

3. Programa Experimental

3.1. Considerações Iniciais

Este estudo experimental tem como objetivo avaliar a influência da taxa de carregamento na resistência de aderência entre o substrato de concreto e o compósito de tecido de fibras de carbono (CFC) por meio de ensaios em blocos de concreto submetidos a carga de impacto. As variáveis adotadas foram a taxa de carregamento e a resistência do concreto.

Neste capítulo são apresentadas as características dos corpos-de-prova, as características da fibra e da resina, a descrição das etapas de aplicação do compósito, a instrumentação dos ensaios e a descrição do aparato utilizado para aplicação do carregamento de impacto.

3.2. Características dos Corpos-de-prova

Os corpos-de-prova são constituídos de blocos de concreto e tiras de tecido de CFC coladas nas laterais opostas dos blocos. As tiras de CFC têm espessura de 0,166 mm e largura de 75 mm. O comprimento de ancoragem (L_a), (comprimento colado no concreto) é de 30 mm. Os blocos de concreto têm a forma de um cubo, com aresta de 150 mm (Figura 3.1).

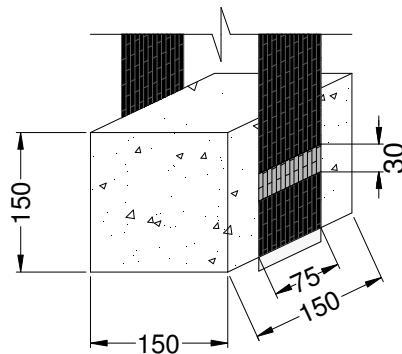


Figura 3.1 – Detalhe do corpo-de-prova (medidas em mm)

Os blocos foram moldados em uma forma metálica, composta de três perfis “U” laminados. As vigas laterais, com 200 mm de altura, foram fixadas na viga da base de 250 mm de altura. Uma das laterais foi fixada por solda e a outra por parafuso. Os blocos foram separados por peças de madeira de dimensões de 150 mm x 150 mm x 20 mm. Também foram usadas barras rosqueadas de 6 mm de diâmetro para fixar as peças de madeira em seus devidos lugares (Figura 3.2).

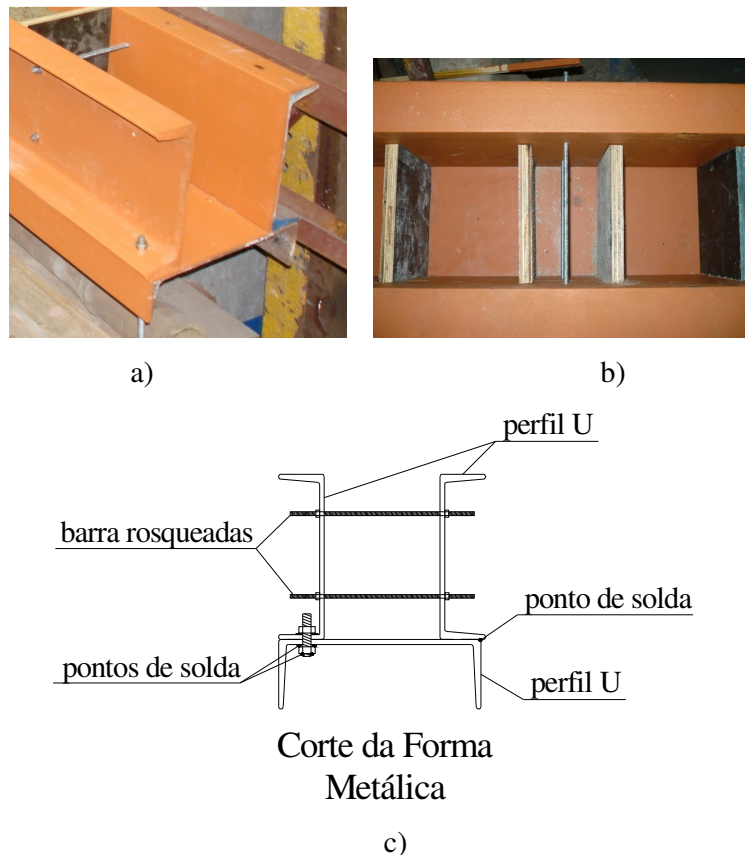


Figura 3.2 – Detalhes da forma metálica.

3.3. Nomenclatura

Os blocos foram nomeados segundo as variáveis adotadas, resistência do concreto e altura de queda do martelo, foram divididos em três séries em função da resistência nominal $f_{c,n}$ do concreto dos blocos como indicado na Tabela 3.1. Cada série é composta de 14 blocos e a variável em cada série é a taxa de carregamento, sendo 25, 75, 100, 125 e 150 cm a altura de queda do martelo.

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos corpos-de-prova.

	Série		
Ensaio	$f_{c,n} = 25 \text{ MPa}$	$f_{c,n} = 45 \text{ MPa}$	$f_{c,n} = 65 \text{ MPa}$
Estático	B25-0-01	B45-0-01	B65-0-01
	B25-0-02	B45-0-02	B65-0-02
Dinâmico	B25-25-01	B45-25-01	B65-25-01
	B25-25-02	B45-25-02	B65-25-02
	B25-50-01	B45-50-01	B65-50-01
	B25-50-02	B45-50-02	B65-50-02
	B25-75-01	B45-75-01	B65-75-01
	B25-75-02	B45-75-02	B65-75-02
	B25-100-01	B45-100-01	B65-100-01
	B25-100-02	B45-100-02	B65-100-02
	B25-125-01	B45-125-01	B65-125-01
	B25-125-02	B45-125-02	B65-125-02
	B25-150-01	B45-150-01	B65-150-01
	B25-150-02	B45-150-02	B65-150-02

Foram realizados três ensaios dinâmicos adicionais, reutilizando-se os blocos da série de 25 MPa, com alturas de queda do martelo de 25 cm, 75 cm, 125 cm, com extensômetros elétricos colados nas tiras de fibras de carbono (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Nomenclatura dos corpos-de-prova com extensômetros.

Resistência de 25 MPa			
Ensaio	Nomenclatura		
Dinâmico	B25-25-E	B25-75-E	B25-125-E

3.4. Materiais

3.4.1. Concreto

As dosagens em peso, para as resistências de 25 MPa e 45 MPa foram respectivamente 1 : 2,59 : 3,07 e 1 : 1,22 : 1,88 (cimento : areia : brita 1), com fator água/cimento de 0,62 e 0,38. Para a resistência de 65 MPa a dosagem empregada foi 1 : 1,61 : 2,44 (cimento: areia: brita 1) e fator água/cimento de 0,32, acrescidos de 3,67 kg de sílica ativa e 0,89 l de superplastificante.

O cimento empregado foi o Portland de alta resistência inicial, da Ciminas (CPV-ARI-Fácil da Holcim). O agregado miúdo utilizado foi areia de rio, lavada, com módulo de finura de 2,60, diâmetro máximo de 4,76 mm e massa específica aparente de 2,60 g/cm³. O agregado graúdo utilizado foi de origem gnaisse, classificada como brita 1, com diâmetro máximo de 19 mm, módulo de finura de 6,81, massa específica absoluta de 2,70 g/cm³ e massa específica aparente de 1,61 g/cm³. A caracterização dos agregados seguiu o prescrito nas Normas NBR 9776:1987, NBR 7217:1987 e NBR 9937:1887, cuja análise foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC - Rio. A análise granulométrica e a determinação das massas específicas dos agregados graúdo e miúdo encontram-se nos Anexos A e B, respectivamente.

Os consumos por metro cúbico de concreto dos materiais empregados para cada resistência são mostrados na Tabela 3.3

Tabela 3.3 – Consumo de material por m³ de concreto.

Material	Quantidade / m ³		
	$f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 65 \text{ MPa}$
Cimento	322 kg	530 kg	440 kg
Areia	834 kg	647 kg	710 kg
Brita1	988 kg	996 kg	1075 kg
Água	200 ℓ	201 ℓ	143 ℓ
Sílica Ativa	-	-	36 kg
Superplastificante	-	-	8,75 ℓ

A moldagem e a cura, tanto dos corpos-de-prova como dos blocos, seguiram as recomendações da Norma NBR 5738:1994. O concreto foi misturado mecanicamente em uma betoneira com capacidade de 100 litros. Foram realizadas três betonadas, sendo uma para cada resistência.

O lançamento do concreto nas formas foi realizado em duas etapas. Na primeira distribuiu-se uniformemente metade do volume de concreto necessário para o total preenchimento dos blocos, sendo executado o adensamento de forma manual, aplicando-se 17 golpes com auxílio de uma haste de socamento.

Além dos blocos foram moldados também corpos-de-prova cilíndricos 100 mm x 200 mm para controle tecnológico. Nesses o concreto foi lançado em quatro camadas, e em cada camada aplicou-se 30 golpes com a mesma haste de socamento. A Figura 3.3 mostra os detalhes dos moldes.



Figura 3.3 – Detalhe da concretagem dos blocos e dos corpos-de-prova.

Os ensaios dos corpos-de-prova à compressão simples foram realizados na prensa CONTENCO, com controle da capacidade de carga de 2400 kN, do Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio em obediência à Norma NBR 5739:1994. A aquisição dos dados foi obtida por meio do equipamento NI DAQ 9172 do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS S/A, interligado a um computador do tipo *laptop* por meio do software LABVIEW 7.1 do mesmo fabricante. Os ensaios da resistência dos corpos-de-prova para cada dosagem, foram realizados somente no dia do ensaio de seus respectivos blocos. Os valores médios da resistência f_c (média de 24 corpos-de-prova) do concreto à compressão são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto.

Blocos	f_c (MPa)	Blocos	f_c (MPa)	Blocos	f_c (MPa)
B25-25-01	26,8	B45-25-01	41,1	B65-25-01	69,4
B25-25-02	26,8	B45-25-02	43,3	B65-25-02	61,2
B25-50-01	24,7	B45-50-01	40,5	B65-50-01	58,5
B25-50-02	23,6	B45-50-02	42,4	B65-50-02	66,0
B25-75-01	24,8	B45-75-01	44,7	B65-75-01	70,3
B25-75-02	26,8	B45-75-02	44,4	B65-75-02	60,3
B25-100-01	22,0	B45-100-01	42,9	B65-100-01	60,3
B25-100-02	25,2	B45-100-02	43,1	B65-100-02	65,1
B25-125-01	21,9	B45-125-01	44,2	B65-125-01	65,3
B25-125-02	25,8	B45-125-02	41,9	B65-125-02	64,1
B25-150-01	26,8	B45-150-01	41,4	B65-150-01	62,5
B25-150-02	27,2	B45-150-02	42,4	B65-150-02	61,3
Média	25,2		42,7		63,7
DP	1,88		1,34		3,69
CV (%)	7,44		3,13		5,79

3.4.2.

Tecido de Fibras de Carbono

O tecido de fibras de carbono empregado neste trabalho foi o SikaWrap – 300 C (ver Figura 3.4). As tiras retiradas desse tecido apresentam as seguintes características descritas na Ficha Técnica de Produto do Fabricante Sika:

- tecido de fibras de carbono com orientação das fibras de 0 °(unidirecional);
- tecido de cor preta com 99 % do volume total em fibras de carbono;
- trama de fibras termoplásticas na cor branca, com 1% do peso total;
- espessura de 0,166 mm (baseado no conteúdo de fibras);
- peso de $300 \text{ g/m}^2 \pm 15 \text{ g/m}^2$ e densidade de $1,79 \text{ g/cm}^3$;
- das propriedades físicas e mecânicas tem-se 3900 MPa de resistência à tração, 230 GPa de módulo de elasticidade e 1,5 % de deformação específica na ruptura.



Figura 3.4 – Tecido de fibras de carbono SikaWrap – 300 C.

3.4.3. Adesivo Epóxi

A resina epoxídica é responsável pela perfeita aderência do reforço com tecido de fibras de carbono e o substrato de concreto, transferindo as tensões tangenciais do reforço para o substrato de concreto.

O adesivo epóxi utilizado para a colagem dos tecidos de fibras de carbono nos blocos foi o Sikadur 330 (Figura 3.5), cujas características descritas na Ficha Técnica de Produto do Fabricante Sika são:

- resina de epóxi em dois componentes, (componente A na cor branca e componente B na cor cinza escuro);
- proporção da mistura, em peso (A:B = 4:1);
- vida útil da mistura (Pot-life) 40 minutos (25°C/ 50% UR);
- consumo de adesivo epóxi (impregnação: 0,7 a 1,2 kg/m²; e camada de proteção: 0,5 kg/m²);
- das propriedades físicas e mecânicas tem-se 30 MPa de resistência à tração e 3800 MPa de módulo de elasticidade.



Figura 3.5 – Adesivo de epóxi Sikadur – 330.

3.5.

Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibras de Carbono

Para a caracterização das propriedades mecânicas da fibra empregada nesta pesquisa foram realizados ensaios seguindo-se as recomendações da ASTM D 3039/3039M *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 D 3039/3039M propõe as dimensões mínimas necessárias para que os corpos-de-prova tenham um número suficiente de fibras em sua seção transversal que represente as propriedades do material. Essas dimensões são mostradas na Tabela 3.5 e na Figura 3.6.

Tabela 3.5 – Dimensões dos corpos-de-prova para o ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono (ASTM D 3039/3039M).

Orientação das fibras	Largura (mm)	Compr. (mm)	Espessura (mm)	Compr. da aba (mm)	Espessura da aba (mm)	Ângulo da 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	-	-	-

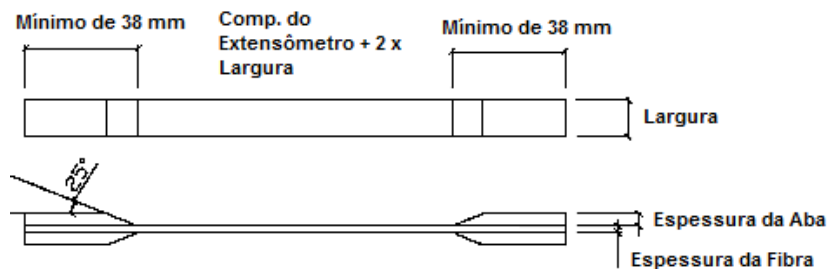


Figura 3.6 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração (ASTM D 3039/3039M).

Foram ensaiados à tração três corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibras de carbono revestidos com resina epóxi, com 15 mm de largura, 250 mm de comprimento e abas de alumínio de 20 mm de largura por 50 mm de comprimento.

Os corpos-de-prova foram instrumentados com um extensômetro elétrico de resistência para a leitura da deformação específica do CFC, permitindo dessa forma a determinação do módulo de elasticidade e da deformação específica última do CFC, e o traçado do diagrama tensão-deformação específica.

Os ensaios foram realizados na máquina MTS do Laboratório de Fadiga e Mecânica da Fratura PUC-Rio, com capacidade de carga de 250 kN (Figura 3.7). O ensaio foi realizado com controle de deslocamento de 2 mm/min, atendendo-se à recomendação da ASTM D 3039/3039M.

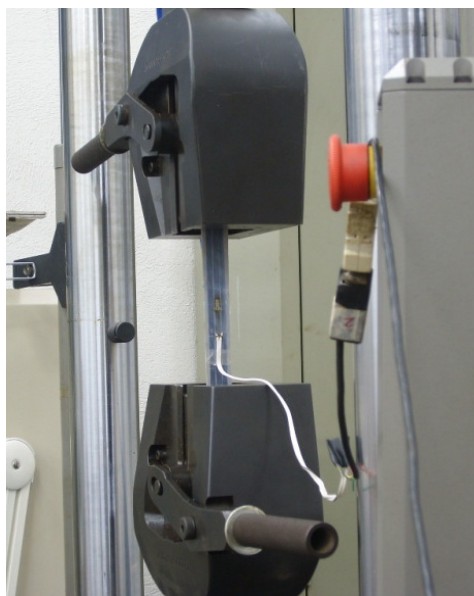


Figura 3.7 – Ensaio de corpo-de-prova CFC.

De acordo com a norma ASTM D 3039/3039M a resistência à tração do compósito de fibras de carbono é dada por:

$$f_{tf} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (3.1)$$

onde

f_{tf} – resistência à tração;

$F_{\max}$ – carga máxima aplicada;

A – área da seção transversal do corpo-de-prova.

A Tabela 3.6 apresenta os resultados da força de ruptura, tensão de ruptura, deformação específica última e módulo de elasticidade do CFC. A Figura 3.8 apresenta os diagramas tensão *vs.* deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.

Tabela 3.6 – Resultados obtidos nos ensaios à tração dos corpos-de-prova de compósitos de fibras de carbono.

Corpos-de-prova	Carga $F_{\max}$ (N)	Resistência f_{tf} (MPa)	Deformação Específica ϵ_{fu} (%)	Módulo de Elasticidade E_f (GPa)
1	8882,07	3567,10	12,2	292,38
2	7733,40	3105,78	10,8	287,57
3	7455,05	2994,00	10,2	293,53
Média	8023,51	3222,29	11,07	291,16
DP	756,45	303,80	1,03	3,16
CV (%)	9,43	9,43	9,27	1,09

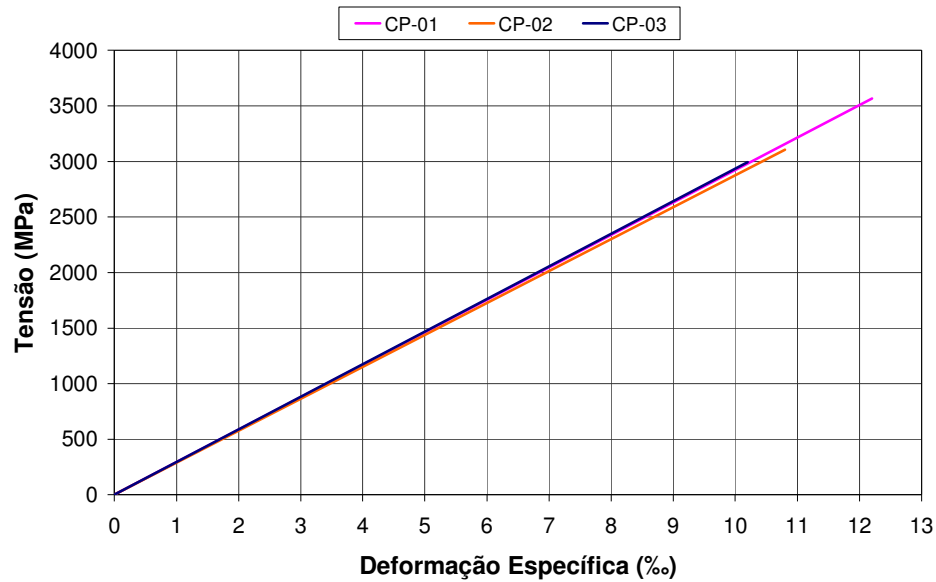


Figura 3.8 – Diagrama tensão-deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.

3.6. Aplicação do Compósito de Fibras de Carbono

Nas extremidades do tecido de fibras de carbono foram coladas fitas adesivas para se evitar o desalinhamento dos fios. Em seguida, o tecido foi cortado com estilete nas dimensões pré-determinadas: 7,5 cm de largura e 195 cm de comprimento (Figura 3.9).

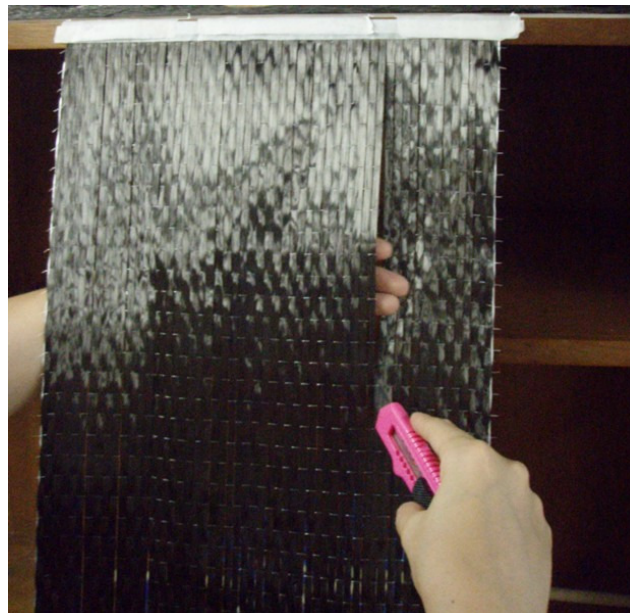


Figura 3.9 – Detalhe da corte do tecido de fibras de carbono.

Os componentes A e B foram homogeneizados em separado, suas massas aferidas em balança digital de acordo com as proporções exatas e misturados manualmente. Ainda para evitar o desalinhamento dos fios, foram aplicadas duas camadas de adesivo epóxi Sikadur 330 em quatro trechos de 12 cm de comprimento ao longo das tiras (Figura 3.10).

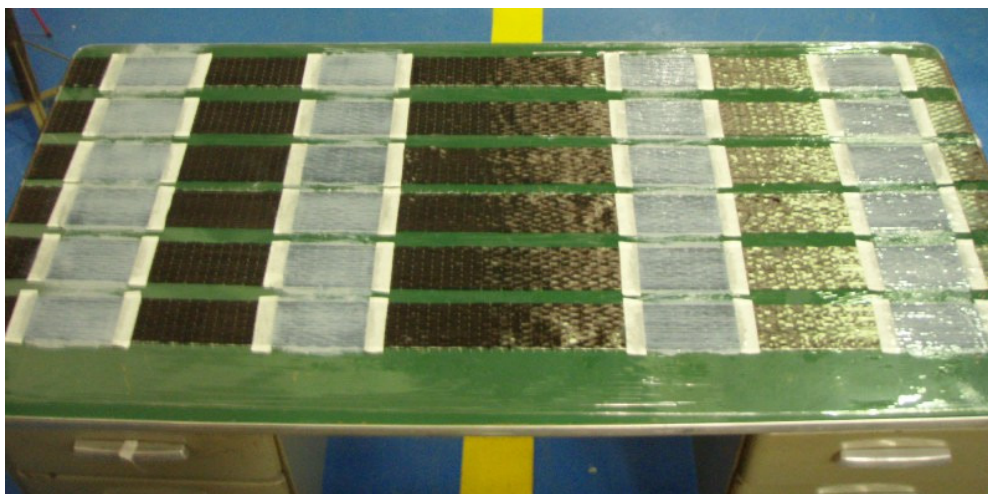


Figura 3.10 – Detalhe das tiras de fibras de carbono com adesivo epóxi.

Após o período de cura de sete dias, especificado pelo fabricante, pesos foram fixados nas extremidades das tiras para que essas ficassem esticadas e em seguida serem coladas no substrato preparado.

Para que as tiras fossem aplicadas na superfície dos blocos, foi necessário inicialmente que essas fossem preparadas adequadamente, de modo a ficarem limpas, secas e livres de partículas soltas. Primeiramente a região destinada à aplicação do CFC foi medida com esquadro e marcada com lápis. Em seguida executou-se o apicoamento da superfície dos blocos com um ponteiro e martelo, tomando-se o cuidado para não deixar a superfície com imperfeições maiores que 2 mm (Figura 3.11). Após essa etapa passou-se a escova de aço para retirar qualquer partícula sólida não totalmente aderida, e com um pano embebido em álcool 93% foram removidas as substâncias oleosas presentes na superfície dos blocos.

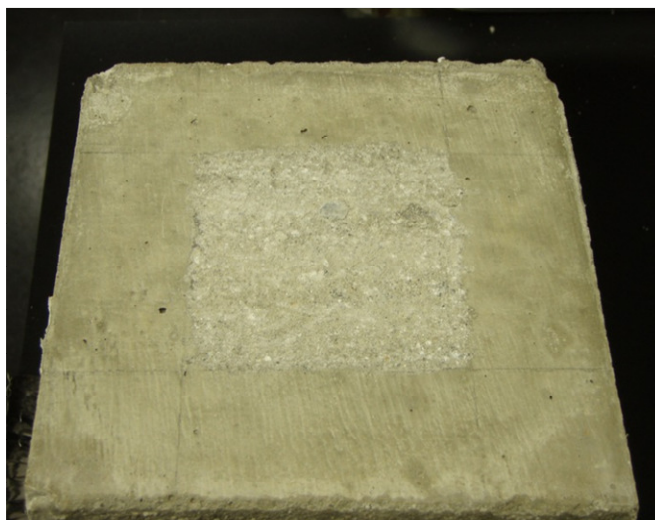


Figura 3.11 – Detalhe da preparação da região a receber o CFC.

A superfície do bloco foi protegida com uma camada de papel *contact*, com dimensões de 7,5 cm x 3,0 cm, localizada na região central, fora recortada para garantir que a aplicação da mistura de Sikadur 330 com as fibras de carbono ficasse apenas na área especificada. Antes da aplicação da mistura, ressaltou-se a demarcação dessas dimensões com fita adesiva e fez-se a verificação das mesmas com paquímetro. Repetiu-se o procedimento para a face oposta do bloco (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Detalhamento da região destinada ao recebimento do CFC.

Com o substrato preparado aplicou-se o adesivo epóxi Sikadur 330 como camada de imprimação com o auxílio de uma espátula. O imprimador tem como objetivo penetrar nos poros do substrato de concreto, preenchendo-os para que

haja uma transferência solicitações eficiente entre o tecido e o concreto. Após esse processo colocou-se a tira do tecido de fibras de carbono, antes preparada, na área demarcada passando-se um rolo de aço dentado para deixar as fibras esticadas e retirar as possíveis bolhas de ar garantindo um perfeito contato com o adesivo. Uma camada de saturação de adesivo epóxi (segunda camada) foi aplicada sobre o tecido para garantir uma total imersão nas fibras de carbono. Novamente passou-se o rolo de aço dentado e, com o auxílio de uma espátula, foi feita a regularização da superfície. A Figura 3.13 mostra os blocos com o CFC e a Figura 3.14 fornece uma visão mais detalhada do bloco com o CFC.

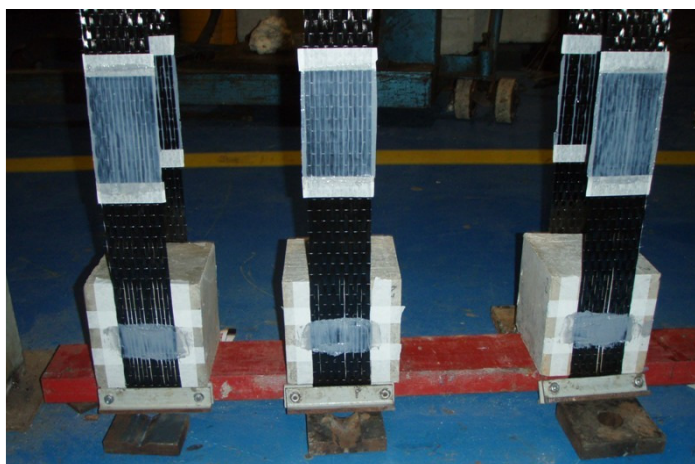


Figura 3.13 – Blocos com compósito de fibras de carbono.

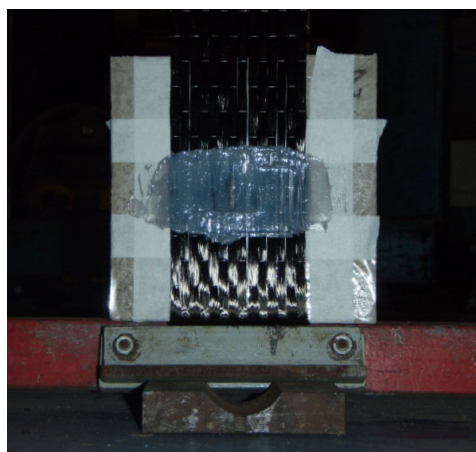


Figura 3.14 – Detalhe do bloco com CFC.

3.7. Instrumentação

As leituras das cargas aplicadas foram realizadas por intermédio de uma célula de carga posicionada entre o perfil metálico e o bloco de concreto. Para os ensaios dinâmicos utilizou-se uma célula de carga com capacidade de 200 kN (Figura 3.15). Para os ensaios estáticos utilizou-se uma célula de carga com capacidade de 100 kN.

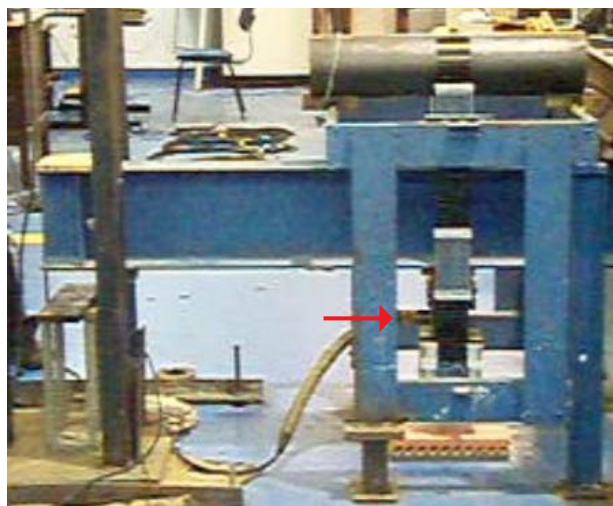


Figura 3.15 – Posicionamento da célula de carga.

Nos seis blocos de ensaios estáticos e nos três blocos adicionais de ensaios dinâmicos (Tabela 3.2) foram colados dois extensômetros elétricos (um em cada lado da tira) no trecho com resina epóxi para a leitura das deformações específicas (Figura 3.16).

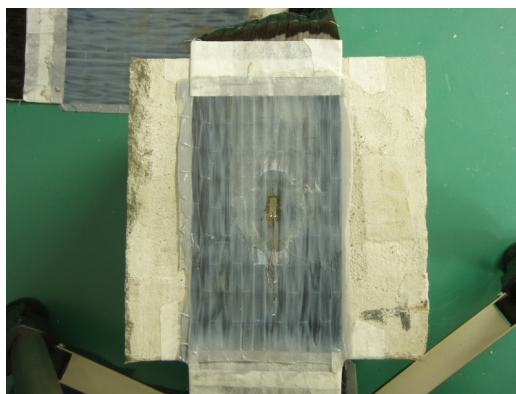


Figura 3.16 – Detalhe do extensômetro colado no CFC.

3.8.

Aquisição de Dados

Para aquisição dos dados dos ensaios dinâmicos utilizou-se o equipamento NI PXI 1052 do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS S/A, interligado a um computador controlado por meio do *software* LABVIEW 7.1 do mesmo fabricante. Nos ensaios estáticos o equipamento utilizado foi o NI USB 9162, do mesmo fabricante, interligado a um computador portátil do tipo laptop por meio do mesmo *software*.

3.9.

Descrição dos Ensaios

3.9.1.

Carregamento Dinâmico

Para a realização dos ensaios foi adaptado um sistema de aplicação de carga baseando-se no aparato utilizado por MARTINS JUNIOR (2006).

A carga de impacto amplificada foi alcançada por meio de um martelo de massa conhecida, solto de diversas alturas, sobre a extremidade em balanço de um perfil metálico I (254 mm x 117 mm) com rigidez a flexão elevada. A Figura 3.17 apresenta o detalhe do equipamento utilizado para aplicação da carga de impacto. Na outra extremidade do perfil metálico foi instalado um apoio com restrição nos eixos vertical e horizontal e livre à rotação (Figura 3.18). Essa restrição é garantida pela laje de reação do laboratório. O apoio foi fixado por duas barras com rosca e porca de $\phi = 25$ mm e rotulado no contato com o perfil I (254 mm x 117 mm) para evitar a rotação de todo o sistema.

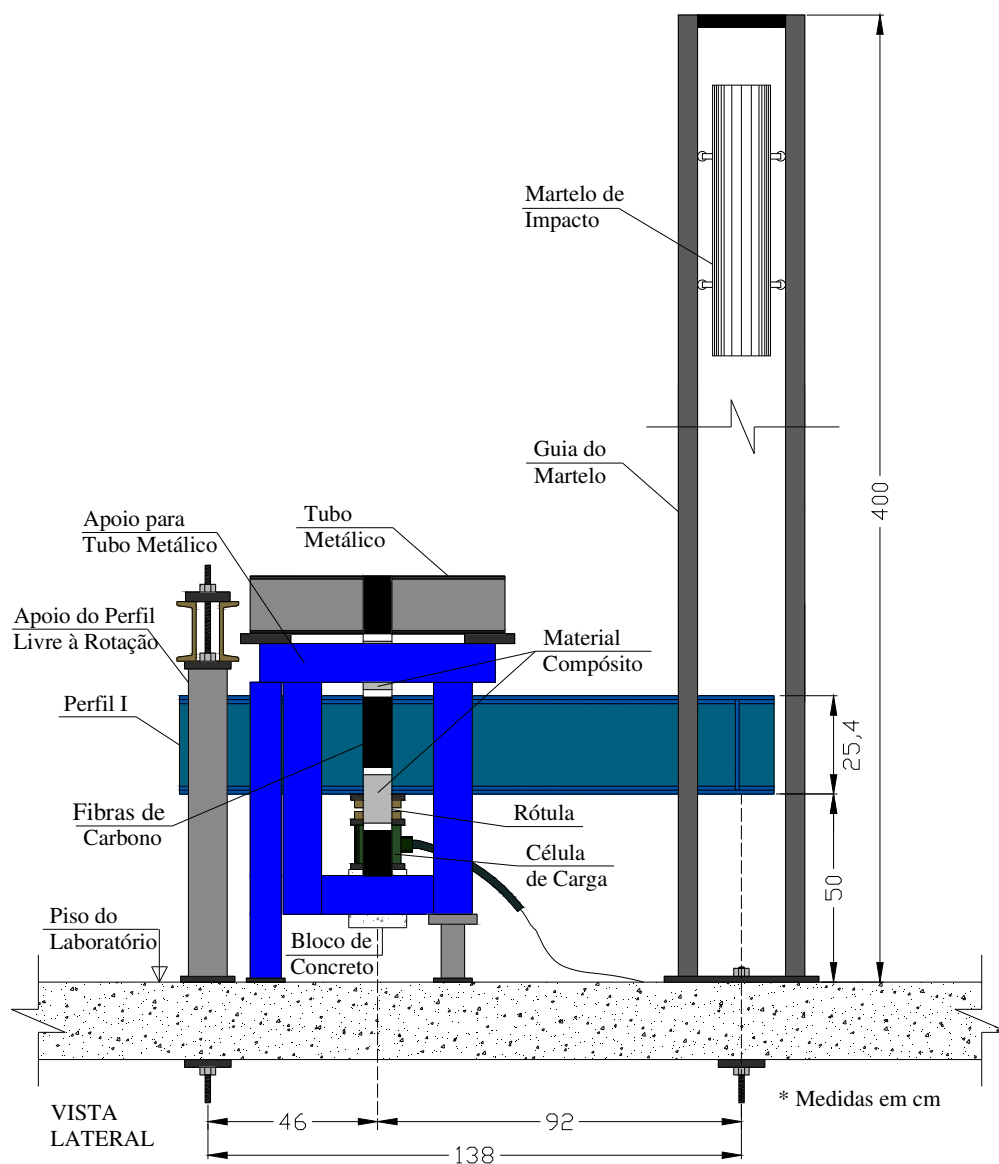


Figura 3.17 – Detalhe do equipamento de ensaio – vista lateral.

O martelo utilizado para aplicação da carga de impacto foi um cilindro de aço maciço de 100 kg de massa. As diferentes taxas de carregamento foram obtidas variando-se a altura de queda do martelo.

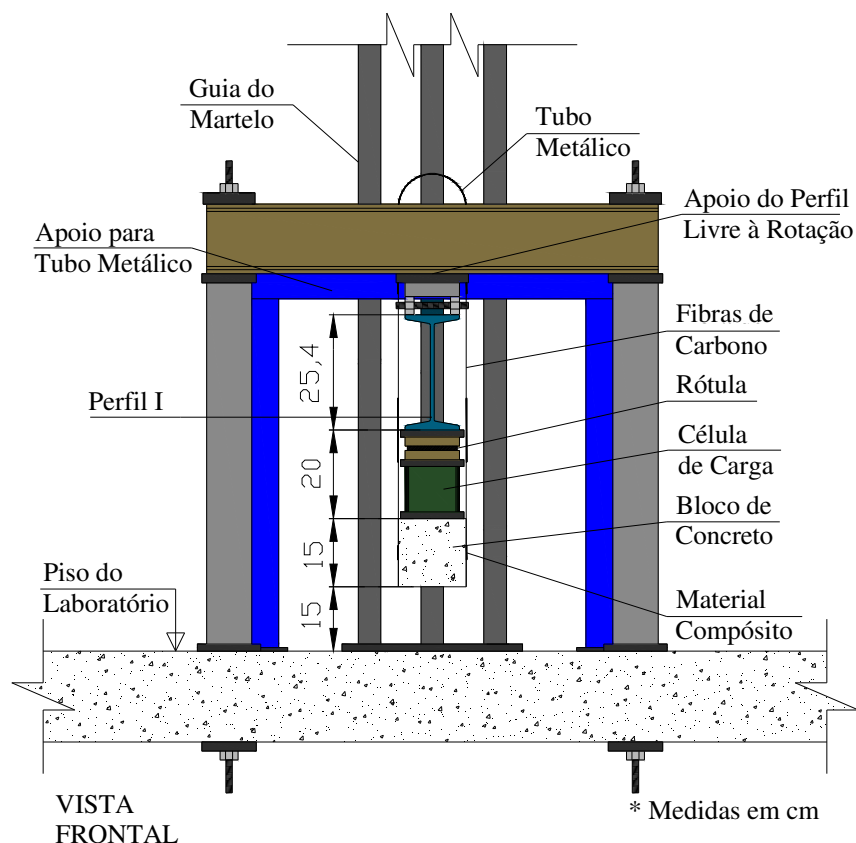


Figura 3.18 – Detalhe do aparato para aplicação de carga – vista frontal.

3.9.2. Carregamento Estático

O equipamento também foi adaptado de modo que se tornasse possível a realização dos ensaios estáticos. O controle de carregamento foi de forma manual e a carga foi aplicada por meio da ação de um atuador hidráulico P80 da ENERPAC com capacidade para 60 kN. Esse foi instalado sobre a extremidade do perfil I. A Figura 3.19 mostra o detalhe do posicionamento do atuador hidráulico para a realização dos ensaios estáticos.

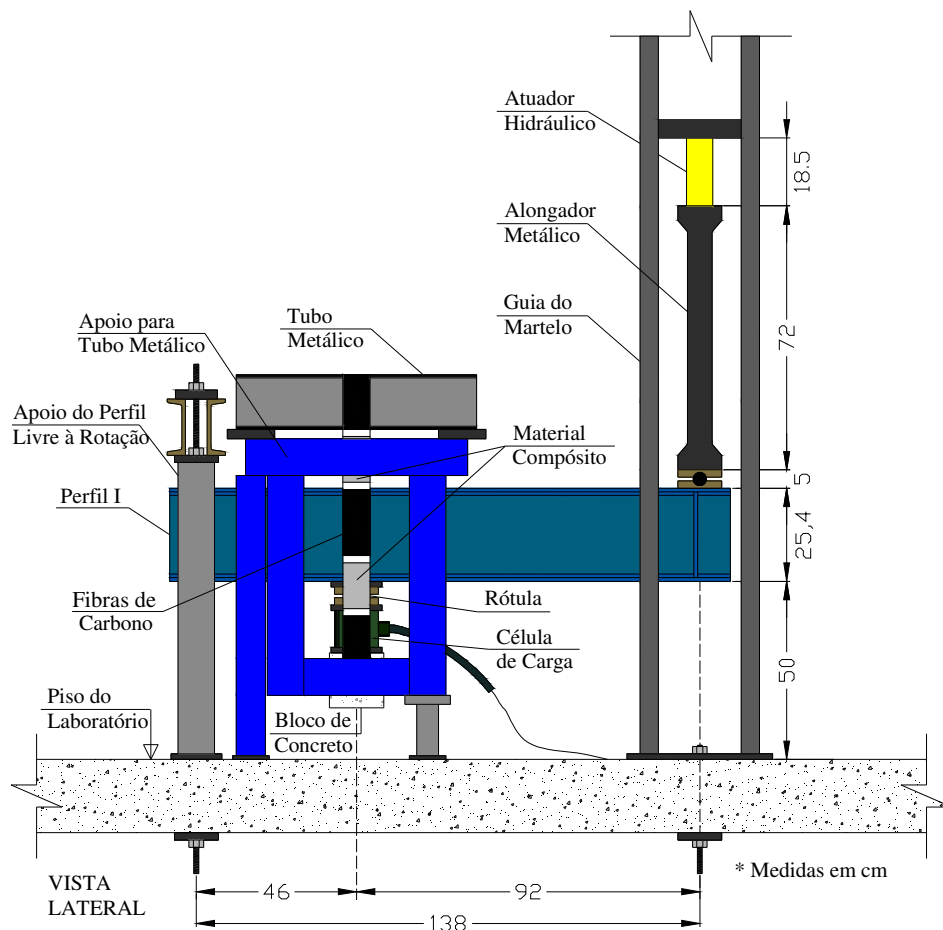


Figura 3.19 – Posicionamento do atuador hidráulico para a realização dos ensaios estáticos.