## 7.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas as características e as propriedades dos materiais utilizados na confecção das vigas do programa experimental, as dimensões destas vigas, o esquema de ensaio à torção, os dados sobre a concretagem, a instrumentação, os sistemas de aplicação de torção, a descrição das etapas de aplicação do reforço, além de todas as etapas dos ensaios.

## 7.2. Ensaios de Caracterização dos Materiais

## 7.2.1. Tecido de Fibras de Carbono

O sistema de reforço com compósitos de fibras de carbono utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela Sika. Este sistema é composto por tecido de fibras de carbono SIKAWRAP<sup>®</sup>-230 C e adesivo epóxi de média viscosidade (tixotrópico), e bicomponente de pega normal SIKADUR<sup>®</sup>300 (Sika, 2005).

As propriedades segundo o manual do fabricante são:

#### a) SIKAWRAP<sup>®</sup>-230 C

- Base: tecido de fibras de carbono unidirecional.
- Cor: preta.
- Conteúdo de fibras em volume: 99%.
- Densidade: 1,78 g/cm<sup>3</sup>.
- Peso: 220 g/m<sup>2</sup>.
- Temperatura máxima de serviço: +50 °C.
- Dimensão: 30 cm de largura por 50 m de comprimento.
- Espessura: 0,122 mm.
- Módulo de elasticidade: 230 GPa.
- Resistência à tração 4.100 MPa.

• Deformação específica máxima 1,7%.

Obs.: as propriedades mecânicas correspondem à direção longitudinal.

- b) SIKADUR<sup>®</sup> 330
  - Cor (componente A): branco.
  - Cor (componente B): cinza escuro.
  - Mistura (A+B): cinza.
  - Relação em peso (A+B): 4:1
  - Vida útil da mistura (*Pot-Life*): 40 minutos (25 ℃/50% UR).

O consumo de adesivo epóxi SIKADUR<sup>®</sup> 330 recomendado pelo fabricante é de:

- 0,7 a 1,2 kg/m<sup>2</sup> para a camada de impregnação do substrato de concreto;
- 0,5 kg/m<sup>2</sup> para a camada de proteção.

Para a caracterização das propriedades mecânicas do reforço de CFC utilizado nesta pesquisa foram realizados ensaios seguindo-se as recomendações da ASTM D3039/3039M *Standard Test Method for Tensile Properties of Matrix Composite Material* (2000), que especifica os procedimentos para a determinação da resistência à tração e o módulo de elasticidade do CFC.

A ASTM D3039/3039M propõe as dimensões mínimas necessárias para que o corpo-de-prova a ser ensaiado tenha um número suficiente de fibras em sua seção transversal que represente suas características (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 – Dimensões recomendadas pela ASTM D3039/3039M para ensaios em CFC.

Orientação das fibras	Largura (mm)	Compr. (mm)	Espessura (mm)	Compr. da aba (mm)	Espessura da aba (mm)	Ângulo da aba (°)
0° unidir.	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° unidir.	25	175	2,0	25	1,5	90
Fios descon.	25	250	2,5	_	_	_

Oito corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibras de carbono revestidos com resina epóxi com dimensões de 15 mm de largura e 250 mm de comprimento foram ensaiados à tração (Figura 7.1 e 7.2).



Figura 7.1 – Dimensões dos corpos-de-prova de CFC ensaiados (dimensões em mm).

Os corpos-de-prova foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência para a leitura da deformação específica do CFC durante a realização dos ensaios, permitindo desta forma a determinação do módulo de elasticidade e da deformação última do CFC, e o traçado do diagrama tensão-deformação específica.



Figura 7.2 – Corpos-de-prova de CFC.

Os ensaios foram realizados na máquina MTS do Laboratório de Fadiga do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, com capacidade de carga de 250 *kN* (Figura 7.3).

A velocidade de ensaio foi realizada por controle de deslocamento de 2 mm/min, atendendo à recomendação da ASTM D3039/3039M.



Figura 7.3 – Realização dos ensaios dos corpos-de-prova de CFC.

Durante a realização dos ensaios, as leituras referentes ao corpo-de-prova número 2 foram perdidas, devido a problemas de configuração no programa responsável pela aquisição de dados. A Tabela 7.2 apresenta os resultados obtidos de força de ruptura, tensão de ruptura, deformação específica última e módulo de elasticidade *E<sub>f</sub>*.

	F <sub>u</sub> (kN)	Tensão (MPa)	€ <sub>fu</sub> (‰)	E <sub>f</sub> (MPa)
CP1	6,206	3391,29	12,091	281778
CP3	5,961	3257,87	12,778	256946
CP4	6,094	3329,89	13,465	248086
CP5	6,616	3615,41	14,437	254301
CP6	6,943	3794,19	15,113	252850
CP7	6,177	3375,28	13,324	253624
CP8	6,045	3303,24	12,822	258570
Média	6,292	3438,17	13,433	258022
DP	3,56	194,40	1,037	10988
CV	5,65%	5,65%	7,72%	4,26%

Tabela 7.2 – Resultados dos ensaios dos corpos-de-prova de CFC.

A Figura 7.4 apresenta os diagramas tensão-deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.



Figura 7.4 – Diagrama tensão-deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.

#### 7.2.2. Aço

O aço utilizado para armar as vigas foi do tipo CA 50 fabricado pela Gerdau. Para a determinação das propriedades mecânicas do aço, foram realizados em laboratório ensaios de resistência à tração, do módulo de elasticidade, e foi traçado o diagrama tensão-deformação específica.

Foram ensaiados à tração seis corpos-de-prova no Laboratório de Fadiga do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, de acordo com a NBR-6152 (1980). As amostras do aço, três de  $\phi$ 10 mm e três de  $\phi$ 12,5 mm, foram ensaiadas na máquina MTS, com capacidade de 250 *kN* (Figura 7.5).

A Tabela 7.3 mostra os resultados das tensões de escoamento e de ruptura dos ensaios realizados, e as Figuras 7.6 e 7.7 apresentam os diagramas tensão-deformação específica. A deformação específica de escoamento  $\varepsilon_y$  foi de 2‰ e a deformação específica última  $\varepsilon_{su}$  foi maior que 10‰.



Figura 7.5 – Ensaio das barras de aço.

Tabela 7.3 – Resultados dos ensaios das amostras de aço.

	AMOSTRA	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (GPa)
φ10	CP 1	578,18	743,43	182,36
	CP 2	563,63	736,09	187,21
	CP 3	559,53	738,70	183,36
	Média	567,11	739,407	184,31
	Desvio Padrão	9,80	3,72	2,56
	Coef. Variação	1,73%	0,50%	1,39%
	CP 1	610,12	734,26	181,41
¢12.5	CP 2	627,94	748,90	178,47
	CP 3	599,93	726,70	176,49
	Média	612,66	736,62	178,79
	Desvio Padrão	14,18	11,29	2,48
	Coef. Variação	2,31%	1,53%	1,38%



Figura 7.6 – Diagrama tensão deformação específica do aço –  $\phi 10 mm$ .



Figura 7.7 – Diagrama tensão deformação específica do aço –  $\phi$ 12,5 mm.

## 7.2.3. Concreto

O concreto das sete vigas do programa experimental foi fornecido pela empresa LAFARGE BRASIL S/A. A concretagem foi executada no dia 16 de dezembro de 2004 e durou aproximadamente 1 h : 45 min. O concreto fornecido pela empresa foi dosado para atingir a resistência de 30 *MPa* aos 28 dias.

Para o preparo do concreto foi utilizado Cimento Portland de Alto Forno CP III 40 RS fabricado pela MAÚA. O concreto foi misturado de forma a se obter  $4 \text{ m}^3$  de material num caminhão betoneira com capacidade de  $8 \text{ m}^3$ , e apresentou 10 cm de abatimento do tronco de cone. O consumo de materiais necessários por m<sup>3</sup> de concreto é apresentado na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Consumo de materiais por  $m^3$  de concreto.

Material	Quantidade
Cimento	323 <i>kg/m³</i>
Brita 1 (Britabrás)	996 k $g/m^3$
Areia natural quartsosa (Areminas areia)	492 k $g/m^3$
Areia artificial de granito (Britabrás)	338 k $g/m^3$
Água	188 <i>l</i>
Aditivo Chrysoplast 213 (Chryso)	0,969 <i>l</i>

Este consumo é equivalente ao traço 1:2,57:3,08, com fator águacimento de 0,582 e 52,3% de argamassa.

## 7.2.3.1. Resistência à Compressão

Para o controle tecnológico do concreto utilizado nas vigas foram moldados durante a concretagem 30 corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm × 20 cm, e 20 corpos-de-prova com dimensões de 15 cm × 30 cm, de acordo com as recomendações da NBR-5738 (1993).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 7 dias, 28 dias e nos dias de ensaios das vigas, seguindo-se as recomendações da NBR-5739 (1993). Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na prensa CONTENCO, com capacidade de 2400 *kN*, do Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio. O concreto atingiu em média 29,7 *MPa* após 28 dias da concretagem, valor superior à resistência de dosagem.

Como as vigas foram ensaiadas com idades do concreto bem avançadas, mais de 300 dias, foi considerado o mesmo valor de  $f_{cm}$ .

Os valores médios da resistência à compressão do concreto são mostrados na Tabela 7.5.

Vice	Idada	Número de	Resistência
viga	luaue	Corpos-de-Prova	(MPa)
_	7 dias	3	21,7
-	28 dias	3	29,7
Vigas	> 300 dias	18	36,6

Tabela 7.5 – Valores médios da resistência à compressão do concreto.

A evolução da resistência à compressão do concreto é mostrada na Figura 7.7.



Figura 7.8 – Variação da resistência média à compressão do concreto para diferentes idades.

#### 7.2.3.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos

A determinação da resistência à tração do concreto utilizado na construção das vigas foi realizada seguindo-se as recomendações da NBR-7222/1994 Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

Segundo a NBR 7122/1994, a resistência à tração do concreto por compressão diametral é determinada pela expressão 7.1:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi dL}$$
(7.1)

- F é a força máxima aplicada;
- d é o diâmetro do corpo-de-prova;
- L é a altura do corpo-de-prova.

No total foram ensaiados seis corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm. A resistência média à tração foi de 3,01 MPa, o desvio padrão de 0,14 e o coeficiente de variação de 4,70% (Tabela 7.6 e Figura 7.9).

Tabela 7.6	<ul> <li>Resultados do</li> </ul>	s ensaios o	de resistê	ncia a	à tração	por com	pressão	diametral.
			-					-

Corpo-de-prova	Força máxima	$f_{t,D}$	
Corpo-de-prova	(kN)	(MPa)	
1	92,56	2,95	
2	98,60	3,14	
3	96,06	3,06	
4	99,03	3,15	
5	86,89	2,77	
6	95,38	3,04	
Média	94,76	3,01	
Desvio padrão	4,51	0,14	
Coef. de variação	4,76%	4,70%	



Figura 7.9 – Ensaio de determinação da resistência à tração do concreto por compressão diametral.

## 7.2.3.3. Módulo de Elasticidade e Diagrama Tensão-Deformação Específica

A determinação do módulo de elasticidade secante do concreto foi realizada seguindo-se as recomendações da NBR 8522 (1984) – Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama – Tensão-Deformação.

Adotou-se o plano de carga 3 da NBR 8522 (1984) que simula a estrutura em seu primeiro carregamento, e que fornece o módulo de deformação secante e permite o traçado do diagrama tensão-deformação específica.

No total foram ensaiados três corpos-de-prova, instrumentados com dois extensômetros elétricos de resistência colados a meia altura em lados opostos.

Inicialmente foi executada a centragem do corpo-de-prova, por meio de um pré-carregamento de até 10% da força prevista de ruptura, para que as deformações específicas lidas nos extensômetros fossem compatibilizadas, de modo que essas deformações não apresentassem desvios superiores a 20% da maior leitura. A previsão da força de ruptura foi obtida por meio de ensaios preliminares de resistência à compressão em outros três corpos-de-prova (Figura 7.10).



Figura 7.10 - Ensaio de módulo de elasticidade do concreto.

Após a centragem do corpo-de-prova, foi aplicado um carregamento crescente à velocidade de 0,50 MPa/s, com variação máxima de  $\pm$  0,05 MPa,

efetuando-se pausas de 60 a 120 segundos entre cada estágio de carregamento.

De acordo com a NBR 8522 (1984) foram realizadas nove leituras, sendo que a leitura inicial  $\ell_0$  refere-se a  $\sigma_{inf} = 0,5$  MPa. A leitura seguinte,  $\ell_{0,1}$ , é referente a  $0,1f_c$ . As demais,  $\ell_{0,2}$ ,  $\ell_{0,3}$ ,  $\ell_{0,4}$ ,  $\ell_{0,5}$ ,  $\ell_{0,6}$ ,  $\ell_{0,7}$  e  $\ell_{0,8}$  foram realizadas a cada incremento de  $0,1f_c$ .

Após a leitura  $\ell_{0,8}$  prosseguiu-se o carregamento do corpo-de-prova à velocidade de 0,5 MPa/s até a sua ruptura.

O módulo de deformação secante em cada leitura é dada por:

$$\mathsf{E}_{\mathsf{sec},\mathsf{n}} = \frac{\sigma_{\mathsf{n}} - \sigma_{\mathsf{inf}}}{\varepsilon_{\mathsf{n}} - \varepsilon_{\mathsf{0}}}$$
7.2

onde

 $E_{sec,n}$  – é o módulo de deformação secante correspondente à inclinação da reta unindo os pontos do diagrama tensão-deformação específica relativos às tensões  $\sigma_{inf}$  =0,5 MPa e  $\sigma_n$ ;

 $\varepsilon_n$  – deformação específica para o cálculo do módulo secante;

n - 0,1 ... 0,7 ou 0,8;

 $\varepsilon_0$  – deformação específica correspondente à leitura  $\ell_0$ ;

A Tabela 7.7 mostra os resultados dos ensaios em três corpos-de-prova. São apresentados a força máxima, a tensão máxima, a deformação específica média máxima, e o módulo de elasticidade secante referente a uma tensão de 0,3 f<sub>c</sub>.

Tabela 7.7 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

Corpo-de-prova	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	– E <sub>c,máx</sub> (‰)	E <sub>sec,0,3</sub> (MPa)
1	643,2	36,4	2,459	23418,5
2	682,1	38,6	2,599	24261,9
3	646,8	36,6	2,484	26240,3
Média	657,4	37,2	2,514	24640,3
Desvio padrão	21,50	1,22	0,075	1448,5
Coef. de variação	3,27%	3,27%	2,97%	5,88%

Os resultados foram considerados válidos, pois a resistência à compressão máxima obtida para cada corpo-de-prova não diferiu em mais de 20% da resistência prevista  $f_c$ .

As Figuras 7.11, 7.12 e 7.13 apresentam os diagramas tensão-deformação específica dos corpos-de-prova ensaiados. As curvas mostradas referem-se aos dois extensômetros elétricos de resistência colados na superfície de cada corpode-prova.



Figura 7.11 - Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 1.



Figura 7.12 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 2.



Figura 7.13 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 3.

#### 7.3. Descrição das Vigas

Para a realização do programa experimental foram construídas sete vigas de concreto armado, todas com a mesma armadura e concreto com a mesma resistência à compressão.

As vigas foram divididas em três séries, sendo uma viga de referência, três vigas com reforço transversal e três vigas com reforço transversal e longitudinal. O esquema mostrado na Figura 7.14 apresenta de maneira sucinta a forma como foram divididas as séries de vigas.



Figura 7.14 – Fluxograma mostrando as séries de vigas.

O código de cada série significa:

- VRef Viga de Concreto Armado de Referência;
- VT Viga de Concreto Armado com Reforço Transversal;
- VTL Viga de Concreto Armado com Reforço Transversal e Longitudinal.

A numeração após cada codificação indica o número da viga dentro de sua série.

## 7.3.1. Características Geométricas

## 7.3.1.1. Viga de Referência VR

Todas as vigas tinham seção transversal de 20 cm de largura e 40 cm de altura, e comprimento total de 420 cm (Figura 7.15).





A armadura longitudinal das vigas foi composta por 6 \u00e912,5 mm CA 50, distribuídas ao longo do perímetro da seção transversal.

Para a armadura transversal foram utilizadas barras de aço de  $\phi 10$  mm CA 50. A disposição da armadura transversal na viga foi dividida em três trechos.

Os trechos extremos próximos aos apoios tinham armadura mais densa, com espaçamento de 7,5 cm entre cada estribo. Este procedimento foi adotado para se evitar a ruptura do concreto devido à introdução da solicitação de torção nessas regiões, o que ocasiona uma concentração de tensões. Na região central o espaçamento da armadura transversal foi de 15 cm. Esses detalhes são mostrados nas Figura 7.16 e 7.17.



Figura 7.16 - Detalhamento da armadura longitudinal.



Figura 7.17 – Detalhamento da armadura na seção transversal.

#### 7.3.1.2. Série VT

As três vigas com reforço transversal, denominadas VT1, VT2 e VT3, tinham além das armaduras longitudinais e transversais da viga de referência, estribos de tecidos de fibra de carbono com 15 *cm* de largura espaçados de 30 cm, e aplicados em duas camadas (Figura 7.18). Os estribos de tecido de fibra de carbono envolveram totalmente a viga com um traspasse de 10 *cm*, para que o CFC fosse ancorado de forma eficiente.



Figura 7.18 – Viga de concreto armado com reforço transversal.

#### 7.3.1.3. Série VTL

As três vigas com reforço longitudinal e transversal da série VTL foram reforçadas por meio da aplicação de CFC nas suas faces laterais, sendo o reforço constituído por fibras orientadas no sentido longitudinal, envolvidas por estribos de CFC com 15 cm de largura e espaçados de 30 cm. O reforço longitudinal foi aplicado nos quatro cantos da viga, sendo que cada faixa de reforço tinha 15 *cm* de largura e 315 *cm* de comprimento, cobrindo 5 *cm* das faces superior e inferior e 10 *cm* nas laterais (Figura 7.19).

As vigas dessa série tinham a mesma armadura longitudinal e transversal da viga de referência.



Figura 7.19 – Viga de concreto armado com reforço transversal e longitudinal.

## 7.3.2. Instrumentação das Vigas

As vigas foram instrumentadas por meio da colagem de extensômetros elétricos e pinos metálicos para leitura das deformações específicas nas seções selecionadas. Para o acompanhamento da evolução da rotação das vigas utilizaram-se transdutores de deslocamentos (LVDT).

## 7.3.2.1. Extensômetros Elétricos de Resistência

As Figuras 7.20 e 7.21 mostram em detalhes as três seções que foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência (EER), e a identificação dos painéis das vigas.



Figura 7.20 – Seções instrumentadas nas vigas.



Figura 7.21 - Nomenclatura dos painéis.

## 7.3.2.1.1. Aço

Cada viga foi instrumentada com seis EER, sendo três colados na armadura longitudinal e três colados na armadura transversal nas seções indicadas na Figuras 7.22 e 7.23.



Figura 7.22 – Posições da instrumentação executada nas armaduras.



Figura 7.23 – Detalhe das seções onde a armadura foi instrumentada.

## 7.3.2.1.2. Concreto e CFC

Cada viga foi instrumentada com 9 EER para medir as deformações específicas no concreto, em 3 posições diferentes. Cada grupo de 3 EER foram

colados numa mesma região com uma diferença de 45º de um para o outro, de modo a se obter o ângulo de inclinação da biela flexo-comprimida. No CFC os EER foram sempre colados na direção da fibra (Figura 7.24). As Figuras 7.25 e 7.26 mostram detalhadamente o esquema de instrumentação das vigas com os EER, no concreto e no CFC.



Figura 7.24 - Detalhe dos EER colados no concreto e no CFC.



Figura 7.25 – Instrumentação no concreto e no CFC das vigas da série VT.



Figura 7.26 – Instrumentação no concreto e no CFC das vigas da série VTL.

#### 7.3.2.2. Transdutores Lineares

Foram instalados cinco transdutores lineares em cada viga, localizados a uma distância de 300 mm da face lateral da viga. O posicionamento desses aparelhos possibilitou a leitura do ângulo de torção em cada estágio de carregamento ao qual a viga foi submetida. Com isso foi possível traçar o diagrama  $T \times \theta$  que retratou o comportamento da viga (Figura 7.27).



Figura 7.27 – Localização dos Transdutores Lineares.

## 7.4. Ensaio

## 7.4.1. Esquema de Ensaio

Para a realização dos ensaios foi montado um aparato estrutural capaz de transferir à viga de concreto armado a solicitação de torção pura (Figuras 7.28, 7.29, 7.30 e 7.31).

A estrutura foi composta basicamente de:

- dois perfis de aço que formaram o braço de alavanca necessário para a transmissão do momento torçor para a viga;
- quatro chapas de aço para acoplar os perfis metálicos na viga;
- duas chapas de aço para transferência da força do perfil para a viga;
- oito parafusos para fixação das placas de aço;
- um apoio que permitia a estrutura girar apenas em torno de seu eixo longitudinal;
- um macaco hidráulico para aplicação do carregamento;
- um parafuso de reação.



Figura 7.28 – Esquema de ensaio.



Figura 7.29 – Esquema de ensaio (vista lateral).



Figura 7.30 – Sistema de ensaio em fase de montagem.



Figura 7.31 – Sistema de apoio.

## 7.5. Aplicação do Sistema de Reforço com CFC

Para que o sistema de reforço com CFC fosse aplicado, foi necessário inicialmente que as superfícies das vigas fossem preparadas adequadamente, de modo a garantir que a superfície a ser reforçada estivesse sã, limpa, seca, livre de partículas soltas, pinturas, desmoldantes, contaminação de graxa, óleo, pó agentes de cura, nata de cimento ou quaisquer outros materiais estranhos.

O manual da Sika (2004) faz as seguintes recomendações para aplicação do sistema de reforço com CFC:

- umidade do substrato de concreto inferior a 4%;
- idade mínima do concreto superior a 28 dias;
- resistência de aderência à tração do adesivo na superfície do substrato a ser reforçado superior a 1,5 MPa;
- quinas e bordas arredondadas com um raio de pelo menos 12,5 mm.

Inicialmente foi executado o apicoamento da superfície superior da viga com ponteiro, e foram feitos cortes das quinas com talhadeira nas regiões onde o CFC foi colado (Figura 7.32).



Figura 7.32 – Corte das quinas e apicoamento da superfície irregular.

Após o corte e o apicoamento, foi feito o lixamento das superfícies e o arredondamento das quinas das vigas com o uso de uma esmerilhadeira (Figura 7.33).



Figura 7.33 – Lixamento das laterais.

A próxima etapa foi a aplicação de Sikadur 30 com adição de cimento nas regiões apicoadas ou que apresentassem rebarbas ou irregularidades superiores a 2 mm, a fim de se obter superfícies planas (Figura 7.34).



Figura 7.34 – Aplicação e regularização da superfície superior com Sikadur 30.

Antes da aplicação do reforço foi feita a retirada da poeira superficial com o uso de aspirador de pó.

O consumo de adesivo epóxi SIKADUR® 330 ideal a que se chegou após alguns testes foi de 0,75 kg/m<sup>2</sup> na fase de impregnação do concreto, e 0,5 kg/m<sup>2</sup> para a camada de proteção.

Para cada mistura do adesivo epóxi foi considerada uma perda estimada de 20%, referentes ao material perdido nas vasilhas utilizadas para pesagem, armazenamento e mistura, e no rolo de aplicação.

As Figuras 7.35 e 7.36 ilustram a aplicação do adesivo epóxi e do tecido de fibras de carbono, e as vigas reforçadas no seu estado final, respectivamente.



Figura 7.35 – Aplicação do sistema de reforço com CFC.



Figura 7.36 - Vigas reforçadas.

## 7.6. Execução dos Ensaios

As vigas foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM). O carregamento foi aplicado de forma similar em todas as vigas, com incrementos de força de 2 kN aplicados com excentricidade de 0,95 m, o que gerou um momento torçor de 1,9 kNm. Entre cada estágio de carregamento esperava-se cerca de 10 minutos até que as deformações específicas e as rotações medidas na viga se estabilizassem (Figuras 7.37, 7.38 e 7.39).

Até atingir a fissuração, para um momento torçor em torno de 15 kNm, o comportamento da curva T  $\times \theta$  foi linear e semelhante em todas as vigas. Após a fissuração essa curva permaneceu linear, entretanto, a redução da inclinação da curva da viga de referência foi maior do que as das vigas reforçadas .



Figura 7.37 – Ensaio da viga de referência.



Figura 7.38 – Ensaio da viga VT1.



Figura 7.39– Detalhe da torção da viga VT1.