

Complementando, o anexo A mostra fotografias referentes ao programa experimental realizado e o anexo B tabelas com os resultados dos ensaios.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentadas as principais causas de problemas estruturais em peças de concreto armado, as técnicas de reparo e/ou reforço mais comumente usadas e alguns estudos realizados sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas a flexão e a cisalhamento utilizando compósitos de fibra de vidro ou de fibra de carbono colados.

Embora haja várias publicações relativas a reparo e reforço, poucas tratam do reforço utilizando lâminas de fibras de carbono coladas, que é o objetivo de estudo deste trabalho.

De acordo com TALJSTEN (1999), a fibra de carbono apresenta vantagens de resistência à corrosão, baixo peso e neutralidade eletromagnética, além de ótimo comportamento à fadiga sob cargas cíclicas. Estas vantagens podem ser combinadas com a alta eficiência oferecida pela protensão externa para obter sucesso na reabilitação de estruturas e na construção de novos elementos pré-fabricados.

2.2 - Causas de Problemas Estruturais

Os problemas estruturais são atribuídos aos erros de origem humana, à deterioração dos materiais e aos acidentes.

Os erros humanos são referidos à má concepção, à falta de qualidade técnica na execução, inadequada seleção dos materiais, projetos e detalhes incompletos, modelos de cálculo incorretos, ao excesso de carga na utilização e instalações não previstas.

A deterioração dos materiais é devida ao envelhecimento natural destes, aos ataques químicos (cloretos, sais, ácidos e sulfatos) e biológicos (raízes, fungos e esgotos), à má utilização e à falta de manutenção necessária nas estruturas.

Quanto aos acidentes, eles podem ser de origem humana (explosões, incêndios, choques, aterros, dragagem, etc.) ou natural (cheias, sismos, etc.).

2.3- Técnicas de Reparo e Reforço

O processo de reparo consiste em restabelecer as condições originais, físicas e estruturais, do elemento ou da estrutura. O processo de reforço consiste em aumentar a capacidade resistente do elemento ou estrutura a ser reforçada.

Para a execução de reparos e reforços, deve-se primeiro diagnosticar o problema e tomar as medidas emergenciais necessárias; analisar a viabilidade do projeto; investigar o estado da estrutura com o auxílio de ensaios não destrutivos, considerando sua rigidez e redistribuição de cargas; selecionar a melhor técnica a ser utilizada e os materiais; e finalmente executar o trabalho com um rigoroso controle de qualidade.

Os materiais a serem usados devem possuir características especiais como: maior durabilidade, baixa permeabilidade, boa resistência estrutural, boa aderência ao concreto e ao aço, baixa retração, boa trabalhabilidade, fácil aplicação e propriedades compatíveis com o concreto e o aço, com objetivo de garantir a eficiência do processo de reparo e/ou reforço.

O reforço de elementos de concreto armado pela adição de armaduras exteriores (chapas de aço coladas com resina de epóxi ou perfis metálicos) é uma técnica adequada nos casos onde há deficiência nas armaduras existentes, sem haver deficiência nas dimensões dos elementos estruturais ou o concreto ser de baixa qualidade. Surge, então, como alternativa a estes sistemas, a adição de compósitos armados com fibras de carbono (ou de vidro), que são comercializados sob diversas formas, sendo os mais comuns os laminados pré-fabricados, os tecidos bidirecionais e as lâminas flexíveis unidirecionais impregnadas (APPLETON et al. ,1998).

Esses compósitos são utilizados mais frequentemente como elementos de reforço de estruturas de concreto armado, com o objetivo de aumentar a ductilidade e

resistência de pilares de pontes e viadutos (por confinamento passivo), e aumentar a capacidade resistente à flexão e ao cortante de vigas e lajes. Este processo, para o aumento da capacidade resistente à flexão e ao cortante de vigas e lajes, requer cuidado na escolha do sistema de amarração do compósito, assim como a análise de tensões na ligação entre o compósito e o substrato de concreto (APPLETON et al., 1998).

As técnicas mais utilizadas para reparo e reforço são:

- Adição de chapas de aço ou lâminas e tecidos de fibras de carbono ou de vidro coladas;
- Adição de perfis metálicos colados;
- Adição de tirantes ou cabos externos pré-tracionados (protensão exterior);
- Adição de vergalhões colados;
- Encamisamento com concreto projetado ou concreto lançado;
- Remoção e reconstrução da região danificada e
- Adição de novos elementos estruturais.

2.3.1 Técnica de Chapas de Aço e Compósitos Colados

A técnica de chapas coladas com adesivo epóxico para o reforço de vigas e lajes de concreto armado, é uma das técnicas mais utilizadas. É uma técnica simples e “limpa” que leva ao aumento da resistência e da rigidez da peça, diminuindo flechas, rotações e aberturas de fissuras.

Essa técnica altera muito pouco as dimensões das peças estruturais e pode ser aplicada nas faces superior, inferior e laterais de vigas de pontes e edificações.

O sucesso deste método, de acordo com TALJSTEN (1996), depende da boa performance do adesivo epóxico e da preparação das superfícies que o receberão.

2.3.1.1 Chapas de Aço

Devido à facilidade de execução e limpeza da aplicação da técnica com chapas coladas, ela é muito recomendada para reforços de vigas e lajes de edifícios. As chapas

de aço são muito utilizadas devido à facilidade de aquisição do material e popularização da técnica de aplicação.

As principais desvantagens desta técnica são as seguintes:

- A impossibilidade de visualizar fissuras na região sob a chapa colada;
- A impossibilidade de detectar deterioração por corrosão na face interna;
- A baixa resistência ao fogo da chapa, sendo necessário a proteção da mesma por meio de um revestimento isolante à base de amianto ou vermiculita;
- Tendência de destacamento dos bordos devido à concentração de tensões.

O CEB (1983) recomenda alguns cuidados para que se obtenha resultados satisfatórios, como: perfeita aderência entre concreto/cola/chapa; espessuras máximas da camada de resina epóxica e da chapa de aço de 1,5 mm e 3,0 mm, respectivamente; aplicação de uma pressão leve e uniforme quando da colagem da chapa de aço no concreto por no mínimo 24 horas (tempo necessário depende do tipo da resina e da temperatura ambiente); proteção da região reforçada contra as mudanças de temperatura e fogo.

A melhor solução é usar tiras de chapa de aço, evitando-se as chapas contínuas, pois estas dificultam a visualização da formação de fissuras e aumentam as concentrações de tensões.



Figura 2.1 – Viga reforçada a flexão e cisalhamento com o uso de chapas coladas

De acordo com CARNEIRO (1997), o uso de chumbadores nas extremidades dos estribos de chapa de aço em forma de “U” não impede o destacamento da chapa, mas previne sua completa separação, tornando a ruptura mais dúctil. Em MORAIS (1997) verificou-se que os estribos formados por chapas em tiras coladas foram efetivos como dispositivos de ancoragem para evitar o descolamento e o arrancamento da chapa de aço de reforço à flexão.

2.3.1.2 Lâminas e Tecidos de Fibras

O reforço estrutural de elementos de concreto por adição de compósitos armados com fibras de carbono ou de vidro constitui um método simples e de rápida execução, devido à leveza do material e ao fato de se poder dispensar o escoramento, além de ter-se um trabalho de execução limpo. Deve-se ressaltar a importância da devida preparação do substrato e da qualidade dos procedimentos de aplicação dos compósitos (APPLETON et al., 1998).

Os materiais à base de fibras mais utilizados são os de fibra de vidro e de carbono.

As fibras de carbono são as que possuem melhores características de resistência mecânica, química e mais alto módulo de elasticidade. As lâminas de fibras de carbono existem em várias larguras e podem ser transportadas em rolos, o que facilita a sua aplicação.

Os compósitos de fibras de carbono têm maior proporção resistência/peso do que as chapas de aço, além de não serem vulneráveis à corrosão, apresentarem excelente resistência à fadiga e poderem ser fornecidos em qualquer comprimento.

Como desvantagens desta técnica para reforço podem ser citadas:

- A impossibilidade de visualizar fissuras da região sob a lâmina ou tecido de fibras colada;
- Alto custo;
- Tendência de descolamento dos bordos devido à concentração de tensões;
- Coeficiente de dilatação térmica diferente daquele do concreto;
- Proteção contra incêndio e radiação ultravioleta necessária (EMMONS, 1998).

Dentre as vantagens da fibra de carbono, segundo TRIANTAFILLOU et al.(1992), está a sua resistência à corrosão, neutralidade eletromagnética e a grande eficiência na construção quando comparada com outros materiais convencionais. Sua aplicação em estruturas de concreto são principalmente como elementos para protensão, estruturas em áreas sísmicas, reforço de vigas de concreto com lâminas ou tecidos de fibra de carbono coladas por resina epóxica, e elementos pré-fabricados.

Há a necessidade de um preparo prévio da superfície do elemento que receberá o adesivo epóxico e a lâmina de fibra de carbono; deve-se apicoar e limpar o concreto, limpar a lâmina de fibra de carbono e aplicar o adesivo epóxico em ambas as partes.

As lâminas de fibra de carbono são uma combinação de fibras de carbono em uma matriz de resina epóxica, que na direção destas fibras tem uma resistência muito alta. As fibras são o elemento com capacidade resistente e a matriz de resina epóxica serve para unir as fibras entre si, permitindo a transferência de força entre as fibras e a proteção destas. A resistência na direção transversal das lâminas é baixa. As características mecânicas na direção longitudinal da lâmina de fibra são determinadas pelo tipo de fibra e pela quantidade de fibras em volume.

O dimensionamento do reforço com compósitos de fibra de carbono, de acordo com APPLETON et al. (1998), pode ser feito considerando-se as mesmas regras aplicadas ao caso das chapas coladas. É fundamental a caracterização mecânica (relação tensão-deformação) do compósito efetivamente aplicado no local e o estabelecimento do limite de deformação a considerar, tanto no estado limite último como em serviço.

2.3.2 Técnica de Estribos Externos Pré-tracionados

É uma técnica de fácil execução e manutenção, consistindo um sistema simples e de baixo custo. Usam-se barras de aço para os estribos isolados e cantoneiras, arruelas, porcas e roscas para fixação. A aplicação da pré-tração pode ser feita por meio de um torquímetro.

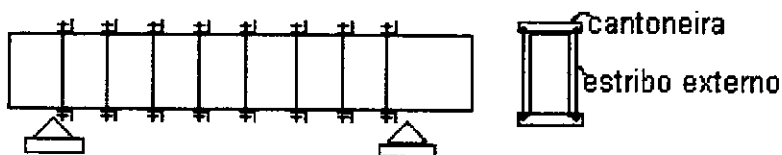


Figura 2.2 – Viga reforçada ao cisalhamento com o uso de estribos externos pré-tracionados.

Esta técnica de uso de estribos não aderentes aumenta a resistência ao cisalhamento de peças previamente carregadas ou não. Permite também o controle de

aberturas das fissuras existentes, reduzindo rapidamente as deformações das armaduras internas das peças reforçadas.

2.3.3 Técnica de Encamisamento com Concreto ou Argamassa

Esta é uma técnica bastante empregada em reforço de elementos de concreto armado, tais como pilares e vigas, apesar de ser uma técnica relativamente trabalhosa no que diz respeito ao preparo do substrato e execução da nova camada de material.

As desvantagens mais relevantes dessa técnica são o aumento da carga permanente da estrutura reforçada e o efeito da retração que acarreta problemas de aderência e fissuração entre a camada nova e o elemento antigo.

Para anular o efeito de retração, é recomendada a utilização de aditivos expansivos, criando-se um certo confinamento do substrato antigo, e garantindo, assim, a perfeita transferência de tensões cisalhantes.

É recomendado também que o concreto novo possua uma resistência à compressão e módulo de elasticidade um pouco maiores que os do concreto antigo, garantindo uma monoliticidade entre os concretos novo e antigo.

2.3.4 Técnica de Protensão Exterior com Cordoalhas

Esta é uma técnica mais sofisticada e de custo mais elevado. Necessita do emprego de cordoalhas de aço com tensões elevadas, o uso de blocos desviadores e regiões de ancoragem que requerem uma atenção especial no dimensionamento.

Com esta técnica pode-se reduzir as deformações das armaduras internas e das flechas da peça reforçada.

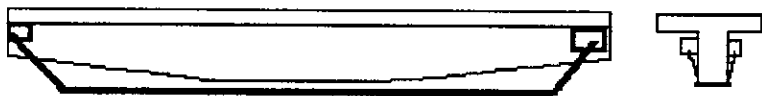


Figura 2.3 – Viga reforçada à flexão com o uso de protensão exterior com cordoalhas

2.3.5 Técnica de Vergalhões Colados

É uma das técnicas econômicas, pois os estribos ou armaduras longitudinais podem ser provenientes de sobras de obras.

Esta técnica é utilizada para o reforço ao cisalhamento e à flexão de vigas de concreto armado com ou sem carregamento prévio.

São executados sulcos na região a ser reforçada, onde os estribos ou a armadura longitudinal são colados com resina epóxica, após uma adequada limpeza do substrato.



Figura.2.4 – Viga reforçada à flexão e cisalhamento com o uso de vergalhões colados

2.4 - Estudos Existentes sobre técnicas de Reforço

2.4.1 – Estudos de Vigas

2.4.1.5 – SHARIF et al (1994)

Foram ensaiadas neste trabalho 10 vigas de concreto armado com o objetivo de analisar a influência da espessura de lâminas de fibra de vidro (GFRP) e ancoragem do reforço à flexão no desempenho das vigas.

As vigas tinham seção transversal quadrada de 150 mm x 150 mm, 1180 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas, foram carregadas com duas carga concentradas e armadas segundo mostrado na figura 2.5. Duas das vigas não foram reforçadas (vigas de referência CB) e as outras tiveram lâminas de fibra de vidro com espessuras variáveis como reforço (tabela 2.1).

Foram usados dois tipos de adesivos epóxicos. As vigas foram submetidas a dois ciclos de carregamento; foram inicialmente carregadas até 85% da carga última da viga

de referência (a armadura longitudinal escoou), descarregadas e reforçadas, e então carregadas até a ruptura.

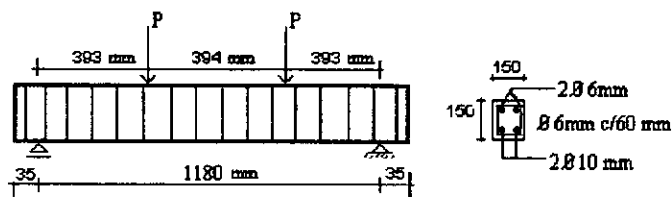


Figura 2. 5 – Características das vigas ensaiadas por SHARIF et al.

De acordo com a disposição do reforço, as 8 vigas foram divididas em 4 grupos (figura 2.6).

As vigas reforçadas tiveram maior capacidade resistente mas menor ductilidade que a de referência.

Os resultados mostraram que o aumento da espessura da lâmina leva a maiores tensões na ligação lâmina - concreto, acarretando ruptura prematura por separação da chapa e arrancamento do concreto.

A ancoragem das vigas P2B e P3B evitaram a separação das lâminas de fibra de vidro. Elas romperam devido a fissuras de cisalhamento que se formaram a partir das de flexão que apareceram fora da região reforçada.

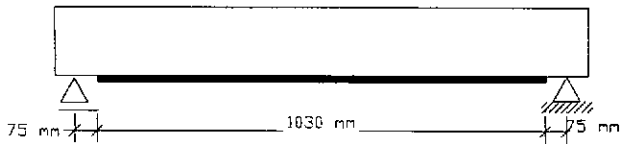
Com base nos resultados dos ensaios das vigas de referência (CB), avaliou-se a carga última, fissuras e escoamento das armaduras.

Nas vigas P2BW e P3BW, as lâminas de fibra de vidro coladas nas laterais das vigas eliminaram o surgimento das fissuras de cisalhamento observada na viga P2B e P3B. A viga P3BW rompeu prematuramente devido à formação de fissura horizontal entre a lâmina na face inferior e a armadura longitudinal interna, e a viga P2BW, com fibra de menor espessura, rompeu por flexão.

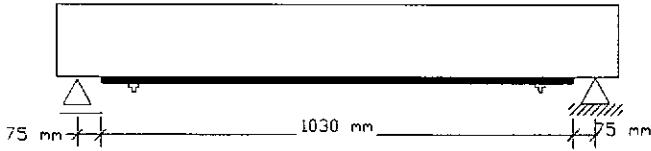
A forma da lâmina de fibra de vidro usada na viga P3J se mostrou uma boa alternativa, já que promoveu uma efetiva ancoragem, eliminando o destacamento da lâmina, e evitou fissuras diagonais. Esta viga teve uma ruptura por flexão com esmagamento do concreto.

Tabela 2.1- Dados das vigas ensaiadas por SHARIF ET AL.

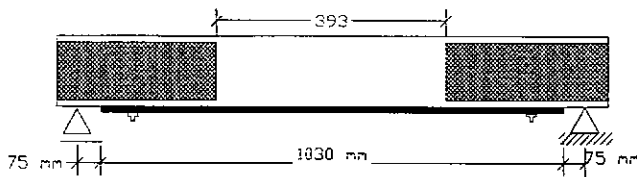
Viga	Grupo	Tipo de reforço	Lâminas de fibra de vidro		Características da peça		Armadura interna		P_u (kN)	Modo De ruptura
			f_{gf} (MPa)	e_f (mm)	b (mm)	f_{cm} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)		
CB					150	37,7	157,1	450	53	Flexão por escoamento da armadura interna
P1	A	Lâmina- GFRP na face inferior	170	1	150	37,7	157,1	450	67	Flexão por ruptura da lâmina de fibra de vidro
P2	A	Lâmina- GFRP na face inferior	170	2	150	37,7	157,1	450	68	Destacamento da Lâmina
P3	A	Lâmina- GFRP na face inferior.	170	3	150	37,7	157,1	450	66	Destacamento da Lâmina
P2B	B	Lâmina- GFRP na face inferior, ancorada com chumbadores nas extremidades.	170	2	150	37,7	157,1	450	65	Cisalhamento
P3B	B	Lâmina- GFRP na face inferior, ancorada com chumbadores nas extremidades.	170	3	150	37,7	157,1	450	73	Cisalhamento
P2BW	C	Lâmina- GFRP na face inferior, ancorada com chumbadores nas extremidades e lâminas de GFRP nas faces laterais	170	2	150	37,7	157,1	450	78	Flexão por esmagamento do concreto
P3BW	C	Lâmina- GFRP na face inferior, ancorada com chumbadores nas extremidades e lâminas de GFRP nas faces laterais	170	3	150	37,7	157,1	450	72	Destacamento da Lâmina
P3J	D	Lâmina de GFRP em forma de I colada na face inferior e envolvendo as faces laterais	170	3	150	37,7	157,1	450	82	Flexão por esmagamento do concreto



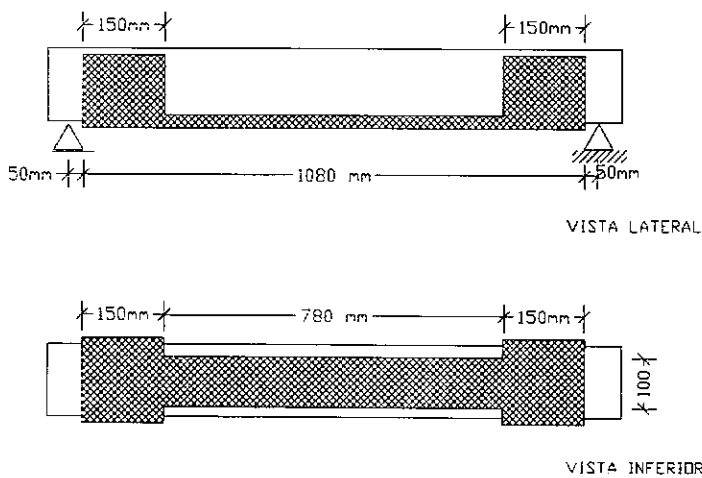
Grupo A – Lâmina de fibra de vidro colada na face inferior da viga .



Grupo B – Lâmina de fibra de vidro colada na face inferior da viga, ancorada com chumbadores nas extremidades.



Grupo C – Lâmina de fibra de vidro colada na face inferior da viga, ancorada com chumbadores nas extremidades, e duas bandas de fibra de vidro coladas em cada face lateral.



Grupo D – Lâmina de fibra de vidro em forma de I colada na face inferior e envolvendo as faces laterais da viga nas extremidades.

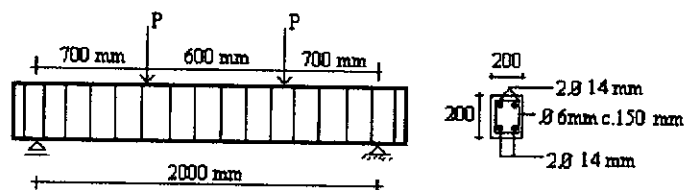
Figura 2.6 – Armaduras de reforço de cada grupo de vigas.

2.4.1.2 – ARDUINI, TOMMASO E NANNI (1997)

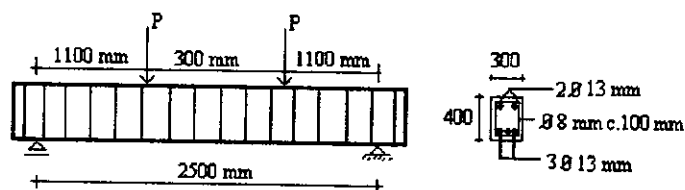
Foram ensaiadas neste trabalho dez vigas de concreto armado com objetivo de analisar o comportamento destas reforçadas à flexão com tecidos e lâminas de fibra de carbono.

As vigas foram divididas em dois grupos, A (reforçadas com lâminas de fibra de carbono) e B (reforçadas com tecido de fibra de carbono). As vigas B foram ensaiadas por outro autor. As vigas A1 e A2 eram iguais às demais vigas do grupo A, mas não foram reforçadas (vigas de referência) e a Viga B1 é a viga de referência para o grupo B.

As seis vigas do grupo A tinham seção transversal de 200 mm x 200 mm, 2000 mm de vão livre e as quatro vigas do grupo B tinham seção transversal de 300 mm x 400 mm, 2500 mm de vão livre, todas eram simplesmente apoiadas. A armadura interna é mostrada na figura 2.7.



Grupo A



Grupo B

Figura 2.7 – Características das vigas de ARDUINI et al. (grupo A) e de AUBERT (grupo B).

No ensaio destas vigas foi focado o modo de ruptura e não a carga resistente. O tipo de reforço aplicado assim como o modo de ruptura das vigas ensaiadas são apresentados na tabela 2.2.

Observa-se que mesmo com a ancoragem com o auxílio de chapas de aço coladas há a possibilidade de uma ruptura por destacamento do compósito (viga A6).

Tabela 2.2 – Vigas ensaiadas por ARDUINI et al.

Viga	Tipo de reforço	Armadura interna		f_c (MPa)	Reforço de fibra de carbono			Modo de ruptura
		A_s (mm ²)	f_y (MPa)		b_f (mm)	e_f (mm)	L_f (mm)	
A1		308	540	33				Esmagamento do concreto
A2		308	540	33				
A3	3 lâminas de fibra de carbono	308	540	33	50	1,3	1700	Ruptura frágil do concreto à cisalhamento
A4		308	540	33	50	1,3	1700	
A5	2 camadas de 3 lâminas	308	540	33	50	1,3	1700	Destacamento na extremidade da lâmina
A6	=A5 c/ chapas de aço em U nas extremidades	308	540	33	50	1,3	1700	Destacamento da chapa de ancoragem
B1		398	340	30				Esmagamento do concreto
B2	1 camada de tecido	398	340	30	300	0,17	2100	Ruptura do tecido
B3	3 camadas de tecido	398	340	30	300	0,17	2100	Descolamento do tecido
B4	=B3 c/ tecido em U ao longo de todo o vão livre	398	340	30	300	0,17	2100	Destacamento do tecido

Obs: Não são fornecidas as cargas de ruptura.

Para o reforço de fibra de carbono: $E = 167GPa$ e $f_f = 2906MPa$

2.4.1.3 - APPLETON, RIPPER, E SOUZA (1998)

Foram ensaiadas neste trabalho oito vigas de concreto armado com objetivo de analisar o comportamento de estruturas de concreto reforçadas à flexão com tecidos de fibra de carbono (TFC).

O sistema TFC para reforço estrutural consiste na adição, por colagem, de um compósito armado com tecido de fibras de carbono impregnadas por epóxi. Sendo este compósito um material resistente aos esforços de tração, permite o reforço à flexão e ao cortante. Sua principal característica é de ser armado por um tecido bidirecional, formado por 70% de fibras de carbono no sentido principal e 30% de fibras no sentido transversal. Depois de colado, o compósito tem cerca de 20 a 40% de tecido e 80 a 60% de resina.

Verificou-se neste estudo que as propriedades do compósito obtido por impregnação de epóxi in situ são diferentes das do tecido puro, variando em função das condições da sua aplicação e da preparação do substrato.

As oito vigas tinham seção transversal de 120 mm x 200 mm, 2100 mm de vão livre e eram simplesmente apoiadas. Os tipos de carregamentos aplicados nas oito vigas estão relacionados na tabela 2.3 e a armadura interna é mostrada na figura 2.8. Os tecidos de fibra de carbono utilizados possuíam largura de 75 mm.

A viga FRD (viga de referência) era igual às demais, mas não foi reforçada.

A viga FRR foi executada com uma barra de aço adicional de diâmetro de 6,3 mm, de maneira que a área total de aço fosse equivalente à soma da área de tecido de fibra de carbono com a área de aço usadas nas vigas reforçadas.

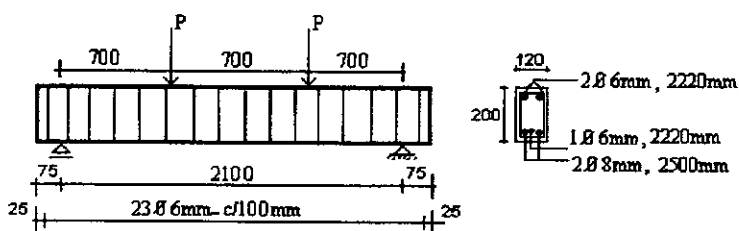


Figura 2.8 – Características das vigas de APPLETON et al.

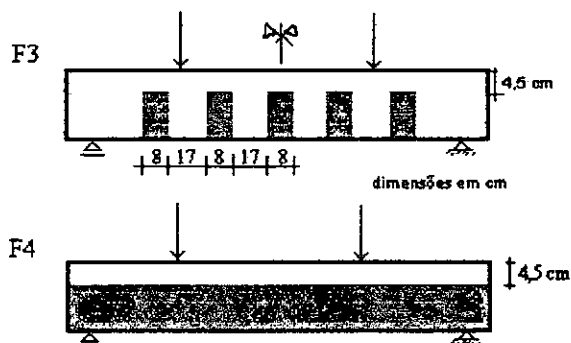


Figura 2.9 – Detalhamento da armadura externa de reforço das vigas F3 e F4.

Todas as vigas foram ensaiadas apenas uma vez, com exceção da viga F3, que foi pré-fissurada (abertura de fissura $\cong 0,2$ mm e tensão do aço = f_y) e posteriormente reforçada, e só então rompida.

Fazendo-se uma avaliação das flechas e momentos no meio do vão das vigas de referência e das vigas F1 e F2, observou-se que as vigas reforçadas com uma camada de tecido apresentaram comportamento semelhante, independente do tipo de carregamento aplicado.

Os resultados dos ensaios mostraram que o reforço aumentou a capacidade resistente das vigas em aproximadamente 70%, comparadas com a viga FRD, enquanto que em serviço o desempenho das vigas reforçadas não foi substancialmente alterado.

As vigas F1, F2 e FRR apresentaram momentos últimos da mesma ordem de grandeza, sendo que a viga FRR deformou-se um pouco menos.

Comparando a viga F1, reforçada com uma camada de compósito, com a viga F5, reforçada com duas camadas de compósito, observou-se que a inclusão de mais uma camada de tecido aumentou a capacidade resistente da viga à flexão em aproximadamente 65%. O tipo de rotura foi idêntico para ambas as vigas, ou seja, com o descolamento do tecido de fibra de carbono e esmagamento do concreto.

A viga F2, que menos se deformou, teve rotura da fibra por tração e descolamento do compósito numa das suas extremidades. Esta foi a única viga a não apresentar esmagamento do concreto na zona comprimida.

Tabela 2.3- Dados das vigas ensaiadas por APPLETON et al.

Viga	Tipo de reforço	Tipo de carregamento	Armadura interna		Características da peça				Tecido de fibra de carbono		M_u (kN.m)	Modo De ruptura
			A_s (mm ²)	f_y (MPa)	b (mm)	d (mm)	f_{cm} (MPa)	f_{tr} (MPa)	E_f (GPa)			
FRD		Duas cargas concentradas nos terços do vão	100,5	486	120	196	33				8,8	
FRR		Duas cargas concentradas nos terços do vão	128,8	486	120	196	33				13,7	
F1	1 camada de reforço na face inferior	Duas cargas concentradas nos terços do vão	100,5	486	120	196	33	1425	138		14,7	Descolamento do tecido e esmagamento do concreto
F2	1 camada de reforço na face inferior	Seis cargas concentradas	100,5	486	120	196	33	1425	138		15,4	Tração e descolamento do tecido
F3	1 camada de reforço na face inferior e 5 bandas transversais de amarração nas faces laterais	Duas cargas concentradas nos terços do vão	100,5	486	120	196	33	1425	138		17,5	Tração e descolamento do tecido e esmagamento do concreto
F4	1 camada de reforço na face inferior e nas faces laterais	Duas cargas concentradas nos terços do vão	100,5	486	120	196	33	1425	138		33,6	Tração do tecido e esmagamento do concreto
F5	2 camadas de reforço na face inferior	Duas cargas concentradas nos terços do vão	100,5	486	120	196	33	1425	138		24,2	Descolamento do tecido e esmagamento do concreto

A viga F3 também teve rotura por tração do tecido de fibra de carbono e um discreto descolamento deste na porção localizada entre duas bandas de amarração adjacentes. Como era previsto, por não se ter injetado as fissuras da viga, estas voltaram a abrir durante o ensaio que levou a viga até a ruptura.

A viga F4, onde o tecido de fibra de carbono envolvia também as faces laterais, a rotura veio a dar-se por tração do tecido de fibra de carbono, devido à grande deformação da viga.

O modo de rotura das vigas foi sempre brusco e local onde se desencadeou o descolamento esteve sempre associado a uma fissura de flexão. De um modo geral, as vigas suportaram o carregamento até grandes deformações e, sem qualquer aviso, romperam quando se deu o descolamento e/ou rotura do tecido de fibra de carbono. O descolamento ou rotura do tecido de fibra de carbono deu-se sempre sob uma fissura de flexão de grande abertura.

As maiores aberturas de fissuras são diretamente relacionadas com regiões mais críticas para o descolamento do tecido de fibra de carbono, assim como as regiões que sofrem maior tensão de tração nas vigas. Deve-se cuidar da amarração dos compósitos e as bandas transversais aparentam ser um solução válida.

Os momentos últimos teóricos, no estado limite de ruptura das vigas reforçadas, foram calculados seguindo as instruções do fabricante, que limitam a deformação máxima do tecido em 1%. Este cálculo foi feito considerando o mesmo método aplicado ao caso de chapas coladas e levou a valores de momento menores que os experimentais.

2.4.1.4 – GANGARAO e VIJAY (1998)

Foram ensaiadas neste trabalho 24 vigas de concreto armado com o objetivo de analisar o comportamento de estruturas de concreto reforçadas utilizando-se diferentes sistemas de reforço à flexão com compósitos de fibra de carbono (CFRP) e chapas de aço coladas.

As 24 vigas tinham seção transversal retangular de 150 mm x 300 mm, 2740 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas cargas concentradas. A armadura interna é mostrada na figura 2.10. As vigas ensaiadas foram divididas em 7

grupos de acordo com o reforço aplicado, as vigas do grupo 1 (1A₁-R, 1A₂-R e 1A₃-R) eram de referência, as do grupo 2 (2A-S, 2B₁-S e 2B₂-S) eram reforçadas com chapas de aço coladas, as dos grupos 3 a 6 (3A-C, 3B₁-C, 3B₂-C, 3B₃-C, 4A-C, 4B₁-C, 4B₂-C, 4B₃-C, 5A-C, 5B₁-C, 5B₂-C, 5B₃-C, 6A-C, 6B₁-C, 6B₂-C, 6B₃-C) eram reforçadas com tecido de fibra de carbono em forma de “U” e das duas do grupo 7 (7A-R e 7A-C) uma era de referência e a outra reforçada com 3 camadas de tecido de fibra de carbono. As vigas 1A₁-R, 1A₂-R, 1A₃-R, 2A-S, 3A-C, 4A-C, 5A-C, 6A-C e 7A-R foram submetidas a um único ciclo de carregamento até a ruptura, enquanto as demais primeiramente foram fissuradas sendo carregadas até a deformação da armadura longitudinal interna atingir o valor de 2,0 ‰, reforçadas e carregadas até a ruptura.

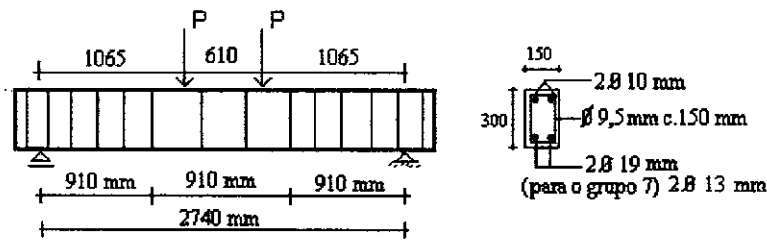


Figura 2. 10 – Características geométricas e detalhamento das 14 vigas ensaiadas.

Foram usados 6 sistemas de reforço, como indicado nas tabela 2.4 e figura 2.11.

Para as vigas reforçadas com chapas de aço foram usados 6 chumbadores espaçados de 460 mm (centro a centro). Nas vigas com mais de uma camada, cada camada foi aplicada independentemente, com a seguinte sendo adicionada após a sua cura.

Todas as vigas reforçadas tiveram cargas últimas superiores às das de referência (1A₁-R, 1A₂-R, 1A₃-R e 7A-R).

O uso do reforço reduziu as flechas para a carga de escoamento da armadura interna e a redução dependeu do tipo e disposição do material do reforço. O maior ganho de resistência ocorreu com a viga 4B₁-C, com carga última alcançada de 195,80 kN.

Entre as vigas reforçadas com tecido de fibra de carbono, a com reforço na parte inferior e nas faces laterais (forma de “U”) tiveram menores deformações e um aumento

Tabela 2.4A- Dados das vigas ensaiadas por GANGARAO et al.

Viga	Tipo de reforço	Armadura interna		Características da peça			Tecido de fibra de carbono		Chapa de Aço		P_u (kN)	Modo de ruptura
		A_s (mm ²)	f_y (MPa)	b (mm)	d (mm)	f_{cm} (MPa)	e_f (mm)	E_f (GPa)	e_c (mm)	f_y (MPa)		
1A ₁ -R		628	415	150	270	50,2					115,7	Escoamento da armadura interna
1A ₂ -R		628	415	150	270	50,2					120,2	Escoamento da armadura interna
1A ₃ -R		628	415	150	270	40,0					115,7	Escoamento da armadura interna
2A-S	Chapa de aço colada	628	415	150	270	35,4			4,5	250	106,8	Descolamento da chapa
2B ₁ -S	Chapa de aço colada	628	415	150	270	35,4			4,5	250	124,6	Descolamento da chapa
2B ₂ -S	Chapa de aço colada	628	415	150	270	40,0			4,5	250	142,4	Cisalhamento
3A-C	3 camadas de tecido de fibra de carbono	628	415	150	270	35,4	0,11	240			186,9	Esmagamento do concreto
3B ₁ -C	longitudinal + tecido de fibra de carbono em forma de "U"	628	415	150	270	50,2	0,11	240			178,0	Esmagamento do concreto
3B ₂ -C		628	415	150	270	50,2	0,11	240			191,4	Esmagamento do concreto
3B ₃ -C		628	415	150	270	38,4	0,11	240			169,1	Esmagamento do concreto
4A-C	3 camadas de tecido de fibra de carbono	628	415	150	270	35,4	0,11	240			169,1	Esmagamento do concreto
4B ₁ -C	longitudinal + tecido de fibra de carbono em forma de "U"	628	415	150	270	50,2	0,11	240			195,8	Esmagamento do concreto
4B ₂ -C		628	415	150	270	50,2	0,11	240			191,4	Esmagamento do concreto
4B ₃ -C		628	415	150	270	38,4	0,11	240			182,5	Esmagamento do concreto

Para o tecido de fibra de carbono: $2824 \leq \sigma_f \leq 3778$ MPa

Tabela 2.4B- Dados das vigas ensaiadas por GANGARAO et al.

Viga	Tipo de reforço	Armadura interna		Características da peça				Tecido de fibra de carbono		P_u (kN)	Modo de ruptura			
		A_s (mm ²)	f_y (MPa)	b (mm)	d (mm)	f_{cm} (MPa)	e_f (mm)	E_f (GPa)						
5A-C	3 camadas de tecido de fibra de carbono longitudinal + tecido de fibra de carbono em forma de "U"	628	415	150	270	35,4	0,11	240	186,9	Esmagamento do concreto				
5B ₁ -C		628	415	150	270	50,2	0,11	240			182,5	Esmagamento do concreto		
5B ₂ -C		628	415	150	270	40,0	0,11	240					178,0	Esmagamento do concreto
5B ₃ -C		628	415	150	270	35,4	0,11	240						
6B ₁ -C	3 camadas de tecido de fibra de carbono longitudinal + tecido de fibra de carbono em forma de "U"	628	415	150	270	35,4	0,11	240	191,4	Esmagamento do concreto				
6B ₂ -C		628	415	150	270	40,0	0,11	240			182,5	Esmagamento do concreto		
6B ₃ -C		628	415	150	270	35,4	0,11	240					178,0	Esmagamento do concreto
7A-R		265	415	150	270	50,2	0,11	240	49,0	Esmagamento do concreto				
7A-C	3 camadas de tecido de fibra de carbono	265	415	150	270	50,2	0,11	240	97,9	Destacamento do tecido				

Para o tecido de fibra de carbono: $2824 \leq \sigma_f \leq 3778$ MPa

significativo nas suas cargas últimas quando comparada com a sem reforço nas faces laterais (7A-C). Sobre as vigas reforçadas com chapas de aço coladas, estas alcançaram resistências menores do que as reforçadas com tecido de fibra de carbono independente do tipo de reforço aplicado.

A viga com compósitos verticais em forma de U tiveram maior capacidade resistente do que outras, eles impedem o desenvolvimento das fissuras de cisalhamento.

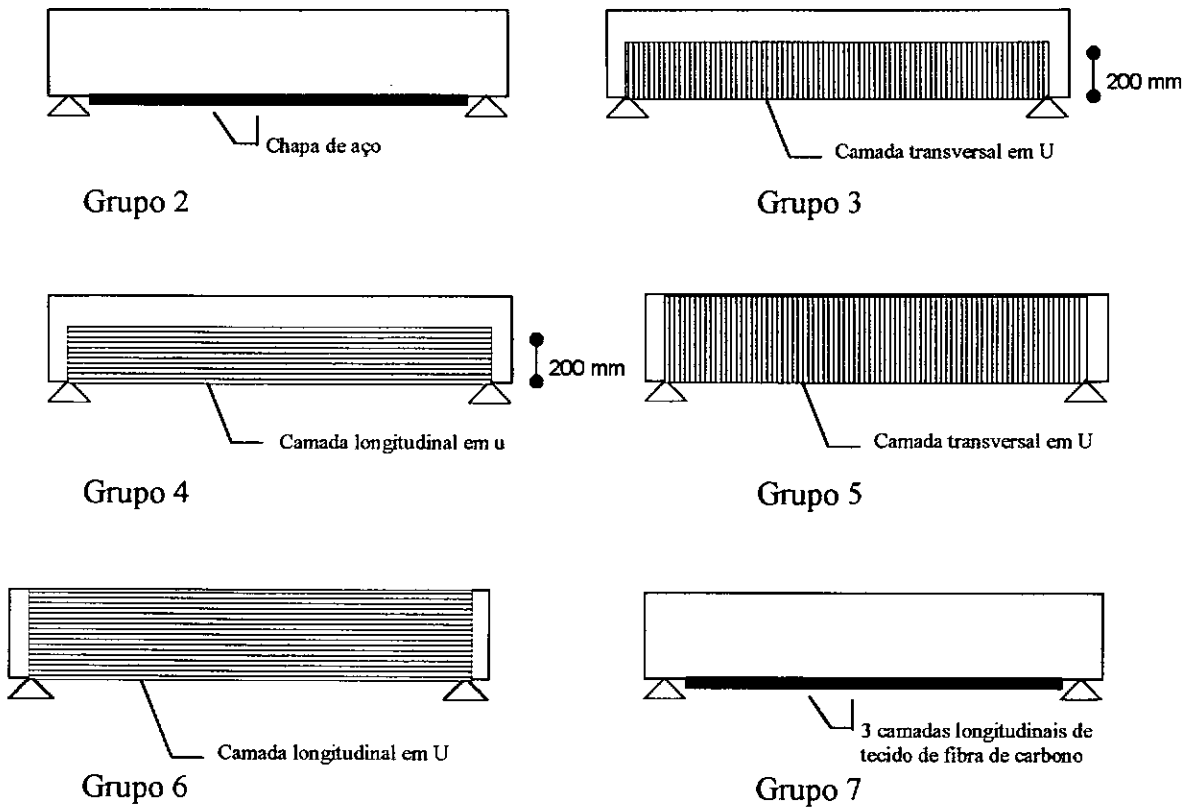


Figura 2.11 – Tipos de reforço usados nas vigas de GANGARAO et al.

A carga correspondente ao escoamento da armadura interna das vigas reforçadas com tecidos de fibra de carbono em forma de “U “ foram 25% maiores do que as cargas correspondentes ao escoamento das vigas não reforçadas.

2.4.1.5 - ROSS , JEROME, TEDESCO AND HUGHES (1999)

Neste trabalho são feitos estudos experimentais e teóricos referentes ao reforço à flexão de vigas de concreto armado com lâminas de fibras de carbono. Os resultados das vigas ensaiadas foram comparados com os de uma análise não linear usando o método dos elementos finitos.

O programa experimental consistiu na confecção de 24 vigas de concreto armado, sub-armadas, com seção transversal de 200 mm x 200 mm, 2742 mm de vão livre e com duas cargas concentradas. O detalhamento da armadura interna é mostrado na figura 2.12.

As vigas foram divididas em seis grupos de quatro, de acordo com a taxa de armadura longitudinal utilizada, que variou da mínima à máxima ($0,75 \rho_b$) segundo a norma americana.

As lâminas de fibra de carbono tinham comprimento de 2740 mm, foram coladas na face tracionada da viga com resina epóxica e curadas a temperatura ambiente.

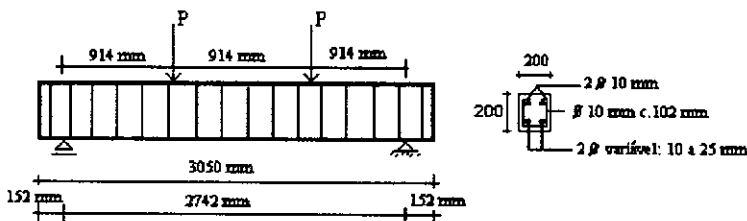


Figura 2.12 – Características das vigas de ROSS et al.

Em cada um dos grupos de vigas, três vigas foram reforçadas com três camadas de lâmina de fibras de carbono, (B,C e D) e uma não (A).

Os grupos de vigas 4, 5 e 6, de maior taxa de armadura longitudinal interna, romperam por esmagamento do concreto comprimido, acompanhado de fissuras horizontais na vizinhança da armadura longitudinal de tração interna na região de momento constante.

Tabela 2.5A- Dados das vigas ensaiadas por ROSS et al.

Viga	Tipo de reforço	Armadura interna		Características da peça						Lâmina de fibra de carbono				P_u (kN)	Modo de ruptura
		A_s (mm ²)	f_y (MPa)	b (mm)	d (mm)	f_{cm} (MPa)	e_f (mm)	E_f (GPa)	b_f (mm)	f_{ff} (MPa)	e_f (mm)	E_f (GPa)	b_f (mm)		
1A		142	410	200	152	54,8								26,7	
1B	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	142	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				80,1	Falha interlaminar e descolamento do reforço
1C	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	142	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				71,2	Falha interlaminar e descolamento do reforço
2A		259	410	200	152	54,8								46,7	
2B	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	259	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				97,9	Falha interlaminar e descolamento do reforço
2C	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	259	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				71,2	Falha interlaminar e descolamento do reforço
2D	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	259	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				80,1	Falha interlaminar e descolamento do reforço
3A		400	410	200	152	54,8								62,3	
3B	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	400	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				109,0	Falha interlaminar e descolamento do reforço
3C	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	400	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				108,1	Falha interlaminar e descolamento do reforço
3D	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	400	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206				108,6	Falha interlaminar e descolamento do reforço

Tabela 2.5B- Dados das vigas ensaiadas por ROSS et al.

Viga	Tipo de reforço	Armadura interna		Características da peça				Lâmina de fibra de carbono				P_u (kN)	Modo de ruptura
		A_s (mm ²)	f_y (MPa)	b (mm)	d (mm)	f_{cm} (MPa)	e_f (mm)	E_f (GPa)	b_f (mm)	f_{fr} (MPa)			
4A		774	410	200	152	54,8						71,2	
4B	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	774	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		107,6	Esmagamento do concreto
4C	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	774	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		104,6	Esmagamento do concreto
4D	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	774	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		111,3	Esmagamento do concreto
5A		612	410	200	152	54,8						115,7	
5B	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	612	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		146,9	Esmagamento do concreto
5C	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	612	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		146,9	Esmagamento do concreto
5D	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	612	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		145,5	Esmagamento do concreto
6A		1019	410	200	152	54,8						133,5	
6B	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	1019	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		169,1	Esmagamento do concreto
6C	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	1019	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		153,1	Esmagamento do concreto
6D	3 Lâminas de fibra de carbono na face inferior	1019	410	200	152	54,8	0,45	138	203	2206		153,1	Esmagamento do concreto

Os grupos de vigas 1, 2 e 3, onde a contribuição do reforço de lâminas foi menor por elas terem menor taxa de armadura longitudinal interna, tiveram a ruptura com falha interlaminar do reforço e da ligação adesivo-reforço.

A tabela 2.5 mostra a carga e o modo de ruptura, com outros dados das vigas. Nela pode-se observar que, nas vigas com menor taxa de armadura longitudinal interna, o reforço levou a aumento de resistência de mais de 70%.

Os autores concluíram que, para haver a utilização da capacidade de resistência da lâmina de fibra de carbono, é necessário implementar um sistema de ancoragem para as lâminas de fibras para que estas não descolem prematuramente.

2.4.1.6 - GRACE, SAYED, SOLIMAM e SALEH (1999)

Foram ensaiadas neste trabalho 14 vigas de concreto armado com o objetivo de analisar o comportamento de estruturas de concreto reforçadas utilizando-se diferentes sistemas de reforço à flexão com compósitos de fibra de vidro (GFRP) e de carbono (CFRP) e tipos de adesivos epóxicos.

As 14 vigas tinham seção transversal retangular de 152 mm x 292 mm, 2743 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e carregadas com uma carga concentrada no meio do vão. A armadura interna é mostrada na figura 2.13. Primeiramente as vigas foram fissuradas sendo carregadas até uma carga de 44,8 kN, depois cada viga foi reforçada e carregada até a ruptura.

Além das 14 vigas, uma viga adicional de controle, sem reforço, denominada CONT também foi ensaiada para determinar sua ductilidade, carregamento último, e flechas para fazer comparações com as vigas reforçadas.

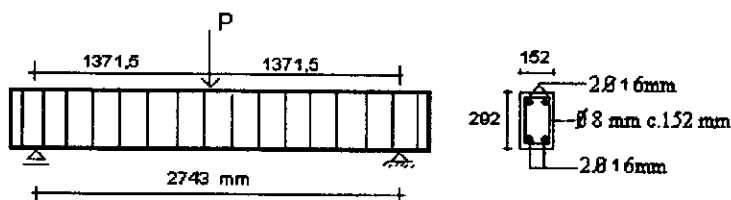


Figura 2. 13 – Características geométricas e detalhamento das 14 vigas ensaiadas por GRACE et al.

Foram usados cinco sistemas de reforço com cinco tipos de compósitos (ver tabela 2.7 e figura 2.14) e quatro tipos de resina. As propriedades dos adesivos epóxicos utilizados são mostradas na tabela 2.6 e as dos compósitos na tabela 2.7.

Tabela 2.6 – Propriedades dos adesivos epóxicos utilizados nas vigas de GRACE et al.

Tipo de adesivo epóxico	1	2	3	4
Resistência a tração (MPa)	29,8	66,5	95,0	24,8
Módulo de Elasticidade (GPa)	-	2,7	3,7	4,5
Alongamento de ruptura (%)	-	5,0	4,6	1,0
Resistência ao cisalhamento (MPa)	9,8	-	-	24,8
Resistência à flexão (MPa)	39,2	79,0	152	46,8

Nas vigas com mais de uma camada, cada camada foi aplicada independentemente, com a seguinte sendo adicionada após a sua cura.

Todas as vigas reforçadas tiveram cargas últimas superiores à da de controle (CONT).

O uso do reforço reduziu as flechas na carga de escoamento da armadura interna e a redução dependeu do tipo e disposição do material do reforço e do adesivo usados na viga. A maior redução, da ordem de 50%, ocorreu com as vigas UG₂-III e CP₃-V. Contudo a quantidade de material de reforço requerido e tempo de preparação da viga UG₂-III foram quase duas vezes os da viga CP₃-V.

O tipo de adesivo influenciou na flecha máxima e na carga última.

Entre as vigas reforçadas com lâmina de fibra de carbono, a com reforço na parte inferior e na metade das faces laterais (CP₃-V) teve a menor deformação e um aumento significativo na sua carga última quando comparada com as outras duas (CP₁-V e CP₂-V).

A viga UG₂-III teve a maior capacidade resistente (2,35 vezes a da viga de controle). Esta viga possuía camadas verticais e horizontais de tecido composto de fibra de vidro em toda a extensão do vão livre.

A viga com compósitos verticais em forma de U tiveram maior capacidade resistente do que as sem, (vigas CF-I e CFS-I); eles impedem o desenvolvimento das fissuras de cisalhamento.

Tabela 2.7- Dados das vigas ensaiadas por GRACE et al.

Viga	Tipo de reforço	Tipo de adesivo	Compositos				Características da peça				Armadura interna		P_u (kN)	Modo de ruptura
			f_f (MPa)	ϵ_{fu} (‰)	E_f (GPa)	e_f (mm)	b (mm)	ρ^* (%)	f_{cm} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)			
CONT							152		48,3	402,1	650	75,2	Ruptura da armadura longitudinal	
CF-I	Tecido- CFRP unidirecional	1	2937	12	230	0,5	152	1,32	48,3	402,1	650	104,5	Ruptura do tecido	
CFS-I	Tecido- CFRP unidirecional	1	2937	12	230	0,5	152	1,32	48,3	402,1	650	110,3	Ruptura do tecido	
CFS-II	Tecido- CFRP unidirecional	2	758	12	62	1,3	152	1,76	48,3	402,1	650	108,9	Ruptura do tecido	
UG ₁ -III	Tecido- GFRP unidirecional	2	413	20	21	1,0	152	2,42	48,3	402,1	650	164,5	Ruptura do tecido	
UG ₂ -III	Tecido- GFRP unidirecional	2	413	20	21	1,0	152	2,42	48,3	402,1	650	177,9	Esmagamento do concreto	
BG ₁ -IV	Tecido- GFRP bidirecional(45°, 45°)	3	x=482 y=310	30	x=14 y=11	1,3	152	1,51	48,3	402,1	650	80,0	Ruptura do tecido	
BG ₂ -IV	Tecido- GFRP bidirecional(45°, 45°)	3	x=482 y=310	30	x=14 y=11	1,3	152	1,92	48,3	402,1	650	94,7	Descolamento do tecido	
BG ₃ -IV	Tecido- GFRP bidirecional(45°, 45°)	3	x=482 y=310	30	x=14 y=11	1,3	152	2,35	48,3	402,1	650	92,5	Descolamento do tecido	
BG ₂ -IV-E4	Tecido- GFRP bidirecional	4	x=482 y=310	30	x=14 y=11	1,3	152	1,52	48,3	402,1	650	142,2	Ruptura do tecido	
BG ₂ -IV-E1	Tecido- GFRP bidirecional	1	x=482 y=310	30	x=14 y=11	1,3	152	1,52	48,3	402,1	650	129,0	Ruptura do tecido	
CP ₁ -V	Lâmina- CFRP unidirecional	4	2399	14	149	1,3	152	1,65	48,3	402,1	650	110,3	Destacamento da lâmina	
CP ₂ -V	Lâmina- CFRP unidirecional	4	2399	14	149	1,3	152	2,19	48,3	402,1	650	120,1	Destacamento da lâmina	
CP ₃ -V	Lâmina- CFRP unidirecional	4	2399	14	149	1,3	152	2,56	48,3	402,1	650	131,2	Destacamento da lâmina	

*Taxa de armadura incluindo a armadura de reforço.

A adição de uma camada de tecido de fibra de vidro (BG_{1-IV}) aumentou somente de 6% a carga resistente da viga. Adicionando mais uma camada de tecido (BG_{2-IV}), o aumento passou para 25%, porém uma terceira adição (BG_{3-IV}) não levou acarretar mais aumento pois as vigas BG_{2-IV} e BG_{3-IV} romperam por falha do adesivo.

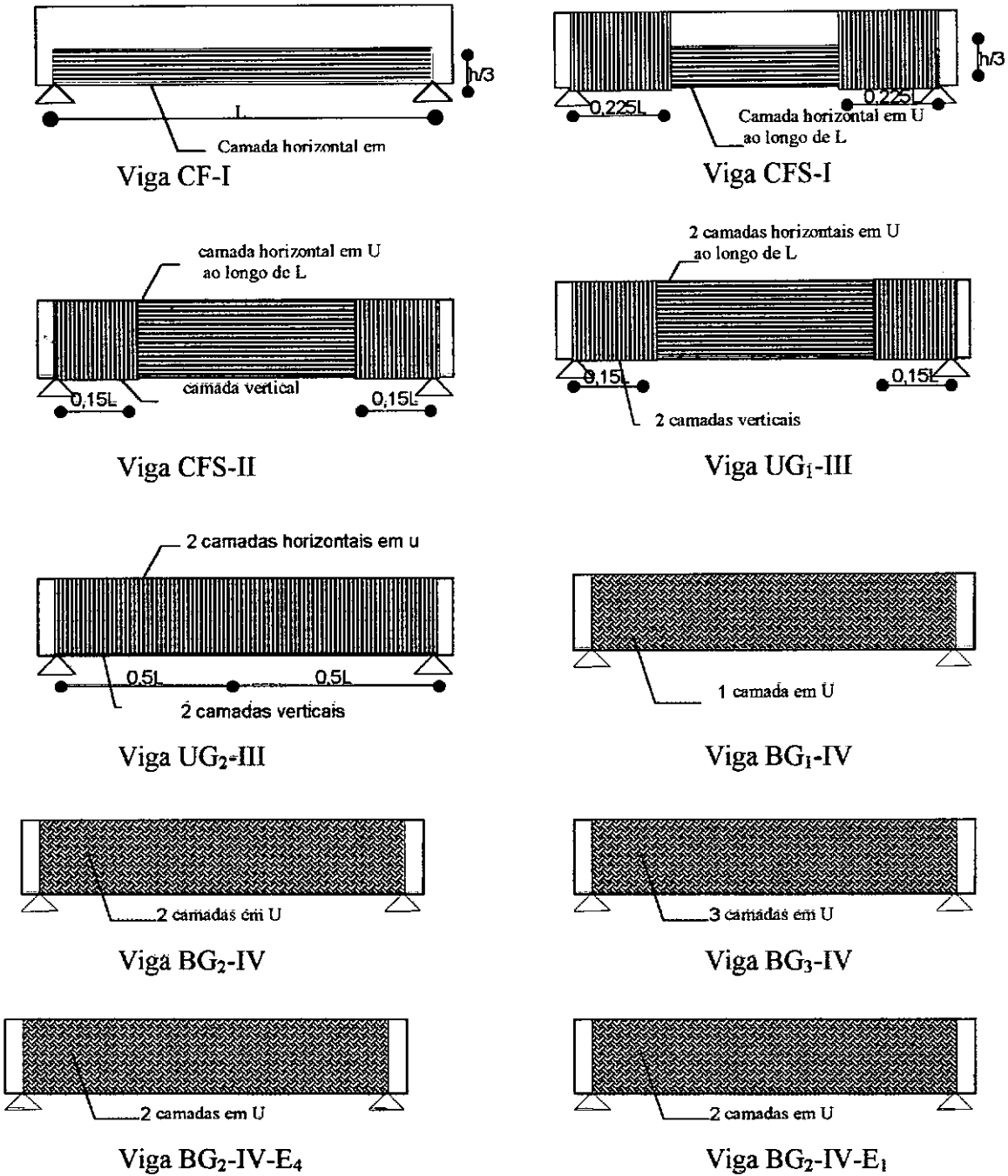


Figura 2.14 – Tipos de reforço usados nas vigas de GRACE et al.

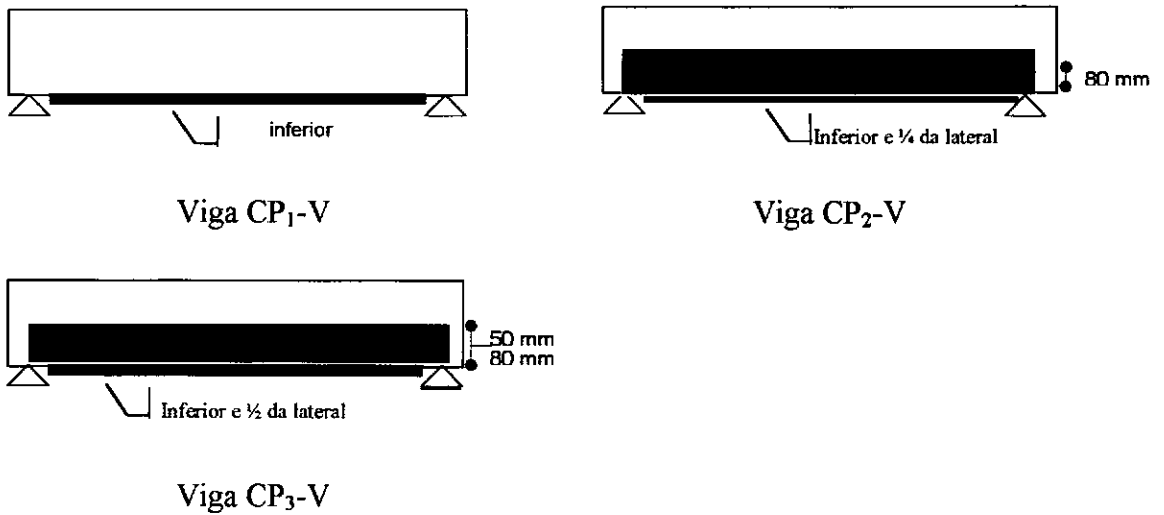


Figura 2.14 – Continuação

As deformações de compressão no concreto das vigas reforçadas foram superiores a da viga de controle em um mesmo carregamento.

2.4.1.7 – NGUYEN, CHAN, CHEONG (1999)

Foram ensaiadas neste trabalho 5 vigas de concreto armado com o objetivo de analisar a influência do comprimento de lâminas de fibra de carbono do reforço destas à flexão no modo de ruptura e no aumento da capacidade resistente.

As vigas tinham seção transversal retangular de 120 mm x 150 mm, 1330 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas carga concentradas dispostas de acordo com a figura 2.15. A armadura interna é também mostrada na figura 2.15. Uma das vigas não foi reforçada e nas outras quatro utilizaram-se lâminas de fibra de carbono com 80 mm x 1,2 mm de seção transversal.

A tabela 2.8 mostra os modos e carga de ruptura das vigas.

As vigas romperam de duas maneiras: por destacamento das lâminas de fibra de carbono (B950, B1100 e B1150) e por flexão (CB1 e B1500).

As vigas que romperam por destacamento das lâminas de fibra de carbono tiveram o desenvolvimento das fissuras de cisalhamento na extremidade das lâminas proporcional ao aumento do carregamento, romperam com o rasgamento súbito do

Tabela 2.8- Dados das vigas ensaiadas por NGUYEN et al.

Viga	Tipo de reforço	Armadura interna		Características da peça				lâmina de fibra de carbono			P_u (kN)	Modo De ruptura
		A_s (mm ²)	f_y (MPa)	b (mm)	d (mm)	f_{cm} (MPa)	f_{tf} (MPa)	E_f (GPa)	L_f			
CB1		235,6	384	120	120	33					42,3	Flexão por escoamento da armadura interna
B950	1 lâmina de fibra de carbono na face inferior	235,6	384	120	120	33	3140	181	950		56,2	Destacamento da lâmina de fibra de carbono
B1100	1 lâmina de fibra de carbono na face inferior	235,6	384	120	120	33	3140	181	1100		57,3	Destacamento da lâmina de fibra de carbono
B1150	1 lâmina de fibra de carbono na face inferior	235,6	384	120	120	33	3140	181	1150		58,9	Destacamento da lâmina de fibra de carbono
B1500	1 lâmina de fibra de carbono na face inferior	235,6	384	120	120	45	3140	181	1500		118,0	Flexão por esmagamento do concreto

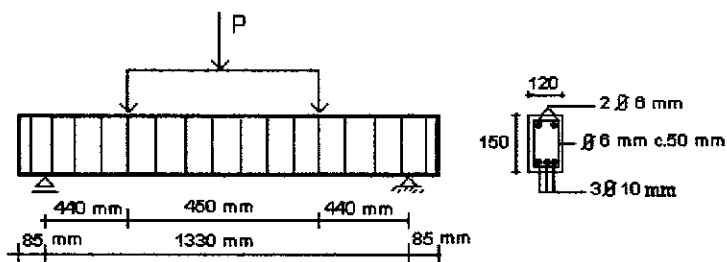


Figura 2. 15 – Características das vigas ensaiadas por NGUYEN et al.

concreto de cobrimento, com uma nítida separação entre a armadura interna e o concreto (ruptura frágil). Nestas vigas, observou-se que o crescimento das deformações nas lâminas foi linear de zero (a aproximadamente 50 mm da extremidade) até o valor aproximado de 1,75‰ (a uma distância aproximada de 250 mm das extremidades das lâminas).

A viga B1500, que foi reforçada com lâmina de fibra de carbono colada em todo o comprimento, mostrou um desenvolvimento de fissuras ao longo da viga igual ao das demais vigas reforçadas, contudo, grandes fissuras de cisalhamento ocorreram e desenvolveram-se na zona de cortante à medida que o carregamento aumentava. O escoamento da armadura interna ocorreu com carga de 84 kN, um destacamento local ocorreu na lâmina abaixo de fissura de cisalhamento que surgiu para a carga de 98kN, porém a viga continuou sendo carregada e rompeu por flexão devido ao esmagamento do concreto com 118 kN, com total destacamento da lâmina.

Observou-se que o comprimento da lâmina é essencial para obter maiores capacidades de cargas nas vigas.

2.4.1.8 – BEBER, CAMPOS FILHO, CAMPAGNOLO (1999)

Foram ensaiadas neste trabalho 10 vigas de concreto armado com o objetivo de analisar o aumento da rigidez e da resistência à flexão dos elementos reforçados com polímeros reforçados com fibra de carbono.

Elas tinham seção transversal retangular de 120 mm x 250 mm, 2350 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas carga concentradas dispostas de acordo com a figura 2.16. A armadura interna é mostrada na figura 2.16.

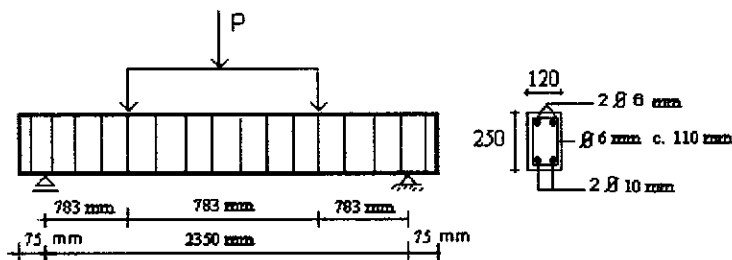


Figura 2. 16 – Características das vigas ensaiadas por BEBER et al.

As vigas foram divididas em 5 grupos com duas vigas em cada um: vigas de referência e vigas reforçadas com 1, 4, 7 e 10 camadas de tecidos de fibra de carbono. A tabela 2.9 fornece os dados destas vigas.

Houve um aumento significativo nas cargas de ruptura das vigas reforçadas, sendo este aumento limitado pela carga de ruptura por destacamento do tecido. Observou-se também o aumento da rigidez, além de uma efetiva diminuição das aberturas de fissuras mesmo para cargas próximas à ruptura.

O aumento na resistência à flexão foi de 35% para as vigas reforçadas com uma camada e 115%, 163% e 182% para as vigas reforçadas com 4, 7 e 10 camadas, respectivamente.

2.4.1.9 – RIPPER, SCHERER (1999)

Foram ensaiadas neste trabalho 2 vigas de concreto armado com o objetivo de analisar o desempenho destas reforçadas à flexão com folhas flexíveis unidirecionais de fibra de carbono com ou sem bandas transversais de amarração.

Elas tinham seção transversal retangular de 120 mm x 200 mm, 2100 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas carga concentradas dispostas de acordo com a figura 2.17. A armadura interna é mostrada na figura 2.17.

A viga V1 foi reforçada sem bandas transversais de amarração, e a viga V2 com bandas transversais de amarração. A tabela 2.10 fornece os dados destas vigas.

Tabela 2.9- Dados das vigas ensaiadas por BEBER, et al.

Viga	Grupo	Tipo de reforço	Tecido de fibra de carbono		Características da peça		Armadura interna		P_u (kN)	Modo De ruptura
			E_f (GPa)	σ_f (MPa)	b (mm)	f_{cm} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)		
VT1	1				120	33,6	157,1	565	47,4	Escoamento da armadura interna
VT2	1				120	33,6	157,1	565	47,0	Escoamento da armadura interna
VR3	2	1 camada de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	65,2	Escoamento da armadura interna
VR4	2	1 camada de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	62,0	Ruptura do tecido de fibra de carbono
VR5	3	4 camadas de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	102,2	Destacamento do tecido de fibra de carbono
VR6	3	4 camadas de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	100,6	Destacamento do tecido de fibra de carbono
VR7	4	7 camadas de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	124,2	Destacamento do tecido de fibra de carbono
VR8	4	7 camadas de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	124,0	Destacamento do tecido de fibra de carbono
VR9	5	10 camadas de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	129,6	Destacamento do tecido de fibra de carbono
VR10	5	10 camadas de tecido de fibra de carbono	230	3400	120	33,6	157,1	565	137,0	Destacamento do tecido de fibra de carbono

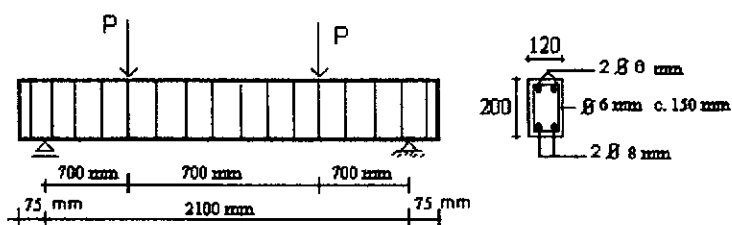


Figura 2. 17 – Características das vigas ensaiadas por RIPPER et al.

Segundo o autor é fundamental a caracterização mecânica (curva tensão x deformação) do compósito aplicado.

Tabela 2.10- Dados das vigas ensaiadas por RIPPER et al.

Viga	Tipo de reforço	Tecido de fibra de carbono		Armadura interna		P_u (kN)	Modo De ruptura
		E_f (GPa)	A_f (mm ²)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)		
V1	Tecido de fibra de carbono na face inferior	240	15,56	100,5	400	40	Destacamento do tecido de fibra de carbono
V2	Tecido de fibra de carbono na face inferior com bandas transversais	240	15,56	100,5	400	44	Ruptura do tecido

O aumento nas cargas de ruptura das vigas reforçadas, foi limitado pela carga de ruptura por destacamento do tecido. As bandas transversais de amarração aparentam ser uma solução válida para promover a amarração do reforço.

2.4.1.10 – GEMERT, AHMED, BROSENS (1999)

Foram ensaiadas neste trabalho 5 vigas de concreto armado com o objetivo de analisar o aumento da rigidez e da resistência à flexão dos elementos reforçados com polímeros reforçados com fibra de carbono com ou sem sistema de ancoragem.

Elas tinham seção transversal retangular de 125 mm x 225 mm, 1500 mm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas cargas concentradas dispostas de acordo com a figura 2.18, tendo relação $a/d = 2,5$. A armadura interna é mostrada na figura 2.18.

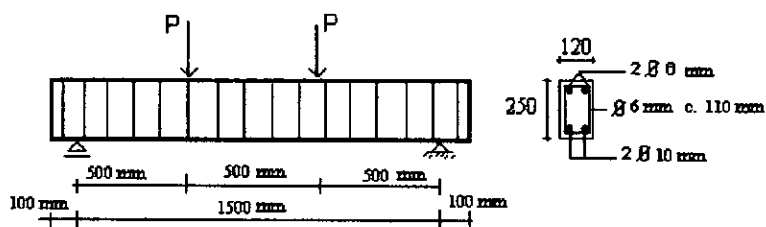


Figura 2. 18 – Características das vigas ensaiadas por GEMERT et al.

Uma das vigas foi de referência e as outras foram divididas em 2 grupos com duas vigas em cada um: vigas reforçadas com 2 camadas de tecidos de fibra de carbono de mesmo comprimento (1300 mm) e vigas reforçadas com 2 camadas de tecido com comprimentos diferentes (1300 mm e 1000 mm). Uma das vigas de cada um destes dois grupos foi reforçada também com tecido de fibra de carbono em forma de U nas duas extremidades (AF.3-1 e AF.3**). O reforço aplicado em cada viga é mostrado na figura 2.19 e a tabela 2.11 fornece os dados das 5 vigas ensaiadas.

Houve um aumento significativo nas cargas de ruptura das vigas reforçadas, sendo este aumento limitado pela carga de ruptura por destacamento do tecido. Observou-se também o aumento da capacidade resistente e diminuição da tensão cisalhante nas extremidades das vigas AF.3-1 e AF.3**, que possuíam a ancoragem em U nas extremidades, em relação as vigas AF.3 e AF.3*.

O aumento na resistência à flexão foi de 75% e 79% para as vigas reforçadas somente com as duas camadas de tecido de fibra de carbono no fundo e 114% e 91% para as vigas reforçadas também com U de fibra de carbono nas extremidades.

Na figura 2.20 são mostradas as tensões cisalhantes ao longo dos compósitos das quatro vigas reforçadas, para as cargas de ruptura. É dada fórmula para cálculo da força no compósito correspondente ao destacamento do mesmo, mas os parâmetros que ela inclui não são claramente definidos.

Tabela 2.11 - Dados das vigas ensaiadas por GEMERT, et al.

Viga	Grupo	Tipo de reforço	Tecido de fibra de carbono				Armadura interna		P_u (kN)	f_c (MPa)	Modo De ruptura
			E_f (GPa)	f_{σ} (MPa)	b_f (mm)	L_f (mm)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)			
AF.0	-						157,1	565	55	48	Flexão
AF.3	1	2 camadas de tecido de fibra de carbono	240	3500	75	1300	157,1	565	96,5	48	Destacamento do tecido de fibra de carbono
AF.3-1	1	2 camadas de tecido de fibra de carbono e 1 U de amarração em cada extremidade	240	3500	75	1300	157,1	565	118,0	48	Destacamento do tecido de fibra de carbono
AF.3*	2	2 camadas de tecido de fibra de carbono	240	3500	75	1300 1000	157,1	565	98,5	48	Destacamento do tecido de fibra de carbono
AF.3**	2	2 camadas de tecido de fibra de carbono e 1 U de amarração em cada extremidade	240	3500	75	1300 1000	157,1	565	105,0	48	Destacamento do tecido de fibra de carbono

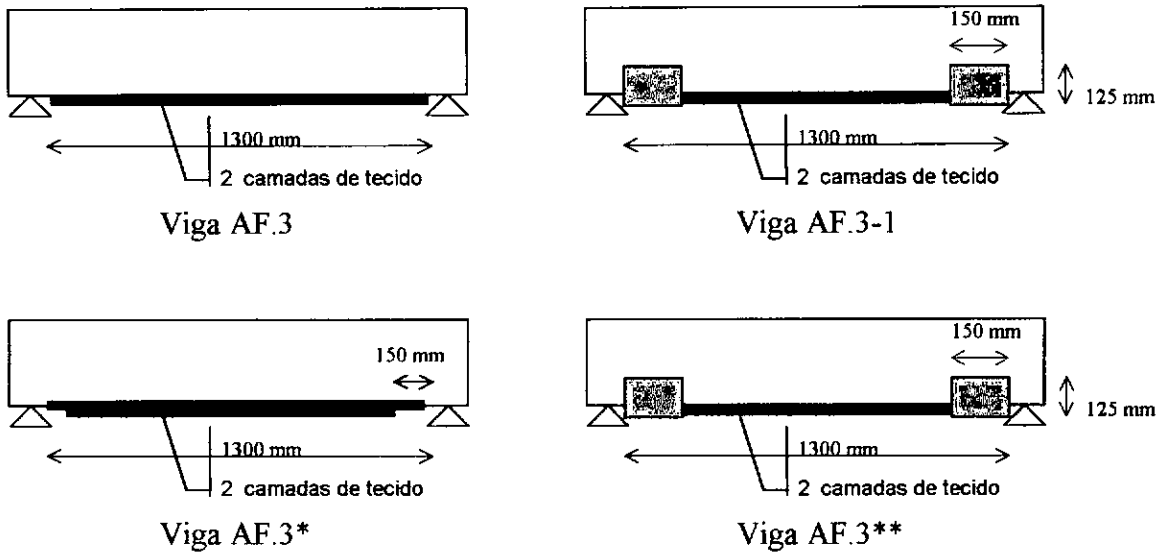


Figura 2.19 – Tipos de reforço usados nas vigas de GEMERT et al.

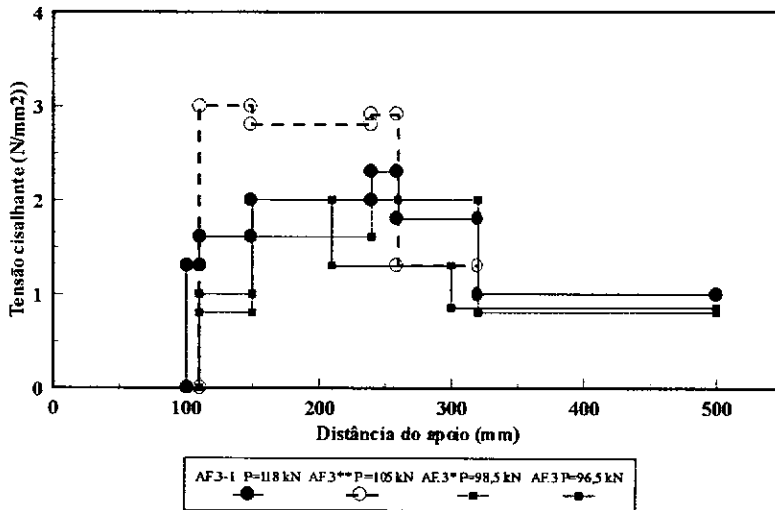


Figura 2.20 – tensões cisalhantes ao longo dos compósitos.

2.4.2 – Estudos sobre aderência

2.4.2.1 - SOUZA (1998)

Foram ensaiadas neste trabalho 4 corpos de prova com o objetivo de analisar o comprimento de ancoragem necessário de tecidos de fibra de carbono.

Foram moldados 4 prismas em concreto armado com seção retangular de 200 x 200 mm e 300 mm de comprimento. Estes prismas foram bem armados, para que não sofressem qualquer tipo de dano ao serem tracionados.

No interior destes prismas e ao longo do seu comprimento foram colocados dois tubos de PVC dispostos em dois cantos opostos e um terceiro tubo no meio do prisma com um trecho de maior diâmetro junto à face. Estes tubos foram previstos para a futura passagem de barras de aço e cabos de protensão (figura 2.21).

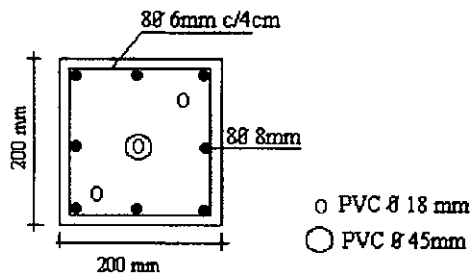


Figura 2.21 – Detalhamento dos prismas de concreto armado.

Cada modelo de ensaio era constituído pela união de dois desses prismas. A preparação dos modelos consistia em atravessar-se um cabo de protensão pelo tubo central do prisma fixando-o com uma cunha que ficava embutida no orifício de maior diâmetro e unir os prismas dois a dois utilizando-se de duas barras Dywidag (pré-tração) passantes pelos tubos de menor diâmetro que foram apertadas nas extremidades opostas por meio de roscas.

O tecido de fibra de carbono foi aplicado em duas faces opostas do modelo.

Três dias após a colagem, foi aplicada em um lado do modelo na barra de pré-tração uma carga crescente de tração até a ruptura do tecido de fibra de carbono e depois procedeu-se da mesma maneira com o outro lado, tendo ao todo 4 ensaios.

Então, cada modelo de ensaio foi utilizado duas vezes, com aproveitamento total das suas quatro faces, onde foram coladas os tecidos de fibra de carbono com dois diferentes comprimentos de aderência.

As quinas dos prismas localizadas na parte central do modelo romperam com o arrancamento do compósito. Nos quatro modelos ensaiados, a ruptura foi brusca e sem aviso.

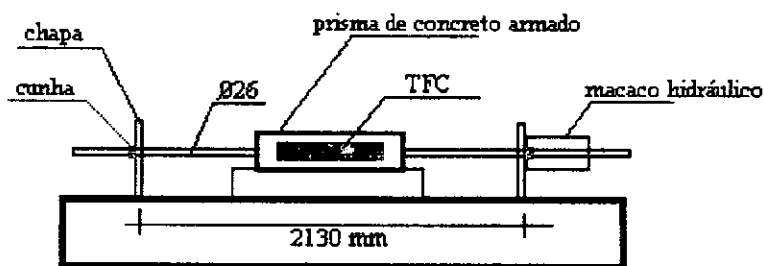


Figura 2.22 – Esquema de ensaio do modelo

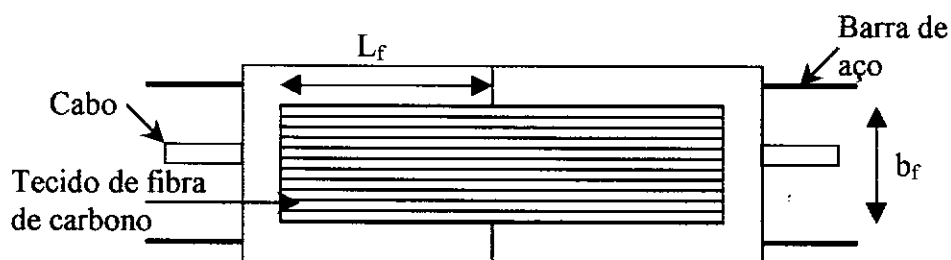


Figura 2.23 – Modelo com tecido de fibra de carbono colada.

Os modelos 1,3 e 4 apresentaram rotura no concreto e o modelo 2, entretanto, apresentou rotura na ligação adesivo - concreto. Concluiu-se que a aderência foi menos efetiva no modelo 2.

Observaram-se valores de tração nas regiões próximas da extremidade do compósito, caindo entretanto para valores abaixo de 0,1% na região situada em torno da metade do comprimento de aderência.

Tabela 2.12- Dados dos espécimes ensaiados por Souza .

Modelos	Tipo de reforço	Tecido de fibra de carbono			Características dos prismas		P_u (kN)	Modo de ruptura
		L_f (mm)	E_f (GPa)	σ_f (MPa)	b (mm)	f_{tm} (MPa)		
1	Tecido de fibra de carbono	200	105	460	200	3,1	37,0	Destacamento do tecido
2	Tecido de fibra de carbono	200	105	308	200	3,1	32,0	Descolamento do tecido
3	Tecido de fibra de carbono	150	105	244	200	3,1	40,0	Destacamento do tecido
4	Tecido de fibra de carbono	150	105	434	200	3,1	29,6	Destacamento do tecido

De acordo com os resultados obtidos com os quatro modelos, verifica-se que o aumento do comprimento de aderência permitiu que os modelos suportassem maiores cargas últimas, embora com menores valores de tensão médias de aderência e maiores deslocamentos (tabela 2.12).

A redução do comprimento de aderência faz com que as tensões de tração na fibra de carbono diminuam mais rapidamente ao longo desse comprimento, sem conduzir a maiores valores de deformações.

De acordo com o fabricante do sistema TFC usado, para concretos com resistência média a compressão aproximadamente igual a 30 MPa, o comprimento de ancoragem deve ser pelo menos igual a 10 cm. Já para concretos com valores de resistência média a compressão entre 20 MPa e 25 MPa, recomenda-se o comprimento de ancoragem com 15 cm. A tensão de cisalhamento admissível no concreto proposta é igual a 1,5 MPa. Fazendo-se extrapolações a partir dos resultados obtidos nos ensaios os comprimentos de 150 e 200 mm, para um comprimento de aderência de 100 mm obtém-se o valor de 1,4 MPa para tensão de aderência.

2.4.3 – Modelos de Cálculo

Aqui serão apresentados modelos de cálculos, para reforço com compósitos de fibra de carbono colados propostos pelo fabricante do material de reforço usado SIKA (1998) e por MASTER BUILDERS TECHNOLOGY (1996).

Embora haja proposta para dimensionamento à flexão baseado no método das tensões admissíveis (MASTER BUILDERS TECHNOLOGY, 1996), onde se consideram as cargas de serviço e tensões admissíveis para o concreto, o aço e o compósito, este método não será aqui abordado.

Em geral, é proposto que se dimensione o reforço à flexão no estado limite último, considerando-se:

- Seções transversais planas até a ruptura;
- Aderência perfeita entre aço e concreto e compósito e concreto;
- Resistência à tração do concreto nula.

As diferenças entre as recomendações para dimensionamento existentes (ANDRÄ et al., 1998; SIKA, 1998 e MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES, 1996) são nas deformações limites admitidas para o concreto (3,0 ‰ ou 3,5 ‰), para o aço ($5 \varepsilon_y$) e para o compósito (0,6 a $0,8 \varepsilon_{fu}$, 6,0 a 8,0 ‰, $0,5 \varepsilon_{fu}$) e nos diagramas de tensão de compressão no concreto adotados (parábola-retângulo ou retangular).

2.4.3.1 - Modelo de Cálculo Proposto Pelo Fabricante

Considerando que na zona tracionada a lâmina de fibra de carbono mostra até a ruptura um comportamento quase linear-elástico e que o material não apresenta nenhuma deformação plástica de reserva, pode-se dizer que a maior resistência à flexão é alcançada quando a ruptura da lâmina se dá durante o escoamento do aço e antes do esmagamento do concreto.

Considera-se que a influência da armadura de compressão é muito pequena e, portanto, para o cálculo do momento último não é considerada.

O diagrama de deformação é definido com deformações médias, enquanto que as forças de tração das lâminas e do aço, para a formulação das condições de equilíbrio, correspondem às deformações máximas.

Para ações externas, a relação entre deformações máximas e médias são dadas pelos coeficientes k_l para lâminas e k_s para o aço.

$$\Delta \varepsilon_f = k_l \Delta \varepsilon_{f \max} \quad (2.1)$$

e

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f,g} + \Delta \varepsilon_f \quad (2.2)$$

Com $0,65 \leq k_l \leq 0,80$; para $\sigma_{f \max} = f_{tf}$

$$\varepsilon_s = k_s \varepsilon_{s \max} \quad (2.3)$$

e com $0,9 \leq k_s \leq 1,0$; para $\sigma_{sm\acute{a}x} \leq f_y$

onde:

$\varepsilon_{f,g}$ = deformação inicial das lâminas de fibra de carbono;

$\varepsilon_{sm\acute{a}x}$ = deformação máxima do aço;

$\Delta\varepsilon_{f\max}$ = variação máxima das lâminas de fibra de carbono.

Na seção devem ser satisfeitas as seguintes condições de equilíbrio:

$$\sum F = 0; T_f + T_s - C_c = 0 \quad (2.4)$$

$$\sum M = 0; M_u = A_f f_{fy} (h - k_2 x) + A_s f_y (d - k_2 x) \quad (2.5)$$

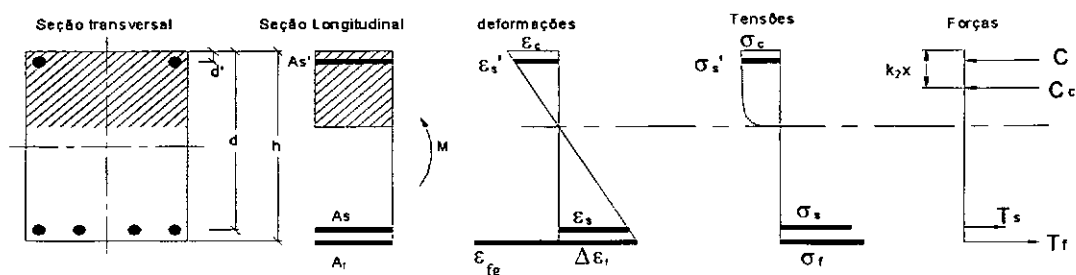


Figura 2.24 – Diagrama de Forças tensão e deformações de uma seção submetida a momento fletor.

Os parâmetros k_1 e k_2 para a determinação e localização de C_c são determinados de acordo com as equações abaixo:

$$C_c = k_1 b x f_c \quad (2.6)$$

Para $\varepsilon_c \leq 2,0\%$:

$$k_1 = -\frac{1000}{6} (500\varepsilon_c^2 + 3\varepsilon_c) \quad (2.7)$$

$$k_2 = 1 - \frac{750\varepsilon_c + 4}{2(500\varepsilon_c + 3)} \quad (2.8)$$

e para $2,0\text{‰} \leq \varepsilon_c \leq 3,0\text{‰}$:

$$k_1 = 1 + \frac{1}{1500\varepsilon_c} \quad (2.9)$$

$$k_2 = 1 - \frac{0,5 - (3 \cdot 10^6 \varepsilon_c^2)^{-1}}{1 + (1500\varepsilon_c)^{-1}} \quad (2.10)$$

onde

$$\varepsilon_c = -\frac{\Delta\varepsilon_f}{h-x}x + \varepsilon_{c,g} \quad (2.11)$$

sendo: $|\varepsilon_c| \leq 3,0\text{‰}$;

A posição da linha neutra (x) é determinada por interações.

Com o diagrama de deformação conhecido, deve-se verificar o tipo de ruptura. Para isso verifica-se se a maior deformação à compressão no concreto ε_c é a limite e a deformação do aço ε_s , que é dada pela equação abaixo, é menor que a de escoamento.

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta\varepsilon_f}{h-x}(d-x) + \varepsilon_{s,g} ; \quad (2.12)$$

Os termos ε_{c0} e ε_{s0} levam em conta todas aquelas deformações que estão presentes antes da colocação da lâmina. Uma pré-deformação da lâmina devido a forças de tração é levada em conta com ε_{f0} para o instante $t=0$.

Pode-se observar que é adotada a aproximação de $d_f = h$ (adequada para o caso de só haver lâminas na face tracionada), que há inconsistência entre os valores de deformações adotados e que, equivocadamente, é usada a tensão f_{fy} na equação (2.5).

2.4.3.2– Modelo de Cálculo Proposto por MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES (1996)

O cálculo de deformações quando da aplicação do reforço é feito no regime elástico, isto é, considera-se:

$$x_e = d \left[\sqrt{(n\rho)^2 + 2n\rho} - n\rho \right] \quad (2.13)$$

sendo: $n = \frac{E_s}{E_c}$ e $\rho =$ taxa de armadura de tração.

O momento correspondente ao escoamento da armadura interna (M_y) e a respectiva curvatura (ϕ_y) são determinados com base no valor de x elástico:

$$M_y = A_s f_y \left(d - \frac{x_e}{3} \right) \quad (2.14)$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_{cy}}{x_e} \quad (2.15)$$

onde:

$$\varepsilon_{cy} = \frac{x_e}{(d - x_e)} \cdot \frac{f_y}{E_s} \quad (2.16)$$

$\varepsilon_{cy} =$ deformação do concreto correspondente ao escoamento do aço

A deformação correspondente à posição onde será colocada a lâmina de fibra de carbono é calculada de acordo com a curvatura da seção no instante de aplicação do reforço.

$$\varepsilon_{fref} = (h - x_e) \phi_{ref} \quad (2.17)$$

onde:

$$\phi_{ref} = \frac{M_{ref}}{M_y} \phi_y \quad (2.18)$$

ϕ_{ref} = curvatura no instante do reforço

M_{ref} = momento no instante de aplicação do reforço

ε_{fref} = deformação correspondente à posição onde será colada a lâmina de fibra de carbono

O cálculo do momento de ruptura para as vigas reforçadas é feito pelo equilíbrio de tensões no estado limite último.

$$\sum F = 0; T_f + T_s - C_c = 0 \quad (2.19)$$

onde:

$$T_f + T_s = A_f \varepsilon_f E_f + A_s f_y \quad (2.20)$$

e

$$C_c = 0,85 f_c b \beta x_p \quad (2.21)$$

sendo:

$$\varepsilon_f = \frac{h - x_p}{x_p} \varepsilon_c - \varepsilon_{fref} \quad (2.22)$$

Os valores de β e ε_{cu} são os recomendados na norma ACI 318:

$$\beta = 0,85 - \frac{0,05(f_c - 28)}{7} \geq 0,65, \text{ para } f_c > 28MPa \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{cu} = 3,0\%$$

$$M_u = A_s f_y \left(d - \frac{\beta}{2} x \right) + A_f \varepsilon_f E_f \left(h - \frac{\beta}{2} x \right) \quad (2.24)$$

Neste método são feitas aproximações no cálculo das deformações das lâminas de fibra de carbono e do aço longitudinal de tração, não tendo sido feita adequada diferenciação entre alturas da linha neutra relativas à deformação inicial ($\varepsilon_{c,g}$) e à ocorrida após o reforço. Além disto, admite-se $d_f = h$. Outra aproximação é a desconsideração da contribuição da armadura longitudinal de compressão, que altera a altura da linha neutra plástica e, conseqüentemente, todas as deformações no estado limite último.

2.5- Conclusões

É fundamental a adequada escolha do adesivo e da técnica de colagem a ser utilizada, para garantir o comportamento monolítico da viga reforçada. O preparo da superfície onde é aplicada a cola à base de epóxi é essencial.

Quando a tensão cisalhante atuante na interface cola-compósito exceder a tensão de aderência da cola ou a atuante na interface cola-concreto exceder a tensão cisalhante limite do concreto, há uma ruptura brusca por descolamento ou destacamento do compósito. Geralmente, o concreto é o material que limita as tensões na ligação compósito-concreto.

Fórmulas são sugeridas para cálculo da carga correspondente à ruptura por destacamento do compósito (ARDUINI et al., 1997 e GEMERT et al., 1999), que foram obtidas empiricamente ou a partir de análises elásticas, que têm sua validade questionável.

Os sistemas de reforço pela adição de plásticos armados com fibras de carbono são eficientes no aumento da ductilidade e da capacidade resistente de elementos

estruturais de concreto armado. Os reforços com fibras de carbono são mais eficientes do que os de fibra de vidro devido ao seu maior módulo de elasticidade.

A ductilidade das vigas é melhorada com a utilização de determinados sistemas de ancoragens que possibilitam a mudança de uma ruptura tipo frágil (destacamento do reforço) para uma ruptura mais dúctil (flexão com escoamento da armadura longitudinal).

Um sistema de ancoragem eficiente é essencial para aumentar a capacidade de carga de uma viga. Diferentes soluções propostas mostraram-se adequadas, evitando a ruptura das vigas por destacamento, como por exemplo bandas transversais de amarração em forma de U envolvendo as faces inferior e laterais da viga (figura 2.25).

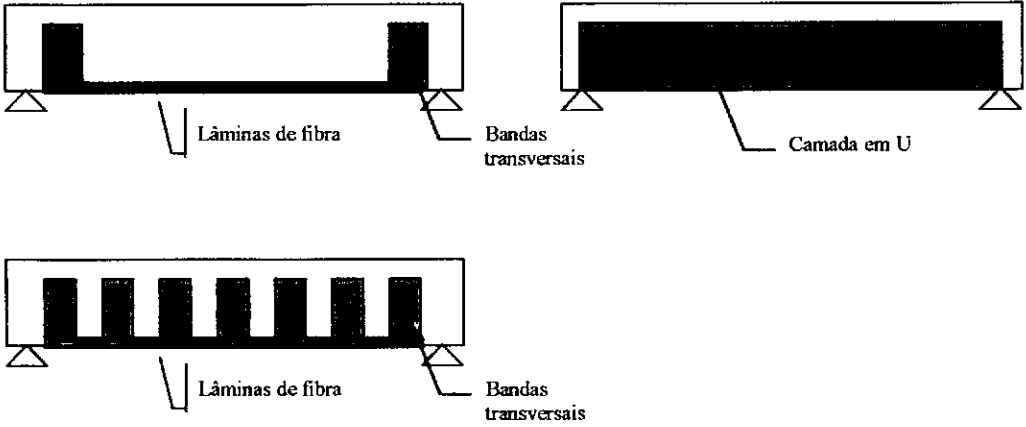


Figura 2.25 – Tipos de bandas transversais de amarração.

As hipóteses básicas dos dois modelos de cálculo apresentados são as mesmas, não sendo feitas limitações nas deformações dos compósitos visando evitar a possibilidade de descolamento e destacamento destes.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - Introdução

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de vigas reforçadas à flexão, e à flexão e ao cisalhamento simultaneamente, usando lâminas de fibra de carbono coladas. Esta é uma técnica “nova”, de fácil execução, e que praticamente não altera as dimensões da peça original.

Foram ensaiadas três vigas, duas reforçadas unicamente à flexão e uma reforçada à flexão e ao cisalhamento. Nas três vigas foram usadas lâminas de fibra de carbono coladas com adesivo epóxico.

As três vigas de seção retangular ensaiadas foram biapoiadas e carregadas com duas cargas concentradas equidistantes dos apoios, tendo a relação $a/d = 3,2$ e idênticas taxas de armadura interna longitudinal. Com objetivo de simular uma situação real de reforço, as vigas foram pré-carregadas até um valor próximo de sua resistência à flexão teórica, reforçadas sob carregamento constante e posteriormente levadas à ruptura. As vigas ensaiadas foram monitoradas em relação a flechas e deformações da armadura interna, das lâminas de reforço e do concreto.

A resistência das vigas reforçadas foi avaliada e o desempenho destas foi comparado com o de uma viga de referência (VM-1R) não reforçada, ensaiada por CARDOSO DE MORAIS (1997), que possuía taxa de armadura longitudinal interna próxima à taxa de armadura balanceada, dimensões, taxa de armadura transversal no vão de cisalhamento e concreto semelhantes às das vigas reforçadas. A viga VM-1R era uma viga monolítica com resistência ao cortante semelhante à das vigas sem reforço de cortante e resistência à flexão que se objetivava alcançar na viga mais reforçada (V5), o que efetivamente não foi conseguido.

Os ensaios destas três vigas deram continuidade a uma série de estudos realizados na COPPE sobre reparo e reforço de elementos de concreto armado, CARNEIRO (1998), MORAIS (1997) e outros.

3.2 - Confeção das vigas

3.2.1 - Concreto

O traço do concreto em massa utilizado nas três vigas foi 1:2,25:3,25 (cimento: areia: agregado graúdo) e a relação água /cimento foi 0,56.

O cimento utilizado foi do tipo CII - E -32 (MAUÁ). A areia era de rio lavada e o agregado graúdo era de gnaisse britado com dimensão máxima de 19 mm.

O concreto foi misturado em uma betoneira com capacidade de 320 l e apresentou 80 mm de abatimento do tronco de cone.

Tabela 3.1 - Quantidade de material empregado por m³ de concreto

Composição por m ³	
Cimento	329 kg
Areia	740,25 kg
Brita	1069 kg
Água	183,60 ℓ

Para cada uma das vigas ensaiadas, foram moldados dez corpos de prova cilíndricos com dimensões de 150 mm x 300 mm, conforme a norma da NBR-5738 (1993). Vinte e quatro horas após a concretagem, os corpos de prova foram desformados e imersos em tanque com água saturada de cal por sete dias, sendo então mantidos sob as condições-ambiente do laboratório.

Foram executados os ensaios de resistência à compressão (foto A.15) e à tração (compressão diametral) dos corpos de prova na data de ensaio de cada viga, em prensa

AMSLER UNIVERSAL com capacidade de 1000 kN do Laboratório de Estruturas da UFRJ, de acordo com as normas NBR-5739 (1994) e NBR-7222 (1994), respectivamente. Os valores médios de resistência do concreto à tração e à compressão são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores médios de resistência do concreto à tração e à compressão

Viga	Idade (dias)	Quantidade de corpos de prova	f_{cm} (MPa)	Quantidade de corpos de prova	f_{tm} (MPa)
V1 antes do reforço	34	5	33,3	-	-
V1 após reforço	41	3	34,8	2	3,63
V3 antes do reforço	49	3	34,3	2	3,50
V3 após reforço	56	5	38,3	-	-
V5 após reforço	70	5	34,7	3	3,56

3.2.2- Aço

Para as armaduras longitudinal e transversal das vigas foi usado aço CA-50 ou CA-60.

As amostras dos aços empregados foram ensaiadas à tração na prensa AMSLER com capacidade de 1000 kN do laboratório de Materiais de construção do IME, de acordo com a norma NBR-6152 (1980), e os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.3 e nas figuras 3.1 a 3.5.

Em todas as vigas (V1, V3 e V5), os diâmetros das barras da armadura longitudinal foram de 8 mm, para armadura de montagem na região comprimida, e de 16

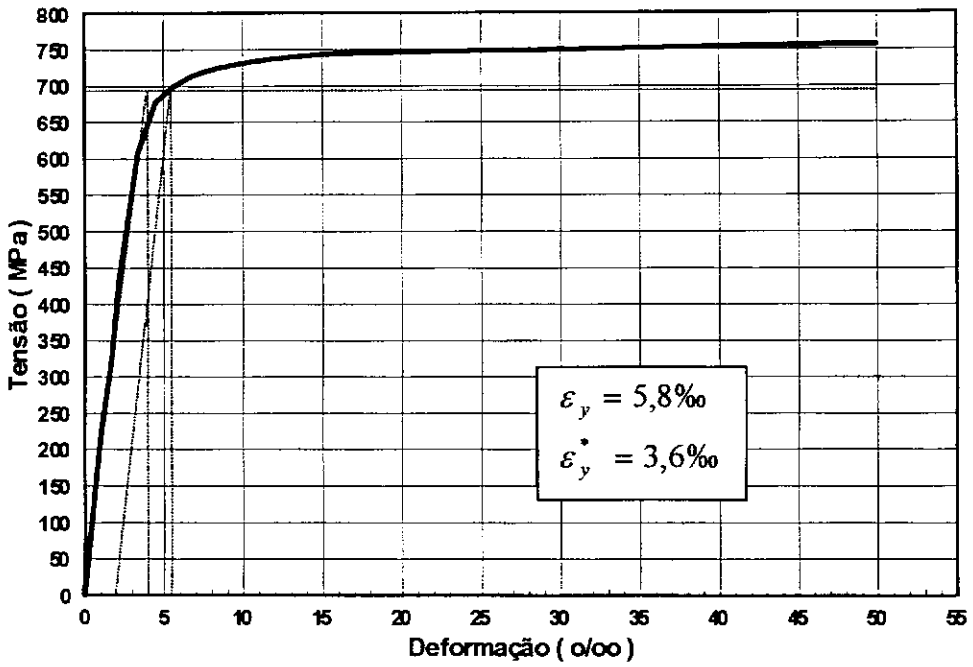


Figura 3.1 - Diagrama tensão x deformação das barras de 5 mm de diâmetro (viga 5)

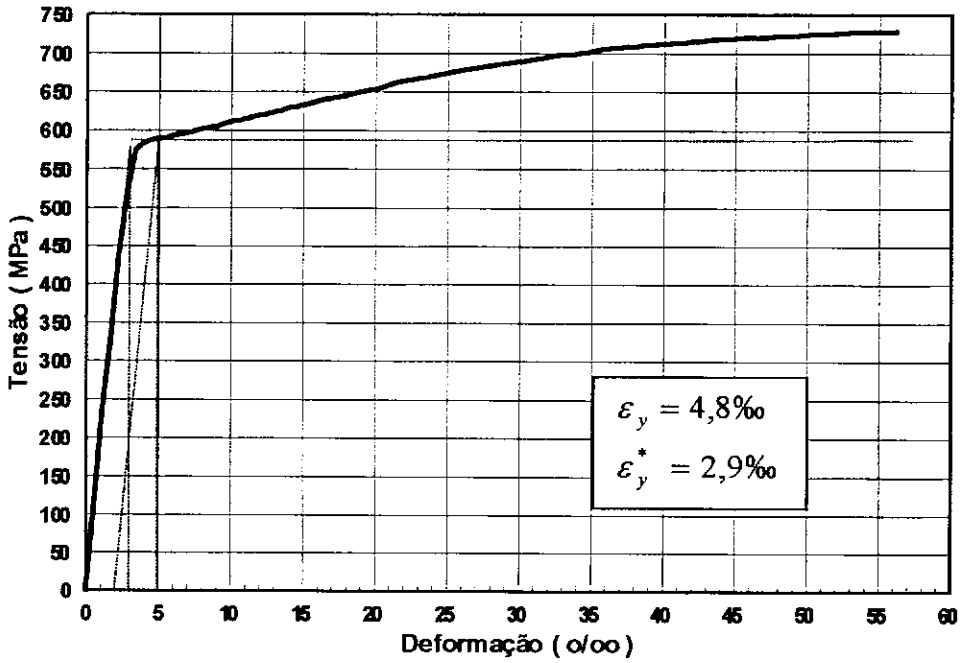


Figura 3.2 - Diagrama tensão x deformação das barras de 6,3 mm de diâmetro (vigas 3 e 5)

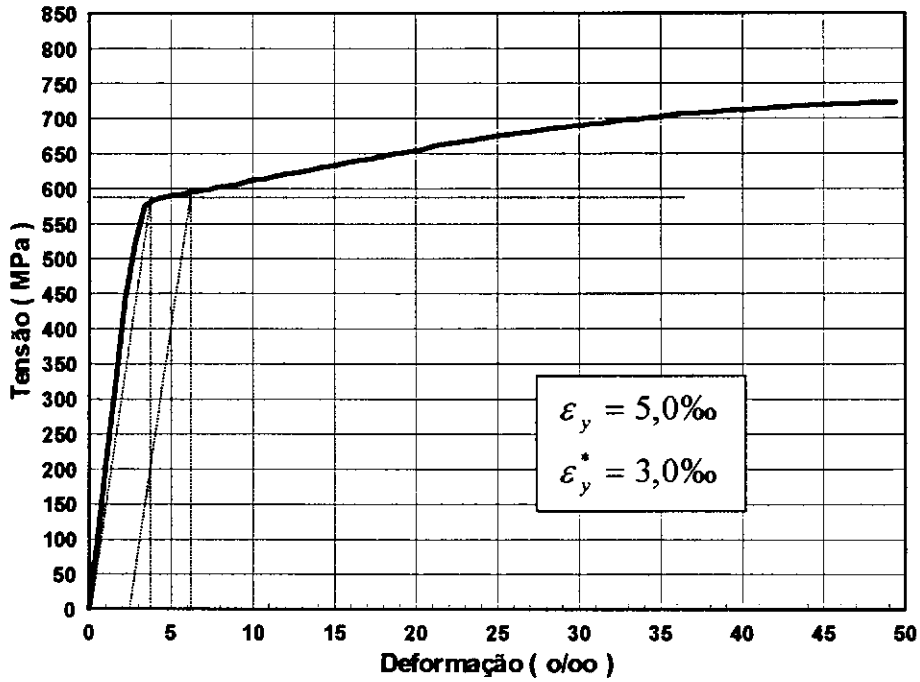


Figura 3.3 - Diagrama tensão x deformação das barras de 8 mm de diâmetro (vigas 1, 3 e 5)

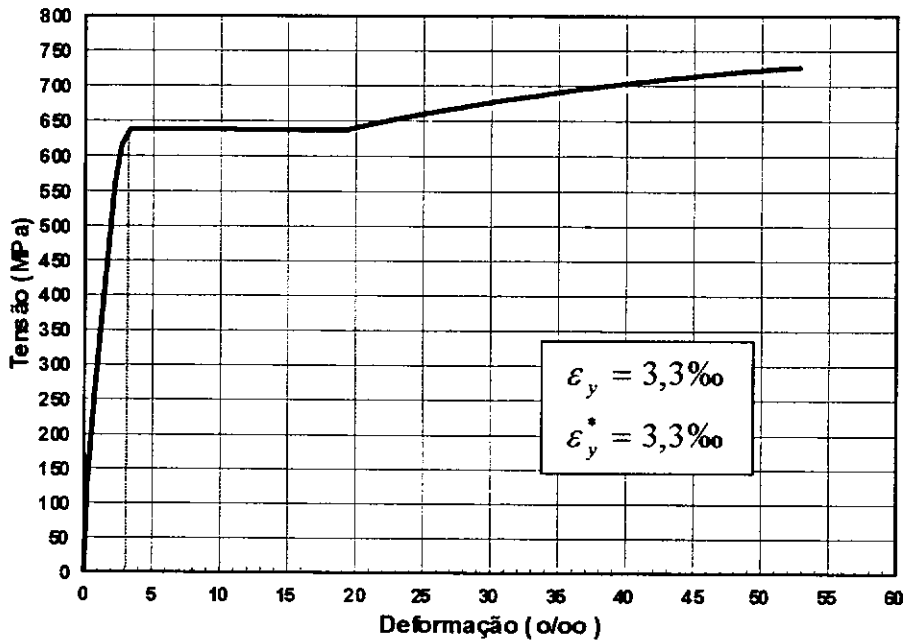


Figura 3.4 - Diagrama tensão x deformação das barras de 16 mm de diâmetro (vigas 1 e 3)

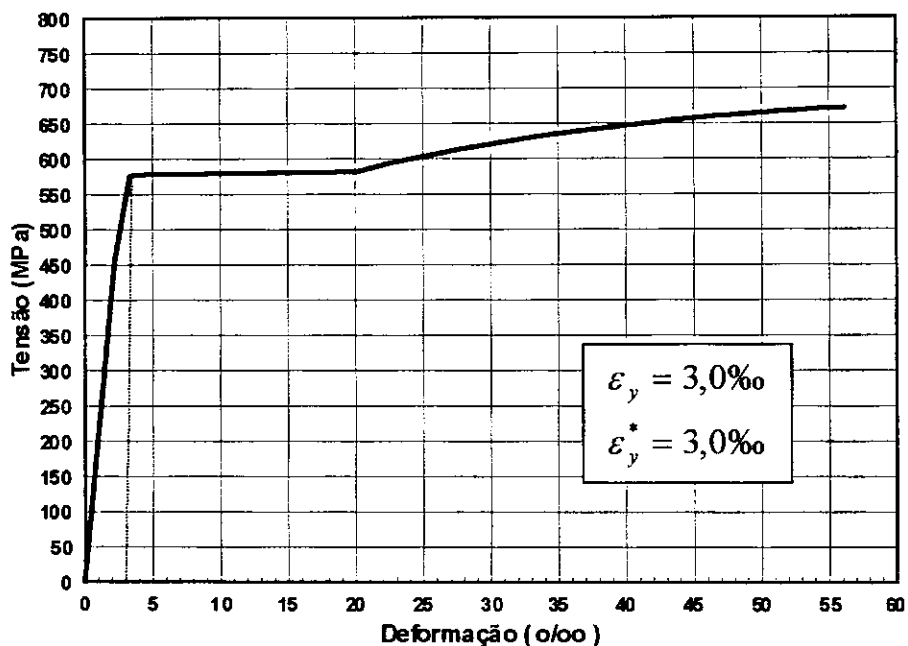


Figura 3.5 - Diagrama tensão x deformação das barras de 16 mm de diâmetro (viga 5)

mm, para a armadura longitudinal de tração.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de tração das barras de aço.

ϕ (mm)	ϕ_e (mm)	f_y (MPa)	f_{st} (MPa)	ϵ_y^* (‰)	ϵ_y (‰)	ϵ_{su} (‰)	E_s (GPa)
5,0*	4,7	688	750	3,6	5,8	>50,0	191
6,3	6,3	575	730	2,9	4,8	>56,2	205
8,0	7,9	590	785	3,0	5,0	>28,3	200
16,0	15,8	630	730	3,3	3,3	>52,7	191
16,0*	15,9	579	690	3,0	3,0	>56,2	193

* viga V5

A armadura transversal da viga V1 consistiu de estribos de 8 mm de diâmetro, com espaçamento de 100 mm, ao longo de todo o comprimento da viga. A viga V3 tinha estribos de 8 mm de diâmetro nas regiões entre as seções de aplicação de carga e os

apoios, e de 6,3 mm de diâmetro na região de flexão pura (entre as cargas concentradas), todos com espaçamento de 100 mm. Já na viga V5, os estribos tinham 5 mm de diâmetro e espaçamento de 200 mm nas regiões entre as seções de aplicação de carga e os apoios, e 6,3 mm de diâmetro e espaçamento de 160 mm na região de flexão pura.

3.2.3- Fibras

Para o reforço à flexão das três vigas, V1, V3 e V5, foram utilizadas lâminas de fibras de carbono SIKA CARBODUR tipo S-512 (foto A.3), que, segundo o fabricante SIKA (1998), têm as seguintes características :

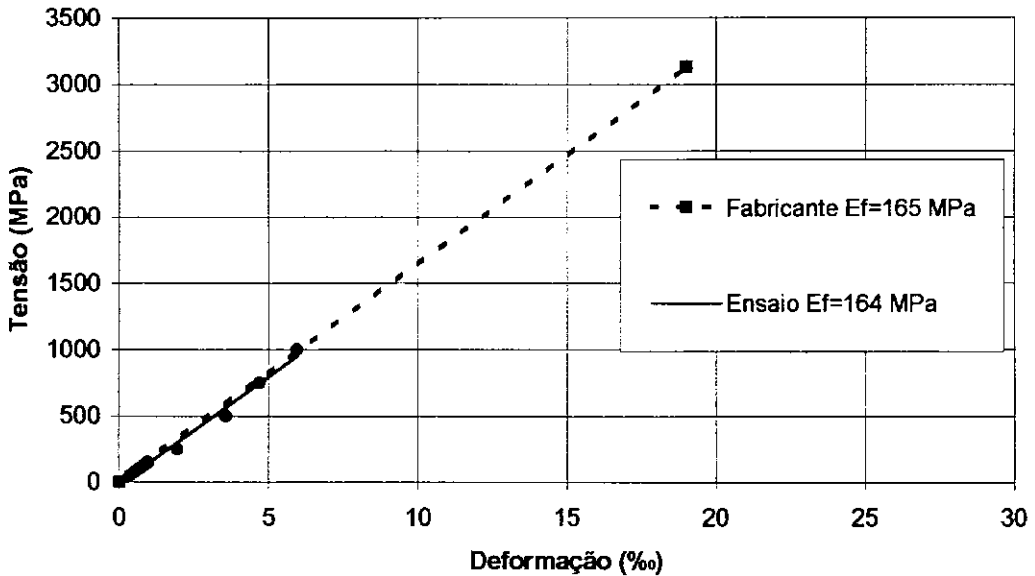
- Largura = 50 mm,
- Espessura = 1,2 mm,
- Área da seção transversal = $60,0 \text{ mm}^2$,
- Módulo de elasticidade > 165 GPa,
- Deformação específica na ruptura > 17 %,
- Resistência à tração > 2,8 GPa,
- Massa específica = 1500 kg/m^3 .

Nas vigas V1, V3 e V5 foram utilizadas duas, três e cinco lâminas de fibra de carbono, respectivamente, sendo que nas duas primeiras vigas elas foram colocadas apenas na face tracionada da viga, enquanto na viga V5 foram utilizadas três na face tracionada da viga e uma na parte inferior de cada face lateral (figura 3.16), que serviu também de ancoragem para o reforço ao cisalhamento que foi executado com o mesmo material. Essas lâminas tinham o comprimento de 3800 mm.

Foi ensaiada à tração no Laboratório de Materiais de Construção da UFRJ uma amostra da lâmina de fibra de carbono (foto A.19). Esta amostra de 180 mm de comprimento foi reforçada em cada lado de suas extremidades com duas tiras de fibra e uma de chapa de aço (camada externa) com comprimento de 50 mm, coladas com resina epóxica. As deformações foram lidas com o auxílio de dois extensômetros elétricos de

resistência, colocados no meio do corpo de prova.

Figura 3.6 – Diagrama tensão x deformação da lâmina de fibra de carbono.



Devido ao pequeno comprimento da amostra ensaiada e dos trechos reforçados na sua extremidade, que foram abraçados pelas garras da prensa, não foi possível alcançar a carga de ruptura, pois houve escorregamento entre a amostra e as tiras de fibra coladas nas extremidades.

O diagrama tensão x deformação obtido é mostrado na figura 3.6, junto com o fornecido pelo fabricante SIKA (1998).

3.2.4- Adesivo

Para a colagem das lâminas de fibras de carbono como reforço à flexão e ao cisalhamento, foi empregada a resina epóxica SIKADUR-30 (figura A.5).

De acordo com o fabricante SIKA (1998), as características da cola são:

- Cor Componente A: branco
 Componente B : preto
 Mistura A+B : cinza claro

- Proporção dos componentes : 3 partes de componente A para 1 parte de componente B (em peso e em volume);
- Densidade da mistura : 1,77 kg/ℓ;
- Vida útil da mistura : 40 minutos a 35⁰C;
- Adesividade após a aplicação : 30 minutos a 35⁰C;
- Temperatura de transição vítrea : 62⁰C;
- Módulo de elasticidade : 12800 MPa;
- Coeficiente de dilatação térmica : $9 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ (-10⁰C a +40⁰C);
- Resistência à flexo-tração : 28 MPa após 10 dias a 15⁰C;
- Resistência à compressão : 95 MPa após 10 dias a 15⁰C.
- Tensão de aderência : 4MPa

3.2.5- Fôrmas

Para a montagem das fôrmas, utilizaram-se placas de compensado plastificado de espessura de 20 mm e gravatas de pinho, conforme mostra a figura 3.7 e a foto A.1.

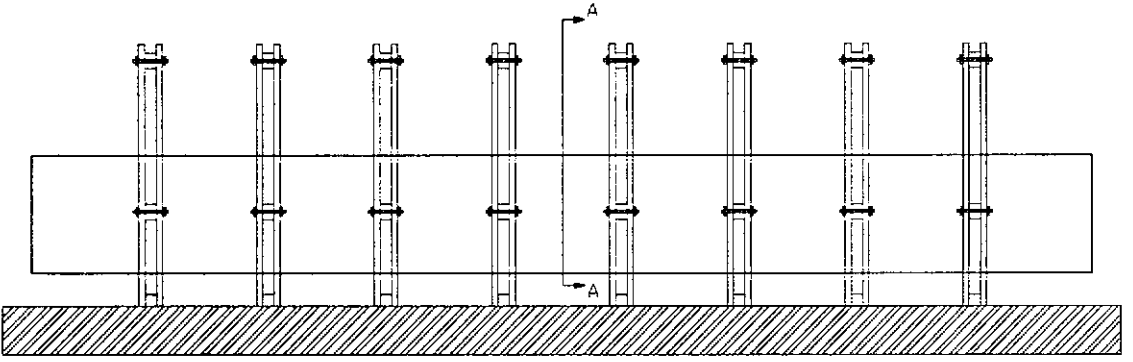
Foi utilizada fita adesiva nas juntas das fôrmas e aplicada uma camada fina de óleo mineral nas superfícies internas, com objetivo de tornar a mesma estanque e facilitar o processo de desmoldagem.

3.3- Descrição das Vigas sem Reforço

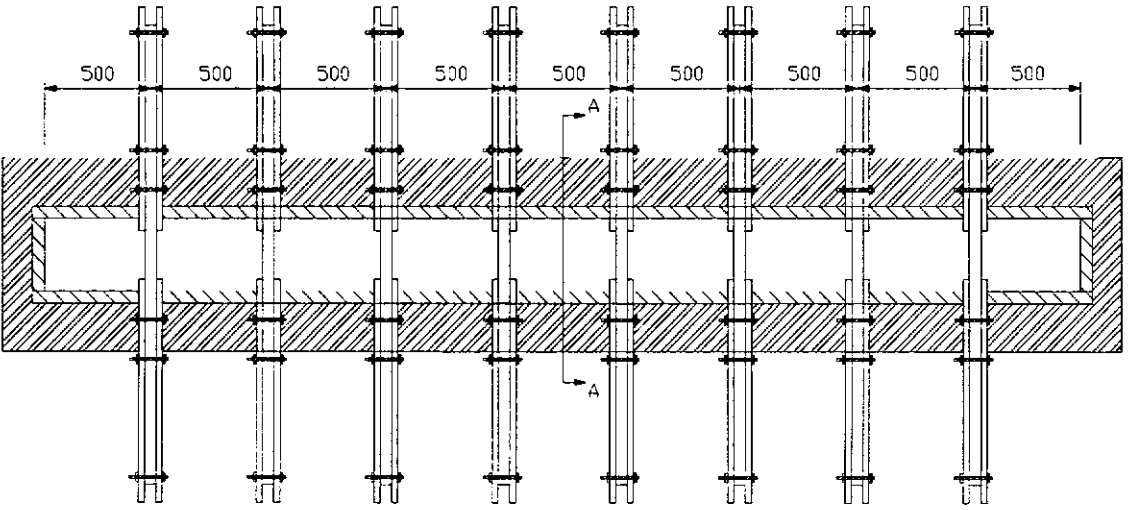
3.3.1 – Características Geométricas e Estruturais

Todas as vigas eram biapoiadas, possuíam seção transversal retangular de 150 mm x 450 mm e comprimento total de 4500 mm.

Os apoios eram do 1^o e 2^o gêneros, distando 4000 mm entre si. O carregamento consistiu em duas cargas concentradas, uma a 1350 mm de cada apoio.

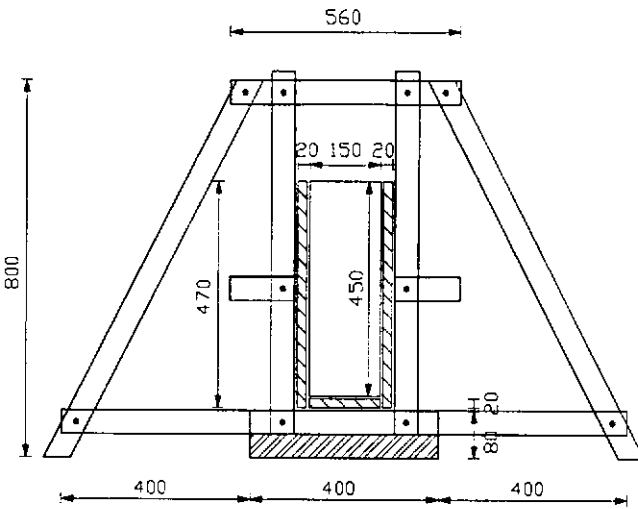


VISTA DE PERFIL



VISTA SUPERIOR

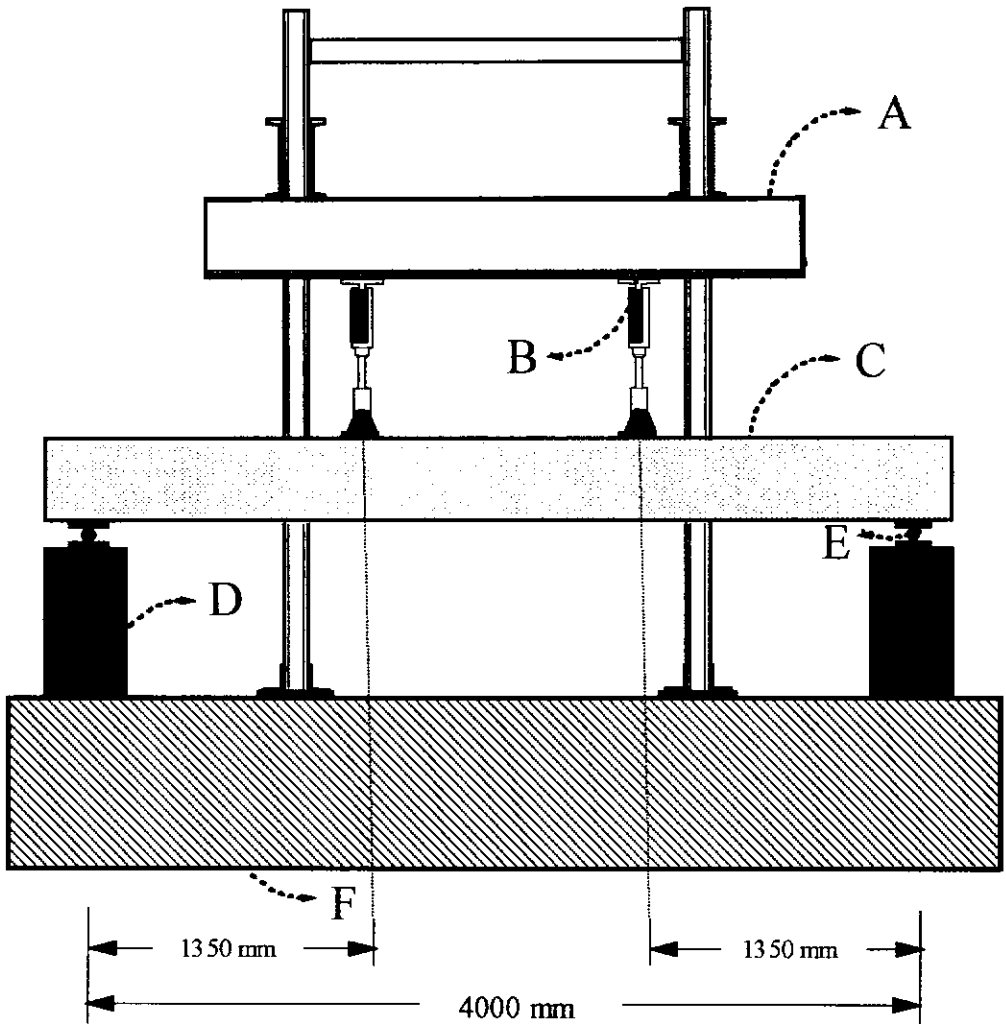
CORTE A-A



OBSERVAÇÕES :

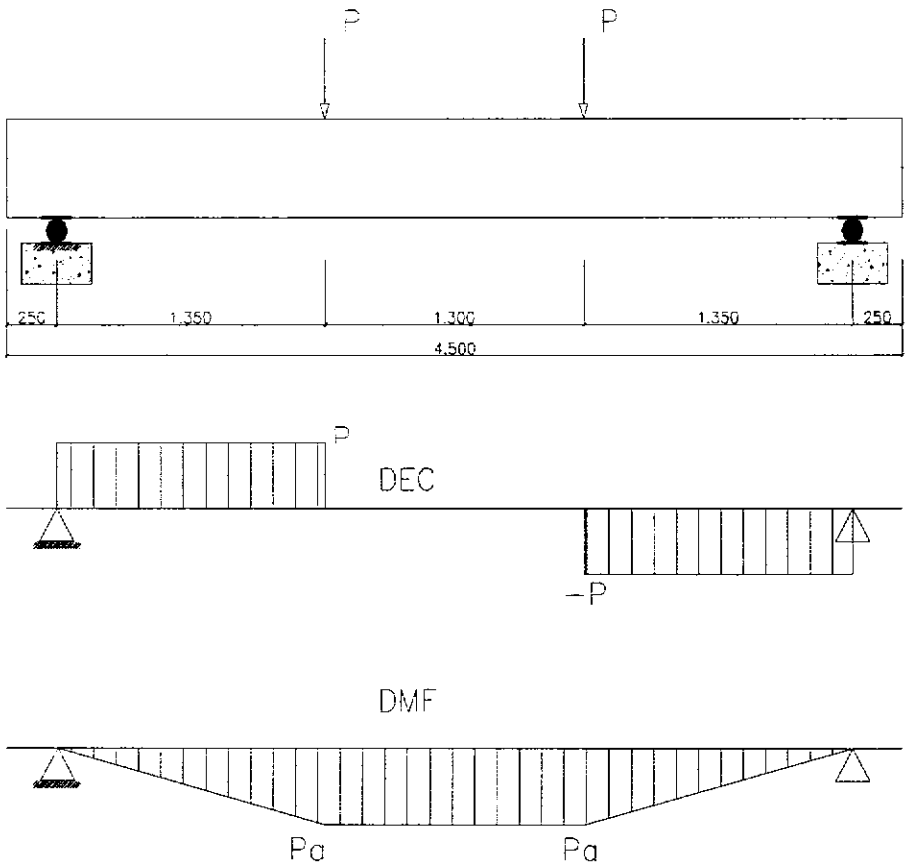
1) Cotas em mm

Figura 3.7 – Fôrmas das vigas



- A) Pórtico de aço
- B) Macaco hidráulico
- C) Viga ensaiada
- D) Bloco de concreto para apoio
- E) Apoio (um fixo e um móvel)
- F) Placa de reação

Figura 3.8 - Montagem de ensaio



Cotas em milímetros

DEC = Diagrama de Esforço Cortante

DMF = Diagrama de Momento Fletor

Figura 3.9 – Esquema estático e diagramas de esforços solicitantes das vigas

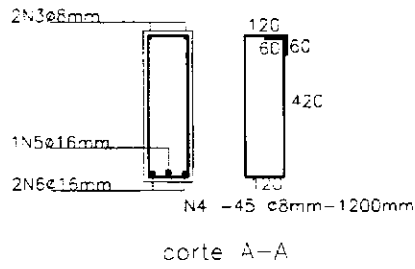
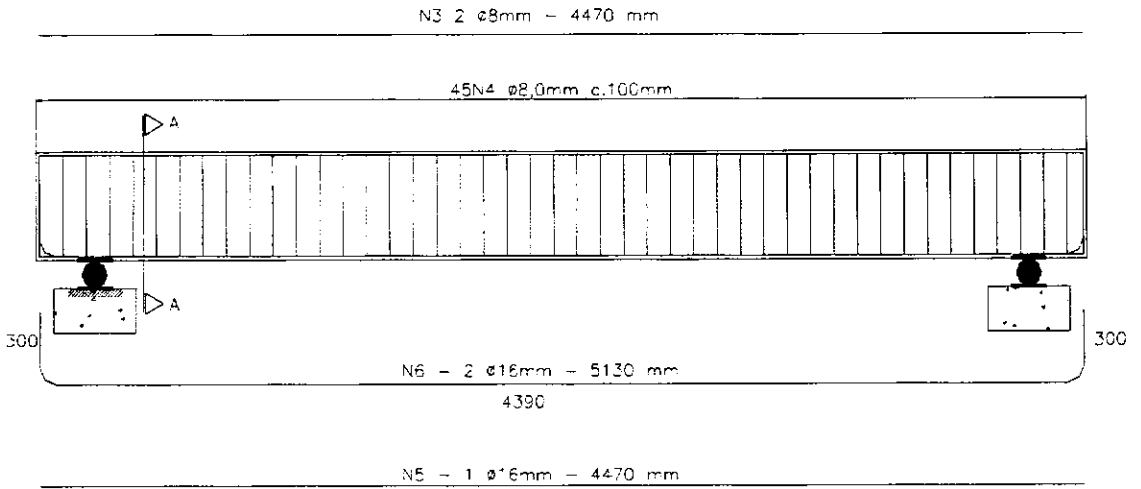


Figura 3.10 – Detalhamento da armadura interna da viga V1

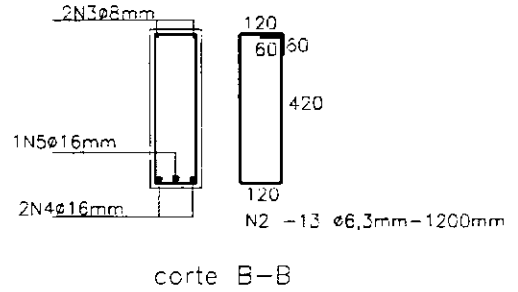
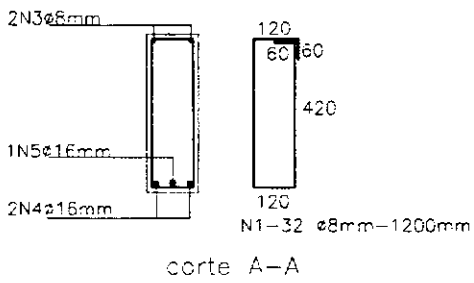
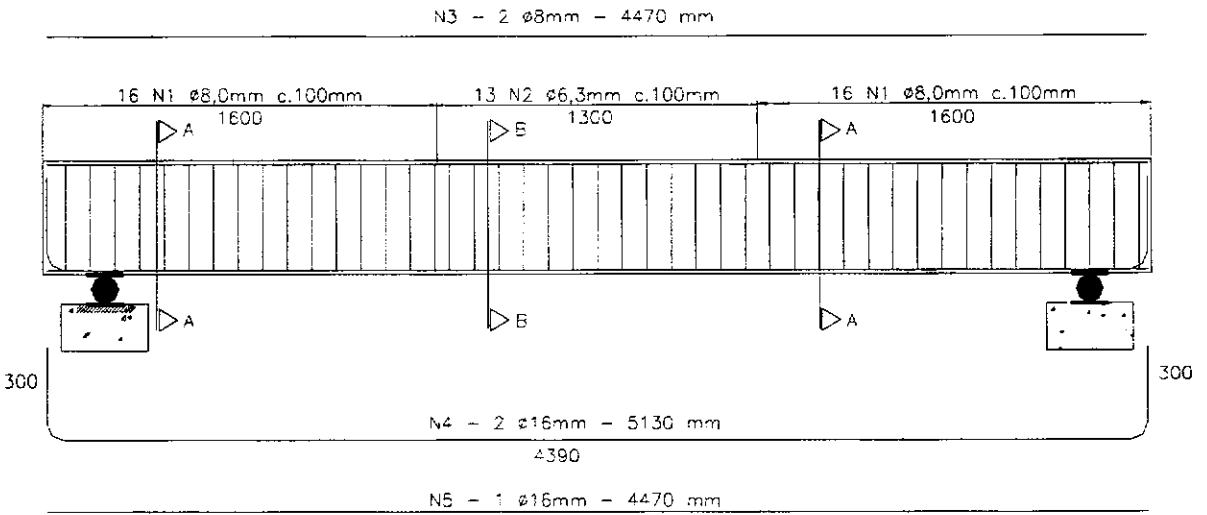


Figura 3.11 – Detalhamento da armadura interna da viga V3

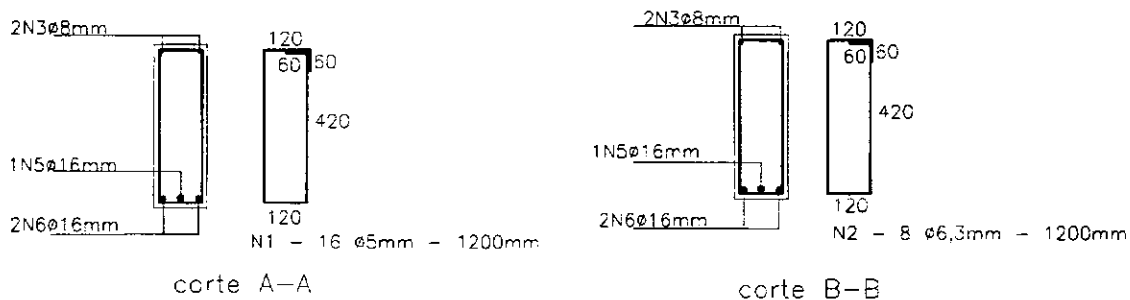
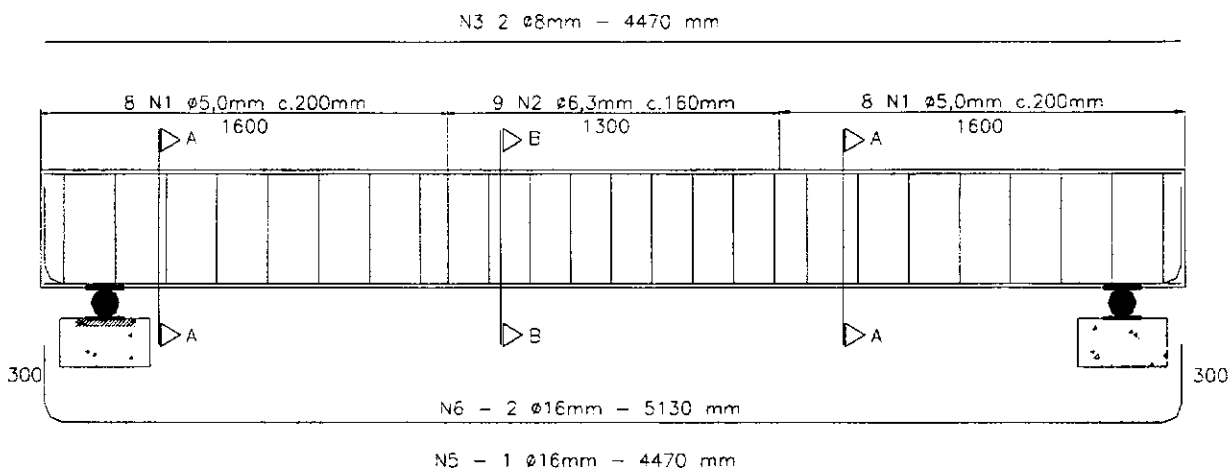


Figura 3.12 – Detalhamento da armadura interna da viga V5

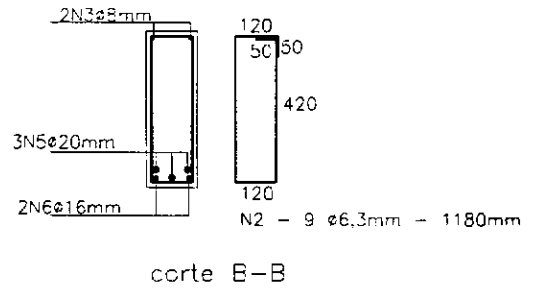
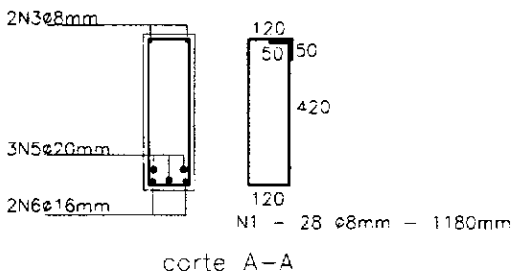
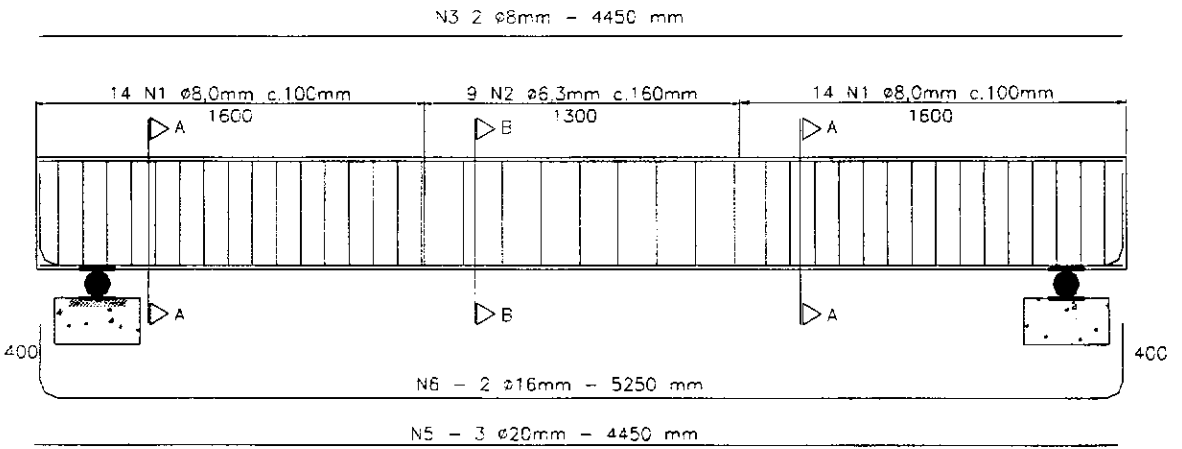


Figura 3.13 – Detalhamento da armadura interna da viga VM-1R

São mostrados nas figuras 3.8 a 3.13 o esquema de ensaio, os diagramas de esforços solicitantes e o detalhamento da armadura interna das vigas ensaiadas V1, V3 e V5 e da viga de referência VM-1R.

3.3.2 – Resistência Teórica das Vigas sem Reforço

As vigas V1, V3 e V5 foram dimensionadas com taxas de armaduras longitudinal de tração menores que a taxa da viga VM-1R, viga de referência. As três vigas V1, V3 e V5 possuíam dimensões e concreto semelhantes aos da viga VM-1R e foram reforçadas com 2 lâminas, 3 lâminas e 5 lâminas, respectivamente, com a intenção de, na viga com mais reforço, alcançar a capacidade resistente à flexão da viga VM-1R.

3.3.2.1 – Resistência à Flexão

Foi adotado o diagrama retangular simplificado (figura 3.14) para tensões de compressão no concreto, de acordo com a NBR-6118 (1980), e coeficientes de segurança unitários para o cálculo da resistência à flexão das vigas V1, V3 e V5.

A carga de ruptura em função do momento resistente da viga é:

$$P_u = \frac{M_u}{a} \quad (3.1)$$

onde, considerando-se coeficientes de minoração da resistência dos materiais iguais a um,

$$M_u = (A_s f_y - A'_s \sigma'_s) z + A'_s \sigma'_s z' = (A_s f_y - A'_s \sigma'_s)(d - 0,4x) + A'_s \sigma'_s z' \quad (3.2)$$

$$x = \frac{A_s f_y - A'_s \sigma'_s}{0,85 f_c 0,80 b} \quad (3.3)$$

$$\sigma'_s = \varepsilon'_s E_s \quad (3.4)$$

$$\varepsilon'_s = \frac{(x - d')}{x} \varepsilon_c \quad (3.5)$$

$$a = 1350 \text{ mm}$$

sendo:

P_u = Carga de ruptura;

M_u = Momento de ruptura;

A_s = Área da seção da armadura longitudinal interna de tração;

A'_s = Área da seção da armadura longitudinal interna de compressão;

f_y = Tensão de escoamento da armadura de tração;

σ'_s = Tensão da armadura de compressão;

f_c = Resistência do concreto à compressão;

b = Largura da seção;

ε'_s = Deformação da armadura de compressão;

ε_c = Deformação do concreto (deformação última = 3,5 ‰);

E_s = Módulo de elasticidade do aço;

z = Distância entre a força resultante no concreto e a força resultante na armadura de tração;

z' = Distância entre a força resultante na armadura de compressão e a força resultante na armadura de tração;

A tabela 3.4 mostra os valores das resistências à flexão teóricas das vigas, obtidos a partir das expressões acima. Nela são dadas também as resistências calculadas a partir do programa CONSEC95 de análise não-linear de vigas de concreto armado.

Tabela 3.4 – Resistências à flexão teóricas das vigas não reforçadas.

Viga	f_{cm} (MPa)	A_s (mm ²)	A'_s (mm ²)	ρ (%)	b (mm)	d (mm)	d' (mm)	f_y (MPa)	x_p (1)(4) (mm)	z (1)(4) (mm)	M_u (1)(4) (kN.m)	P_u (1) (kN)		P_u (2) (kN)	
												(3)	(4)	(3)	(4)
V1	33,3	603	100,5	0,96	150	420	27	630	97,0	381	146,6	87,9	108,6	87,4	108,1
V3	34,3	603	100,5	0,96	150	420	27	630	94,3	382	146,9	88,1	108,8	87,8	108,6
V5	34,7	603	100,5	0,95	150	422	24	579	84,5	388	136,94	88,6	101,4	88,1	100,7
VM-IR	34,4	1344	100,5	2,18	150	410	25	511	178,7	339	236,4	172,2	175,1	176,0	179,0

(1) valores obtidos a partir do diagrama retangular de tensões

(2) valores obtidos a partir do programa CONSEC95.

(3) valores baseados na tensão de escoamento nominal ($\epsilon_y = 2,5\%$ e $f_y = 500$ MPa).

(4) valores baseados na tensão de escoamento experimental (ϵ_y^* e f_y , tabela 3.3).

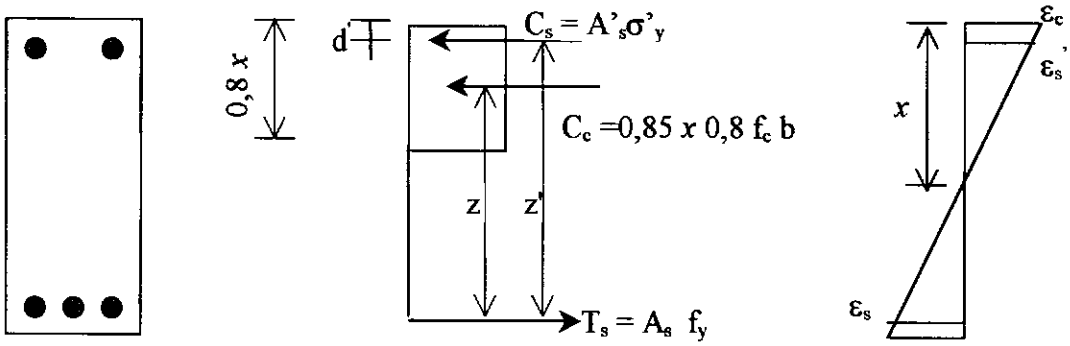


Figura 3.14 – Forças e deformações numa seção submetida a momento fletor.

3.3.2.2 – Resistência ao Cisalhamento

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento teórica das vigas V1, V3 e V5 foi utilizada a seguinte equação:

$$V_R = V_c + V_s \tag{3.6}$$

onde:

V_R = força cortante resistente da viga;

V_c = parcela da força cortante resistente devida à contribuição do “concreto”;

V_s = parcela da força cortante devida à contribuição dos estribos, obtida da treliça de Morsch.

Com base na NBR-6118 (1980), a parcela V_c é dada pela equação (3.7):

$$V_c = \psi_1 \sqrt{f_{ct}} b d \tag{3.7}$$

onde:

$$0,14 \geq \psi_1 = (0,065 + 5\rho_1) \geq 0,07$$

ρ_1 = menor taxa da armadura longitudinal de tração no trecho de comprimento $2h$ a partir da face do apoio.

Nessa expressão de V_c , segundo FUSCO (1982), está embutido um coeficiente de segurança $\gamma_c = 1,4$.

De acordo com a NBR-6118 (2000), a parcela V_c é dada pela equação (3.8):

$$V_c = 0,6 f_{ctd} b d \quad (3.8)$$

onde:

$$f_{ctd} = \frac{0,7}{\gamma_c} f_{ctm} = \frac{0,7}{\gamma_c} 0,33 \sqrt{f_{ck}^2}$$

Segundo a analogia da treliça de Morsch, para estribos perpendiculares ao eixo da viga, a parcela V_s é dada pela seguinte equação:

$$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} z}{\gamma_s s} \quad (3.9)$$

onde:

A_{sw} = área da seção de um estribo interno no comprimento s ;

f_{yw} = tensão de escoamento dos estribos;

z = braço de alavanca;

s = espaçamento entre os estribos.

Na tabela 3.5 são dados os valores da resistência ao cortante (equação 3.6), considerando-se para parcela V_c as equações 3.7 e 3.8 e $\gamma_c = \gamma_s = 1$.

As diferenças entre os valores de V_c obtidos com base nas normas NBR-6118 (1980) e (2000) se mostram maiores para as vigas que possuem baixa taxa de armadura longitudinal de tração, parâmetro desconsiderado na NBR-6118 (2000) .

Tabela 3.5 – Resistências ao cisalhamento teóricas das vigas não reforçadas.

Viga	f_{om} (MPa)	s (mm)	d (mm)	A_{sw} (mm^2)	f_{yw} (MPa)	z (4) (mm)	V_c		V_s (kN)		V_R (kN)		
							(1) (kN)	(2) (kN)	(3)	(4)	(1) (3)	(1) (4)	(2) (3)
V1	33,3	100	420	100,6	590	381	58,5	82,2	196,1	226,1	254,6	278,3	308,3
V3	34,3	100	420	100,6	590	382	59,4	83,8	196,5	226,7	255,9	280,3	310,5
V5	34,7	200	422	39,2	688	388	58,8	84,9	46,3	52,4	105,1	131,1	137,3
VM-IR	34,4	100	410	100,6	684	339	70,7	82,0	171,1	232,9	241,8	253,1	314,9

(1)valores baseados na NBR-6118 (1980).

(2)valores baseados na NBR-6118 (2000).

(3)valores baseados na tensão de escoamento nominal ($\phi 5mm \rightarrow \epsilon_y = 3,0\%$ e $f_y = 600$ MPa; $\phi 8mm \rightarrow \epsilon_y = 2,5\%$ e $f_y = 500$ MPa).

(4) valores baseados na tensão de escoamento experimental (ϵ_y^* e f_y , tabela 3.3).

3.4- Concretagem

O concreto foi preparado em uma betoneira de 320 l de capacidade, com o tempo de mistura dos materiais em torno de 6 minutos.

O adensamento do concreto, com vibradores de imersão com diâmetro de 25 mm, foi realizado durante e imediatamente após o seu lançamento manual.

Após a cura de sete dias, realizada com cobertura de areia molhada, houve a desforma da viga, que permaneceu em condições-ambiente do laboratório até a data do ensaio.

3.5- Tipos de reforços

Para cada uma das três vigas reforçadas, foi utilizado um tipo de reforço à flexão. A tabela 3.6 dá as disposição e quantidade das lâminas de fibra de carbono em cada viga ensaiada.

Tabela 3.6 –Reforço à flexão usado nas vigas

Viga	Material	Reforço à Flexão
V1	SIKA CARBODUR S-512, $b_f=50\text{mm}; e_f=1,2\text{mm};$ $L_f=3,80\text{m}$	Duas lâminas de fibra de carbono coladas na face tracionada da viga (figura 3.15)
V3	SIKA CARBODUR S-512, $b_f=50\text{mm}; e_f=1,2\text{mm};$ $L_f=3,80\text{m}$	Três lâminas de fibra de carbono coladas na face tracionada da viga (figura 3.15)
V5	SIKA CARBODUR S-512, $b_f=50\text{mm}; e_f=1,2\text{mm};$ $L_f=3,80\text{m}$	Três lâminas de fibra de carbono coladas na face tracionada da viga e uma na parte inferior de cada face lateral da viga (figura 3.16)

A viga V5, além do reforço à flexão, recebeu reforço ao cisalhamento com estribos externos de lâminas de fibra de carbono. Foram utilizados dez estribos espaçados de 200 mm, ancorados superiormente com auxílio de lâminas coladas de 950 mm de comprimento e inferiormente com as lâminas de reforço à flexão laterais. As dimensões destes estribos eram : $b_f=50\text{mm}$; $e_f=1,2\text{mm}$ e $L_f=400\text{ mm}$. Em uma das regiões da viga onde havia cortante, os estribos foram colocados perpendicularmente ao eixo longitudinal da viga; na outra região eles foram posicionados a 45° com esse eixo, como mostra a figura 3.16.

O reforço ao cisalhamento da viga V5 é discutido mais detalhadamente em CERQUEIRA (2000).

3.6 - Instrumentação

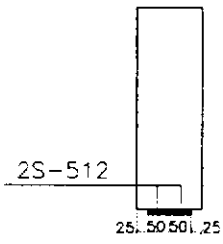
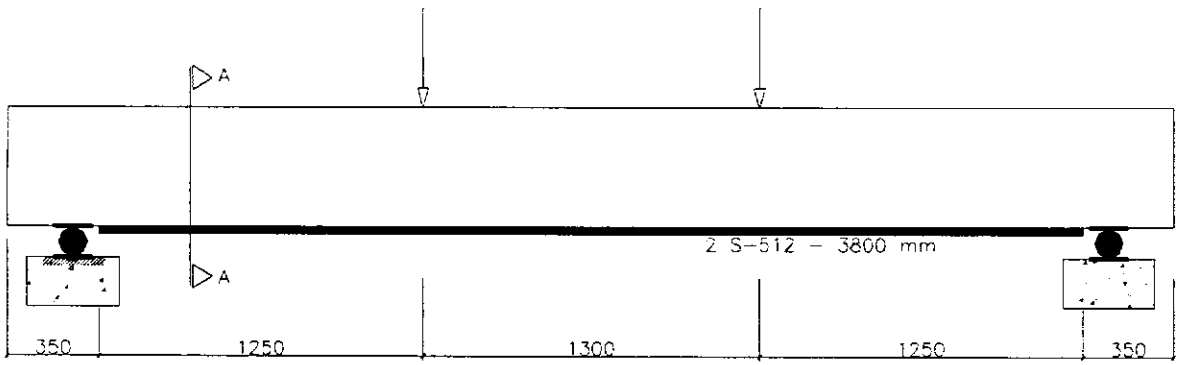
Com o objetivo de verificar a eficiência do reforço, as vigas foram instrumentadas interna e externamente para, ao longo dos ensaios, se fazer o acompanhamento de flechas, deformações do concreto, deformações das armaduras internas e das lâminas de fibras de reforço.

3.6.1 – Extensômetros Elétricos de Resistência

Foram usados extensômetros elétricos de resistência com base de medição de 5 mm, sendo que nas barras de aço foram colocados dois diametralmente opostos.

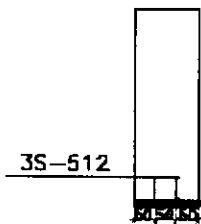
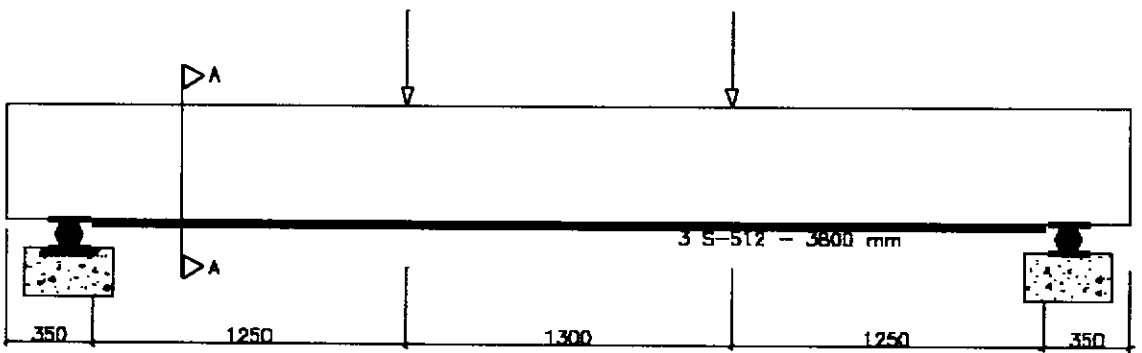
A barra central da armadura longitudinal interna de tração das três vigas foi instrumentada na seção do meio do vão e numa seção de aplicação de carga (figura 3.17).

Foi instrumentada uma das pernas de seis estribos internos em cada uma das vigas, conforme indicado na figura 3.18.



corte A-A

Cotas em milímetros



corte A-A

Cotas em milímetros

Figura 3.15 – Detalhamento da armadura externa de reforço da viga V1 e V3

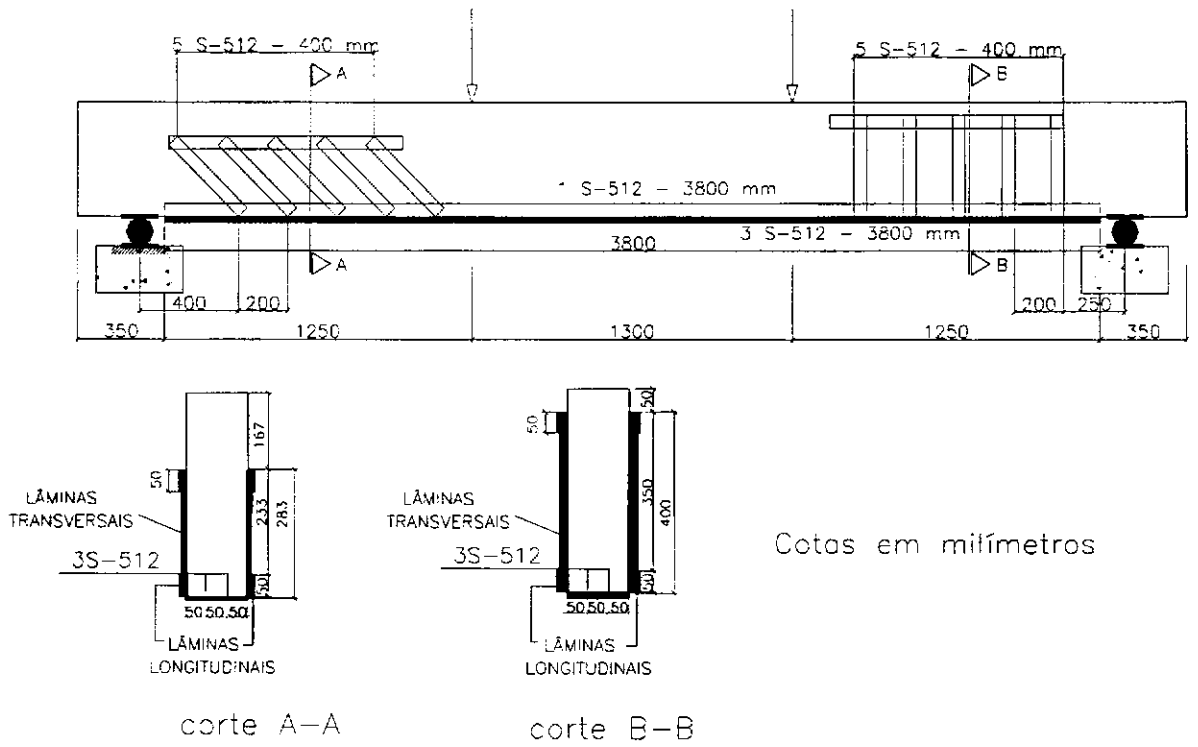


Figura 3.16 – Detalhamento da armadura externa de reforço da viga V5

Algumas das lâminas de fibras de carbono usadas no reforço à flexão foram instrumentadas na seção do meio do vão e numa seção de aplicação de carga; nas vigas V1 e V3, duas lâminas inferiores (foto A.10) e, na viga V5, uma lâmina inferior e uma lateral (foto A.11), como mostrado nas figuras 3.19 e 3.20.

Dos estribos de lâminas de fibra de carbono usados para reforço ao cisalhamento na viga V5 (foto A.12), seis foram instrumentados de acordo com o esquema da figura 3.21.

3.6.2 – Extensômetro Mecânico

Foi utilizado um extensômetro mecânico com base de medição de 100 mm e precisão de 0,001 mm para a medição de deformações do concreto. A figura 3.22 mostra a posição das bases de medição fixadas na seção do meio do vão.

3.6.3 – Deflectômetros Elétricos

Deflectômetros elétricos com constante de calibração de $0,032 \text{ mm}/10^{-6}$ e curso de 100 mm foram utilizados para a medição das flechas das vigas nas seções de aplicação de carga (figura 3.23).

3.6.4 – Fissurômetro

Utilizou-se uma lupa associada a uma escala graduada com precisão de 0,02 mm para leitura de aberturas de fissuras em alguns estágios de carregamento.

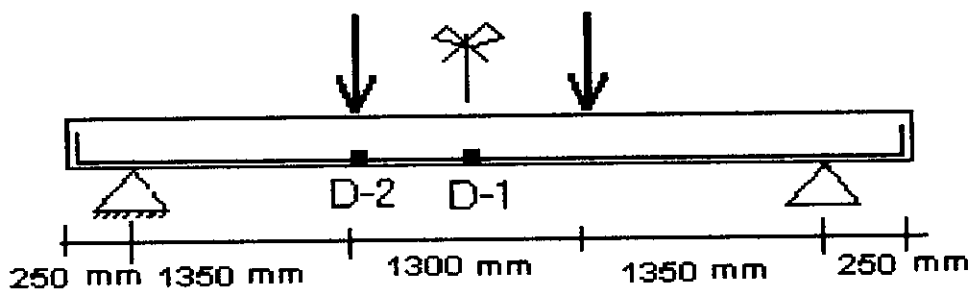


Figura 3.17 – Localização dos extensômetros elétricos de resistência para medição da deformação das barras longitudinais internas tracionadas.

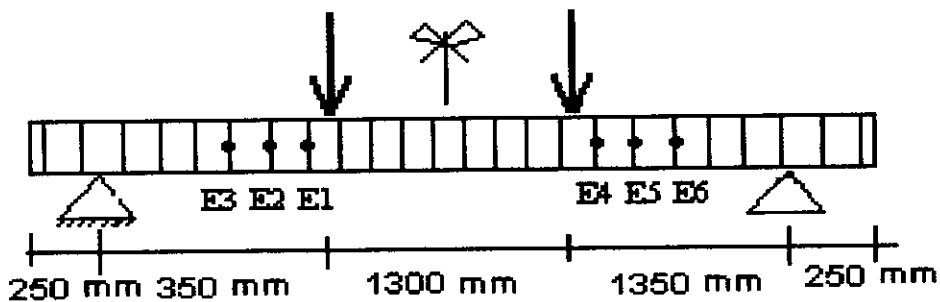


Figura 3.18 – Localização dos extensômetros elétricos de resistência para medição da deformação dos estribos internos.

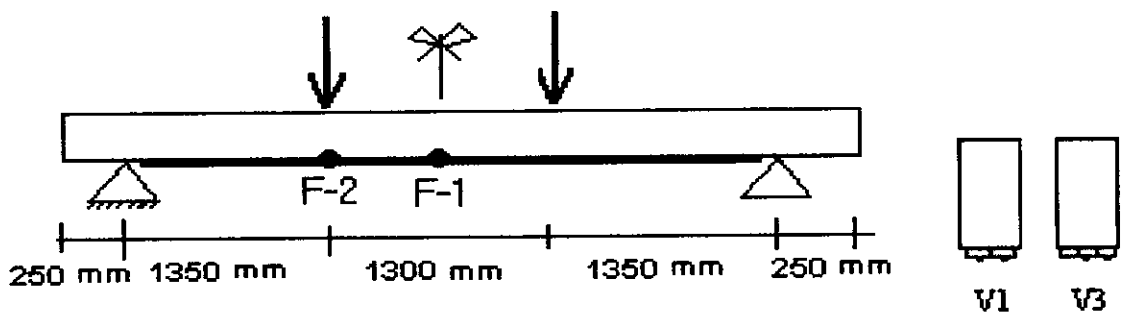


Figura 3.19 – Localização dos extensômetros elétricos de resistência para medição da deformação das lâminas de fibras de carbono usadas no reforço à flexão das vigas V1 e V3.

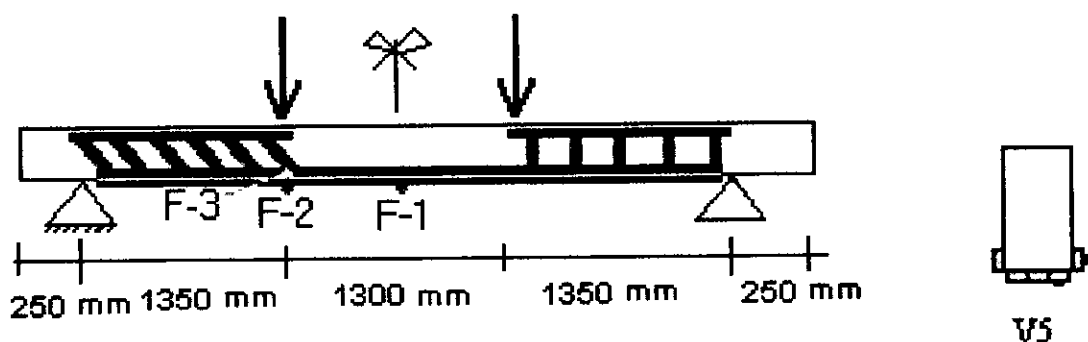


Figura 3.20 – Localização dos extensômetros elétricos de resistência para medição da deformação das lâminas de fibras de carbono usadas no reforço à flexão da viga V5.

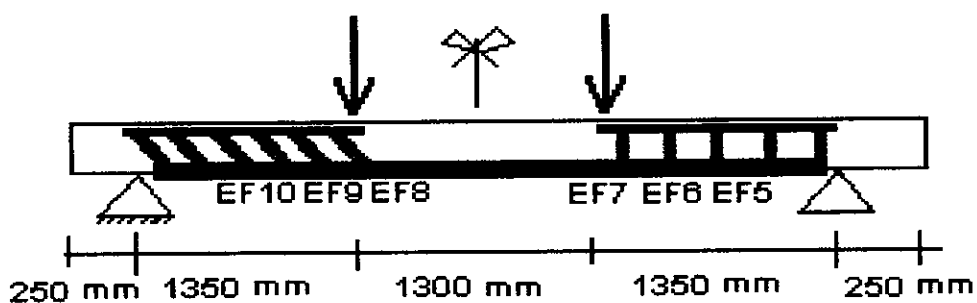


Figura 3.21 – Localização dos extensômetros elétricos de resistência para medição da deformação das lâminas de fibras de carbono usadas no reforço ao cisalhamento da viga V5.

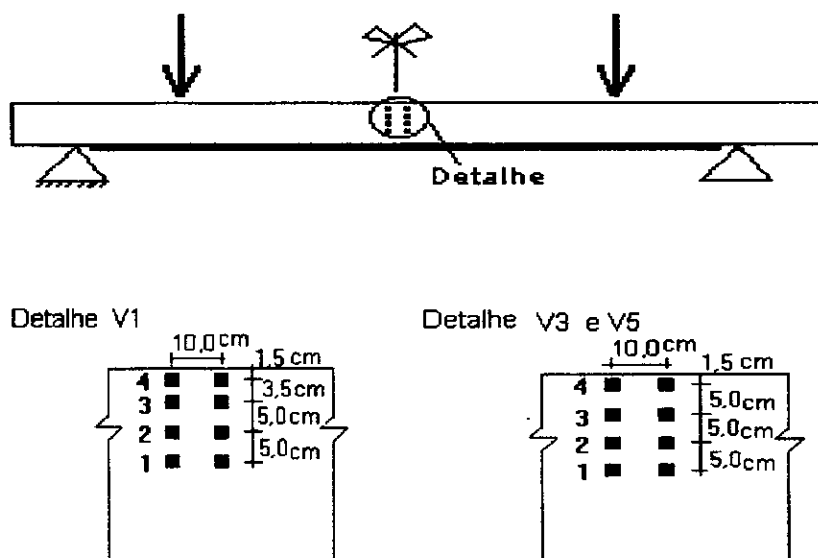


Figura 3.22 – Localização das placas de cobre para medição das deformações do concreto com extensômetro mecânico.

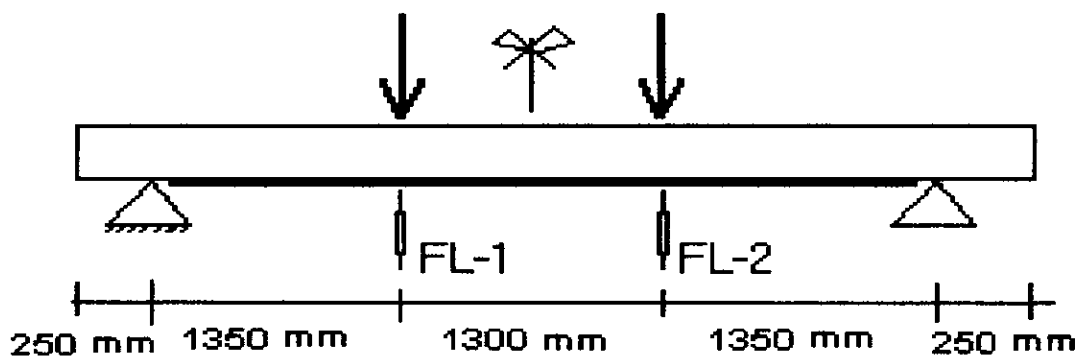


Figura 3.23 – Localização dos deflectômetros elétricos para medição de flechas.

3.7 - Execução dos Ensaios

Depois de serem posicionadas de acordo com a figura 3.8, as vigas foram pintadas com cal com objetivo de facilitar a visualização e a marcação das fissuras. A

fiação dos extensômetros e deflectômetros elétricos foi conectada a um sistema de aquisição de dados (foto A.14), os macacos hidráulicos de capacidade de 500 kN foram ligados ao sistema de controle de carga e deslocamento MTS, e deu-se, então, início aos ensaios das vigas.

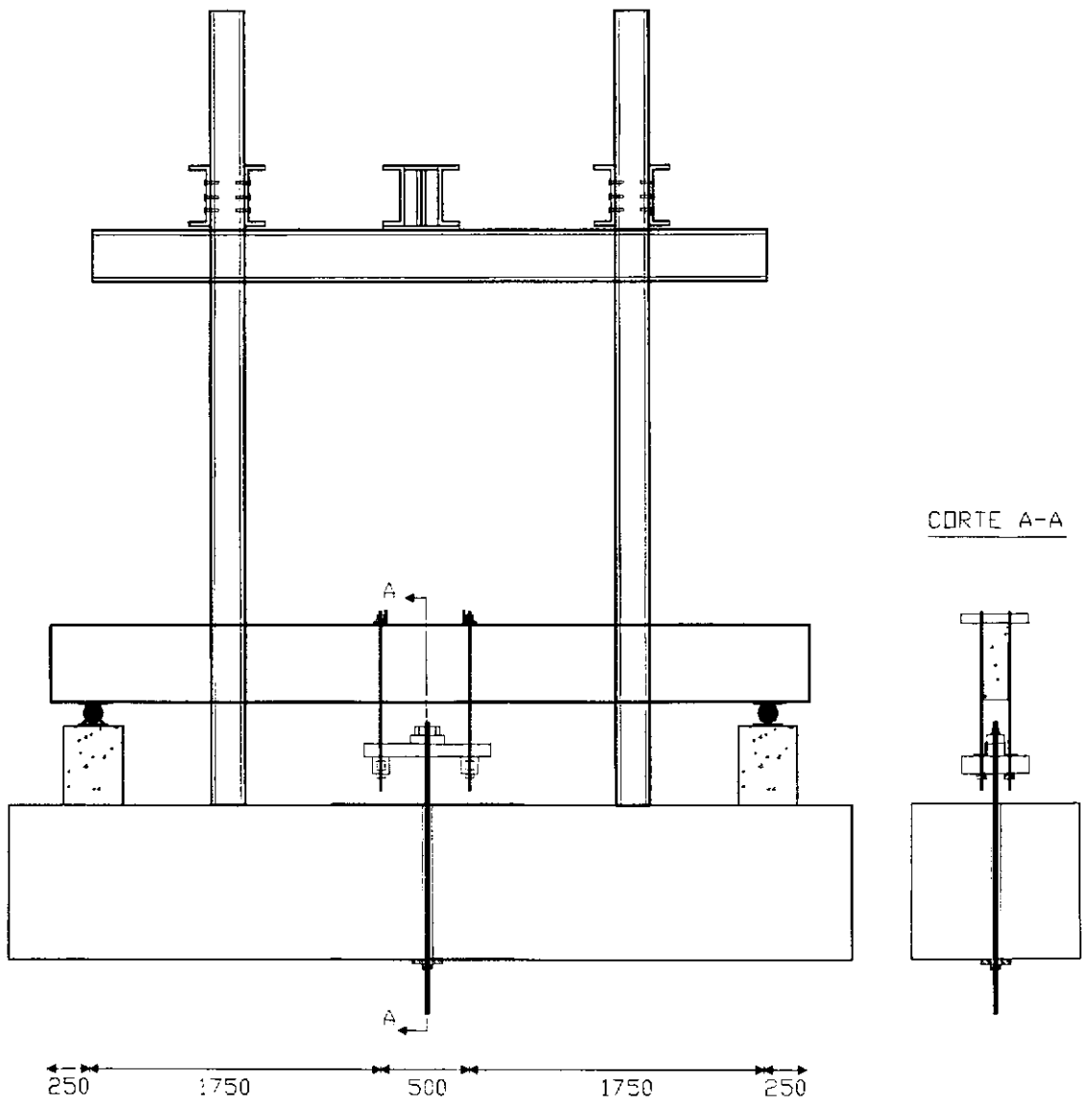
As vigas V1, V3 e V5 foram submetidas a dois ciclos de carregamento antes de serem reforçadas. No primeiro ciclo variaram-se as cargas de 0 kN a 70 kN, com incrementos de 10 kN. Após este ciclo, as vigas foram descarregadas e submetidas ao segundo ciclo de carregamento com variação de cargas de 0 kN a 60 kN, com incrementos de 20 kN, sendo em seguida as vigas descarregadas até as cargas atingirem o valor aproximado de 40 kN. Por intermédio de um sistema de tirantes (foto A.13), estas cargas foram mantidas durante a execução do reforço à flexão (V1, V3 e V5) e do reforço ao cisalhamento (V5). O sistema de tirantes utilizado para manter o carregamento durante o reforço é mostrado na figura 3.24.

Após a execução dos reforços e a cura da resina epóxica durante sete dias, as vigas V1, V3 e V5 foram novamente carregadas (terceiro ciclo), aumentando as cargas até a ruptura, com incrementos de 10 kN.

3.8 - Execução dos Reforços e Resistência das Vigas Reforçadas

Nas três vigas ensaiadas, os reforços foram executados mantendo-as carregadas por meio de um sistema de tirantes com cargas de aproximadamente 40 kN, com objetivo de mantê-las carregadas durante a execução do reforço, representando assim situações reais de reforços (admitiu-se que a carga permanente fosse em torno de 40% da carga de ruptura das vigas sem reforço).

O controle das forças nos tirantes foi feito por meio da medição das deformações do aço longitudinal de tração na seção do meio do vão (anexo B). A partir destas deformações e com base na distribuição linear de tensões do concreto, chegou-se ao maior momento na viga e à força “T” em cada tirante do sistema (figura 3.26), cujo valor é dado na tabela 3.7.



OBSERVAÇÕES :

1) Cotas em mm

Figura 3.24 – Sistema atirantado de manutenção de carregamento

$$x = d \left[\sqrt{(n\rho)^2 + 2n\rho} - n\rho \right] \quad (3.10)$$

sendo: $n = \frac{E_s}{E_c}$

Com E_c (módulo secante) proposto na NBR-6118 (2000):

$$E_c = 0,85(5600\sqrt{f_{ck}}) \quad (3.11)$$

f_{ck} e E_c em MPa

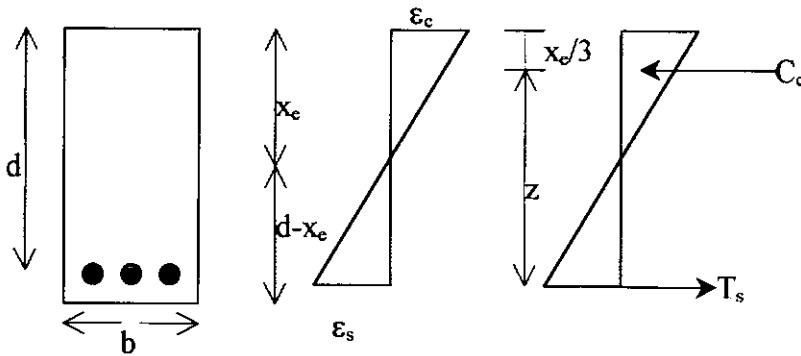


Figura 3.25 – Diagrama triangular de deformações e de tensões de uma seção retangular em viga fletida, na fase elástica.

$$M = \sigma_s A_s \left(d - \frac{x_c}{3} \right) = E_s \varepsilon_s A_s \left(d - \frac{x_c}{3} \right) \quad (3.12)$$

$$T = \frac{M}{(2000 - l_t)} \quad (3.13)$$

onde:

M = momento na seção no meio do vão;

ε_s = deformação do aço;

T = força em um tirante;

l_t = distância entre cada tirante e a seção no meio do vão;

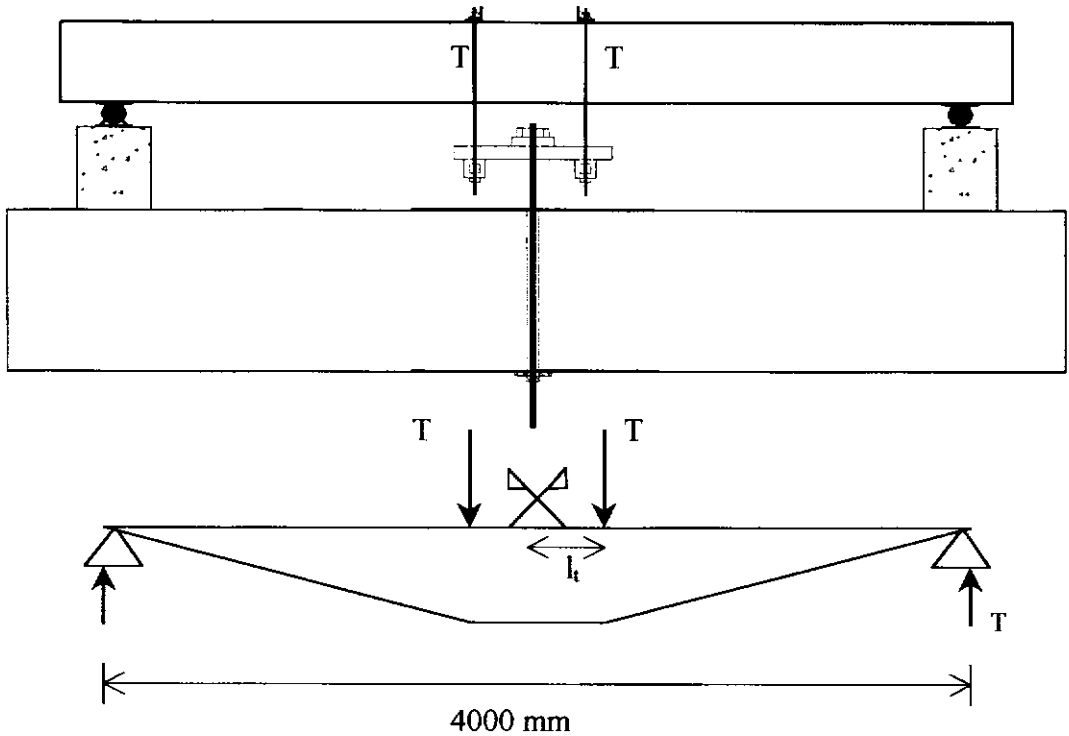


Figura 3.26 – Esquema de forças e de diagrama de M no momento de instalação do tirante.

Tabela 3.7 – Força nos tirantes

Viga	E_s (GPa)	E_c (GPa)	d (mm)	ρ (%)	A_s (mm ²)	x_e (mm)	$\varepsilon_{c,g}$ (‰)	$\varepsilon_{s,g}$ (‰)	l_t (mm)	T (kN)
V1	191	27,5	420	0,96	603	128	0,75	1,70	200	41,0
V3	191	27,9	420	0,96	603	127	0,74	1,75	230	43,0
V5	193	28,0	422	0,95	603	127	0,75	1,74	225	43,3

3.8.1– Reforço a Flexão

O reforço a flexão foi executado com a colagem de duas lâminas de fibra de carbono na viga V1, três na viga V3 e cinco na viga V5, conforme mostram as figuras 3.15 e 3.16. A superfície do concreto onde seriam coladas as lâminas foram previamente apicoadas (foto A.2) com uma britadeira de impacto e escovadas para remover os materiais pulverulentos, enquanto as lâminas de fibra de carbono foram limpas com tecido embebido em tricloroetileno (foto A.4).

Depois da superfície das vigas preparada, foi aplicada uma camada de resina epóxica (mistura homogênea de dois componentes) com espessura aproximada de 1,5 a 2,0 mm na viga (foto A.7) e nas lâminas de fibra de carbono (foto A.6). As lâminas foram, então, posicionadas e pressionadas contra as vigas com o auxílio de um rolo de madeira (foto A.8).

Com o uso de estribos externos e placas de madeira, foi executado o escoramento das lâminas de fibra de carbono nas faces inferior e laterais (viga V5) da viga, durante sete dias, período de cura da resina epóxica.

3.8.1.1 – Resistência à Flexão Teórica das Vigas Reforçadas

Foi adotado o diagrama retangular simplificado (figura 3.27) para a distribuição de tensões de compressão no concreto e coeficientes de segurança unitários para o cálculo da resistência a flexão das vigas V1, V3 e V5 reforçadas.

Para o momento resistente tem-se:

$$M_u = \sum A_f \sigma_f (d_f - 0,4x_p) + A_s f_y (d - 0,4x_p) + A'_s \sigma'_s (0,4x_p - d') \quad (3.14)$$

e, a partir do equilíbrio das forças na seção,

$$x_p = \frac{A_s f_y - A'_s \sigma'_s + \sum A_f \sigma_f}{0,85 f_c 0,8b} \quad (3.15)$$

$$\sigma_s' = \varepsilon_s' E_s \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_s' = \frac{(x_p - d')}{x_p} \varepsilon_c \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_f \frac{(d - x_p)}{(d_f - x_p)} + \varepsilon_{s,g} \quad (3.18)$$

sendo:

A_f = Área da seção transversal da lâmina de fibra de carbono;

σ_f = Tensão na lâmina de fibra de carbono;

d_f = Altura útil da seção relacionada às lâminas de fibra de carbono.

A tabela 3.8 mostra os valores das resistências à flexão teóricas das vigas reforçadas, obtidas a partir das expressões acima, e das cargas últimas $\left(P_u = \frac{M_u}{a} \right)$.

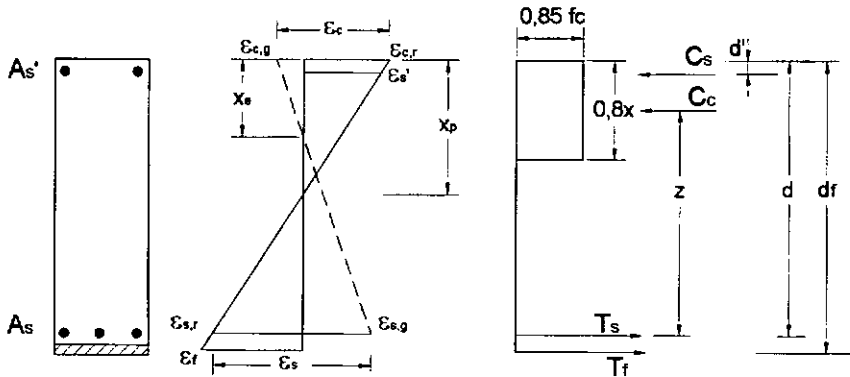


Figura 3.27 – Diagrama de tensão no concreto e de deformação na seção da viga reforçada.

A ruptura das vigas reforçadas sem sistemas especiais de ancoragem ocorre muitas vezes por destacamento das lâminas ao atingir a tensão máxima de cisalhamento da ligação cola-concreto. Admitindo-se uma distribuição plástica de tensões cisalhantes (uniforme) nessa ligação, conclui-se que a força máxima na fibra para que se evite esse tipo de ruptura deve ser:

$$F_{f,m\acute{a}x} = \sigma_f (e_f b_f) = \tau_{lim} L_{\beta} b_f \quad (3.19)$$

e

$$\sigma_f = \varepsilon_f E_f \leq \sigma_{f,lim} \quad (3.20)$$

onde:

$L_{\beta} = 1175$ mm; comprimento da lâmina de fibra de carbono entre a extremidade da placa de aplicação de carga e a extremidade da lâmina (figura 3.28).

b_f = Largura da lâmina de fibra de carbono

e_f = Espessura da lâmina de fibra de carbono

E_f = Módulo de elasticidade da lâmina de fibra de carbono

ε_f = Deformação específica da lâmina de fibra de carbono na ruptura da viga.

É recomendável que a tensão da fibra não ultrapasse um valor limite definido pela deformação máxima (ε_f) que o conjunto cola-concreto pode acompanhar. Esta deformação será objeto de análise do estudo experimental.

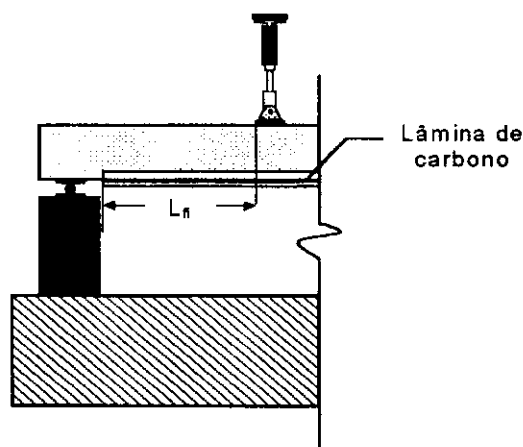


Figura 3.28 – Comprimento da lâmina de fibra de carbono considerado na equação (3.19).

Tabela 3.8 – Resistências à flexão teórica das vigas reforçadas.

Viga	f_c (MPa)	b (mm)	d (mm)	d' (mm)	A_s (mm ²)	A'_s (mm ²)	ρ (%)	f_y (MPa)	A_f (mm ²)	d_f (mm)	E_f (GPa)	x_p (mm)	ϵ'_s (‰)	$\epsilon_{c,r}$ (‰)	$\epsilon_{s,r}$ (‰)	ϵ_s (‰)	ϵ_f (‰)	M_u (kN.m)	P_u (kN)
V1	34,8	150	420	27	603	100,5	0,96	630	120	450,6	165	129	2,77	2,75	6,20	7,90	6,86	195,5	144,8
V3	38,3	150	420	27	603	100,5	0,96	630	180	450,6	165	133	2,79	2,76	5,96	7,71	6,59	218,6	161,9
V5	34,7	150	422	24	603	100,5	0,95	579	180	450,6	165	155	2,95	2,95	4,74	6,48	5,24 4,79	222,2	164,6

Os valores da tabela estão baseados na tensão de escoamento experimental do aço (ϵ_y^* e f_y , tabela 3.3) e $\epsilon_c=3,5$ ‰.

O valor da tensão máxima de cisalhamento é aqui definido de acordo com o critério de Mohr-Coulomb modificado para concreto, ou seja:

$$\tau_{lim} = kf_t \tag{3.21}$$

onde:

f_t = resistência à tração do concreto não fissurado.

k = fator que representa o estado do concreto no fundo da viga no momento da colagem da lâmina de fibra de carbono.

$$k = \frac{0,9 \times 0,7}{2}$$

sendo:

0,9 = coeficiente que relaciona a resistência à tração direta com a resistência à tração indireta.

0,7 = coeficiente de minoração que visa considerar a qualidade inferior do concreto de cobrimento.

2,0 = coeficiente de minoração do valor de f_t que objetiva levar em conta as condições de fissuração do concreto entre a lâmina de fibra e a armadura longitudinal interna.

Os valores de $\tau_{ff} = \frac{\sigma_f e_f}{L_{\beta}}$ com o valor de σ_f correspondente à ruptura e de

τ_{lim} segundo a equação (3.21), para as três vigas, são mostrados na tabela 3.9. Com base na tabela 3.9, pode-se prever ruptura praticamente simultânea por flexão e destacamento para as vigas V1 e V3 e por flexão para a viga V5.

Tabela 3.9 – Tensão cisalhante longitudinal.

Viga	b_f (mm)	e_f (mm)	E_f (GPa)	ε_f (‰)	σ_f (MPa)	f_{tm} (MPa)	τ_{ff} (MPa)	τ_{lim} (MPa)
V1	50	1,2	165	6,86	1131,9	3,63	1,15	1,14
V3	50	1,2	165	6,59	1087,4	3,50	1,11	1,10
V5	50	1,2	165	5,24 4,79	864,6 790,4	3,56	0,88 0,81	1,12

3.8.2– Reforço ao Cisalhamento

No reforço ao cisalhamento da viga V5 foram utilizadas cinco lâminas em cada região com força cortante (em cada face lateral), com largura de 50mm, comprimento de 400 mm e espessura de 1,2mm, espaçadas de 200 mm. Para estudar o comportamento da viga quando reforçada com lâminas tendo diferentes inclinações, em uma região as lâminas foram posicionadas verticalmente e na outra inclinadas a 45° com o eixo da viga.

A ancoragem das lâminas do reforço ao cisalhamento na viga V5 foi feita com o auxílio das lâminas coladas na extremidade inferior das faces laterais usadas no reforço à flexão e com as lâminas coladas na extremidade superior que tinham dimensões de 50 mm por 950 mm.

A figura 3.16 mostra a disposição das lâminas usadas para o reforço da viga V5.

3.8.2.1– Resistência ao Cisalhamento Teórica da Viga Reforçada

Para calcular a resistência ao cisalhamento obtida com a adição de lâminas de fibra de carbono, foi utilizado o modelo de treliça com diagonais comprimidas inclinadas a 45° com o eixo da viga, isto é,

$$V_R = V_s + V_f + V_c \quad (3.22)$$

$$V_R = \frac{A_{sw}}{s} \frac{f_{yw}}{\gamma_s} z + \frac{2A_f}{s_f} \frac{\sigma_{fw}}{\gamma_{fc}} z(1 + \cot g\alpha)\text{sen } \alpha + V_c \quad (3.23)$$

Para estribos de reforço verticais, tem-se:

$$V_s + V_f = \frac{A_{sw}}{s} \frac{f_{ywr}}{\gamma_s} z + \frac{2A_f}{s_f} \frac{\sigma_{fw}}{\gamma_{fc}} z \quad (3.24)$$

e para estribos de reforço inclinados a 45° :

$$V_s + V_f = \frac{A_{sw}}{s} \frac{f_{ywr}}{\gamma_s} z + \frac{2A_f}{s_f} \frac{\sigma_{fw}}{\gamma_{fc}} z \sqrt{2} \quad (3.25)$$

onde:

V_s = parcela da força cortante resistida pelos estribos internos;

V_f = parcela da força cortante resistida pelo reforço;

A_f = área da seção transversal da lâmina de reforço ao cisalhamento;

s_f = espaçamento dos estribos de lâminas de fibra de carbono;

σ_{fw} = tensão na lâmina de reforço ao cisalhamento;

γ_{fc} = fator de minoração da resistência da lâmina de fibra de carbono;

A parcela da força cortante resistida pelo concreto (V_c) foi calculada no ítem 3.3.2.2.

O concreto deve suportar as tensões de cisalhamento transmitidas pelas lâminas de fibra de carbono, caso contrário ocorrerá o destacamento do reforço. A tensão cisalhante que atua na ligação concreto-lâmina de reforço ao cisalhamento não deve ser superior à tensão de cisalhamento limite do concreto que corresponde à resistência à tração, de acordo com o critério Mohr-Coulomb modificado para o concreto.

$$\tau_{lim} = 0,9kf_{tm} \quad (3.26)$$

onde

$k = 0,5$ de acordo com CERQUEIRA (2000).

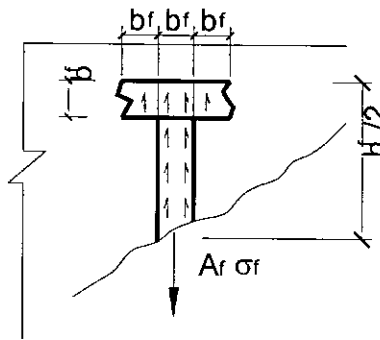
0,9 = coeficiente que relaciona a resistência à tração direta com a resistência à tração indireta.

A tensão de cisalhamento, τ_{fw} , na área A é dada por:

$$\tau_{fw} = \frac{A_f \cdot \sigma_{fw}}{A} \leq \tau_{lim} = 0,9k f'_{lm} \quad (3.27)$$

onde

A = metade da área de contato da lâmina com concreto, formada por metade de um estribo de reforço e parte de suas ancoragens direita e esquerda (ver esquema abaixo).



Então, a deformação limite nas lâminas de reforço ao cisalhamento é igual a :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{A \cdot \tau_{lim}}{A_f \cdot E_f} \quad (3.28)$$

A tabela 3.10 apresenta a tensão e deformação teóricas das lâminas usadas para reforço ao cisalhamento.

O sistema de ancoragem usado nas extremidades reduz significativamente a tensão de cisalhamento, evitando o destacamento do reforço. Por isso a superposição entre a lâmina do reforço e a da ancoragem deve ser total, para não comprometer a sua

eficácia. Caso não possa haver um controle efetivo da execução da ancoragem é aconselhável aumentar a largura da lâmina de reforço e desprezar a contribuição das lâminas de ancoragens nos cálculos de dimensionamento.

Tabela 3.10– Tensão cisalhante na interface concreto-lâmina de reforço ao cisalhamento.

Viga	τ_{lim} (MPa)	A_f (mm ²)	A (mm ²)	σ_{fv} (MPa)	ϵ_f (‰)
V5	1,60	60	15000	401	2,43

A partir do valor de σ_f calculado, tem-se a parcela da força cortante resistida pelo reforço de lâminas de fibra de carbono. A tabela 3.11 mostra os valores das resistências ao cisalhamento teóricas das vigas reforçadas obtidos a partir das expressões anteriores, considerando $\gamma_s = \gamma_c = \gamma_f = 1$.

3.9- Resultados dos Ensaios

Os resultados das medições feitas durante os ensaios encontram-se nas tabelas B.1 a B.7 do anexo B. A partir destes resultados foram traçados os gráficos que são mostrados a seguir.

3.9.1– Flechas

Os valores de flechas em função da carga das vigas V1, V3 e V5 são apresentados nas figuras 3.29, 3.33 e 3.37, respectivamente.

Tabela 3.11 – Resistências ao cisalhamento teóricas das vigas reforçadas.

Viga	A_{sw} (mm ²)	A_f (mm ²)	s_f (mm)	f_{yw} (MPa)	ε_{yw}^* (MPa)	V_c (kN)		ε_f (MPa)	σ_{fw} (MPa)	z (mm)	V_s (kN)	V_f (kN)	V_R (kN)	
						(1)	(2)						(1)	(2)
V5 $\alpha = 45^\circ$	39,2	60	200	688	3,6	58,8	84,9	2,43	401	360	48,6	122,5	229,9	256,0
V5 $\alpha = 90^\circ$	39,2	60	200	688	3,6	58,8	84,9	2,43	401	360	48,6	86,6	194,0	220,0

Os valores da tabela estão baseados na tensão de escoamento experimental (ε_y^* e f_y , tabela 3.3).

(1) valores de V_c baseados na NBR-6118 (1980).

(2) valores de V_c baseados na NBR-6118 (2000).

Observa-se pela inclinação das curvas que, após a execução do reforço, houve nítido aumento da rigidez na viga V5, que tinha maior armadura de reforço. Durante a execução do reforço, as vigas V1 e V3 tinham o valor da flecha de aproximadamente 9,0 mm e a viga V5 tinha um valor um pouco maior, aproximadamente 11,0 mm. O valor da flecha máxima foi de aproximadamente 32,0 mm para a viga V1 ($P = 130$ kN) e 38,0 mm para as vigas V3 ($P = 150$ kN) e V5 ($P = 165$ kN).

3.9.2– Deformação Longitudinal na Seção no Meio do Vão

Os diagramas de deformação longitudinal na seção no meio do vão das vigas V1, V3 e V5 são apresentados nas figuras 3.30, 3.34 e 3.38, para diferentes valores de carregamento. Esses valores foram determinados a partir das deformações do concreto e da armadura longitudinal interna de tração no meio do vão.

3.9.3– Deformação das Armaduras Internas e de Reforço

Os diagramas de deformação da armadura longitudinal interna e externa de tração, nas seções do meio do vão e de aplicação de carga, em função da carga aplicada são apresentados nas figuras 3.31, 3.32, 3.35, 3.36, 3.39 e 3.40. A viga V1 com menos reforço, foi a que teve maior deformação da armadura longitudinal interna de tração, 24,3 ‰ ($P = 130$ kN), enquanto as vigas V3 e V5 tiveram os valores de 22,6 ‰ e 18,4 ‰ ($P = 154$ kN e 160 kN), respectivamente.

Na viga V5, a deformação das lâminas de fibra de carbono usadas no reforço a flexão situadas no fundo e na lateral da viga apresentaram deformações de aproximadamente 6,3 ‰ ($P = 165$ kN) e 4,4 ‰ ($P = 160$ kN), respectivamente. As vigas V1 e V3 apresentaram deformações máximas para a armadura de reforço de 5,2 ‰ ($P = 130$ kN) e 5,4 ‰ ($P = 150$ kN), respectivamente.

Os diagramas de deformação dos estribos internos e externos em função da carga aplicada são apresentados nas figuras 3.41 e 3.42. O estribo externo mais solicitado foi

o da posição 8, com deformação de 1,6 ‰, e o estribo interno foi o da posição 6, com deformação de 4,97 ‰, ambas para o carregamento de 165 kN.

As deformações das lâminas de fibra de carbono adotadas para os cálculos realizados no capítulo 4, para a viga V1, foram determinadas pela interpolação dos valores dos gráficos, já que não foi possível obtê-las para a carga de ruptura da viga.

3.9.4– Cargas e Modos de Ruptura

As vigas V1 e V3 apresentaram um modo de ruptura à flexão frágil (foto A.17), com destacamento da lâmina de fibra de carbono do concreto na região de contato resina epóxica-concreto sob as cargas de 140 e 150 kN, respectivamente, e escoamento da armadura longitudinal interna. Observação mais detalhada dos diagramas carga-deformação e das armaduras longitudinais interna e externa e dos diagramas de deformação na seção do meio do vão (ver figuras 4.1 a 4.8) leva à conclusão de que, na verdade, a ruptura nestas vigas ocorreu com a combinação de destacamento (começando na extremidade) e descolamento das lâminas (região de momento máximo).

Ao contrário das outras duas vigas ensaiadas, a viga V5 apresentou um modo de ruptura à flexão dúctil (foto A.18), com escoamento da armadura longitudinal interna e posterior esmagamento do concreto na região comprimida, sob a ação de cargas de 165 kN. As lâminas de fibras de carbono nas faces laterais da viga evitaram o destacamento das lâminas da face tracionada da viga, e a ruptura frágil verificada nas vigas V1 e V3. Essas lâminas além de reduzirem tensões nas lâminas inferiores, promoveram uma maior sustentação da camada de concreto onde eram ancoradas as lâminas de fibra de carbono inferiores, impedindo assim o destacamento (foto A.16).

As cargas e modos de ruptura das vigas são apresentados na tabela 3.12. Observe-se que mesmo que fossem adotadas para o reforço das vigas lâminas de fibras de carbono com maiores espessuras, as vigas só apresentariam maiores resistências se as lâminas fossem devidamente ancoradas.

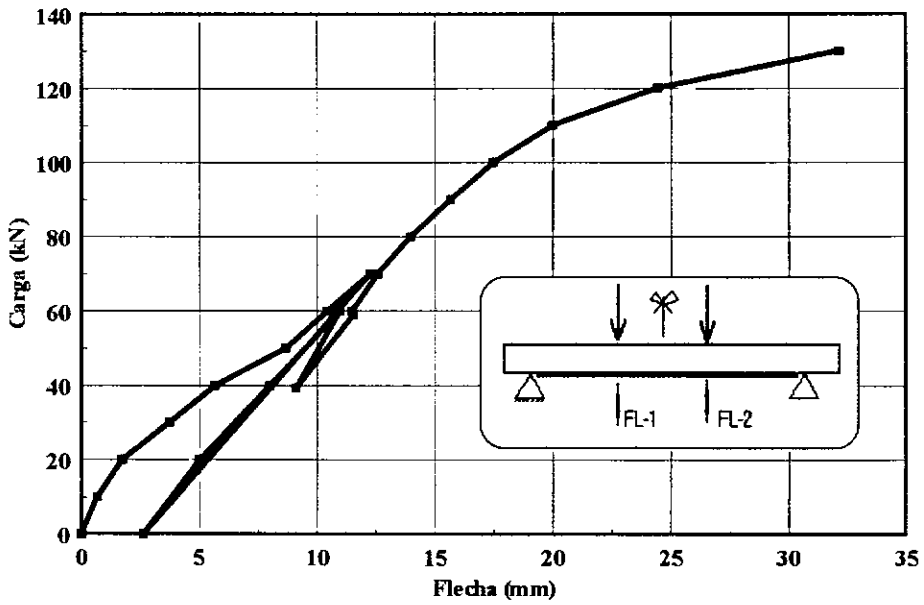


Figura 3.29 - Diagrama carga x flecha - viga 1

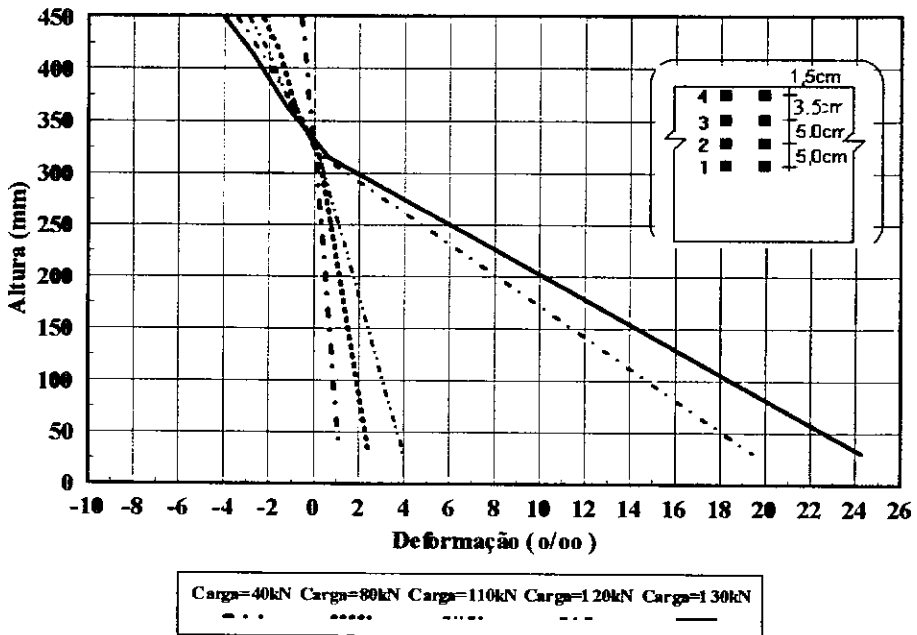


Figura 3.30 - Diagrama de deformação na seção do meio do vão - viga 1

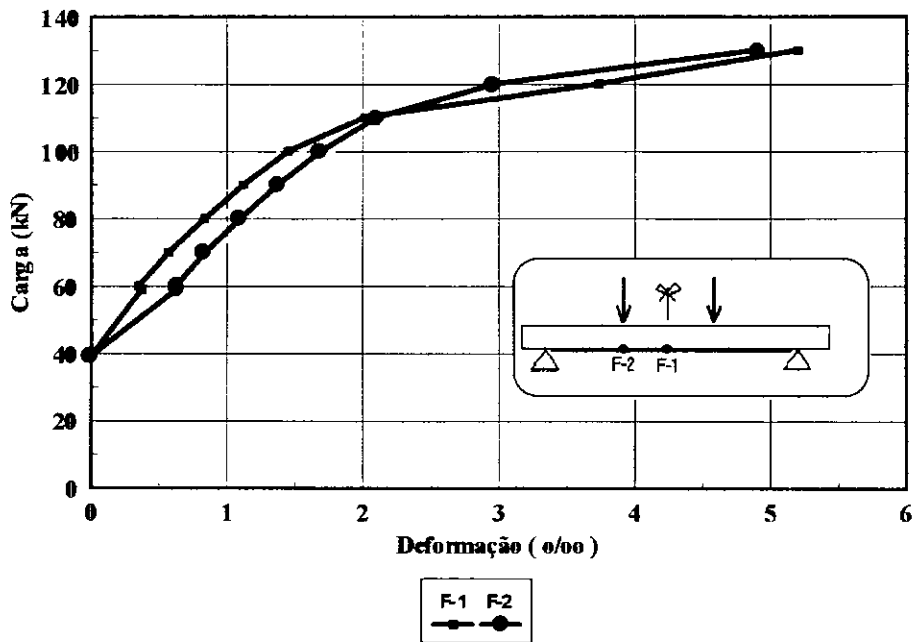


Figura 3.31 - Diagrama carga x deformação da lâmina de fibra de carbono - viga 1

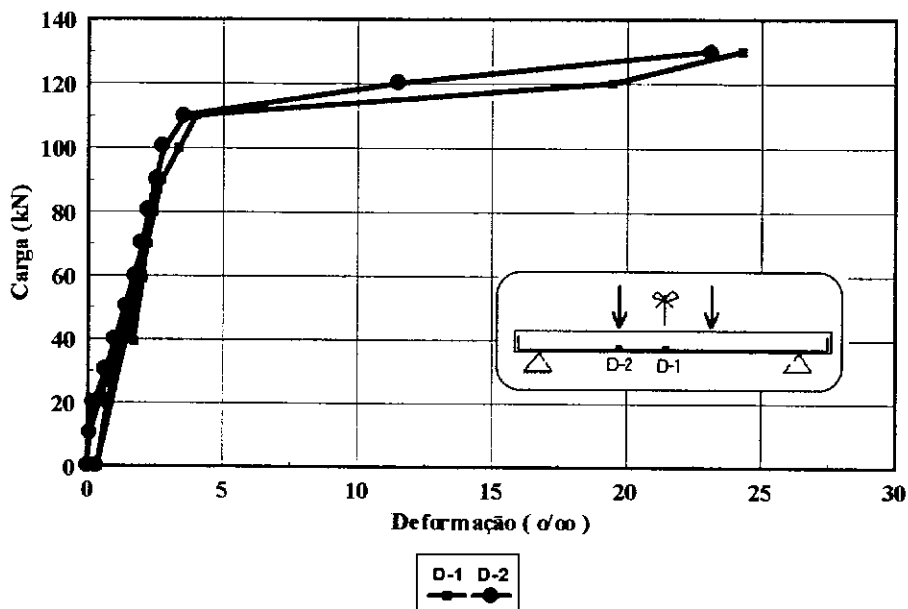


Figura 3.32 - Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna de tração - viga 1

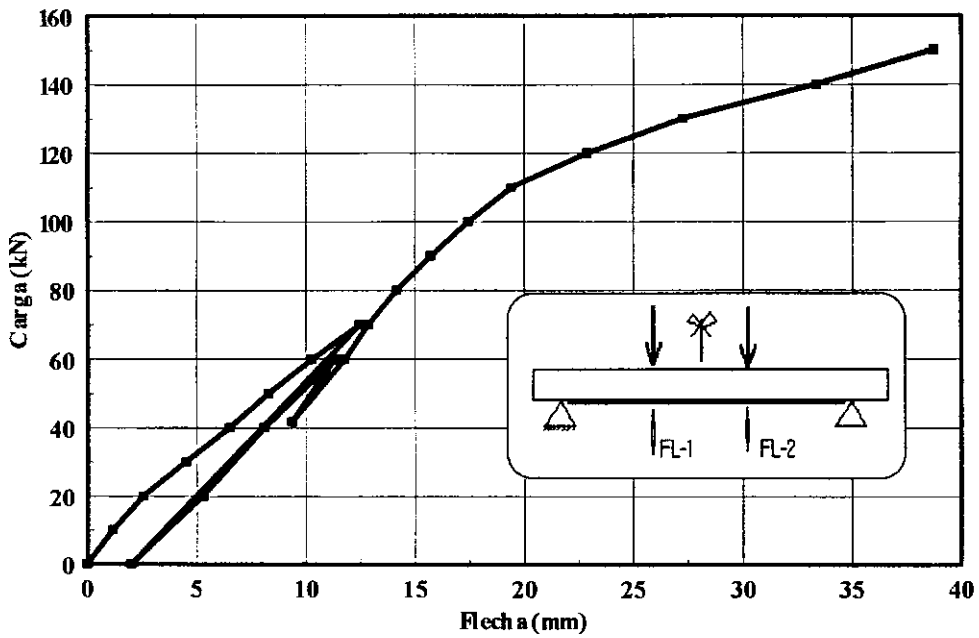


Figura 3.33 - Diagrama carga x flecha - viga 3

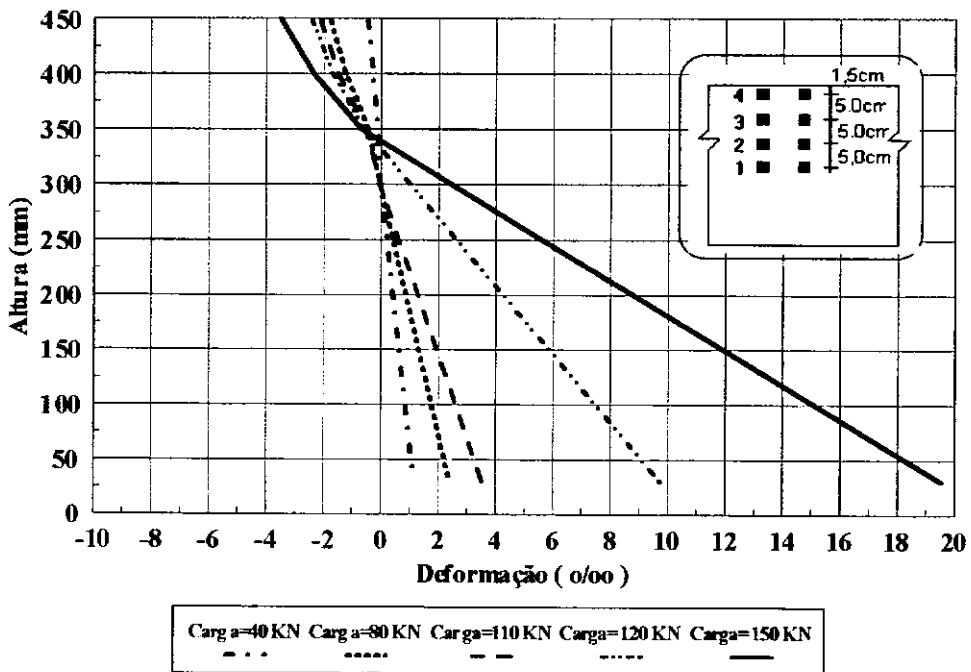


Figura 3.34 - Diagrama de deformação na seção do meio do vão - viga 3

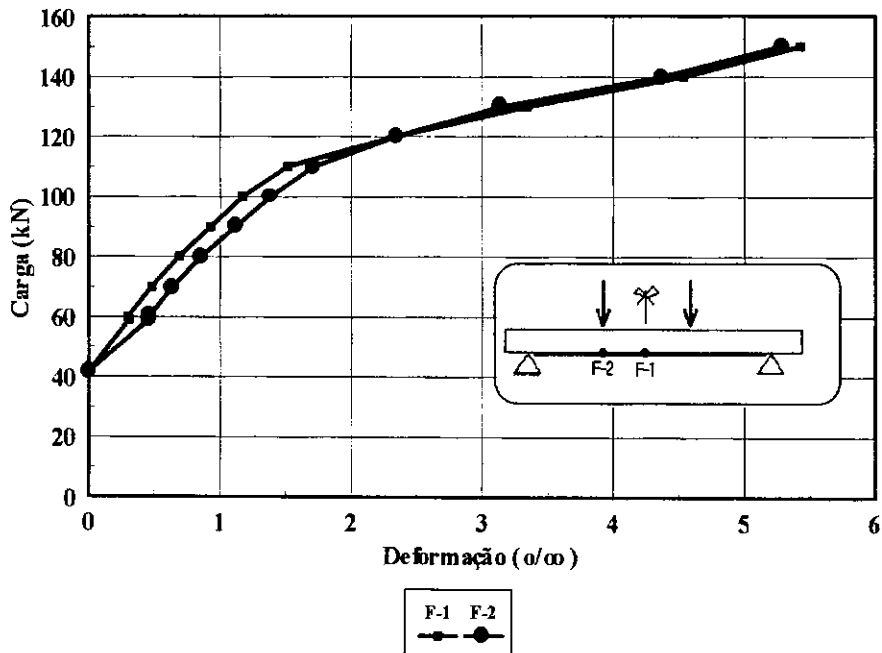


Figura 3.35 - Diagrama carga x deformação da lâmina de fibra de carbono - viga 3

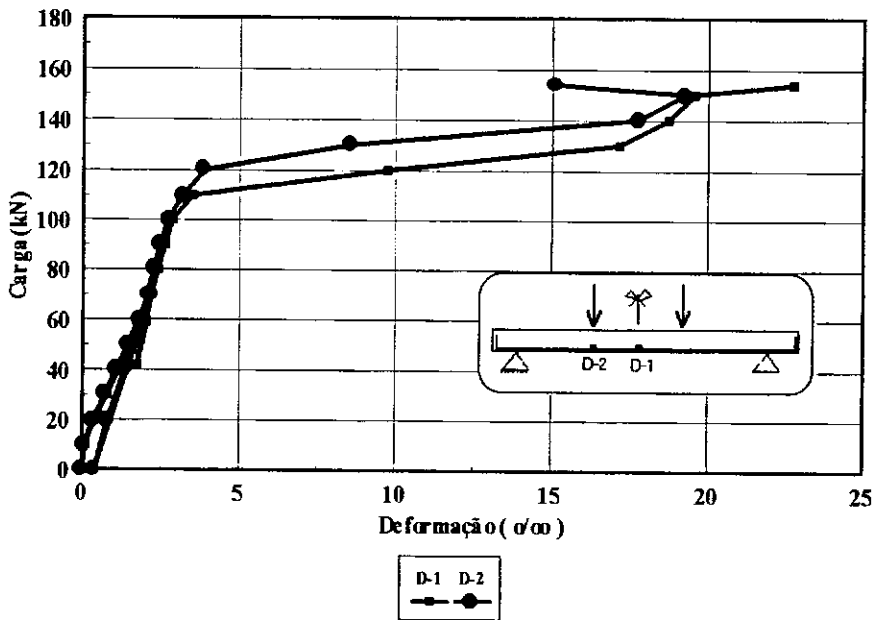


Figura 3.36 - Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna de tração - viga 3

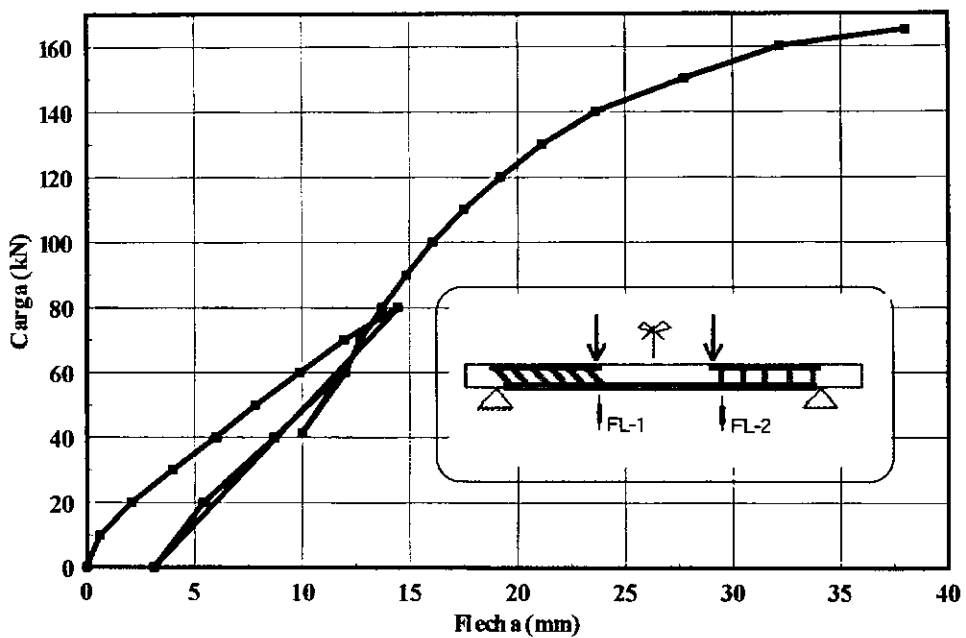


Figura 3.37 - Diagrama carga x flecha - viga 5

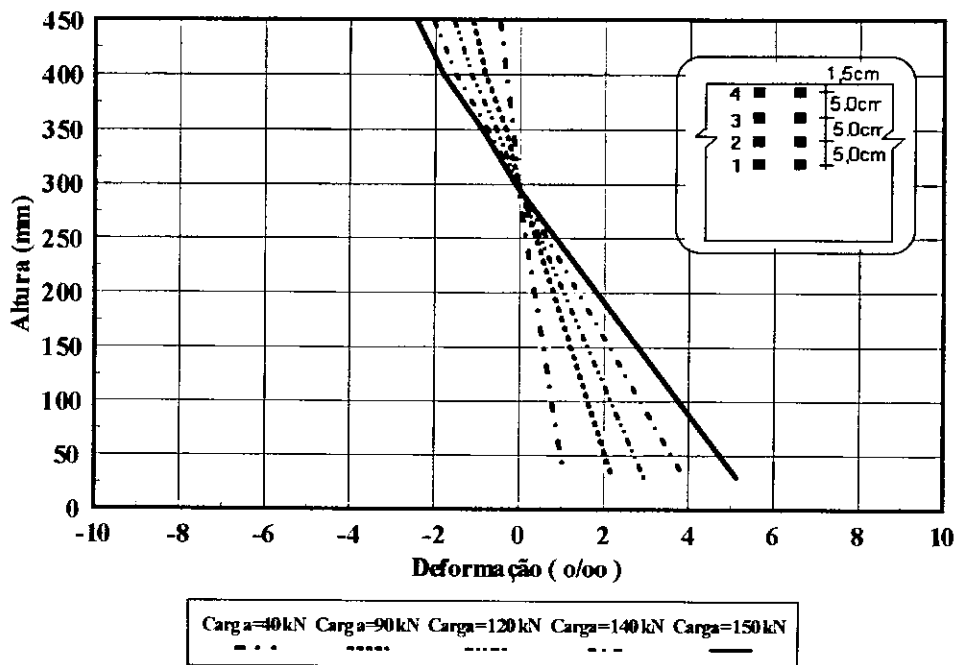


Figura 3.38 - Diagrama de deformação na seção do meio do vão - viga 5

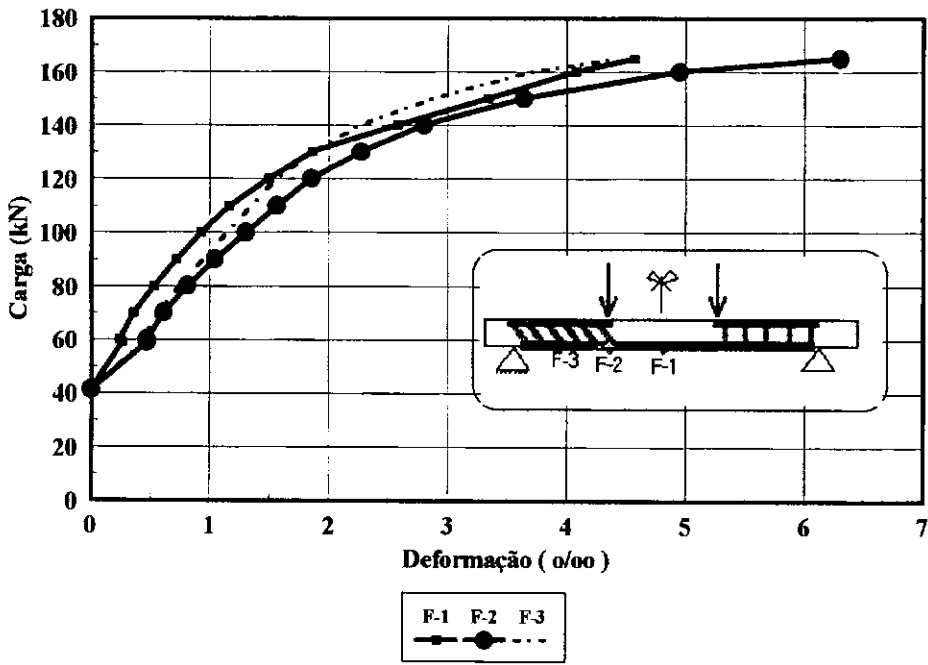


Figura 3.39 - Diagrama carga x deformação da lâmina longitudinal - viga 5

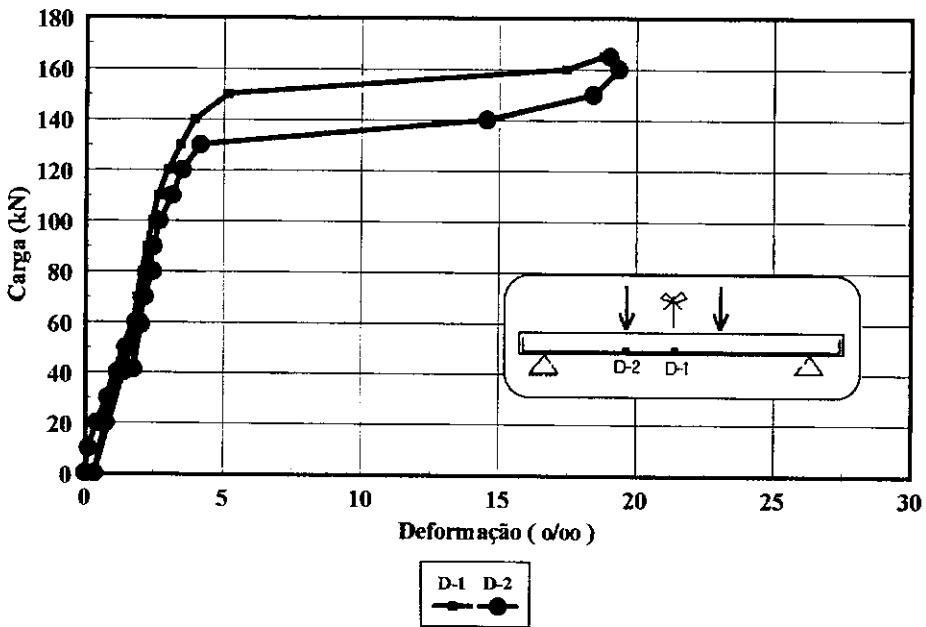


Figura 3.40 - Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna de tração - viga 5

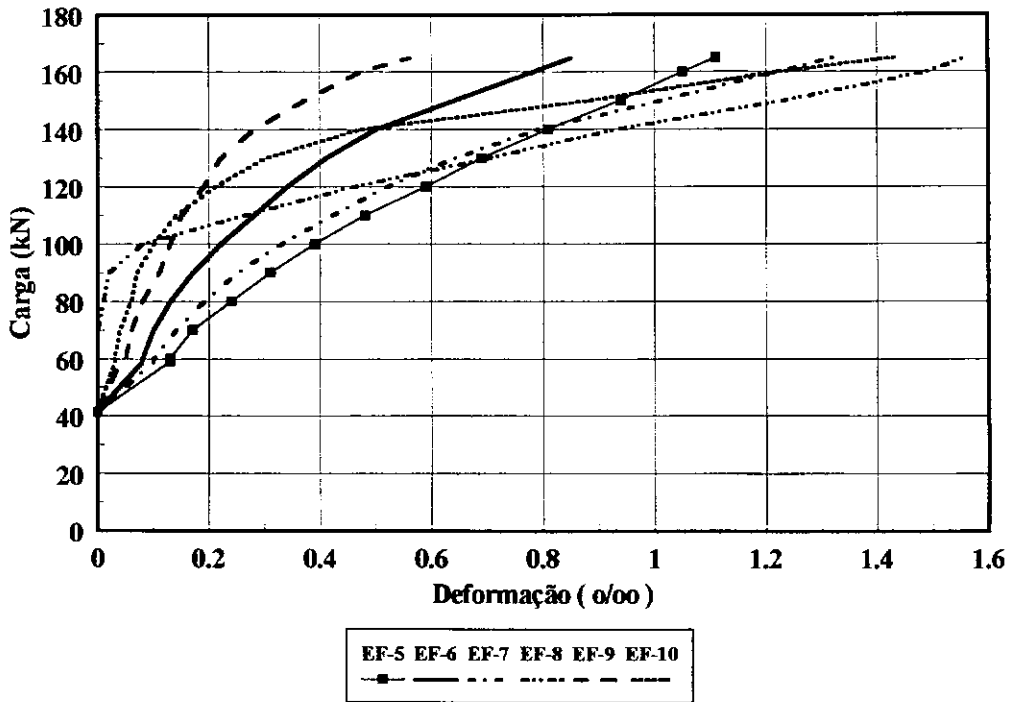


Figura 3.41 - Diagrama carga x deformação das lâminas transversais - viga 5

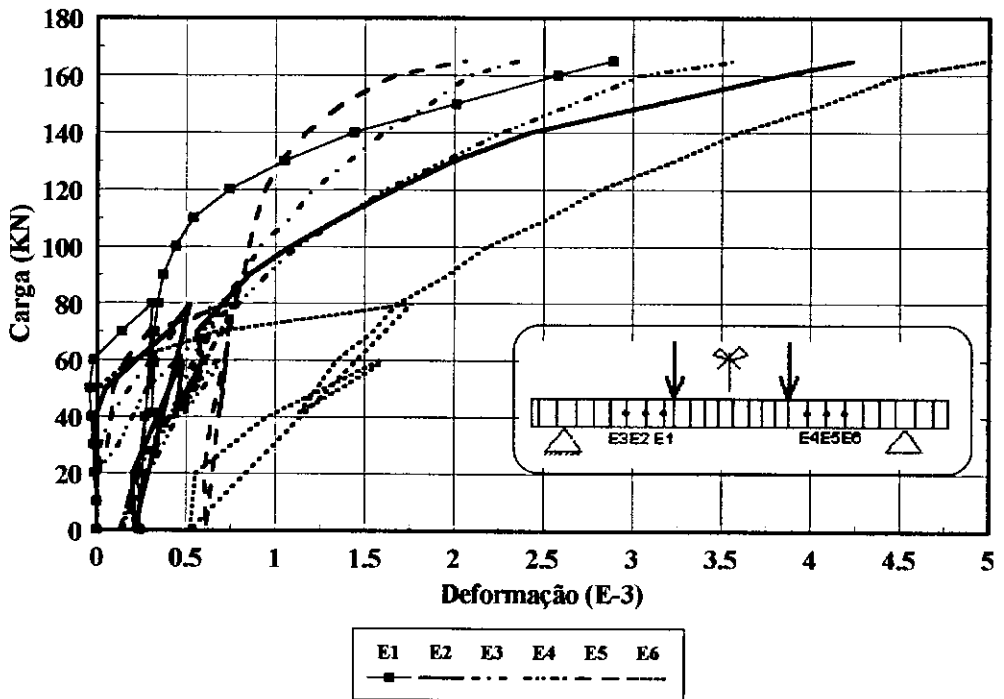


Figura 3.42 - Diagrama carga x deformação dos estribos internos - viga 5

Tabela 3.12 – Valores de carga e modo de ruptura das vigas.

Viga	Carga de Ruptura teórica (kN)	Carga de Ruptura experimental (kN)	Modo de Ruptura
V1	144,8	140	Descolamento e destacamento da lâmina
V3	161,9	150	Descolamento e destacamento da lâmina
V5	164,6	165	Escoamento da armadura longitudinal e esmagamento do concreto .
VM-1R	175,1	200	Escoamento da armadura longitudinal e esmagamento do concreto .

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Introdução

Neste capítulo é realizada a análise dos resultados apresentados no capítulo anterior. Os valores das capacidades resistentes à flexão experimentais são comparados com os teóricos calculados de acordo com procedimentos propostos neste trabalho.

As análises referentes ao desempenho do reforço ao cortante e à capacidade resistente ao cisalhamento da viga V5 são feitas em CERQUEIRA (2000).

São também realizadas comparações entre os valores de flechas, deformações do concreto, deformações das armaduras internas e de reforço e das cargas de ruptura das vigas reforçadas (V1, V3 e V5) e os da viga de referência VM-1R.

4.2 – Flechas

A figura 4.1 mostra a comparação entre os diagramas carga x flecha na posição de aplicação de carga de cada viga ensaiada.

Nos dois primeiros ciclos de carregamento, antes da execução do reforço, as três vigas ensaiadas apresentaram valores de flechas na posição de aplicação de carga muito próximas. Após o primeiro ciclo de carga, de 0 kN a 70 kN e descarregamento até 0 kN, mediram-se flechas residuais em torno de 2,5 mm. Após o segundo ciclo de carga, de 0 kN a 60 kN e descarregamento até 40 kN aproximadamente (carga durante a execução do reforço), as vigas possuíam flechas em torno de 9,0 mm.

Depois da execução do reforço destas três vigas, o aumento na sua rigidez levou à mudança de inclinação do diagrama carga x flecha, sendo esta mais acentuada para a viga V5, na qual foram usadas cinco lâminas de fibra de carbono para o reforço à flexão.

O estado limite de serviço pode ser caracterizado por deformação excessiva que é referida ao valor de flecha admissível de 13,33 mm, correspondente a 1/300 do vão da viga conforme a norma NBR-6118 (1980). Para a viga V5, a carga de serviço no primeiro ciclo foi de 75 kN, as outras duas vigas apresentaram valores de flecha inferiores a 13,33 mm nos dois primeiros ciclos. Após o reforço, a carga de serviço para as vigas V1, V3 e V5 foi de 75 kN, 80 kN e 75 kN, respectivamente. A carga de serviço para a viga V5 permaneceu a mesma com a execução do reforço.

As vigas ensaiadas apresentaram índices de ductilidade (relação entre as flechas na ruptura e no escoamento da armadura longitudinal interna) que tenderam a diminuir com o aumento da área da armadura total (aço + fibra), tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de índice de ductilidade das vigas.

Viga	Resultados experimentais					
	No escoamento da armadura longitudinal interna			Na ruptura		Índice de ductilidade μ_d
	ε_y^* ‰	P_y (kN)	Flecha (mm)	P_u (kN)	Flecha (mm)	
V1	3,0	90	15,7	140	40,0	2,5
V3	3,0	100	16,1	150	34,8	2,2
V5	3,3	120	19,2	165	38,0	2,0

4.3 – Deformação da Seção Transversal no Meio do Vão

A altura da linha neutra é praticamente a mesma para as três vigas (V1, V3 e V5) antes e depois da execução do reforço, para um mesmo nível de carregamento (Figuras 4.2 e 4.3).

4.4 – Deformação das Armaduras Longitudinais Internas e de Reforço

Os diagramas carga x deformação da armadura longitudinal interna no meio do vão das vigas ensaiadas encontram-se reunidos na figura 4.4.

Nos primeiro e segundo ciclos de carregamento, os valores de deformação da armadura longitudinal interna no meio do vão foram similares em todas as vigas ensaiadas, pois todas possuíam mesma armadura longitudinal interna.

A viga V1 apresentou maiores valores de deformação da armadura longitudinal interna no meio do vão no início do terceiro ciclo de carregamento (de 40kN até 140 kN). Posteriormente para o mesmo estágio de carregamento, e quanto menor a área de armadura longitudinal de reforço, maior a deformação na armadura interna.

As vigas tiveram a armadura longitudinal interna apresentando a deformação de escoamento nominal (2,5 ‰) para a carga de 85 kN (V1), 90kN (V3) e 100kN (V5), no meio do vão.

Os diagramas carga x deformação da armadura longitudinal de reforço no meio do vão de cada viga ensaiada podem ser vistos na figura 4.5. As deformações da armadura longitudinal de reforço no meio do vão apresentaram um comportamento similar, sendo que as maiores deformações ocorreram na viga V1. As lâminas de fibra de carbono longitudinais coladas nas laterais da viga V5 contribuíram para a diminuição da tensão por lâmina e, conseqüentemente, evitaram o destacamento das lâminas coladas no fundo da viga.

Vê-se nas figuras 4.6 a 4.8 que, em geral, os acréscimos de deformação nas armaduras longitudinais interna e externa, com o acréscimo de carga, são semelhantes,

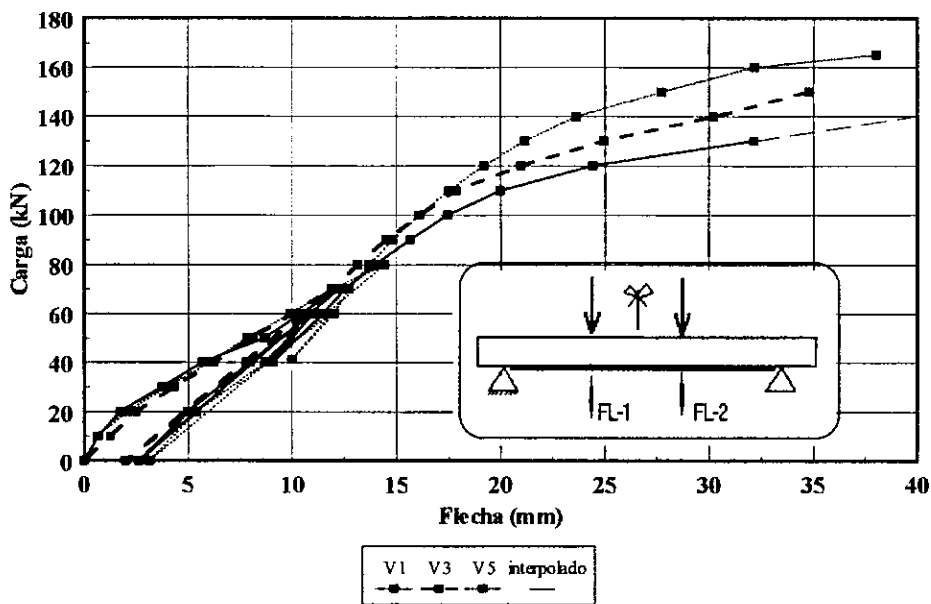


Figura 4.1 - Diagrama carga x flecha - vigas V1, V3 e V5

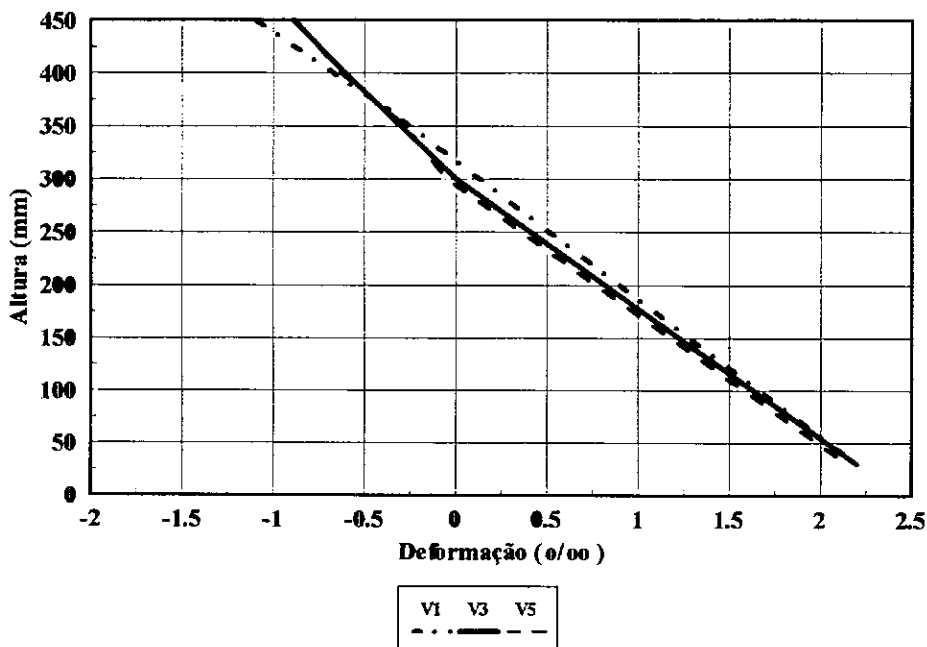


Figura 4.2 - Diagrama de deformação na seção do meio do vão - carga = 70 kN

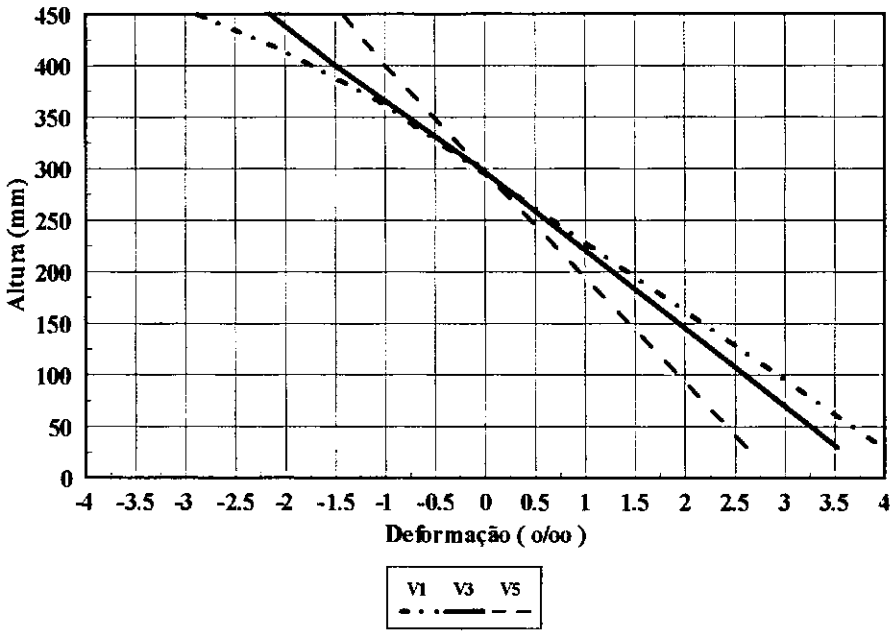


Figura 4.3- Diagrama de deformação na seção do meio do vão - carga = 110 kN

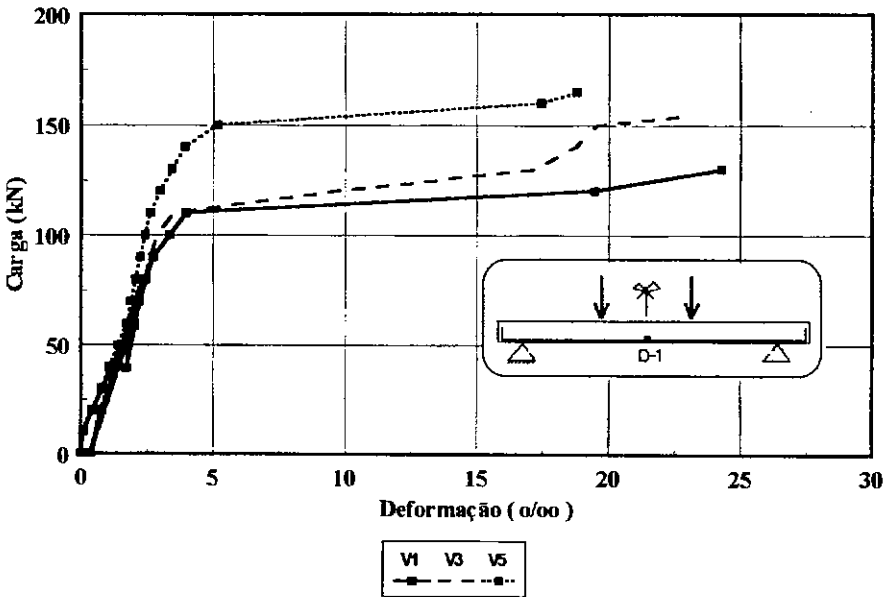


Figura 4.4- Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna no meio do vão das vigas ensaiadas

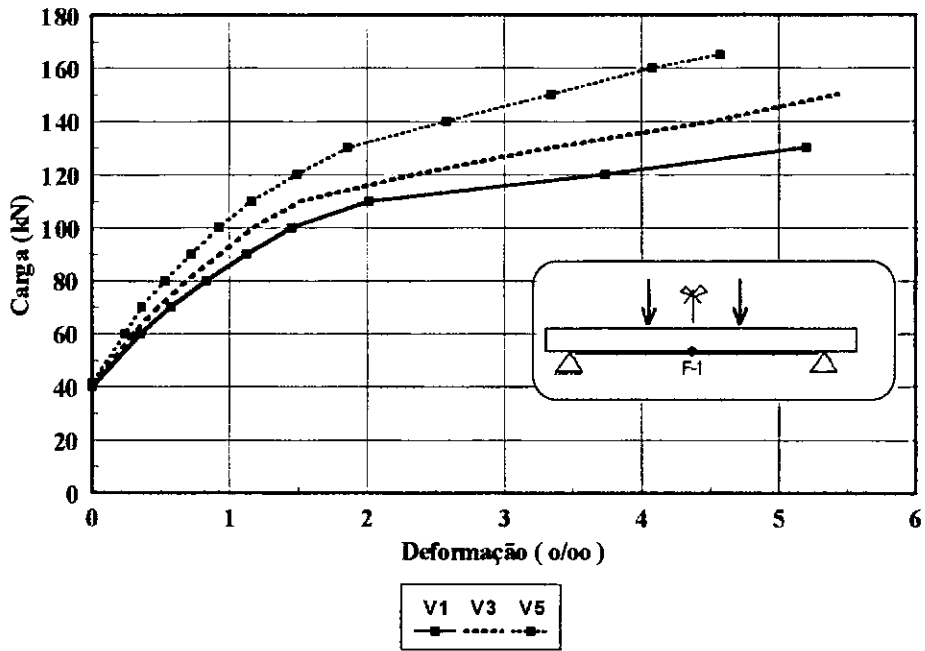


Figura 4.5 - Diagrama carga x deformação da lâmina de fibra de carbono no meio do vão das vigas ensaiadas

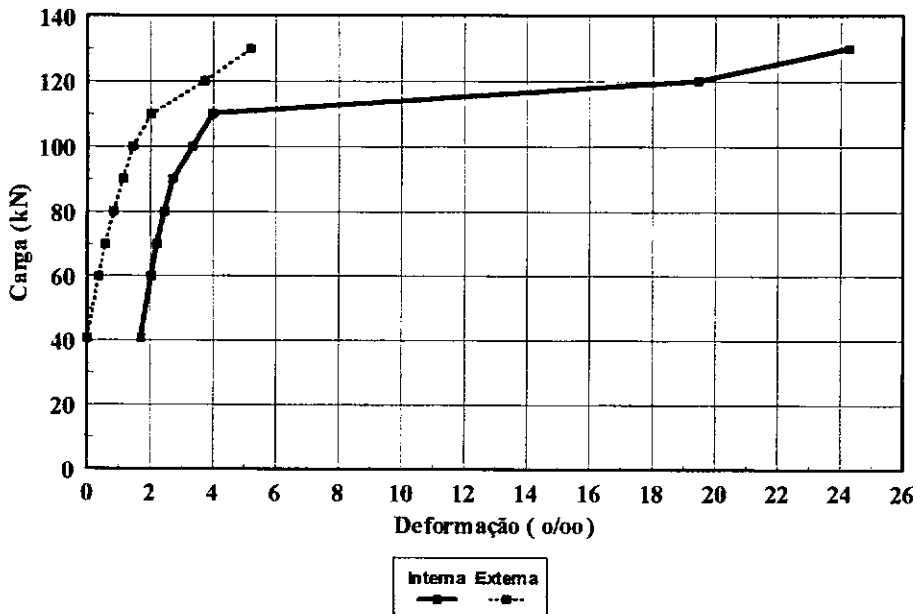


Figura 4.6 - Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna e externa de tração - viga 1

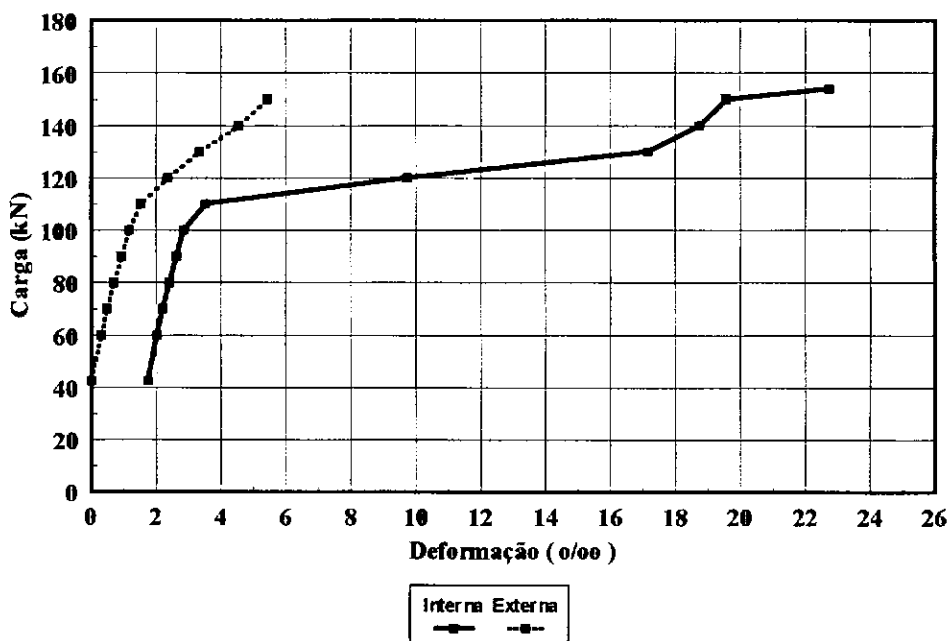


Figura 4.7 - Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna e externa de tração - viga 3

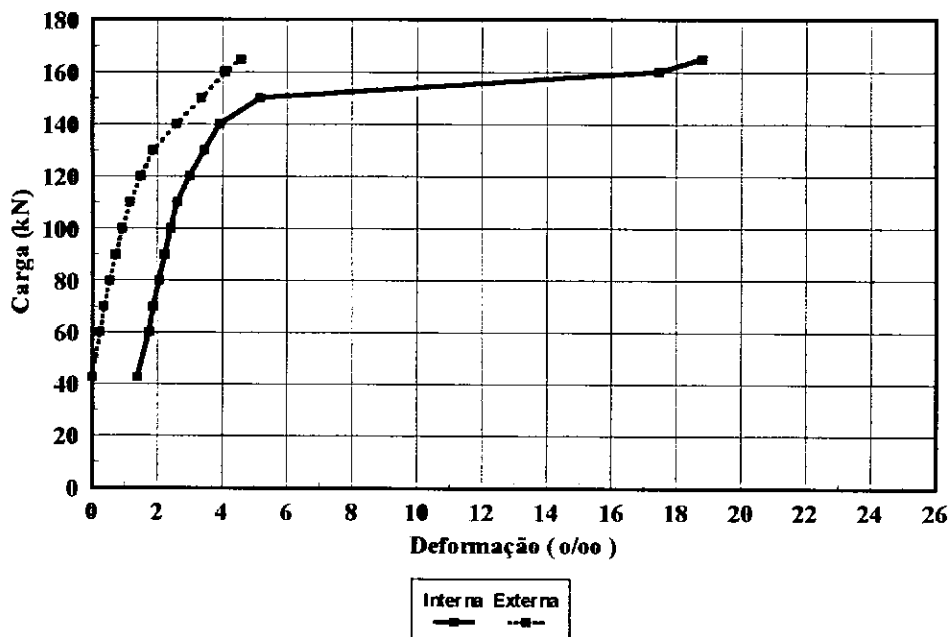


Figura 4.8 - Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna e externa de tração - viga 5

havendo uma pequena diminuição do acréscimo de deformação com o aumento da área de lâmina de reforço. Nas vigas V1 e V3, para cargas maiores que aproximadamente 110 kN, observa-se aumento de deformação na lâmina menor que na armadura interna. Na viga V5 isto começou a ocorrer apenas para cargas maiores que 150 kN. Esse comportamento das vigas V1 e V3, junto com a não manutenção de seção plana observada nas figuras 3.30 e 3.34, evidencia o processo de descolamento das lâminas.

4.5 – Avaliação da Resistência à Flexão das Vigas Reforçadas

Na avaliação da resistência ou no dimensionamento à flexão das vigas reforçadas, pode-se considerar que as armaduras internas resistam à carga permanente e a uma parte da carga acidental e as lâminas de fibra de carbono coladas resistam apenas à outra parte da carga acidental. Ressalte-se a necessidade de verificação da tensão de cisalhamento na ligação concreto-lâminas usadas no reforço longitudinal, limitando-a à resistência à tração do concreto minorada por coeficiente que visa considerar as condições do concreto onde as lâminas são coladas.

Observou-se nas figuras 4.6 a 4.8 que a deformação das lâminas de fibra de carbono nas três vigas ensaiadas foram superiores ao valor de 5 ‰ para a carga de ruptura experimental, mas que antes desta carga iniciou-se processo de descolamento. Em vista disto, considerou-se que, para o tipo de reforço usado, sem sistema especial de ancoragem da armadura longitudinal, a deformação-limite nas lâminas seria de cerca de 5,0 ‰. Este valor é ligeiramente menor que a deformação atingida pelas fibras da viga V5, que não apresentou descolamento das lâminas.

Os valores teóricos das cargas últimas para as três vigas reforçadas, considerando-se o procedimento do item 3.8.1.1 e a deformação da lâmina de fibra de carbono de 5 ‰, para valores nominais e experimentais de tensões de escoamento do aço são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resistências à flexão teórica das vigas reforçadas.

Viga	f_c (MPa)	b (mm)	d (mm)	d' (mm)	A_s (mm ²)	A'_s (mm ²)	ρ (%)	f_y (MPa)	A_f (mm ²)	d_f (mm)	E_f (GPa)	Tensão de escoamento experimental do aço										
												x_p (mm)	ϵ'_s (‰)	$\epsilon_{c,r}$ (‰)	$\epsilon_{s,r}$ (‰)	ϵ_f (‰)	ϵ_c (‰)	ϵ_s (‰)	M_u (kN.m)	P_u (kN)	$P_{u,exp}$ (kN.m)	
V1	34,8	150	420	27	603	100,5	0,96	630	120	450,6	165	123	2,05	1,88	4,54	5,00	2,63	6,24	181,5	134,5	140	
V3	38,3	150	420	27	603	100,5	0,96	630	180	450,6	165	125	2,07	1,90	48	5,00	2,64	6,23	201,0	148,9	150	
V5	34,7	150	422	24	603	100,5	0,95	579	180 120	450,6 425,0	165	151	2,75	2,52	4,52	5,00 4,57	3,27	6,26	219,2	162,4	165	
													Tensão de escoamento nominal do aço									
V1													104	1,65	1,50	4,55	5,00	2,25	6,25	155,1	114,9	140
V3													106	1,69	1,54	4,56	5,00	2,28	6,31	175,0	129,6	150
V5													140	2,68	2,48	4,99	5,00 4,99	6,26 6,73	207,1	153,4	165	

Os valores de cargas últimas para as vigas reforçadas apresentados na tabela 4.2 sugerem que a deformação adotada de 5,0 ‰ para as lâminas de fibra de carbono de reforços à flexão sem sistemas de ancoragens leva a valores de cargas últimas muito próximos dos experimentais. Os valores de carga última baseados na tensão de escoamento experimental do aço são 3,9 ‰ (V1), 0,73 ‰ (V3) e 1,58 ‰ (V5) menores do que a carga última obtida experimentalmente. Já os valores de carga última baseados em tensões de escoamento nominais do aço são 17,9 ‰ (V1), 13,6 ‰ (V3) e 7,0 ‰ (V5) menores que as experimentais.

A tensão cisalhante τ_{ff} na ligação concreto-lâmina correspondente ao valor de deformação das lâminas coladas adotado ($\varepsilon_f = 5\text{‰}$) é dada na tabela 4.3. Esta tensão foi calculada segundo a equação abaixo:

$$\tau_{ff} = \frac{(A_f \sigma_f)}{b_f L_f} = \frac{(b_f e_f E_f \varepsilon_f)}{b_f L_f}$$

Tabela 4.3 – Tensão cisalhante na ligação concreto-lâmina determinada usando o valor de $\varepsilon_f = 5,0\text{‰}$.

Viga	b_f (mm)	e_f (mm)	E_f (GPa)	ε_f (E-3)	f_{tm} (MPa)	τ_{lim}^* (MPa)	τ_{ff} (MPa)	P (kN)
V1	50	1,2	165	5,0	3,63	1,14	0,84	134,5
V3	50	1,2	165	5,0	3,50	1,10	0,84	148,9
V5	50	1,2	165	5,0	3,56	1,12	0,84	162,4

*equação 3.21.

A tabela 4.3 mostra que, para a deformação da lâmina de 5,0 ‰, o valor de τ_{ff} é menor que o considerado para τ_{lim} .

Tabela 4.4 – Comparação dos resultados de resistência obtidos.

Viga	P_u (kN) (*)	P_u (kN) (**)	P_u (kN) (***)	P_u (kN) exp	Modo de Ruptura
V1	144,8	135,4	114,9	140,0	Descolamento e destacamento das lâminas
V3	161,9	148,9	126,6	150,0	Descolamento e destacamento das lâminas
V5	164,6	162,4	153,4	165,0	Esmagamento da armadura longitudinal e esmagamento do concreto

(*)Método de cálculo proposto neste trabalho, limitando $\varepsilon_c = 3,5 \text{ ‰}$ e usando tensões de escoamento do aço experimentais (tabela 3.8)

(**)Método de cálculo proposto neste trabalho, limitando $\varepsilon_f = 5,0 \text{ ‰}$ e usando tensões de escoamento do aço experimentais (tabela 4.2)

(***)Método de cálculo proposto neste trabalho, limitando $\varepsilon_f = 5,0 \text{ ‰}$ e usando tensões de escoamento do aço nominais (tabela 4.2)

A tabela 4.4 apresenta os valores de carga última obtidos nos resultados dos ensaios e pelo método apresentado neste capítulo com diferentes considerações para as deformações. Nela observa-se que, para a viga V5, que rompeu por flexão, o cálculo feito a partir de limites da deformação do concreto leva a carga de ruptura próxima da experimental. Já para as viga V1 e V3, que romperam por descolamento e destacamento das lâminas, este tipo de cálculo acarreta cargas teóricas maiores que as experimentais, sendo mais adequado considerar deformações menores nas Lâminas.

Estes resultados levam a crer que o pré-dimensionamento do reforço à flexão constituído de lâminas de fibras de carbono sem dispositivo especial de ancoragem possa ser feito segundo o fluxograma da figura 4.9, que admite para deformação máxima nas lâminas o valor de $5,0 \text{ ‰}$. Em se usando dispositivos especiais de ancoragem, o limite desta deformação provavelmente poderá ser aumentado.

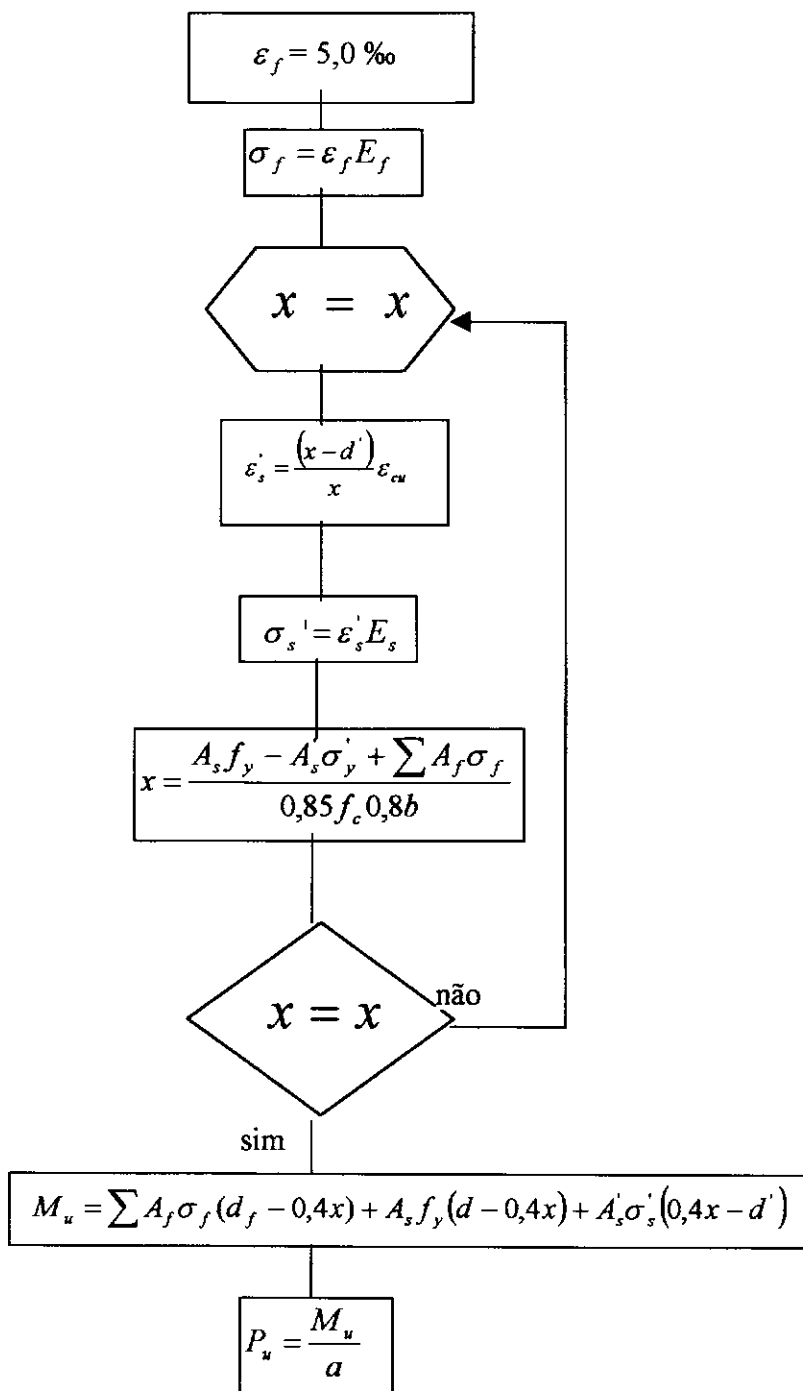


Tabela 4.9 – Fluxograma do modelo de cálculo proposto.

4.6 – Comparação das Vigas Ensaçadas com a Viga de Referência

As vigas V1, V3 e V5 são comparadas com a viga VM-1R em termos de flechas, deformações da armadura longitudinal interna no meio do vão e carga de ruptura.

A tabela 4.5 mostra a resistência teórica à flexão das vigas ensaiadas e da viga VM-1R. A carga última da viga V5, viga mais reforçada, foi cerca de 21% menor que a carga de ruptura da viga VM-1R. Para que obtivéssemos valores mais próximos de carga última ao da viga de referência (VM-1R) seria necessária uma área de ancoragem maior e o uso de lâminas ao fundo mais espessas do que as usadas.

Tabela 4.5 – Armaduras e cargas últimas à flexão das vigas

Viga	Armadura Longitudinal		P_u (kN)	P_u (kN)
	interna	de reforço	teórico *	experimental
V1	3 ϕ 16 mm	2 x 60 mm ²	134,5	140
V3	3 ϕ 16 mm	3 x 60 mm ²	148,9	150
V5	3 ϕ 16 mm	5 x 60 mm ²	162,4	165
VM-1R	2 ϕ 16 mm + 3 ϕ 20 mm		175,1	200

* valores baseados na tensão de escoamento do aço experimental e $\varepsilon_f = 5,0\%$

Na figura 4.12 pode ser vista a comparação dos diagramas carga x deformação da armadura longitudinal interna das vigas reforçadas com o respectivo diagrama da viga de referência VM-1R. Essa figura mostra que as deformações das armaduras das vigas reforçadas foram maiores que as da viga VM-1R.

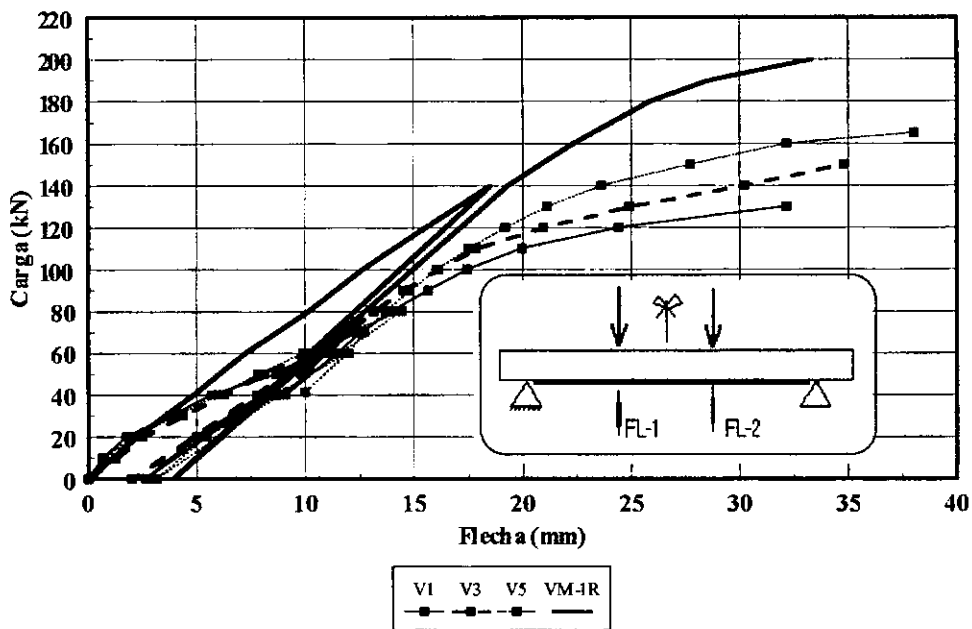


Figura 4.11 - Diagrama carga x flecha - vigas V1, V3, V5 e VM-1R

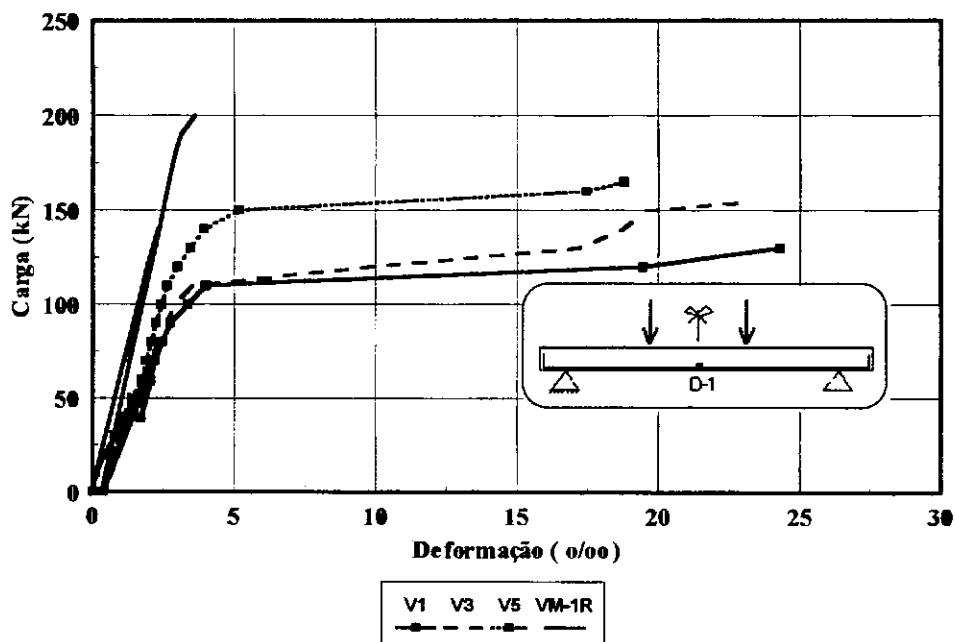


Figura 4.12 - Diagrama carga x deformação da armadura longitudinal interna no meio do vão das vigas V1, V3, V5 e VM-1R

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A técnica de lâminas ou tecidos de fibra de carbono colados representa uma alternativa a outras modalidades de reforço empregadas atualmente e, em alguns casos, pode se tornar bastante vantajosa. A execução do reforço com este material é bem rápida, e o baixo peso próprio e a pequena espessura das lâminas de fibra de carbono permitem que os aumentos na seção transversal do elemento reforçado e na carga das fundações sejam muito pequenos.

A eficiência e facilidade de aplicação de reforços com compósitos de fibra de carbono têm sido constatadas não só em laboratório, como mostrado neste e noutros trabalhos revistos no capítulo 2, mas também no campo. Dois dos três tabuleiros de uma ponte que ia ser demolida foram reforçados com esse material e, posteriormente, junto com o não reforçado, foram carregados até a ruptura (NANNI e GOLD, 1998). Num edifício-garagem, as lajes reforçadas foram submetidas a prova de carga (ALKHRDAIJ et al., 1999).

Entretanto, para que este reforço possa ser dimensionado de maneira econômica e segura, evitando-se tipos de ruptura não desejáveis, há ainda alguns aspectos que precisam ser melhor esclarecidos, como a deformação máxima a permitir no compósito.

Na análise dos resultados obtidos nas três vigas ensaiadas verificou-se que:

- Na viga com maior área de armadura de reforço houve nítido aumento de rigidez.
- A deformação da armadura longitudinal interna foi reduzida com a aplicação do reforço à flexão de lâminas de fibra de carbono coladas. O aumento de deformação

das lâminas foi similar ao da armadura interna até o momento que estas começaram a descolar na região de maiores deformações.

- As lâminas de fibra de carbono coladas lateralmente na viga V5, tendo levado à diminuição de deformações nas lâminas do fundo, evitaram o descolamento e destacamento destas lâminas, o que resultou em aumento de resistência e de ductilidade. O sistema de ancoragem dos estribos de reforço desta viga permitiu que ela não rompesse prematuramente por cortante.
- A limitação da deformação das lâminas de fibra de carbono em 5,0 ‰ no dimensionamento à flexão de vigas reforçadas com lâminas de fibras de carbono sem sistemas especiais de ancoragens parece eliminar a possibilidade de descolamento e destacamento das lâminas.
- A resistência da viga VM-1R não foi alcançada por nenhuma das três vigas reforçadas; para que isto fosse possível seria necessária maior área de lâmina de fibra de carbono além de uma ancoragem efetiva.

Em estudos futuros, dentre outros assuntos, poder-se-ia investigar o nível de deformação que é possível alcançar nas lâminas de reforço à flexão ao serem usados diferentes sistemas especiais de ancoragem para as mesmas (tiras de tecido em U, por exemplo, com diferentes espaçamentos). Além do sistema de ancoragem, o número de camadas de lâminas e a espessura da resina epóxi empregada poderiam ser variados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKHRDAJI, TAREK.; BARKER, MICHAEL.; CHEN, GENDA.; NANNI, ANTÔNIO.; - "Solid RC Decks Strengthened With FRP"- *Concrete International* – v.21, n.10, pp.37-41, 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (Committee 440 - ACI), Working Draft, ACI Committee 440-F, *GUIDELINES for The Selection, Design, and Installation of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Systems for External Strengthening of Concrete Structures.* pp.96, 1999.

ANDRÄ, H. P.; SANDNER, D.; MAIER, M.; "Strengthening of Reinforced Concrete Structures by Prestressed or Non-Prestressed Externally Bonded Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Strips"- *Concrete in The Service of Mankind, Thomaz Telford*, – pp.103-111, 1999.

APPLETON, J; RIPPPE, THOMAZ; SOUZA, REGINA H.F..DE. - *Avaliação do desempenho de Compósitos Armados Com Tecido de Fibras De Carbono Com Elemento de Reforço de Vigas de Betão Armado, Simpósio sobre Manutenção e Recuperação de Obras de Arte Especiais*, Lisboa, 1998.

ARDUINI, MARCO.; TOMMASO, ANGELO DI.; NANNI, ANTONIO.; - "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams"- *ACI Structural Journal, Technical Paper* – v.94, n.4, pp.363-370, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-5738, 1993, *Moldagem e cura de Corpos-de-Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos – Método de Ensaio*. Brasil, pp.14.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-5739, 1994, *Concreto – Ensaio de Compressão de Corpo-de-Prova Cilíndricos – Método de Ensaio*. Brasil, pp.4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-6118, 1980, *Projeto e Execução de Obras de Concerto Armado – Procedimento*. Brasil, pp.76.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-6118, 2000, *Projeto de Revisão NBR 6118– Projeto de Estruturas de Concerto*. Brasil, pp.76.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-6152, 1980, *Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos – Método de Ensaio*. Brasil, pp.4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-7222, 1994, *Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos – Método de Ensaio*. Brasil, pp.3.

BEBER, ANDREI. JOSÉ.; CAMPOS. FILHO, AMÉRICO.; CAMPAGNOLO, JOÃO. LUIZ. - *Avaliação do Desempenho de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Lâminas de Fibra de Carbono*. – 41^o Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 1999.

CARNEIRO , L. A.V. - *Reforço à flexão e ao cisalhamento de Vigas de Concreto Armado*. - Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

CERQUEIRA , ELIETE. DA CONCEIÇÃO. - *Reforço ao cisalhamento de Vigas de Concreto Armado com fibras de carbono*. - Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB), 1983, *Assessment on Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading*, Bulletin d'Information n^o 162, pp.288.

EMMONS, PETER H.; THOMAS, JAY.; VAYSBURD, ALEXANDER H.; -
“Strengthening Concrete Structures, part II “- *Concrete International* - abril, pp.56-60,
1998.

FUSCO, PÉRICLES. BRASILIENSE. - *Estruturas de Concreto Solicitações Tangenciais*, Universidade de São Paulo - Escola Politécnica , 1982.

GEMERT, D. VAN.; AHMED, O.; BROSENS, K.; “Anchoring of Externally Bonded CFRP Reinforcement“- *Concrete in The Service of Mankind, Thomaz Telford*, – pp.81-92, 1999.

GRACE, N.F.; SAYED, G.A.; SOLIMAN, A.K.; SALEH, K.R. - “Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates“- *ACI Structural Journal, Technical Paper* – v.96, n.5, pp.865-874, 1999.

GANGARAO, HOTA. V. S.; VIJAY, P.V.; - “Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped With Carbon Fabric“- *ASCE Journal of Structural Engineering* – v.124, n.4, pp.3-10, 1998.

MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES, *Tow Sheet Design Procedures*, 1996.

MORAIS , M. C. D. - *Reforço de Vigas de Concreto*. - Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

NANNI, ANTÔNIO.; GOLD, WILLIAM.J.; - “Strength Assessment Of External FRP Reinforcement“- *Concrete International* – v.20, n.6, pp.39-42, 1998.

NGUYEN, DAI. MINH.; CHAN, TOONG. KHUAN.; CHEONG, HEE. KIAT.; “Effects Of Plate Length On The Strength Of Reinforced Concrete Beams Bonded With CFRP Plates“- *The Seventh East Asia-Pacific Conference On Structural Engineering & Construction* –Japan, pp.1277-1282, 1999.

RIPPER, THOMAZ. - *Plásticos Armados Com Fibras Como Solução Para o Reforço de Estruturas* – Seminário Sobre Estruturas Reforçadas Com Fibras, UFF, Niterói, 1998.

RIPPER, THOMAZ; SCHERER, JOSEF. – *Avaliação do Desempenho de Plásticos Armados com Folhas Unidirecionais de Fibras de Carbono como Elemento de Reforço de Vigas de Betão Armado*, - 41^o Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 1999.

ROSS, C.ALLEN; JEROME, DAVID, M; TEDESCO, W.JOSEPH et al. - “Strengthening of Reinforced Concrete Beams With Externally Bonded Composite Laminates” - *ACI Structural Journal, Technical Paper* – v.96, n.2, pp.212-220, 1999.

SHARIF, ALFARABI.; AI-SULAIMANI, G.J.; BASUNBUL, M.H.BALUCH et al. - “Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates” - *ACI Structural Journal, Technical Paper* – v.91, n.2, pp.160-168, 1994.

SIKA, *Reforzamiento com Sistemas de Fibras de Carbono para Estructuras de Concreto y Madera – Guías de Diseño e Instalación.*, 1998.

SOUZA, REGINA H.F..DE. - *Avaliação da Aderência de Um Compósito Armado com tecido de Fibra de Carbono à Superfície do Betão*. - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1998.

TALJSTEN, B. - “Strengthening of Existing Concrete Structures By Epoxy Bonded Steel Plates of Steel or Fibre Reinforced Plastics” - *Concrete in the Service of Mankind* – v.5, pp.623-632, 1999.

TRIANAFILLOU, THANASIS C.; DESKOVIC, NIKOLA; DEURING, MARTIN - “Strengthening of Concrete Structures With Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets” - *ACI Structural Journal, Technical Paper* – v.89, n.3, pp.234-244, 1992.

ANEXO A

FOTOS

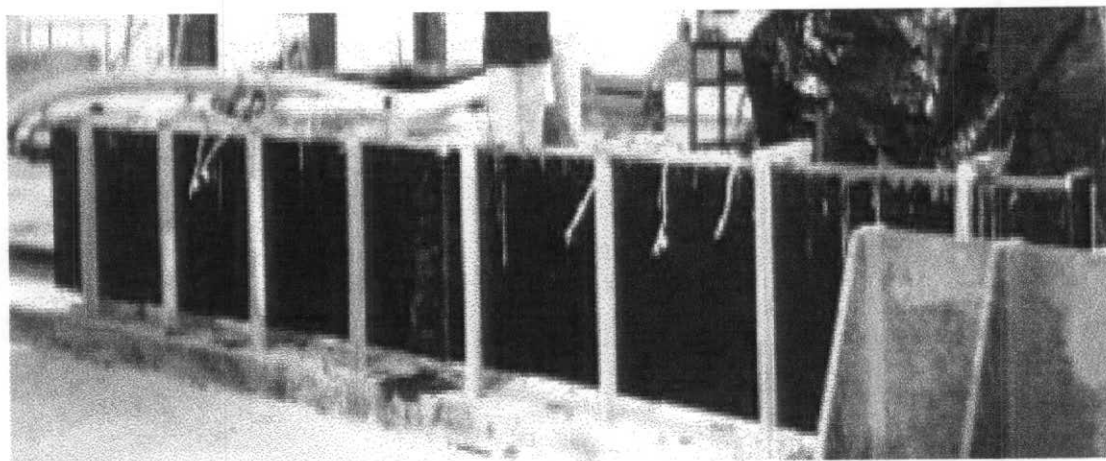


Foto A.1 – Formas das vigas.

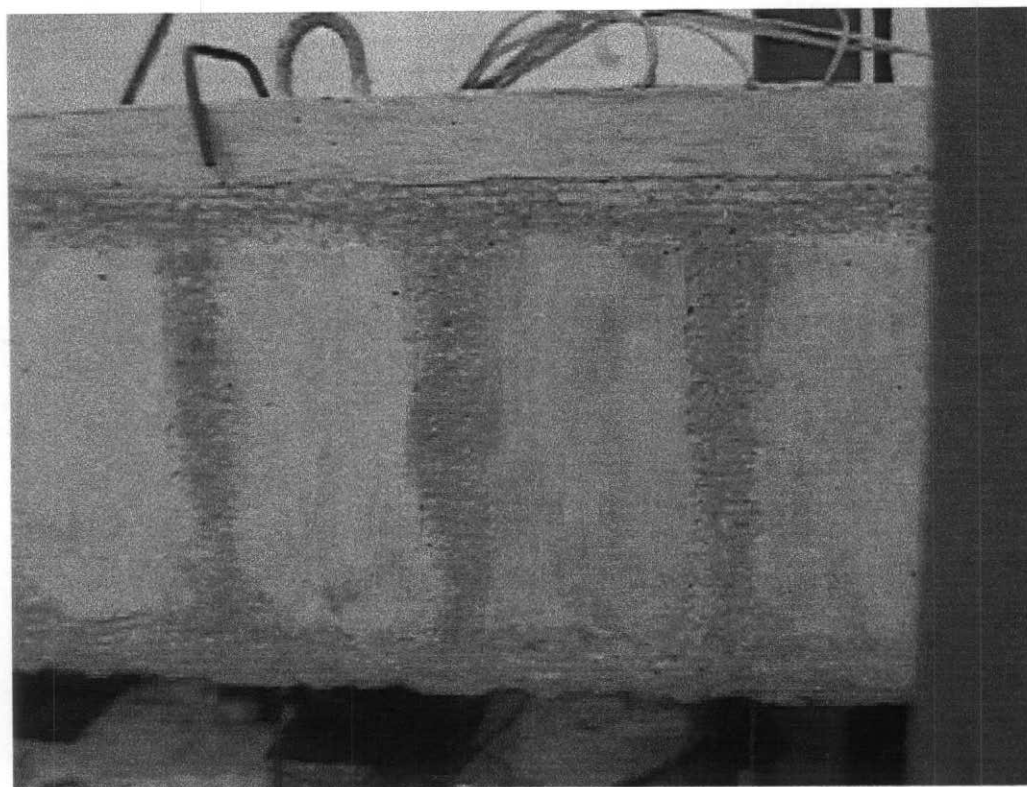


Foto A.2 – Apicoamento da superfície da viga.



Foto A.3 – Lâminas de fibra de carbono utilizadas.



Foto A.4 – Limpeza das lâminas com tricloroetileno.

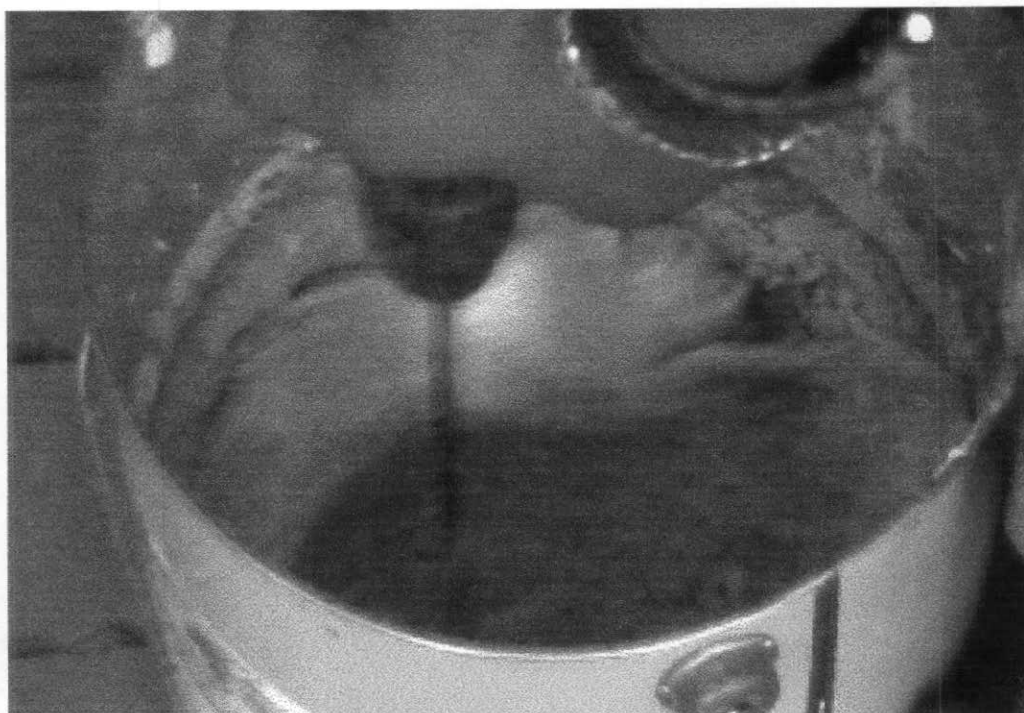


Foto A.5 – Mistura da resina epóxica.



Foto A.6 – Limpeza da superfície da viga.



Foto A.7 – Aplicação da resina sobre a superfície da viga.



Foto A.8 – Colagem das lâminas de fibra de carbono na viga.

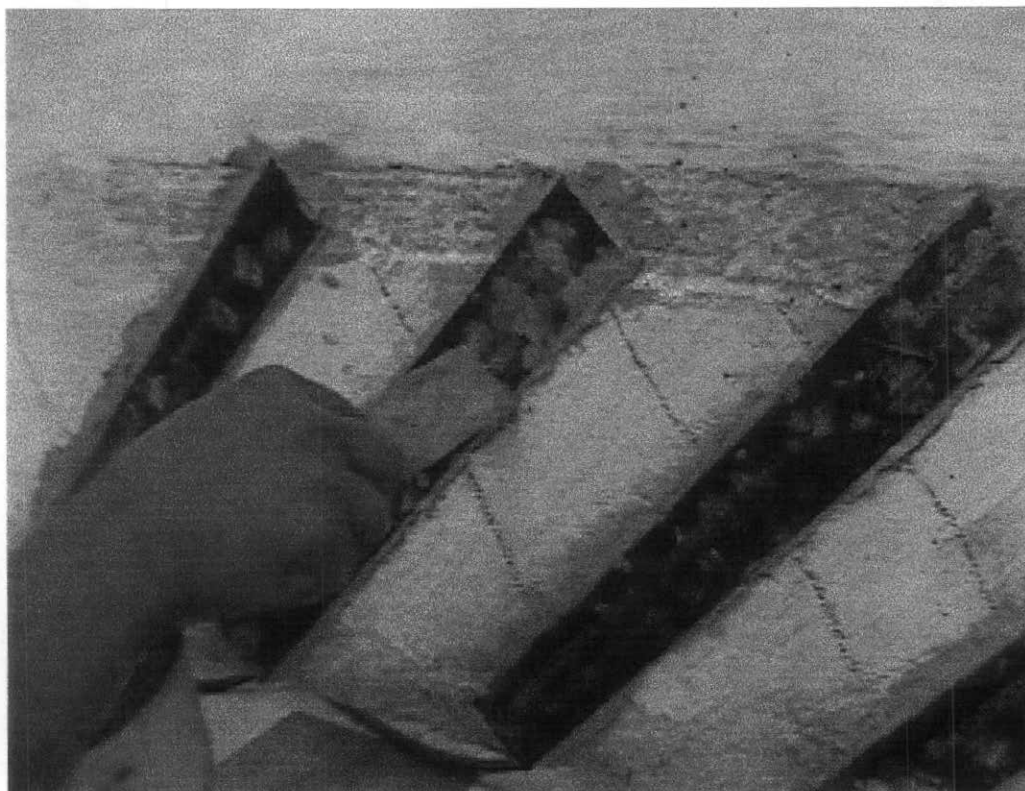


Foto A.9 – Remoção do excesso de resina epóxica.



Foto A.10 – Instrumentação da lâmina de fibra de carbono inferior.

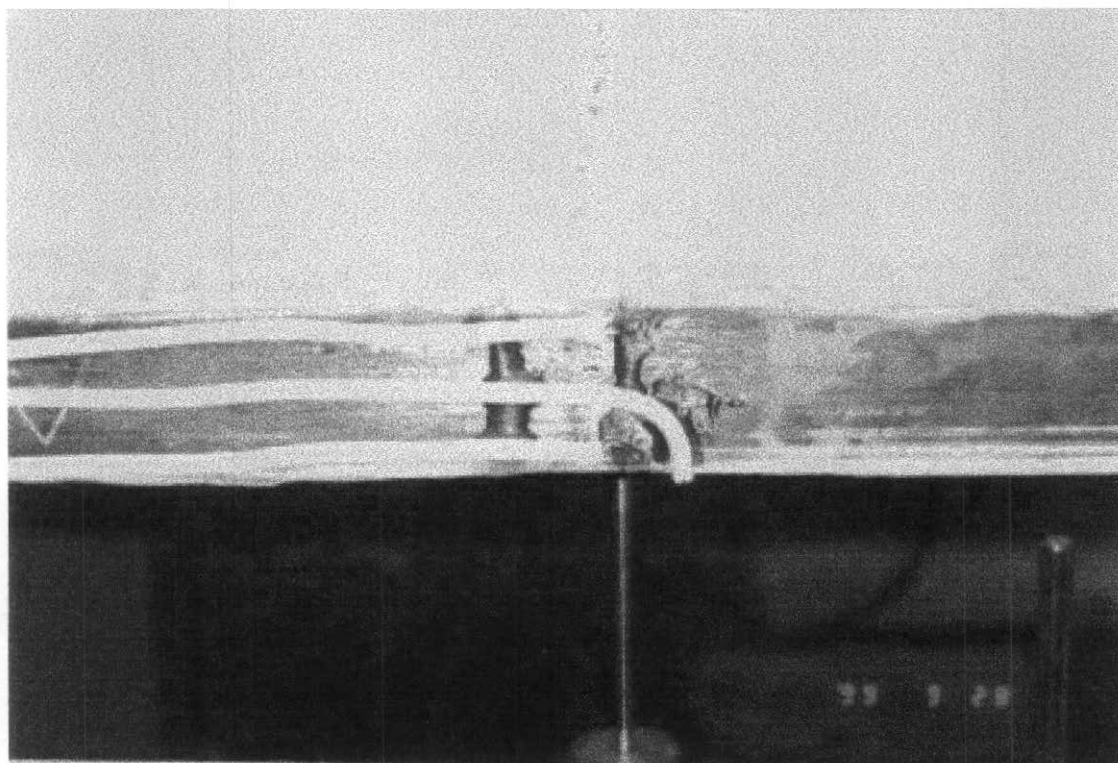


Foto A.11 – Instrumentação da fibra de carbono lateral.

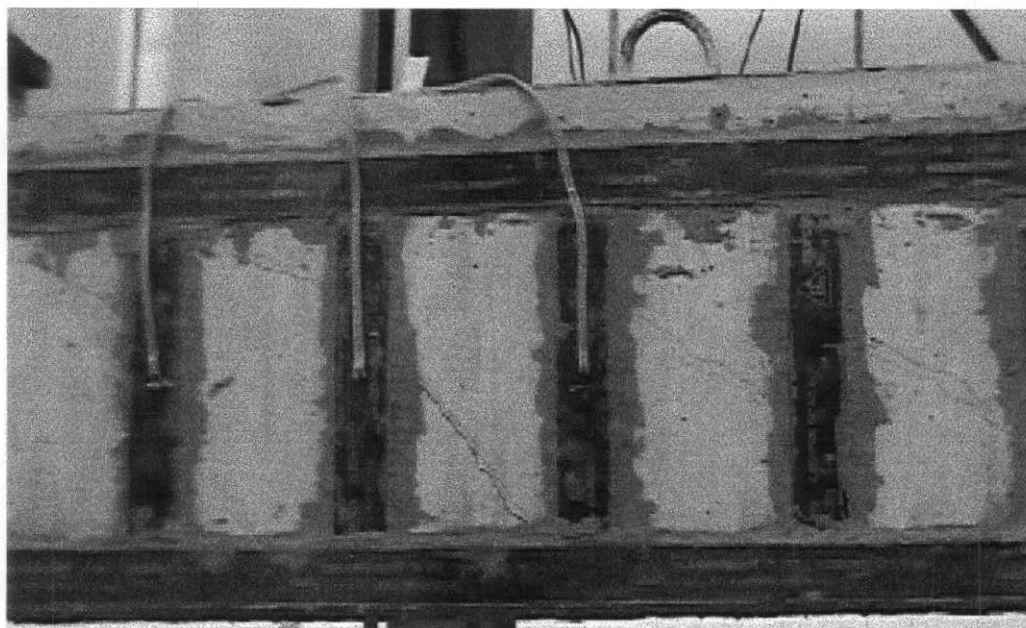


Foto A.12 – Instrumentação dos estribos de lâminas de fibra de carbono -V5.

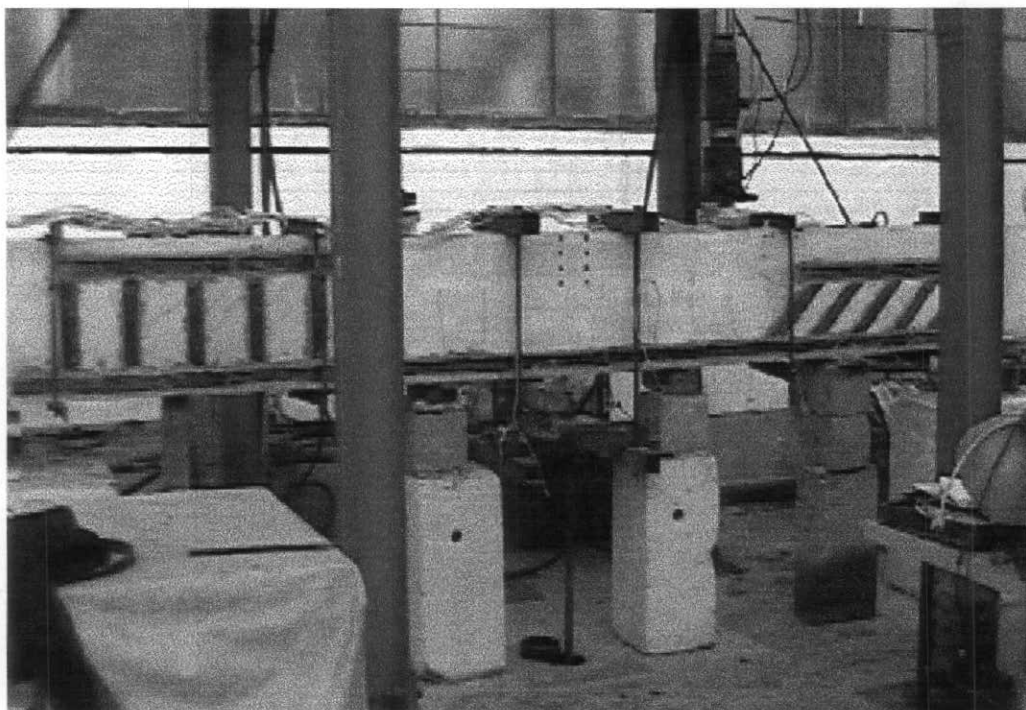


Foto A.13–Viga reforçada submetida ao carregamento pelo esquema de tirantes–V5.



Foto A.14 – Sistema de aquisição de dados dos ensaios.

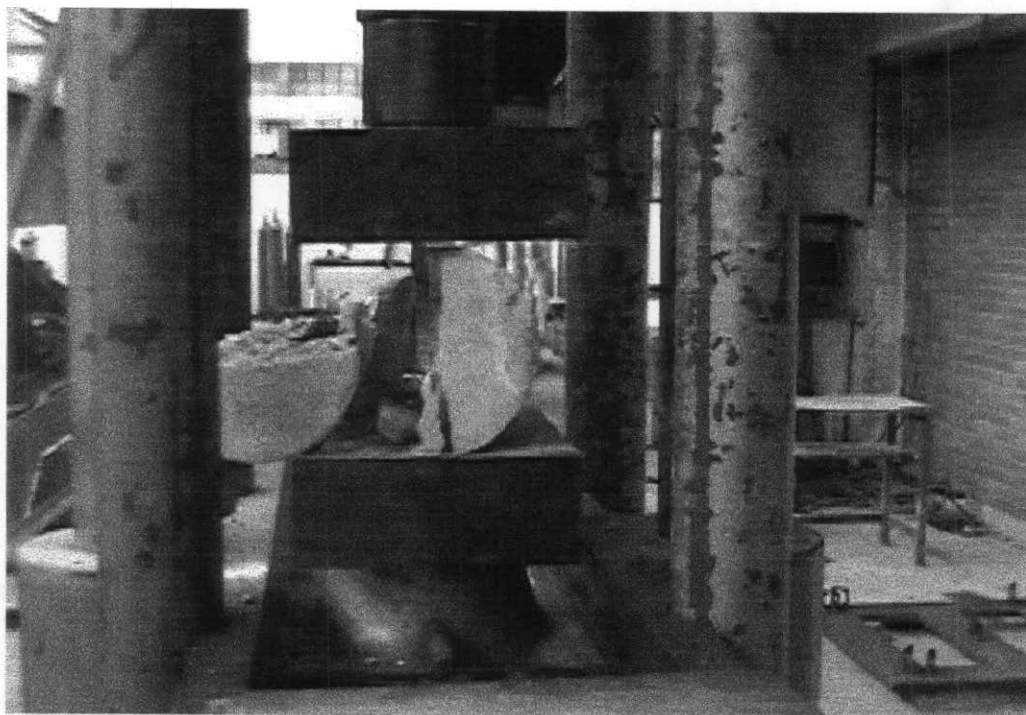


Foto A.15 – Ruptura do corpo de prova por compressão diametral.

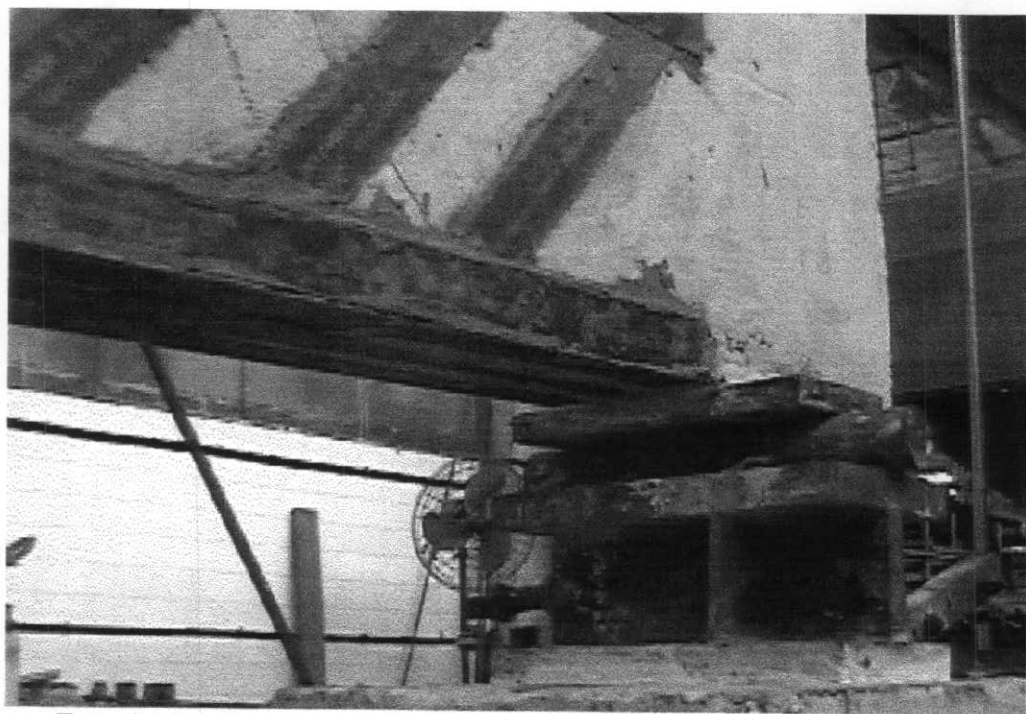


Foto A.16 – Ancoragem das lâminas de reforço à flexão da viga V5.

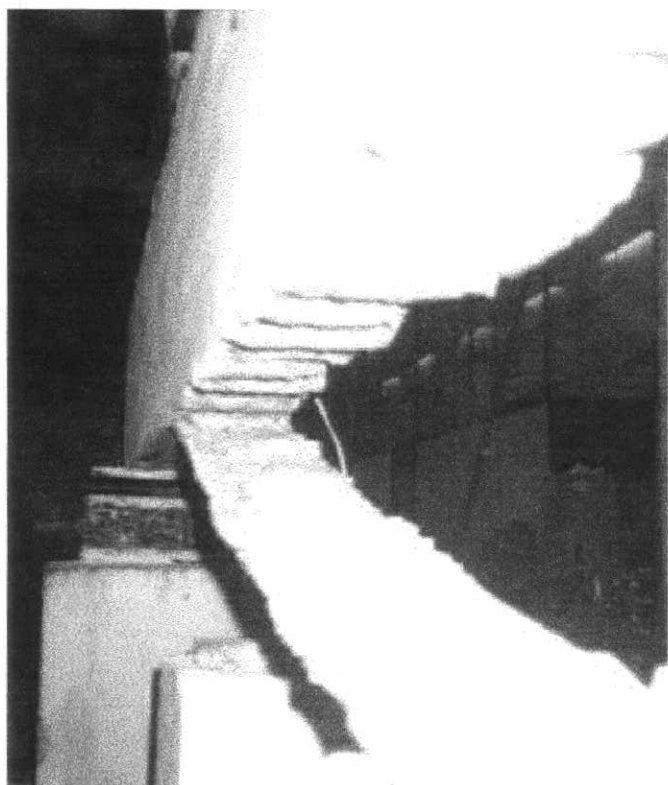


Foto A.17 – Ruptura da viga V3.

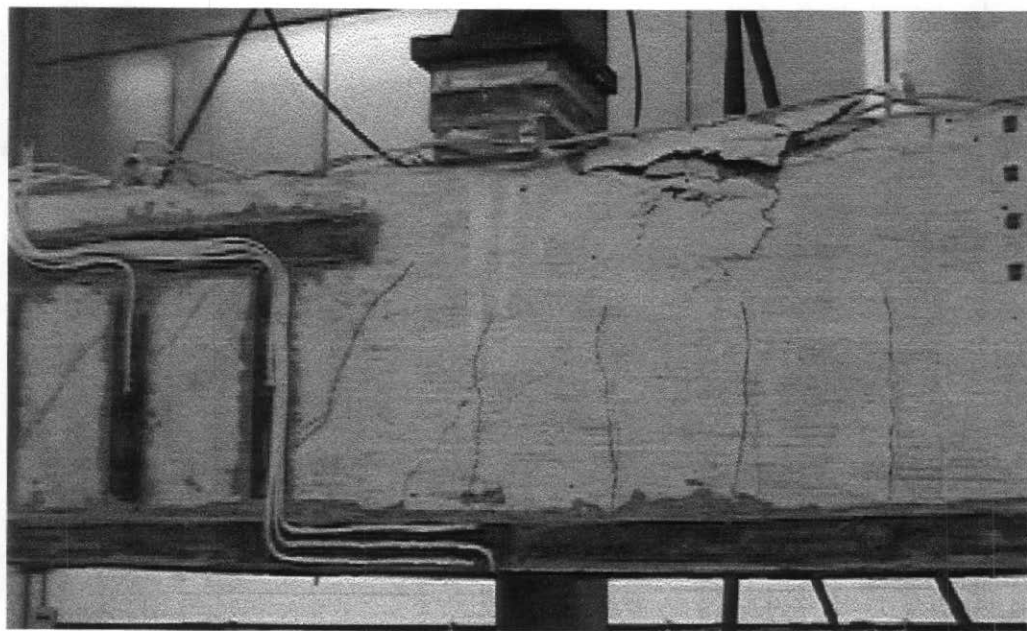


Foto A.18 – Ruptura da viga V5.

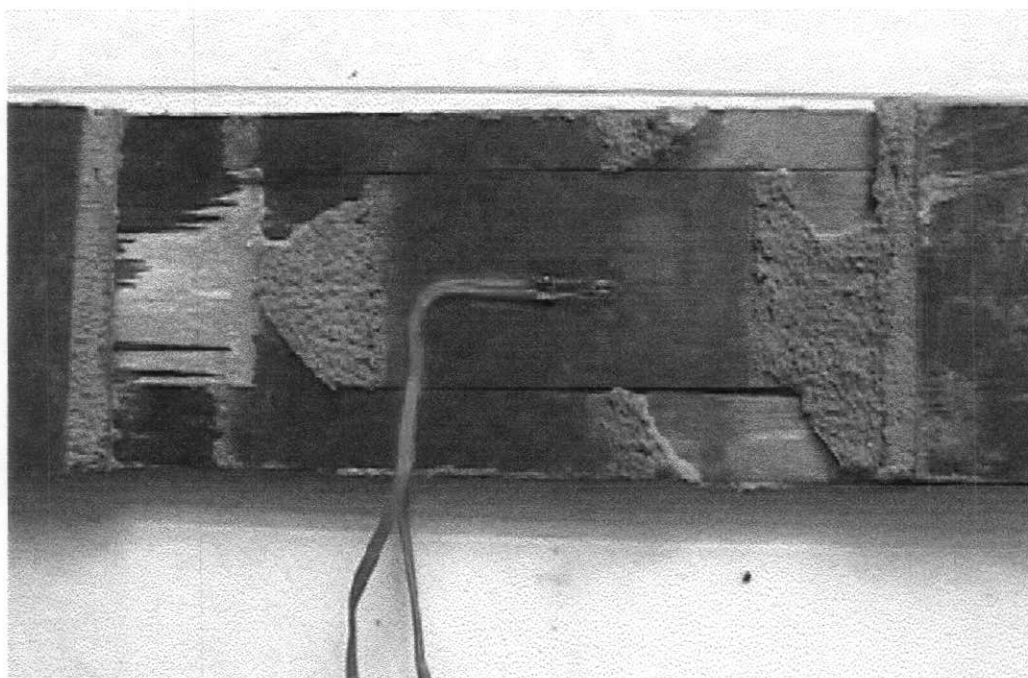


Foto A.19 – Corpo de prova da lâmina de fibra de carbono.

ANEXO B

TABELAS DE RESULTADOS

Tabela B.1 - Resultados dos ensaios da viga V1

Ciclos de Carga	Carga (kN)	Flecha na		Deformação do concreto (%)				Deformação da armadura		Abertura de Fissura (mm)
		posição 1 (mm)	posição 2 (mm)	posição 1	posição 2	posição 3	posição 4	posição 1	posição 2	
Ciclo 1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	10	0,67	0,67	-0,03	-0,04	-0,05	-0,07	0,10	0,07	
	20	1,72	1,83	-0,04	-0,12	-0,15	-0,91	0,43	0,25	
	30	3,74	3,84	0,03	-0,15	-0,27	-0,39	0,81	0,67	
	40	5,67	5,83	0,08	-0,22	-0,39	-0,57	1,15	1,03	
	50	8,65	9,38	0,16	-0,26	-0,55	-0,78	1,61	1,39	
	60	10,41	11,05	0,19	-0,29	-0,49	-0,90	1,89	1,72	
Ciclo 2	70	12,23	12,72	0,21	-0,37	-0,55	-1,10	2,20	2,06	
	0	2,63	2,86	0,07	-0,06	-0,11	-0,15	0,37	0,37	0,04
	20	5,00	5,28	0,07	-0,16	-0,29	-0,40	0,80	0,76	0,08
	40	7,98	8,33	0,12	-0,23	-0,47	-0,68	1,35	1,26	0,12
	60	10,95	11,26	0,16	-0,34	-0,64	-0,96	1,92	1,80	0,18
	41*	9,08	9,32	0,15	-0,30	-0,62	-0,90	1,71	1,38	-
	41*	9,08	9,32	0,09	-0,37	-0,69	-0,96	1,71	1,38	-
Ciclo 3	60	11,46	11,85	0,25	-0,78	-1,42	-2,03	2,02	1,85	-
	70	12,55	12,94	0,26	-0,83	-1,51	-2,17	2,21	2,03	-
	80	13,96	14,32	0,23	-0,87	-1,52	-2,29	2,45	2,26	-
	90	15,66	15,96	0,16	-0,94	-1,73	-2,44	2,72	2,52	-
	100	17,46	17,69	0,12	-0,95	-1,87	-2,63	3,36	2,81	-
	110	19,98	20,21	0,22	-1,06	-2,03	-2,89	3,98	3,58	-
	120	24,44	24,63	0,42	-0,15	-2,35	-3,45	19,46	11,56	-
130	32,16	32,25	0,62	-0,27	-1,75	-4,04	24,28	23,11	-	
140										

* Carga na posição do tirante

Tabela B.2 - Resultados dos ensaios da viga V1

Cargas de Carga	Carga (kN)	Deformação das lâminas de fibra de carbono (‰)			
		posição 1		posição 2	
Ciclo 3	41*	0,00	0,00	0,00	0,00
	60	0,37	0,33	0,60	0,65
	70	0,60	0,54	0,81	0,87
	80	0,86	0,80	1,06	1,13
	90	1,15	1,10	1,33	1,42
	100	1,47	1,44	1,64	1,74
	110	2,02	2,01	2,03	2,18
	120	3,77	3,70	2,89	3,04
	130	5,21	5,19	4,88	4,93
	140				

* Carga na posição do tirante

Tabela B.3 - Resultados dos ensaios da viga V3

Ciclos de Carga	Carga (kN)	Flecha na		Deformação do concreto (‰)				Deformação da Armadura longitudinal (‰)		Abertura de Fissura (mm)
		posição 1 (mm)	posição 2 (mm)	posição 1	posição 2	posição 3	posição 4	posição 1	posição 2	
Ciclo 1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	10	1,25	1,16	0,12	-0,08	-0,66	-0,11	0,08	0,07	
	20	2,50	2,54	-0,02	-0,06	-0,16	-0,19	0,40	0,36	
	30	4,34	4,51	-0,04	-0,08	-0,22	-0,38	0,81	0,73	
	40	6,21	6,50	-0,01	-0,11	-0,28	-0,45	1,16	1,10	
	50	8,08	8,28	-0,01	-0,13	-0,39	-0,58	1,51	1,45	0,10
	60	9,98	10,27	-0,01	-0,16	-0,48	-0,72	1,85	1,79	
Ciclo 2	70	11,89	12,46	0,00	-0,18	-0,61	-0,89	2,20	2,15	0,20
	0	2,00	2,25	0,01	0,03	-0,04	-0,09	0,39	0,39	
	20	4,96	5,28	0,01	-0,03	-0,17	-0,30	0,81	0,80	
	40	7,77	8,08	0,01	-0,08	-0,34	-0,51	1,37	1,35	
	60	10,70	11,30	0,01	-0,20	-0,49	-0,77	1,97	1,93	
	43*	8,77	9,37	0,03	-0,13	-0,44	-0,67	1,75	1,46	-
	43*	8,77	9,37	-0,07	-0,25	-0,58	-0,79	1,75	1,46	-
Ciclo 3,00	60	10,98	11,76	-0,03	-0,40	-1,09	-1,61	2,03	1,89	-
	70	11,94	12,84	-0,04	-0,43	-1,13	-1,66	2,05	2,07	-
	80	13,15	14,14	-0,03	-0,44	-1,23	-1,77	2,26	2,24	-
	90	14,51	15,71	-0,03	-0,48	-1,28	-1,88	2,48	2,48	0,20
	100	16,12	17,43	-0,04	-0,51	-1,38	-2,05	2,71	2,71	-
	110	17,85	19,41	-0,05	-0,55	-1,50	-2,15	3,37	3,19	-
	120	20,98	22,87	-0,02	-0,60	-1,69	-2,43	9,59	3,89	0,40
Ciclo 3,00	130	24,94	27,28	0,01	-0,60	-1,87	-2,75	17,01	8,59	-
	140	30,23	33,37	0,01	-0,64	-2,11	-3,14	18,59	17,75	-
	150	34,79	38,74	0,03	-0,69	-2,34	-3,51	19,41	19,25	0,80
	154	-1953,76	-2108,11					22,60	15,07	-

* Carga na posição do tirante

Tabela B.4 - Resultados dos ensaios da viga V3

Ciclos de Carga	Carga (kN)	Deformação da lâmina de fibra de carbono (%)		
		posição 1	posição 2	
Ciclo 3	43*	0,00	0,00	
	60	0,31	0,28	
	70	0,50	0,45	
	80	0,72	0,66	
	90	0,97	0,89	
	100	1,22	1,12	
	110	1,56	1,48	
	120	2,38	2,32	
	130	3,31	3,36	
	140	4,54	4,54	
	150	5,45	5,41	
	154	0,40	0,43	
			0,00	0,00
			0,47	0,45
		0,66	0,63	
		0,89	0,83	
		1,16	1,08	
		1,46	1,33	
		1,81	1,62	
		2,47	2,23	
		3,28	3,03	
		4,50	4,26	
		5,41	5,17	
		0,60	0,65	

* Carga na posição do tirante

Três fibras de carbono coladas na face tracionada da viga

Tabela B.5 - Resultados dos ensaios da viga V5

Ciclos de Carga	Carga (kN)	Flecha na		Deformação do concreto (%)				Deformação da armadura		Abertura de Fissura (mm)
		posição 1 (mm)	posição 2 (mm)	posição 1	posição 2	posição 3	posição 4	posição 1	posição 2	
Ciclo 1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	10	0,64	0,73	-0,02	-0,05	-0,06	-0,08	0,11	0,09	
	20	2,08	2,07	-0,06	-0,09	-0,17	-0,21	0,43	0,44	
	30	3,98	3,98	-0,05	-0,13	-0,24	-0,35	0,83	0,77	
	40	5,99	5,83	-0,05	-0,14	-0,32	-0,47	1,16	1,08	
	50	7,81	7,65	-0,05	-0,18	-0,40	-0,59	1,48	1,39	0,15
	60	9,89	9,83	-0,05	-0,23	-0,51	-0,73	1,83	1,73	
	70	11,94	11,77	-0,05	-0,28	-0,63	-0,88	2,15	2,02	0,20
Ciclo 2	80	14,44	14,08	-0,04	-0,32	-0,74	-0,99	2,43	2,30	
	0	3,13	2,88	-0,05	-0,04	-0,07	-0,13	0,35	0,36	
	20	5,40	5,09	-0,06	-0,13	-0,28	-0,35	0,76	0,73	
	40	8,70	8,43	-0,05	-0,20	-0,46	-0,58	1,36	1,27	
	60	11,88	11,57	-0,07	-0,25	-0,57	-0,80	1,93	1,81	
	43,3*	9,99	9,68	-0,06	-0,24	-0,56	-0,75	1,74	1,40	
	43,3*	10,00	9,68	-0,06	-0,24	-0,56	-0,75	1,74	1,40	
	59	12,04	11,62	-0,06	-0,26	-0,64	-0,89	2,01	1,77	
Ciclo 3	60	12,00	11,49	-0,01	-0,24	-0,62	-0,87	1,98	1,76	
	70	12,70	12,17	-0,01	-0,28	-0,67	-0,92	2,11	1,88	
	80	13,70	13,18	0,00	-0,28	-0,74	-1,01	2,28	2,06	
	90	14,83	14,25	-0,02	-0,32	-0,81	-1,11	2,47	2,23	
	100	16,07	15,52	-0,04	-0,36	-0,89	-1,23	2,68	2,42	
	110	17,52	16,83	-0,04	-0,44	-1,02	-1,38	3,13	2,62	
	120	19,20	18,49	-0,07	-0,55	-1,15	-1,56	3,50	2,99	
	130	21,15	20,39	-0,08	-0,64	-1,30	-1,79	4,14	3,44	
140	23,64	22,83	-0,09	-0,76	-1,52	-2,05	4,55	3,92	0,30	
150	27,74	26,74	-0,10	-0,88	-1,80	-2,45	18,41	5,15		
160	32,17	30,92	0,81	-1,10	-2,13	-2,80	19,34	17,44		
165	38,02	35,09					19,02	18,79		
160	40,69	36,59					18,54	18,73		

* Carga na posição do tirante

Tabela B.7 - Resultados dos ensaios da viga V5

Ciclos de Carga	Carga (kN)	Deformação das lâminas de fibra de carbono- flexão (‰)			Deformação dos estribos de lâmina de fibra de carbono (‰)					
		posição 1	posição 2	posição 3	posição 5	posição 6	posição 7	posição 8	posição 9	posição 10
3	43,3*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	60	0,24	0,47	0,43	0,13	0,08	0,10	0,00	0,05	0,03
	70	0,36	0,61	0,57	0,17	0,10	0,14	0,00	0,06	0,04
	80	0,53	0,81	0,74	0,24	0,13	0,19	0,01	0,08	0,06
	90	0,72	1,04	0,94	0,31	0,17	0,25	0,02	0,11	0,07
	100	0,92	1,30	1,14	0,39	0,22	0,33	0,08	0,13	0,10
	110	1,16	1,56	1,34	0,48	0,28	0,42	0,26	0,15	0,14
	120	1,49	1,85	1,55	0,59	0,34	0,52	0,46	0,19	0,21
	130	1,86	2,27	1,86	0,69	0,41	0,64	0,70	0,22	0,30
	140	2,58	2,80	2,25	0,81	0,50	0,79	0,93	0,28	0,47
	150	3,34	3,64	2,86	0,94	0,64	1,01	1,23	0,37	0,88
	160	4,08	4,95	3,68	1,05	0,78	1,22	1,49	0,47	1,22
	165	4,57	6,30	4,41	1,11	0,85	1,32	1,56	0,56	1,43
	160	4,65	6,60	4,58	1,10	0,84	1,31	1,46	0,60	1,51

* Carga na posição do tirante

Três fibras de carbono coladas na face tracionada da viga

Tabela B.6 - Resultados dos ensaios da viga V5

Ciclos de Carga	Carga (kN)	Deformação dos estribos internos (%)					
		Posição					
		1	2	3	4	5	6
Ciclo 1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,00	-0,01
	30	-0,02	-0,01	0,02	0,12	0,06	-0,01
	40	-0,03	-0,01	0,08	0,20	0,08	0,00
	50	-0,04	0,05	0,18	0,28	0,09	0,00
	60	-0,02	0,22	0,30	0,45	0,16	0,19
	70	0,14	0,40	0,43	0,59	0,29	0,66
	80	0,31	0,52	0,67	0,77	0,75	1,76
Ciclo 2	0	0,24	0,21	0,14	0,13	0,61	0,52
	20	0,23	0,20	0,21	0,22	0,60	0,55
	40	0,27	0,34	0,40	0,43	0,64	0,95
	60	0,31	0,47	0,60	0,67	0,71	1,58
	43,3*	0,31	0,44	0,48	0,49	0,69	1,13
	43,3*	0,31	0,44	0,48	0,49	0,69	1,14
	60	0,31	0,59	0,55	0,60	0,72	1,34
	70	0,32	0,56	0,64	0,70	0,74	1,54
	80	0,34	0,70	0,69	0,79	0,77	1,68
Ciclo 3	90	0,37	0,85	0,82	0,95	0,82	1,96
	100	0,44	1,08	0,91	1,12	0,85	2,18
	110	0,54	1,36	1,08	1,37	0,89	2,53
	120	0,74	1,66	1,21	1,61	0,94	2,81
	130	1,05	1,99	1,41	1,94	1,03	3,23
	140	1,44	2,42	1,60	2,26	1,17	3,59
	150	2,01	3,13	1,86	2,66	1,37	4,08
	160	2,58	3,83	2,08	3,04	1,66	4,49
	165	2,89	4,23	2,35	3,57	2,06	4,97
	160	2,93	4,24	2,08	3,51	1,97	4,49

* Carga na posição do tirante