

5 Programa Experimental

5.1. Introdução

Este estudo experimental tem como objetivo principal avaliar a ductilidade de vigas retangulares de concreto armado reforçadas à flexão com tecido de fibras de carbono, por meio da análise do seu comportamento estrutural, da determinação das flechas, das curvaturas, das deformações das armaduras internas, das deformações do tecido, da obtenção da carga de ruptura e do momento de ruptura das vigas ensaiadas.

Foram ensaiadas sete vigas de concreto armado bi-apoiadas, com resistência de dosagem à compressão de 20 MPa . Todas as vigas têm as mesmas armaduras.

A viga de referência VR, a primeira ensaiada, não foi reforçada e serve para comparações de incremento de rigidez e resistência após a aplicação do reforço. Esta viga foi levada à ruptura, que ocorreu, no meio do vão por escoamento da armadura seguido do esmagamento do concreto na zona de compressão.

A segunda e terceira vigas ensaiadas - AI e AII - foram assim chamadas, com a letra A significando que as vigas foram reforçadas à flexão antes do início do ensaio, ou seja, o reforço foi aplicado sem carregamento inicial. Os números romanos I e II representam o número de camadas de tecido de fibra de carbono que foram utilizadas em cada viga. Portanto, tem-se AI, a viga reforçada inicialmente com uma camada de tecido de fibra de carbono e AII representa a viga reforçada inicialmente com duas camadas de tecido.

As demais vigas ensaiadas – BI-1, BI-2, BII-1 e BII-2 – foram assim chamadas, com a letra B representando uma segunda forma de ensaio, no qual as vigas foram pré-ensaiadas antes da aplicação do reforço, buscando-se simular uma situação próxima da realidade. Já os números romanos têm os mesmos significados utilizados para as vigas do grupo A. Os números 1 e 2 representam o número da viga com o mesmo tipo de reforço, ou seja, foram ensaiadas duas vigas com uma camada de tecido, e duas vigas com duas camadas de tecido de fibra de

carbono. Portanto o ensaio da viga de referência e das vigas AI e AII foram realizados numa única etapa, não havendo pré-carregamento. Os ensaios das demais vigas, buscando-se uma situação real, foram realizados com as vigas pré-ensaiadas, reforçadas sob deformação teoricamente constante, e em seguida levadas à ruptura. Para a manutenção da deformação foi desenvolvido um sistema mecânico especial. A deformação foi mantida constante durante a aplicação e o período de cura do reforço.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na confecção das vigas, as características desses elementos, os esquemas de concretagem e de instrumentação das vigas, os sistemas de aplicação e manutenção de deformação, a descrição das etapas de aplicação do reforço, além de todas as etapas dos ensaios.

5.2. Materiais

5.2.1. Concreto

O concreto utilizado na confecção das vigas foi fornecido pela LAFARGE BRASIL S/A, e foi dosado para alcançar uma resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias.

O cimento empregado no preparo do concreto foi do tipo CPIII-RS. O concreto foi misturado de forma a se obter 3 m^3 de material, de acordo com a NBR – 5738 (1993) e NBR – 5739 (1994), num caminhão betoneira com capacidade de 8 m^3 , e apresentou 100 mm de abatimento do tronco de cone. As quantidades dos materiais empregados por metro cúbico de concreto, são descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.

Material	Quantidade / m^3
Cimento CPIII-RS	726 kg
Areia	2,76 m^3
Pedra	2,08 m^3
Água	576 l
Aditivo	2,17 ml

5.2.1.1. Resistência à Compressão do Concreto

Foram realizados ensaios de compressão em 13 corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova foram moldados conforme a NBR- 5738, com dimensões de $150\text{mm} \times 300\text{mm}$. Após 48 horas, os corpos-de-prova foram desformados e mantidos imersos em água. Os ensaios foram realizados aos 28 dias após a concretagem, e aos 60, 96 e 115 dias. Os ensaios após os 28 dias foram realizados no intervalo do ensaio de cada grupo de vigas. Seis corpos-de-prova foram ensaiados à compressão na prensa AMSLER UNIVERSAL, com capacidade de 1000 kN, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ITUC – Instituto de Tecnologia da Universidade Católica da PUC-Rio, de acordo com a norma NBR-5739. Os seis corpos-de-prova restantes foram ensaiados à compressão simples na prensa CONTENCO com capacidade de 2400 kN, no Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio. Os valores médios da resistência do concreto à compressão são mostrados na Tabela 5.2, e no diagrama tensão x dias de concretagem apresentado na Figura 5.1.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de resistência do concreto à compressão.

Ensaio da viga	Idade do concreto (dias)	Quantidade de corpos-de-prova	f_c médio (MPa)
VR	28	4	22,1
AI e AII	60	3	25,2
BI-1 e BI-2	96	3	27,1
BII-1e BII-2	115	3	29,9

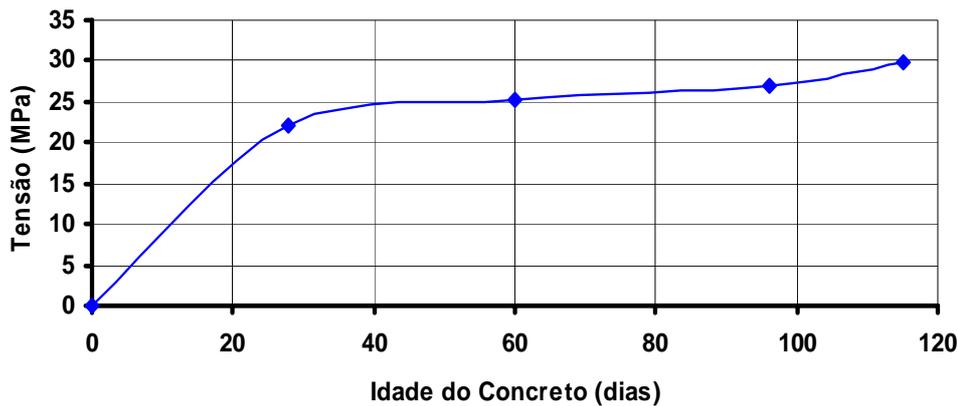


Figura 5.1 – Diagrama tensão x idade do concreto utilizado.

5.2.1.2.

Resistência à Compressão Diametral do Concreto

Foram realizados os ensaios de compressão diametral de três corpos de prova de concreto aos 28 dias. Estes ensaios visam determinar a resistência à tração do concreto utilizado na execução das vigas. Os corpos-de-prova para a realização desse ensaio foram moldados de acordo com a NBR-5738, com dimensões de $150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$. O ensaio foi realizado na prensa AMSLER UNIVERSAL, com capacidade de 1000 kN , no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ITUC – Instituto de Tecnologia da Universidade Católica da PUC-Rio, conforme a NBR - 7222.

Após a realização do ensaio obteve-se a carga máxima de cada corpo-de-prova. A resistência à tração por compressão diametral é dada por:

$$f_{td} = \frac{2F}{\pi dL} \quad (5.1)$$

onde:

f_{td} – resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa , com aproximação de $0,05\text{ MPa}$;

F – carga máxima obtida no ensaio;

d – diâmetro do corpo-de-prova;

L – altura do corpo-de-prova.

De posse dos valores das cargas obtidos no ensaio tem-se, por meio da expressão 5.1, a resistência à tração de cada corpo-de-prova ensaiado. Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados do ensaio de compressão diametral, com os valores obtidos para cada corpo-de-prova.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão diametral.

Corpos-de-Prova	Carga (<i>kN</i>)	Resistência à Tração $f_{t,D}$
1	167	2,36 MPa
2	175	2,48 MPa
3	192	2,72 MPa

Com a resistência à tração de cada corpo-de-prova obtém-se o valor da resistência à tração média do concreto utilizado na confecção das vigas. A resistência à tração média do concreto é $f_{t,D} = 2,52 MPa$. O esquema do ensaio, aplicação de carga e ruptura do corpo-de-prova são apresentados na Foto A.1 do Anexo A.

5.2.1.3. Módulo de Elasticidade do Concreto

Para determinação do módulo de deformação estática (módulo de elasticidade do concreto) foram moldados três corpos-de-prova de concreto, conforme a NBR – 5738, com dimensões $150mm \times 300mm$. Foram utilizados dois extensômetros elétricos em cada corpo-de-prova para medir a deformação do concreto durante o ensaio. Este ensaio, realizado de acordo com NBR-8522, consiste na aplicação de carregamento crescente, com leitura das deformações para as respectivas cargas aplicadas. A relação constitutiva é dada por:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.2)$$

sendo σ a tensão no concreto, E o módulo de elasticidade do concreto, e ε a deformação específica do concreto. Com o aumento do carregamento aplicado,

efetuam-se as leituras das deformações. Para cada carregamento tem-se uma tensão no concreto e a sua respectiva deformação específica.

O módulo de elasticidade foi calculado por meio da seguinte expressão:

$$E = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (5.3)$$

onde:

E – módulo de deformação secante;

σ_n – tensão considerada para o cálculo do módulo secante;

ε_n – deformação específica correspondente à tensão σ_n ;

n – variação dos níveis de aplicação de carga, 0,1.....0,7 ou 0,8;

ε_0 – deformação específica correspondente à leitura l_0 ;

σ_{inf} – 0,5 MPa .

Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 5.4. O esquema do ensaio, da aplicação de carga e da medida de deformação são mostrados nas Fotos A.2 e A.3 do Anexo A.

Tabela 5.4 – Resultado dos ensaios de corpos-de-prova de concreto.

Corpos-de-Prova	Carga de ruptura P (kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica ε_c (‰)
1	587,16	33,23	2,07
2	530,58	30,03	1,88
3	566,67	32,07	2,08

O procedimento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade do concreto é o correspondente a uma simulação de uma estrutura em seu primeiro carregamento (plano de carga III da NBR 8522), ou seja, obtém-se por meio da equação 5.3 o módulo de deformação secante, sendo este o módulo que corresponde a $0,3f_c$. De acordo com a NBR-8522, os ensaios serão válidos se os resultados dos corpos-de-prova não diferirem mais de 20 % das resistências previstas. Como a resistência dos corpos-de-prova está em torno de

$f_c = 31,77 \text{ MPa}$, todos os resultados dos corpos-de-prova são válidos e apresentados na Tabela 5.5. A Figura 5.2 mostra o gráfico tensão x deformação específica dos três corpos-de-prova ensaiados.

Tabela 5.5 – Módulo de elasticidade do concreto.

Corpos-de-Prova	Carga para $0,3f_c$ (kN)	Tensão para $0,3f_c$ (MPa)	Módulo de Elasticidade Secante (MPa)
1	158,97	8,39	28,81
2	159,35	8,40	26,15
3	160,20	8,43	27,43
Média	159,51	8,41	27,46

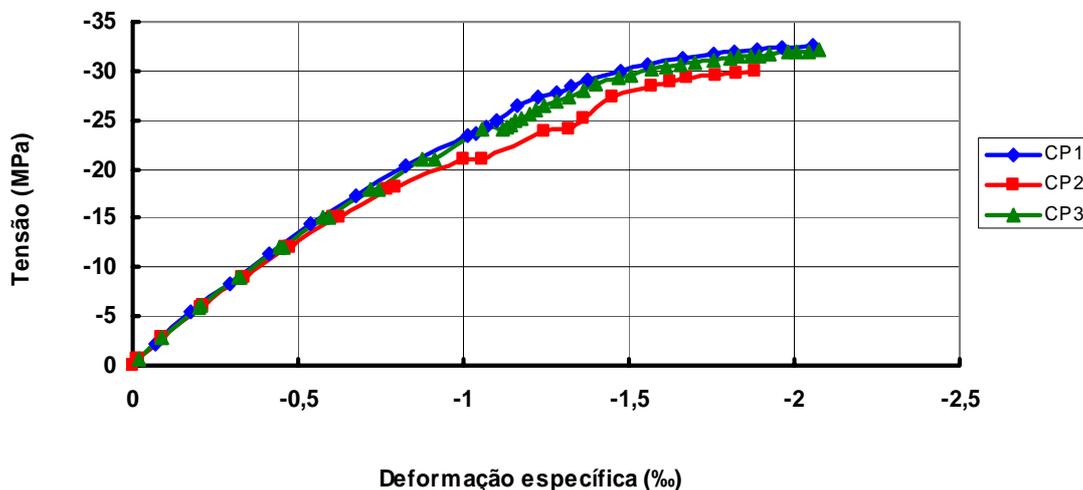


Figura 5.2 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de concreto.

5.2.2. Aço

Para as armaduras longitudinal e transversal das vigas foram utilizadas barras de aço CA-50 e CA-60. Os diâmetros das barras da armadura longitudinal foram de $5,0 \text{ mm}$, para armadura de montagem, e de $12,5 \text{ mm}$ e 10 mm para a armadura longitudinal de tração. As vigas não foram armadas à compressão. As barras com diâmetro de $5,0 \text{ mm}$ foram usadas somente como barras de montagem e sua parcela de contribuição à força de compressão foi desprezada.

A armadura transversal consistiu de estribos de $6,3 \text{ mm}$ de diâmetro, com espaçamento de $17,5 \text{ cm}$ ao longo do comprimento das extremidades para o centro

da viga, e na região central o espaçamento foi de 25 *cm* ao longo do comprimento de 1,50 *m*.

Foram ensaiadas à tração 15 amostras de aço, no Laboratório de Ensaaios Mecânicos do ITUC - Instituto de Tecnologia da Universidade Católica da PUC-Rio, de acordo com a NBR-6152 (1980). As três amostras do aço com diâmetro de 5,0 *mm*, as nove amostras com diâmetro de 6,3 *mm* e as três amostras com diâmetro de 10 *mm* foram ensaiadas à tração na máquina Instron-5500R. Foi necessário realizar o ensaio de nove corpos-de-prova de diâmetro de 6,3 *mm*, devido à utilização de aços de diferente fabricação. Como os demais aços utilizados nas vigas foram de um mesmo lote fez-se necessário o ensaio de três amostras.

As três amostras do aço com diâmetro de 12,5 *mm* foram ensaiadas na máquina AMSLER UNIVERSAL, com capacidade de 1000 *kN*, no Laboratório de Ensaaios Mecânicos do ITUC – Instituto de Tecnologia da Universidade Católica da PUC-Rio.

Todos os valores obtidos nos ensaios de tração foram superiores aos mínimos exigidos pela norma. Os resultados dos ensaios de resistência à tração encontram-se apresentados por meio de gráficos e da Tabela B.1 contidos no Anexo B.

5.2.3. Tecido de Fibra de Carbono

Para a confecção do reforço à flexão das vigas AI, AII, BI-1, BI-2, BII-1 e BII-2 foram utilizados tecidos de fibra de carbono fornecidos pela Rheotec Ativos de Concreto Ltda., tipo N-300 (Fotos A.4 e A.5 do Anexo A), com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

- Largura = 50 *cm* ;
- Espessura = 0,165 *mm* ;
- Área da seção transversal = 85,2 *mm*² ;
- Deformação específica na ruptura = 1,55 % ;
- Resistência à tração > 3550 *MPa* ;

- Módulo de elasticidade = $235GPa$.

Para o reforço das vigas AI, BI-1e BI-2 foram usadas tiras de tecido de fibra de carbono com dimensões de $20\text{ cm} \times 380\text{ cm}$ na parte inferior da viga entre os apoios. Para o reforço das vigas AII, BII-1 e BII-2 foram usadas duas tiras com dimensões de $10\text{ cm} \times 380\text{ cm}$, também coladas na zona tracionada das vigas.

5.2.4.

Materiais Necessários para a Aplicação do Tecido de Fibra de Carbono

Para a aplicação do tecido de fibra de carbono, obedecendo-se ao sistema correto de impregnação, deve-se utilizar quatro produtos que permitem a correta aplicação do reforço. Os quatro produtos são:

- Argamassa de reparo;
- Resina de imprimação;
- Argamassa epoxídica;
- Resina epoxídica.

Dois destes produtos, a argamassa de reparo e a argamassa epoxídica são dispensáveis, dependendo das condições da superfície. A argamassa de reparo se torna necessária se houver significativas irregularidades na superfície. A argamassa epoxídica promove a regularização final da superfície. Portanto, em superfícies sem muitas irregularidades o uso dessas argamassas se torna dispensável.

Na aplicação do tecido de fibra de carbono no reforço à flexão das vigas não houve a necessidade de regularizar as superfícies que receberiam o tecido, portanto, a aplicação foi feita utilizando-se somente a resina de imprimação e a resina epoxídica.

5.2.4.1. Resina de Imprimação

Após a limpeza da superfície inferior da viga foi aplicada a Tec-Poxi PR da RHEOTEC (Foto A.10). Esta resina é responsável pela perfeita aderência da camada de resina epoxídica ao substrato, e é de uso obrigatório neste sistema de aplicação. Algumas de suas propriedades para 100 gramas da mistura A + B, a 22° C são:

- Componente A: transparente;
- Componente B: transparente amarelado;
- Mistura A+B: incolor;
- Proporção dos componentes: 71% de componente A e 29 % de componente B (em peso);
- Viscosidade: 65 a 75 s (CF 4);
- Peso específico: $1,050 \text{ g} / \text{cm}^3$;
- Sólido por volume: mínimo de 98%;
- Tempo de vida útil da mistura: máximo de 40 min;
- Secagem ao toque: 4 horas máximo;
- Secagem ao manuseio: 6 horas máximo;
- Secagem completa: 10 horas máximo;
- Cura total: 7 dias;
- Deformação específica na ruptura: $0,218 \text{ mm} / \text{mm}$;
- Resistência à tração: $20,0 \pm 2,0 \text{ MPa}$ após 24 horas;
- Rugosidade do substrato: 60 a 80 microns;
- Tempo de aplicação: a 10° C máximo de 2 horas;
a 20° C máximo de 1 hora;
a 35° C máximo de 15 minutos.

5.2.4.2. Resina Epoxídica

A resina epoxídica é responsável pela perfeita aderência do reforço com tecido de fibra de carbono e o substrato de concreto, transferindo as tensões do reforço para esse. É uma componente básica deste sistema de reforço (Foto A.11)

Algumas das propriedades dessa resina, numa quantidade de 100 gramas da mistura A + B, temperatura de 22⁰C, são:

- Componente A: transparente;
- Componente B: azul;
Mistura A+B: azul transparente;
- Proporção dos componentes: 71% de componente A e 29 % de componente B (em peso);
- Viscosidade: 70 a 80 s (CF 4);
- Cura total: 7 dias
- Aderência: 1,5 *MPa* ;
- Deformação específica na ruptura: 0,300 *mm / mm*
- Peso específico: 1,055 *g / cm³* ;
- Sólido por volume: mínimo de 98 %;
- Tempo de vida útil da mistura: máximo de 40 min;
- Secagem ao toque: 4 horas máximo;
- Secagem ao manuseio: 6 horas máximo;
- Resistência à tração: 55 ± 3,0 *MPa* após 24 horas;
- Resistência à compressão: mínima de 60 *MPa* ;
- Tempo de aplicação: a 10° C máximo de 2 horas;
a 20° C máximo de 1 hora;
à 35° C máximo de 20 minutos.

5.2.5.

Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibra de Carbono

O método de ensaio utilizado foi o da norma ASTM D 3039 / D 3039M, que especifica os procedimentos para a determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compostos de fibras revestidos com matriz polimérica (por exemplo, resina epóxi)

Essa norma estabelece dimensões mínimas para os corpos-de-prova. Essas dimensões, utilizadas nos ensaios de resistência à tração, são mostradas na Figura

5.3. A Tabela 5.6. apresenta algumas dimensões recomendadas em função da orientação das fibras.

Os corpos-de-prova unidirecionais possuem abas, com o objetivo de evitar o surgimento de falhas prematuras quando da aplicação de carga.

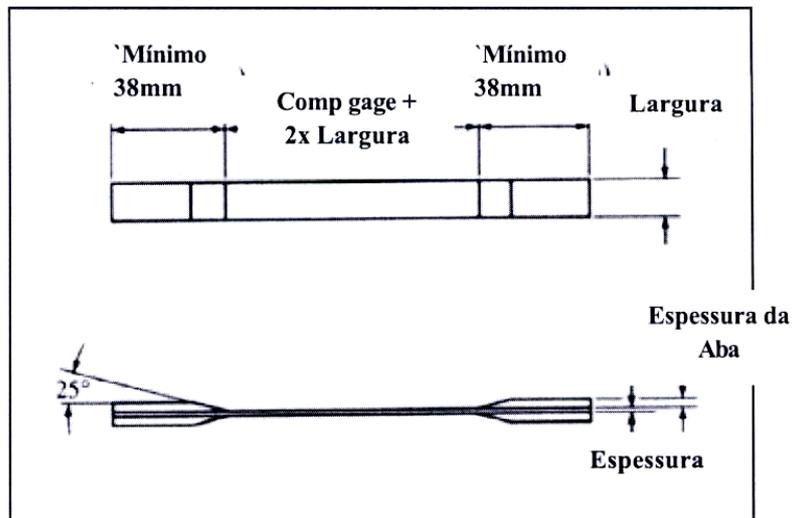


Figura 5.3. – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; ASTM D 3039.

Tabela 5.6 - Geometria dos corpos-de-prova recomendada para ensaio de tração em materiais compósitos com matriz polimérica (ASTM D3039/3039M).

Orientação das Fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Espessura (mm)	Comp. Aba (mm)	Espessura Aba (mm)	Ângulo Aba (°)
0° Unidirecional	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° Unidirecional	25	175	2,0	25	1,5	90
Fios Descontínuos	25	250	2,5	-	-	-

A resistência à tração do compósito de fibras de carbono é dada por:

$$f_{tf} = \frac{P_{MAXx}}{A} \quad (5.4)$$

onde:

f_{tf} – resistência à tração (MPa);

$P_{máx}$ – carga máxima aplicada (N);

A – área do corpo-de-prova (mm²).

Foram ensaiados à tração quatro corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibra de carbono revestidos com resina epóxi, com dimensões $2,5\text{ cm}$ de largura e 40 cm de comprimento. O ensaio foi realizado na máquina Instron-5500R no Laboratório de Ensaio Mecânicos do ITUC - Instituto de Tecnologia da Universidade Católica da PUC-Rio. Foram utilizadas como placas de fixação nas extremidades das amostras quatro (duas a duas) “almofadas” de alumínio, coladas com a mesma resina epóxi misturada com areia para promover uma melhor aderência entre o tecido e as placas de alumínio. Os resultados do ensaio constam na Tabela 5.7. As Fotos A.6, A.7, A.8 e e A.9 do Anexo A mostram os corpos-de-prova ensaiados, o esquema de ensaio e os equipamentos utilizados para a realização deste.

Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de tecido de fibra de carbono revestidos com resina epóxi.

Corpos-de-prova	Carga P (kN)	Resistência f_{if} (MPa)	Módulo de Elasticidade E_f (MPa)
1	12.785	2556,98	193.933
2	11.700	2339,92	189.089
3	14.242	2848,49	203.602
4	11.157	2231,42	177.807
Média	12.471	2494,21	191.108

5.3.

Descrição das Vigas

5.3.1.

Características Mecânicas e Geométricas das Vigas

As sete vigas bi-apoiadas possuem comprimento total de $4,20\text{ m}$ e seção transversal retangular de $20\text{ cm} \times 40\text{ cm}$. Foram aplicadas duas cargas concentradas a 75 cm do centro da viga. O esquema de cálculo, a seção transversal, os diagramas de momento fletor e de força cortante, são mostrados nas Figuras 5.4 e 5.5.

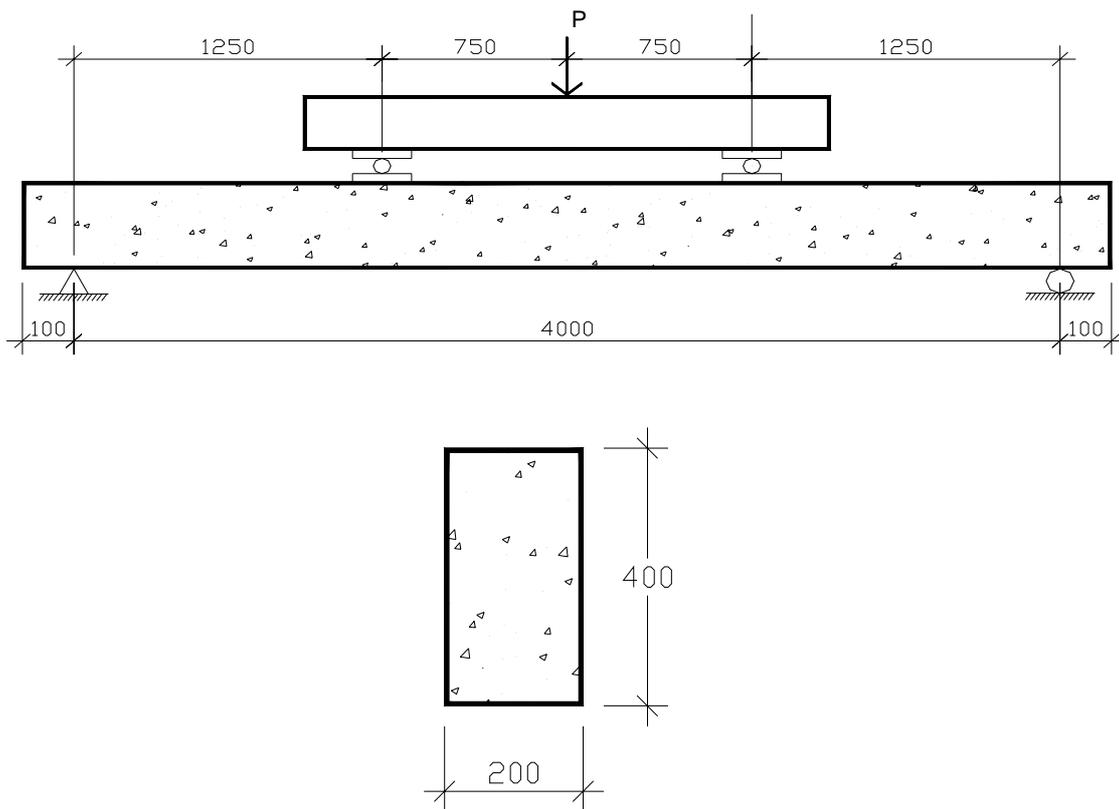
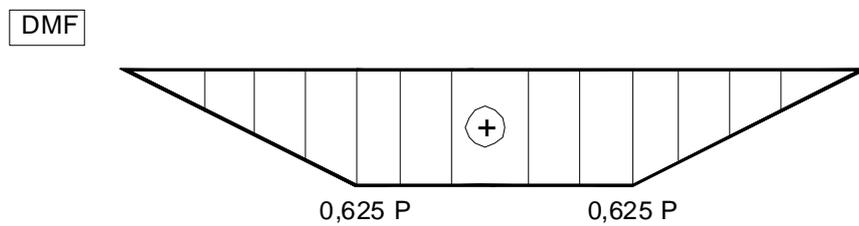
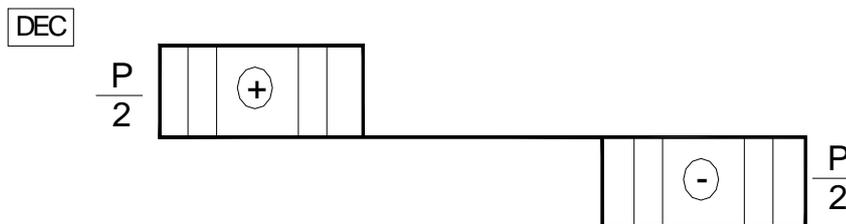


Figura 5.4- Esquema de carregamento e seção transversal das vigas (cotas em cm).



a)



b)

Figura 5.5 – Diagramas de esforços solicitantes das vigas; a) digrama de momento fletor; b) diagrama de força cortante.

5.3.2. Cálculos Básicos

Os parâmetros geométricos das vigas ensaiadas são:

- distância de aplicação da carga aplicada até o apoio $a = 1250 \text{ mm}$;
- altura útil da viga $d = 370 \text{ mm}$.

A relação $\frac{a}{d} = 3,37$ mostra que a ruptura por flexão é esperada.

A flecha teórica é dada por:

$$\delta = \frac{2Pa}{48 EJ} (3l^2 - 4a^2) \quad (5.5)$$

Com os dados do esquema dos ensaios resulta:

$$\delta = 2,175 \frac{P}{EJ} \times 10^9 \quad (5.6)$$

com a flecha em mm .

Os dados da seção transversal são:

- largura $b = 20 \text{ cm}$;
- altura $h = 40 \text{ cm}$.

Os parâmetros mecânicos básicos dos materiais são:

- resistência à compressão do concreto $f_c = 20 \text{ MPa}$;
- resistência de escoamento do aço $f_y = 500 \text{ MPa}$.

Esses valores foram usados para o dimensionamento prévio das vigas.

5.3.3. Dimensionamento à Flexão

O dimensionamento à flexão das vigas foi feito de acordo com a Nova Normalização Brasileira para o Concreto Estrutural. Seguindo-se:

$$\bar{K}_c = \frac{bd^2}{M} = 4,4 \quad (5.7)$$

donde

$$M = \frac{bd^2}{\bar{k}_c} = \frac{20 \times 37^2}{4,4} = 5891 \Rightarrow M = 58,91 \text{ kNm} \quad (5.8)$$

De acordo com a Tabela 1 da Nova Normalização Brasileira para o Concreto Estrutural (1999), para flexão simples em seção retangular-armadura simples, tem-se:

$$\bar{K}_s = \frac{A_s d}{M} = 0,026 \quad (5.9)$$

e para a armadura de flexão resulta:

$$A_s = \frac{0,026 \times 5891}{36} = 4,26 \text{ cm}^2 \quad (5.10)$$

A bitolagem da armadura de flexão fornece a seguinte armadura:

$$A_{s,ADOT} = 2\phi 12,5 + 2\phi 10 = 4,10 \text{ cm}^2 \quad (5.11)$$

Com o valor de M calculado anteriormente obtém-se a carga última:

$$P_u = \frac{58,91 \text{ kN}}{0,625} = 94,26 \text{ kN} \quad (5.12)$$

5.3.4. Dimensionamento à Força Cortante

Para o dimensionamento à força cortante, adotando-se a Treliça Clássica de Ritter-Mörsch, ou seja, $\theta = 45^\circ$, segue-se:

$$A_{Sw} = \frac{V}{zf_y} \quad (5.13)$$

com o braço de alavanca dado por :

$$z = 0,9d = 0,9 \times 37 \cong 33 \text{ cm} \quad (5.14)$$

resulta

$$A_{sw} = 3,68 \text{ cm}^2 / \text{cm} \tag{5.15}$$

Bitolando-se a armadura transversal tem-se $\phi 6,3$ cada 17,5.

A armadura transversal mínima é dada por:

$$a_{sw, \min} = 0,07\% d \times 100 = 2,52 \text{ cm}^2 / \text{m} \tag{5.16}$$

logo tem-se $\phi 6,3$ c25 , que é inferior à armadura transversal adotada.

A Figura 5.6 ilustra o detalhamento das armaduras das vigas.

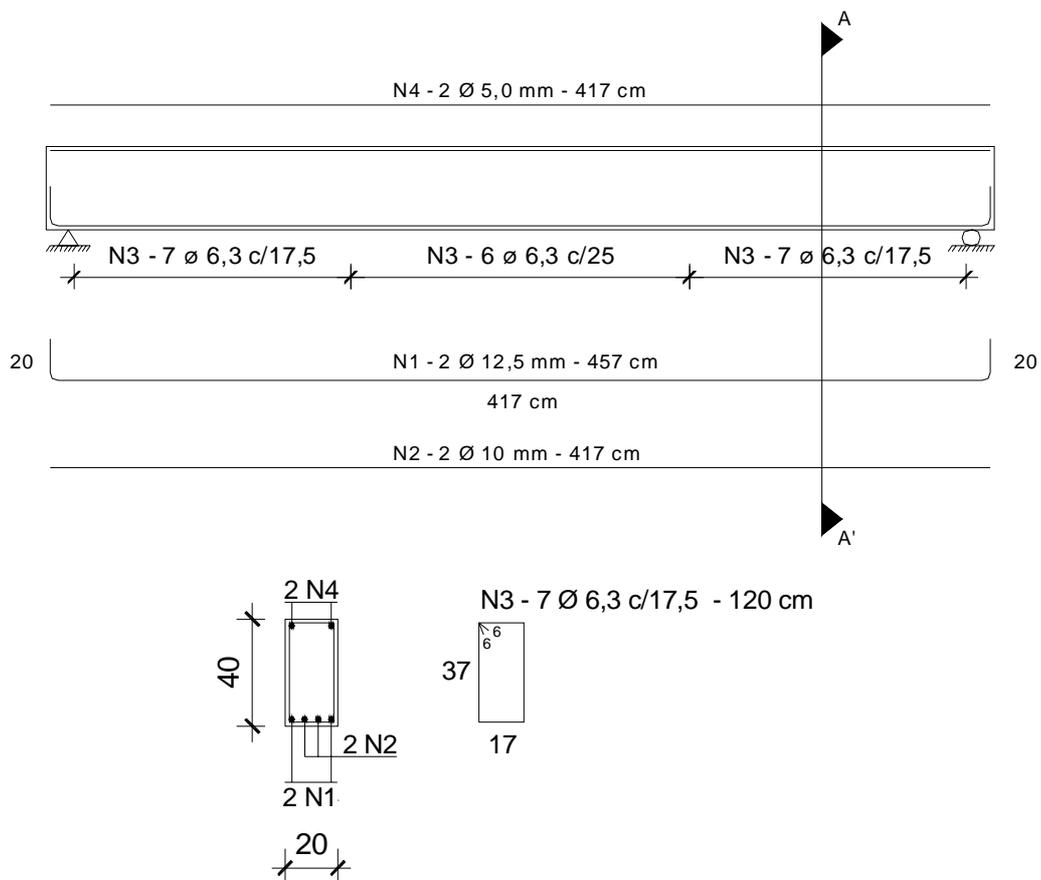


Figura 5.6 – Detalhamento das armaduras das vigas.

5.3.5. Reforço à Flexão

O reforço à flexão das vigas AI, BI-1 e BI-2 foi feito com uma camada de tecido de fibra de carbono cobrindo toda a largura da viga. As vigas AII, BII-1 e BII-2 receberam duas camadas de reforço com tecido de fibra de carbono com a metade da largura da viga. Em todas as vigas o tecido foi colocado ao longo do comprimento de $3,80\text{ m}$ da viga. Os detalhamentos das armaduras de reforços aplicados em todas as vigas são mostrados na Figura 5.7. São apresentados, na Tabela 5.8, os valores obtidos para a verificação proposta no item 2.5. deste trabalho, levando-se em conta todos os dados utilizados para as vigas ensaiadas. É necessário enfatizar que há uma aproximação na comparação desta verificação com os ensaios realizados em função da não consideração das deformações iniciais existentes nas vigas que receberam carregamento antes da aplicação do reforço.

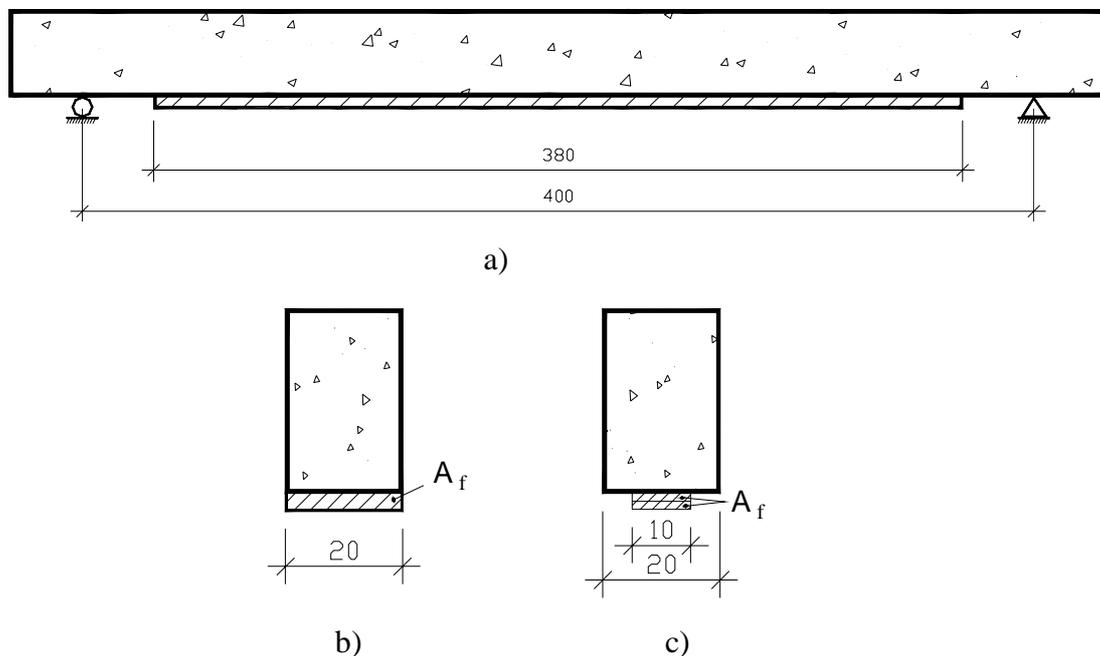
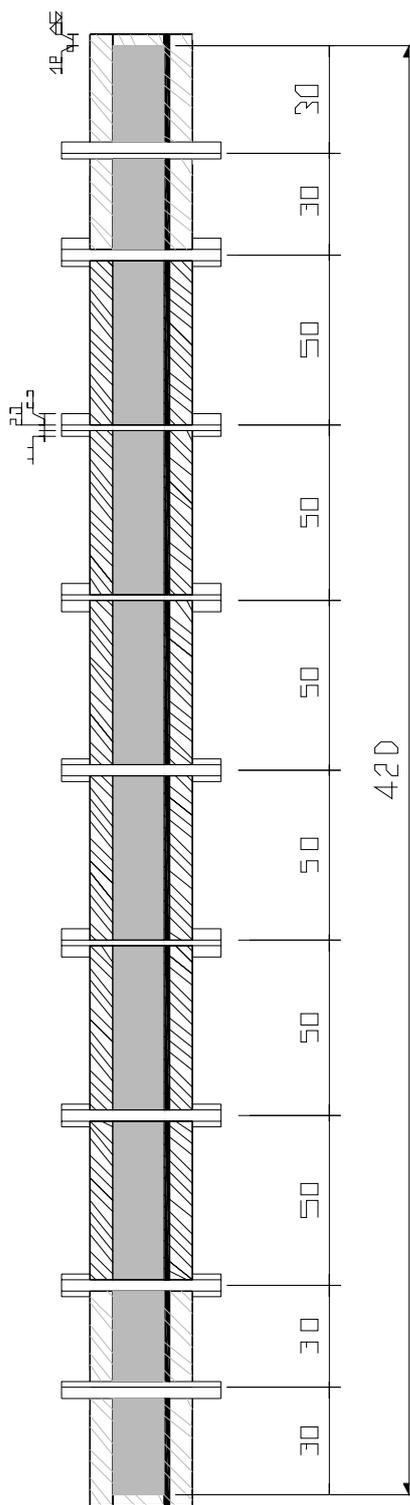


Figura 5.7 – Disposição do tecido de fibra de carbono; a) disposição ao longo do comprimento para todas as vigas; b) vigas AI, BI-1, BI-2; c) vigas AII, BII-1, BII-2. (cotas em cm)

Viga	d (mm)	ξ	f_c	f_y	f_s	β	α	α_s	A_s (mm ²)	A	L_s (cm)	W	k_x	S	f_l (MPa)	ω_f	M	$P_{f_{lim}}$
VR	370	0,03	27,10	533,12	5,541	0,133	0,174	0,174	3300	0,446	-	-	0,133	-	-	-	79,75	10,25
A	370	0,03	25,20	533,12	5,541	0,174	0,174	3300	0,446	1,91	0,01741	0,134	0,134	1,4	2,8421	0,035	10,82	13,31
A1	370	0,03	25,20	533,12	5,541	0,174	0,174	3300	0,446	1,91	0,01741	0,134	0,134	1,4	2,8421	0,035	10,82	13,31
B-1	370	0,03	27,10	533,12	5,541	0,132	0,132	3300	0,446	1,91	0,01619	0,131	0,131	1,4	2,8421	0,030	10,43	10,28
B-2	370	0,03	27,10	533,12	5,541	0,132	0,132	3300	0,446	1,91	0,01619	0,131	0,131	1,4	2,8421	0,030	10,43	10,28
B-1	370	0,03	25,50	533,12	5,541	0,147	0,147	3300	0,446	1,91	0,01657	0,134	0,134	1,4	2,8421	0,035	10,79	17,50
B-2	370	0,03	25,50	533,12	5,541	0,147	0,147	3300	0,446	1,91	0,01657	0,134	0,134	1,4	2,8421	0,035	10,79	17,50

Tabela 5.8 – Verificação do reforço à flexão.

Vista Lateral



Obs: cotas em cm.

Figura 5.10 – Detalhamento das formas – vista lateral.

5.4.2. Concretagem

O concreto foi misturado de forma a se obter $3m^3$ de material, num caminhão betoneira com capacidade de $8m^3$, e apresentou $100mm$ de abatimento do tronco de cone. Todas as vigas foram concretadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

Seu lançamento nas formas se deu de forma manual e demorou em torno de uma hora e meia até a última viga ser concretada. Durante e imediatamente após o lançamento do concreto nas formas, foi realizado o adensamento por meio de vibrador de imersão com diâmetro de $20mm$. Não foi realizado nenhum processo especial de cura.

As vigas foram desformadas após 15 dias de concretagem, e permaneceram em condições ambientes no laboratório, até as datas dos ensaios. (Foto A.15 do Anexo A).

5.4.3. Execução do Reforço

O sistema de aplicação do reforço por meio de tecidos de fibra de carbono é uma técnica bastante simples. Primeiramente o tecido foi cortado nas dimensões pré-determinadas. Em seguida, foi feita a preparação da superfície do substrato de concreto que recebeu o reforço. Nesta etapa a superfície do substrato foi limpa, deixando-a livre de qualquer resíduo ou poeira.

Com a superfície pronta para receber o reforço, realizou-se a imprimação do substrato. O primer é um epóxi que permite um alto poder de impregnação devido a sua baixa viscosidade. O objetivo da aplicação do primer é vedar os poros do concreto, promovendo a perfeita aderência entre a superfície de concreto e o sistema de reforço.

Após a imprimação, quando o ponto de visgo foi alcançado, aplicou-se a primeira camada de resina epóxi no concreto, e simultaneamente uma camada de resina no tecido que foi aplicado. Fez-se então a aplicação do tecido na estrutura, tentando-se retirar todo o ar aprisionado. Outra camada de resina foi aplicada sobre o tecido de fibra de carbono para finalizar a formação do compósito. (Foto A.23)

5.4.4. Instrumentação das Vigas

O comportamento estrutural das vigas foi acompanhado durante os ensaios por medições das deformações das armaduras longitudinal de tração e transversal, das deformações do reforço, das deformações do concreto, das flechas no meio do vão e nas duas seções de aplicação de carga.

5.4.4.1. Extensômetro Mecânico

A medição das deformações do concreto na seção do meio do vão foi feita com um extensômetro mecânico com base de medida de 100 mm e precisão de 0,001 mm. (Foto A.18)

A Figura 5.11 mostra a posição das placas de cobre coladas na superfície do concreto que serviram de base de medição. Os resultados obtidos para a deformação do concreto por meio da leitura do extensômetro são apresentados no Anexo C.

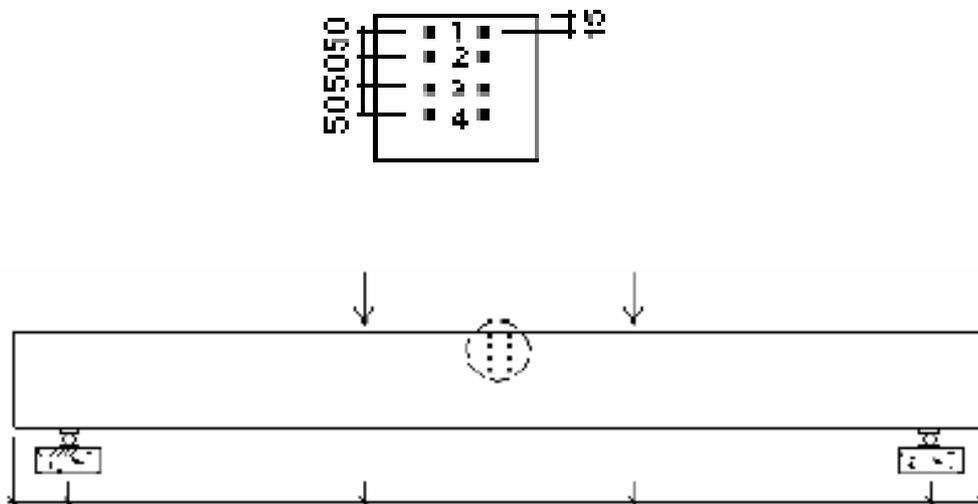


Figura 5.11 - Posicionamento das placas de alumínio para medição da deformação do concreto com deflectômetro mecânico. (cotas em cm).

5.4.4.2. Extensômetros Elétricos de Resistência

Foram utilizados extensômetros elétricos, com base de medição de 5 mm, para medir as deformações das armaduras longitudinal de tração e transversal, em todas as vigas, e das deformações da armadura de reforço nas vigas AI, AII, BI-1, BI-2, BII-1, BII-2.(Foto A.16 do Anexo A)

Em todas as vigas foram posicionados dois extensômetros na armadura transversal nas seções de aplicação de carga, e quatro extensômetros na armadura longitudinal, sendo dois no meio do vão, e um em cada seção de aplicação de carga. A Figura 5.12 mostra o posicionamento dos extensômetros elétricos na armadura das vigas.

Nas vigas reforçadas foram posicionados três extensômetros no reforço, sendo um na seção do meio do vão e os demais nas seções de aplicação de carga (Figura 5.12 e Foto A.17).

5.4.4.3. Deflectômetros Elétricos

As flechas da viga no meio do vão e nas duas seções de aplicação de carga, foram medidas por intermédio de três deflectômetros elétricos com os valores obtidos diretamente em mm. A posição dos deflectômetros é mostrada na Figura 5.12. Nas três primeiras vigas, VR, AI e AII os deflectômetros foram posicionados como mostrado na figura, sendo necessário sua retirada antes do término do ensaio, visando a preservação do equipamento, visto que não se sabia qual seria o comportamento destas durante o ensaio (Fotos A.19 do Anexo A). Nas demais vigas, os deflectômetros foram posicionados de forma a permitir a leitura das flechas até o fim do ensaio (Foto A.20 do Anexo A).

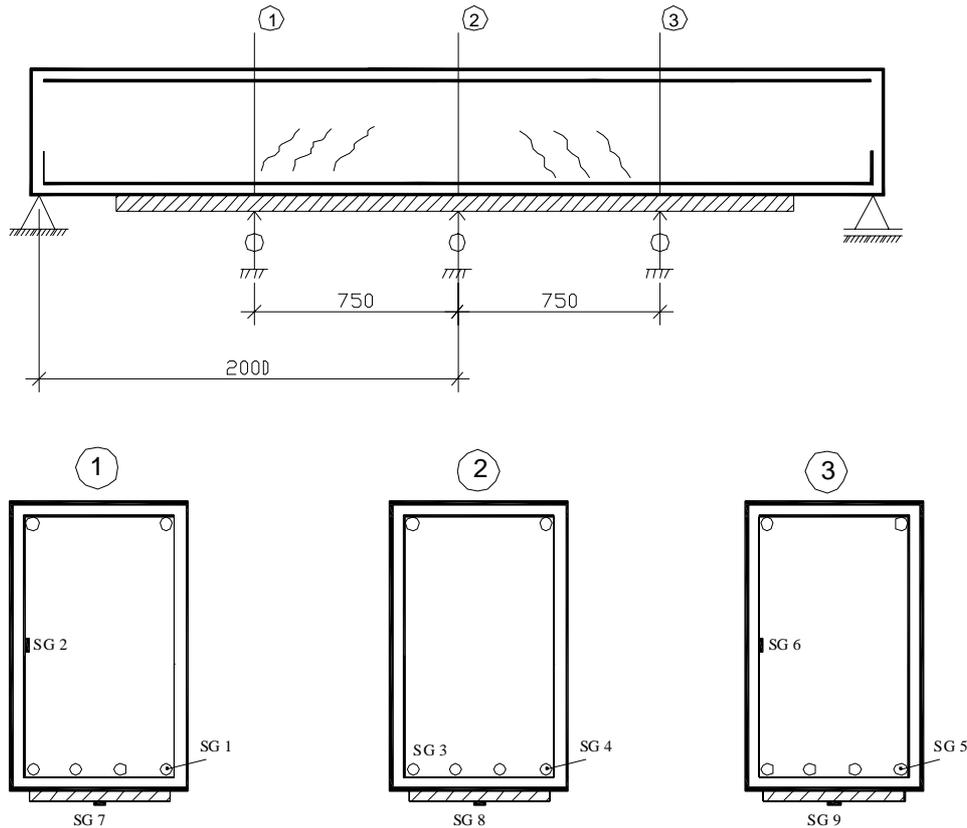
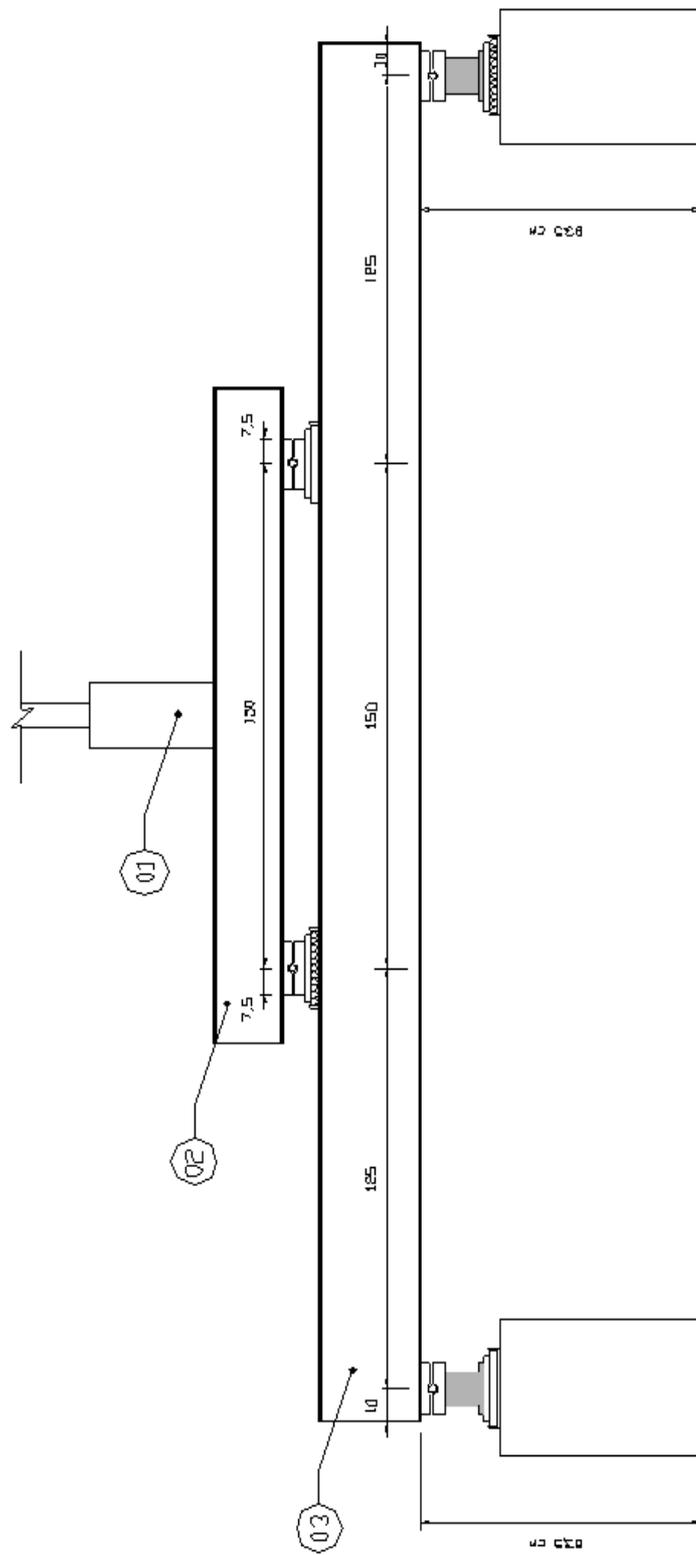


Figura 5.12 – Posicionamento dos defletores elétricos e dos extensômetros elétricos de resistência.

5.5. Execução dos Ensaios das Vigas

As vigas foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM). Foi montado um sistema de pórtico para a sustentação de um macaco hidráulico com capacidade de 1000 kN (Figura 5.13).

Para as vigas ensaiadas em duas etapas foi necessário interromper o ensaio e dar seqüência ao mesmo, somente seis ou sete dias depois, ou seja, apenas após o período de cura do reforço aplicado. Como não foi possível manter o equipamento de aplicação de carga ligado durante este período, foi montado um sistema de manutenção de deformação, que representasse a situação real em que havia sido interrompido o ensaio. Este sistema foi feito por meio de parafusos fixados nas regiões próximas às de aplicação de carga, que foram apertados para se alcançar uma determinada deformação na viga. Foi estabelecido que na etapa inicial a carga aplicada deveria corresponder a uma deformação específica da armadura longitudinal de 1,5 ‰ (Fotos A.21 e a.22).



- Legenda:
- 01 macaco de aplicação de carga
 - 02 viga metálica de distribuição de carga
 - 03 viga ensaiada

Obs: cotas em cm.

Figura 5.13- Sistema de aplicação de carga.

5.6. Descrição dos Ensaios

5.6.1. Viga de Referência

O ensaio da viga de referência foi realizado no dia 12/12/2003, sendo iniciado às 9 h: 45 min, e terminando às 13 h: 30 min. O incremento de carga inicial foi de 1 kN até se atingir a carga de fissuração aproximadamente igual a 30 kN e a partir desta carga por meio de incrementos iguais a 2 kN até a ruptura da viga. A carga de escoamento da armadura longitudinal foi de $96,05\text{ kN}$.

Com a carga de 140 kN foram observadas fissuras com abertura de até 1 mm . O Estado Limite Último da viga foi atingido por deformação excessiva do aço da armadura longitudinal, para uma carga de $141,54\text{ kN}$, configurando-se um comportamento dúctil.

De acordo com os resultados observados, determinou-se que os ensaios das demais vigas teriam sua primeira etapa finalizada para uma carga correspondente à deformação específica de $1,5\text{ ‰}$ da armadura longitudinal antes da aplicação do reforço, visto que, para essa magnitude de carga não foi observada a presença de fissuras com grandes aberturas.

A viga foi levada até a ruína, que ocorreu por compressão do concreto no meio do vão, para uma carga de $163,54\text{ kN}$. As Fotos A.24 e A.25 do Anexo A mostram detalhes da ruptura da VR. Os resultados do ensaio são apresentados de forma resumida na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Dados obtidos no ensaio da viga VR.

Estágios	Carga (kN)	Flecha (mm)	Deformação Específica do Aço (‰)
Fissuração	15,39	0,80	0,11
Escoamento	96,05	14,14	2,01
Ruptura	143,55	42,74	9,94

5.6.2. Viga AI

O ensaio da viga AI foi realizado no dia 21/01/2004, sendo iniciado às 14 h, e terminando às 16 h: 15 min. Esta viga foi inicialmente reforçada com uma camada de tecido de fibra de carbono de 20 cm de largura ao longo do comprimento de 3,80 m da viga. O objetivo desse ensaio é analisar o comportamento da viga já reforçada antes da aplicação do carregamento, buscando-se avaliar sua capacidade resistente e sua deformabilidade, e com esses dados obter a sua ductilidade.

Para a aplicação de carga foi utilizado o mesmo sistema utilizado na viga de referência. O reforço foi executado em várias etapas. Inicialmente foi feita uma limpeza na superfície de aplicação do reforço, e em seguida, aplicou-se o “primer”, que serve de ligação entre o concreto e a próxima camada. Cerca de três horas após a aplicação do “primer”, tempo necessário para se chegar ao ponto de viscosidade ideal da resina, aplicou-se a resina epóxi juntamente com o tecido. Esta última camada de resina possui a função de ligar o “primer” ao compósito de fibra de carbono, e de proteger o tecido. Após a aplicação do tecido foi necessário esperar seis dias, tempo esse indicado pela empresa que forneceu o material, para que o ensaio pudesse ser realizado.

O incremento de carga inicial foi de 2 kN até se atingir a carga de fissuração que foi 30,17 kN. Após esta carga, os incrementos foram de 10 kN até a ruptura da viga. A carga de escoamento da armadura longitudinal foi de 80,7 kN.

Neste ensaio não foram observadas grandes aberturas de fissuras, mas sim o surgimento de diversas fissuras com aberturas pequenas. Observou-se uma uniformidade no aparecimento das fissuras, que ocorreram em grande quantidade e com aberturas pequenas.

O Estado Limite Último da viga ocorreu por deformação excessiva da armadura longitudinal, para uma carga de 150,29 kN

A viga foi levada até a ruína, que ocorreu por ruptura do compósito de fibra de carbono entre o apoio e o ponto de aplicação de carga, seguido de desprendimento do cobrimento da armadura longitudinal, com ruptura explosiva, para uma carga de 187,34 kN. As Fotos A.26, A.27, A.28 e A.29 do Anexo A

mostram detalhes da ruptura da viga VAI. Os resultados do ensaio são apresentados de forma resumida na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Dados obtidos no ensaio da viga AI.

Estágios	Carga (<i>kN</i>)	Flecha (<i>mm</i>)	Deformação Específica do Aço (%)	Deformação Específica da Fibra (%)
Fissuração	21,88	1,81	0,31	0,22
Escoamento	80,70	11,98	1,99	1,71
Ruptura	187,34	52,61	19,68	11,02

5.6.3. Viga AII

O ensaio da viga AII foi realizado no dia 29/01/2004, sendo iniciado às 14 h, e terminando às 15 h: 20 min. Esta viga foi reforçada com duas camadas de tecido de fibra de carbono de 10 *cm* de largura ao longo do comprimento de 3,80 *m* antes do início do ensaio. Esta viga foi reforçada antes da aplicação do carregamento, buscando-se obter a ductilidade desta por meio da análise da sua capacidade resistente e das suas deformações.

Para a aplicação de carga foi utilizado o mesmo sistema utilizado na viga de referência. O reforço foi executado em várias etapas. Inicialmente foi feita uma limpeza na superfície de aplicação do reforço, e em seguida, aplicou-se o “primer”, que serviu de ligação entre o concreto e a próxima camada. Cerca de três horas após a aplicação do “primer”, tempo necessário para se chegar ao ponto de viscosidade ideal da resina, aplicou-se a resina epóxi juntamente com o tecido. Após duas horas aplicou-se a outra camada de tecido juntamente com a resina epóxi. Esta camada de resina possui a função de ligar o “primer” ao composto de fibra de carbono, e de proteger o tecido. Após a aplicação das duas camadas de tecido foi necessário esperar seis dias, tempo esse indicado pela empresa que forneceu o material, para que o ensaio pudesse ser realizado.

O incremento de carga inicial foi de 5 *kN* até se atingir a carga de fissuração que foi 25,10 *kN*. Após esta carga, os incrementos de carga foram de 10 *kN* até a ruptura da viga. A carga de escoamento da armadura longitudinal foi de 89,88 *kN*.

Neste ensaio não foram observadas grandes aberturas de fissuras, mas sim o surgimento de muitas fissuras com aberturas pequenas. Houve uma uniformidade no aparecimento das fissuras, que ocorreram em maior quantidade e com aberturas pequenas.

O Estado Limite Último da viga ocorreu por deformação excessiva da armadura longitudinal para uma carga de $159,97\text{ kN}$

A viga foi levada até a ruína, que ocorreu por ruptura do compósito de fibra de carbono para uma carga de $191,09\text{ kN}$, seguida de descolamento do tecido ao longo do substrato de concreto, com ruptura explosiva. As Fotos A.30, A.31, A.32 e A.33 do Anexo A mostram detalhes da ruptura da viga VAI. O resultados do ensaio são apresentados de forma resumida na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Dados obtidos no ensaio da viga All.

Estágios	Carga (kN)	Flecha (mm)	Deformação Específica do Aço (%)	Deformação Específica da Fibra (%)
Fissuração	15,35	0,77	0,06	0,064
Escoamento	89,88	12,53	1,99	2,03
Ruptura	191,09	36,63	17,22	11,05

5.6.4. Viga BI-1

A primeira parte do ensaio da viga BI-1 foi realizada no dia 04/02/2004, com o ensaio iniciado às 16 h: 15 min, e terminando às 16 h: 40 min. Inicialmente foi determinado que se chegaria a uma carga máxima de aplicação que correspondesse a deformação específica da armadura longitudinal igual a $1,5\%$. A partir dessa carga o ensaio foi interrompido temporariamente, e a deformação foi mantida para que assim se realizasse o reforço com o tecido de fibra de carbono. Foi necessário manter a deformação por seis dias, tempo esse necessário para a aplicação e cura do reforço. Foi desenvolvido um sistema de perfis para garantir uma deformação constante da viga.

A carga foi aplicada inicialmente em incrementos de 5 kN até se atingir 40 kN , possibilitando assim uma maior acomodação da viga ao sistema de carregamento, sendo que a carga de fissuração foi de $24,92\text{ kN}$. Em seguida a aplicação foi em incrementos de 10 kN . Quando a viga atingiu a carga de 60 kN ,

correspondente à deformação específica da armadura longitudinal igual a 1,5 ‰, o ensaio foi interrompido. O sistema de manutenção da deformação foi aplicado e a máquina desligada.

O reforço foi realizado logo após a paralisação do ensaio. Nesta viga foi utilizada uma camada de tecido de fibra de carbono de 20 cm de largura ao longo de 3,80 m do comprimento da viga. O reforço foi executado em várias etapas. Inicialmente foi feita uma limpeza na superfície de aplicação do reforço, em seguida, aplicou-se o “primer”, que serviu de ligação entre o concreto e a próxima camada. Cerca de três horas após a aplicação do “primer”, tempo necessário para se chegar ao ponto de viscosidade ideal da resina, aplicou-se a resina epóxi juntamente com o tecido. Esta última camada de resina tem a função de ligar o “primer” ao compósito de fibra de carbono, e de proteger o tecido. Seis dias após a aplicação do sistema de reforço, tempo esse indicado pela empresa que forneceu o material, como o mínimo necessário para a aplicação de carga, o ensaio foi reiniciado.

O ensaio foi reiniciado no dia 10 /02 /2004 às 10 h: 15 min e terminando às 11h: 30 min. O incremento de carga foi de 10 kN e a carga de escoamento da armadura longitudinal foi de 84,95 kN .

Neste ensaio não foram observadas grandes aberturas de fissuras, mas observou-se uma uniformidade no aparecimento das fissuras.

O Estado Limite Último da viga ocorreu por deformação excessiva da armadura longitudinal, para uma carga de 155,39 kN .

A viga foi levada até a ruína, que ocorreu por ruptura do compósito de fibra de carbono, seguido de desprendimento do cobrimento da armadura longitudinal, com ruptura explosiva para uma carga de 199,13 kN . As Fotos A.34, A.35, A.36 e A.37 do Anexo A mostram detalhes da ruptura da viga BI-1. Os resultados do ensaio são apresentados de forma resumida na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Dados obtidos no ensaio da viga BI -1.

Estágios	Carga (kN)	Flecha (mm)	Deformação Específica do Aço (‰)	Deformação Específica da Fibra (‰)
Fissuração	20,59	1,43	0,24	-
Escoamento	74,25	11,27	2,03	0,42
Ruptura	199,13	77,50	19,80	11,52

5.6.5. Viga BI-2

A primeira parte do ensaio da viga BI-2 foi realizada no dia 01/03/2004, com o ensaio iniciado às 11 h: 45 min, e terminando às 12 h:15 min. Foi determinado, como na viga BI-1, que se chegaria a uma carga máxima de aplicação que correspondesse a deformação específica da armadura longitudinal igual a 1,5 ‰ . Nessa carga, o ensaio foi interrompido temporariamente, e a deformação alcançada mantida para que se realizasse o reforço com o tecido de fibra de carbono. A deformação foi mantida por sete dias, tempo esse necessário para a aplicação e cura do reforço. Para garantir uma constante deformação da viga, mesmo depois que se desligasse a máquina de aplicação de cargas, foi utilizado o mesmo sistema de perfis da viga BI-1. Esse sistema consistia de perfis que passaram a realizar a transmissão da carga sobre a viga.

A carga foi aplicada inicialmente em incrementos de $5kN$ até se atingir $40kN$ possibilitando assim uma maior acomodação da viga ao sistema de carregamento, sendo que a carga de fissuração foi de $23,91kN$. Quando a viga atingiu a carga de $55kN$, correspondente a deformação específica da armadura longitudinal igual a 1,5‰, o ensaio foi interrompido. O sistema de manutenção de deformação foi aplicado e a máquina desligada.

O reforço foi realizado logo após a paralisação do ensaio. Nesta viga foi utilizada uma camada de tecido de fibra de carbono de $20cm$ de largura ao longo de $3,80m$ do comprimento da viga. O reforço foi executado em várias etapas, como na viga BI-1.

O ensaio foi reiniciado no dia 08 /03 /2004 às 14 h: 10 min e terminando às 15h: 10 min. O incremento de carga foi de $10kN$ e a carga de escoamento da armadura longitudinal foi de $75,47kN$.

O Estado Limite Último da viga ocorreu por deformação excessiva da armadura longitudinal, para uma carga de $124,88kN$.

A viga foi levada até a ruína, que ocorreu por ruptura do compósito de fibra de carbono na parte central da viga, seguido de desprendimento do cobrimento da armadura longitudinal, com ruptura explosiva para uma carga de $145,33kN$. As

Fotos A.38, A.39, A.40 e A.41 do Anexo A mostram detalhes da ruptura da viga BI-2. Os resultados do ensaio são apresentados de forma resumida na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Dados obtidos no ensaio da viga BI-2.

Estágios	Carga (<i>kN</i>)	Flecha (<i>mm</i>)	Deformação Específica do Aço (%)	Deformação Específica da Fibra (%)
Fissuração	16,63	1,15	0,32	-
Escoamento	75,47	13,12	2,13	0,703
Ruptura	145,33	68,78	15,11	9,68

5.6.6. Viga BII-1

A primeira parte do ensaio da viga BII-1 foi realizada no dia 16/03/2004, com o ensaio iniciado às 10 h: 50 min, e terminando às 11 h: 20 min. Foi determinado, como na viga BI-1, que se chegaria a uma carga máxima de aplicação que correspondesse a deformação específica da armadura longitudinal igual a 1,5 %. Nessa carga, o ensaio foi interrompido temporariamente, e a deformação alcançada mantida para que se realizasse o reforço com o compósito de fibra de carbono. A carga aplicada foi mantida por sete dias, tempo esse necessário para a aplicação e cura do reforço. Para garantir uma constante deformação da viga, mesmo depois que se desligasse a máquina de aplicação de cargas, foi utilizado o mesmo sistema de perfis da viga BI-1.

A carga foi aplicada inicialmente em incrementos de $5kN$ até se atingir $40kN$, possibilitando assim uma maior acomodação da viga ao sistema de carregamento, sendo que a carga de fissuração foi de $21,47kN$. Quando a viga atingiu a carga de $58kN$, correspondente à deformação específica na armadura longitudinal igual a 1,5 %, o ensaio foi interrompido. O sistema de manutenção de deformação foi aplicado e a máquina desligada.

O reforço foi realizado logo após a paralisação do ensaio. Esta viga foi reforçada com duas camadas de tecido de fibra de carbono de $10cm$ de largura ao longo do comprimento de $3,80m$ antes do início do ensaio. O reforço foi executado em várias etapas. Inicialmente foi feita uma limpeza na superfície de aplicação do reforço, em seguida, aplicou-se o “primer”, que serviu de ligação entre o concreto e a próxima camada. Cerca de três horas após a aplicação do

“primer”, tempo necessário para se chegar ao ponto de viscosidade ideal da resina, aplicou-se a resina epóxi juntamente com o tecido. Após duas horas, aplicou-se a outra camada de tecido juntamente com a resina epóxi. Esta camada de resina possui a função de ligar o “primer” ao compósito de fibra de carbono, e de proteger o tecido. Seis dias após a aplicação do sistema de reforço, tempo esse indicado pela empresa que forneceu o material como o mínimo necessário para a aplicação de carga, o ensaio foi reiniciado.

O ensaio foi reiniciado no dia 22 /03 /2004 às 10 h: 40 min e terminando às 11h: 30 min. O incremento de carga foi de 10 *kN* e a carga de escoamento da armadura longitudinal foi de 75,38 *kN*.

O Estado Limite Último da viga ocorreu por deformação excessiva da armadura longitudinal, para uma carga de 130,01 *kN*.

A viga foi levada até a ruína, que ocorreu por flexão seguida de descolamento do compósito de fibra de carbono ao longo de grande parte do comprimento da viga, com ruptura para uma carga de 165,86 *kN*. As Fotos A.42, A.43 e A.44 do Anexo A mostram detalhes da ruptura da viga BII-1. Os resultados do ensaio são apresentados de forma resumida na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Dados obtidos no ensaio da viga BII-1.

Estágios	Carga (<i>kN</i>)	Flecha (<i>mm</i>)	Deformação Específica do Aço (%)	Deformação Específica da Fibra (%)
Fissuração	15,86	0,805	0,15	-
Escoamento	75,38	12,27	2,05	0,41
Ruptura	165,86	66,87	18,09	9,98

5.6.7. Viga BII-2

A primeira parte do ensaio da viga BII-2 foi realizada no dia 29/03/2004, com o ensaio iniciado às 10 h : 35 min, e terminando às 11 h. Foi determinado, como na BI-1, que se chegaria a uma carga máxima de aplicação que correspondesse a deformação específica da armadura longitudinal igual a 1,5 %. Nessa carga o ensaio foi interrompido temporariamente, e a deformação alcançada mantida para que se realizasse o reforço com tecido de fibra de carbono. A carga aplicada foi mantida por sete dias, tempo esse necessário para a aplicação e cura

do reforço. Para garantir uma constante deformação da viga, mesmo depois que se desligasse a máquina de aplicação de cargas, foi utilizado o mesmo sistema de perfis da viga BI-1.

A carga foi aplicada inicialmente em incrementos de 5 kN até se atingir 40 kN , possibilitando assim uma maior acomodação da viga ao sistema de carregamento, sendo que a carga de fissuração foi de $25,77\text{ kN}$. Quando a viga atingiu a carga de 61 kN , correspondente à deformação específica da armadura longitudinal igual a $1,5\%$, o ensaio foi interrompido. O sistema de manutenção de deformação foi aplicado e a máquina desligada.

O reforço foi realizado logo após a paralisação do ensaio. Esta viga foi reforçada com duas camadas de tecido de fibra de carbono de 10 cm de largura ao longo do comprimento de $3,80\text{ m}$ antes do início do ensaio. O reforço foi executado em várias etapas, como na viga BII-1.

O ensaio foi reiniciado no dia 06 /04 /2004 às 14 h: 15 min e terminando às 15h: 10 min. O incremento de carga foi de 10 kN , e a carga de escoamento da armadura longitudinal foi de $60,23\text{ kN}$.

O Estado Limite Último da viga ocorreu por deformação excessiva da armadura longitudinal, para uma carga de $120,12\text{ kN}$.

A viga foi levada até a ruína, que ocorreu por flexão seguida da ruptura do tecido de fibra de carbono, com ruptura para uma carga de $152,16\text{ kN}$. As Fotos A.45 e A.46 do Anexo A mostram detalhes da ruptura da viga BII-2. Os resultados do ensaio são apresentados de forma resumida na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Dados obtidos no ensaio da viga BII-2.

Estágios	Carga (kN)	Flecha (mm)	Deformação Específica do Aço (%)	Deformação Específica da Fibra (%)
Fissuração	20,16	0,943	0,09	-
Escoamento	60,23	12,79	2,12	0,65
Ruptura	152,16	67,53	18,18	9,56