3 Programa Experimental

3.1 Considerações Iniciais

O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da taxa de carregamento sobre a resistência de aderência entre CFC e o concreto, por meio de ensaios de flexão de corpos-de-prova submetidos a forças de impacto. Neste capítulo é feita uma descrição detalhada dos corpos-de-prova, das variáveis adotadas, dos materiais utilizados, da montagem dos ensaios e da instrumentação.

3.2 Nomenclatura dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova foram nomeados como descrito abaixo:

VE – Ensaio estático;

VD – Ensaio Dinâmico;

M – Distância do início da ancoragem à borda do bloco de concreto, 6 cm;

I – Corpos-de-prova da primeira série de concretagem;

II – Corpos-de-prova da segunda série de concretagem;

III – Corpos-de-prova da terceira série de concretagem;

n° – Número do corpo-de-prova

3.3 Características dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova são constituídos de dois blocos de concreto unidos por uma rótula na região de compressão e tiras de tecidos de CFC coladas na face inferior dos blocos (Figura. 3.1 'a'). As tiras de CFC têm espessura de 0,122 mm e largura de 75 mm. O comprimento de ancoragem la (comprimento colado ao concreto) é de 60 mm (Figura 3.1 'c' e 'd') e 120 mm (Figura 3.1 'b' e 'b'). Para os corpos-de-prova com comprimento de ancoragem de 60 mm foram feitas duas séries; a primeira recebia impregnação parcial das fibras com epóxi (Figura 3.1 'c'), e a segunda recebia impregnação total das fibras com epóxi (Figura 3.1 'd'). Para os corpos-de-prova com comprimento de ancoragem de 120 mm, foi adicionado um reforço em "V" em um dos blocos (Figura 3.1 'b'), forçando a ruptura para o bloco sem reforço onde foram colocados extensômetros de

resistência. A região entre as áreas de ancoragem foi protegida com fita para evitar a aderência do CFC ao concreto.

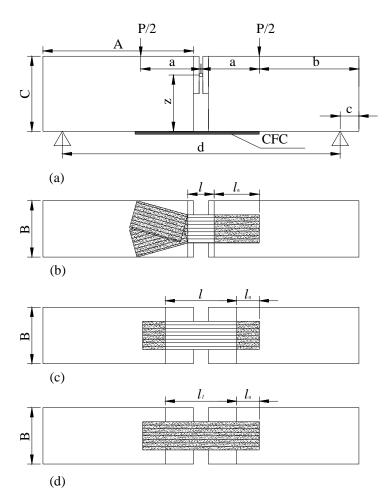


Figura 3.1 – Características geométricas dos corpos-de-prova.

Os parâmetros mostrados na Figura 3.1 são:

A, B e C – dimensões do bloco (40 x 15 x 20 cm);

P/2 – força aplicada;

a – distância da rótula ao ponto de aplicação da força, 16 cm;

b – distância do ponto de aplicação da força a extremidade do bloco, 26 cm;

c – distância do apoio a extremidade do bloco de concreto, 14 cm,

d – distância entre os apoios do corpo-de-prova, 56 cm;

z – distância do braço de alavanca entre a fibra e a rótula, 15 cm;

 l_a – comprimento de ancoragem;

l – comprimento da fibra sem impregnação;

 l_1 – distância não aderida do CFC ao concreto, 16 cm.

Os blocos de concreto tinham seção transversal de 150 mm x 200 mm e comprimento de 400 mm. Estes foram armados com duas barras de ϕ 6,3 mm para a armadura longitudinal no banzo comprimido, duas barras de ϕ 6,3 mm para armadura longitudinal no banzo tracionado, seis estribos de ϕ 5 mm para armadura transversal e cobrimento de 30 mm. Os blocos foram armados com a finalidade de evitar uma possível ruptura desses elementos (Figura 3.2).

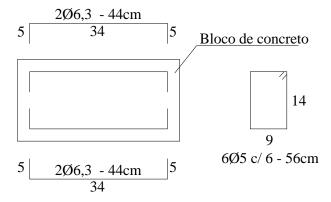


Figura 3.2 – Detalhes das armaduras dos blocos de concreto

Os blocos foram moldados numa fôrma metálica com capacidade para 12 blocos, compostas por três vigas "U" laminadas. Duas vigas "U" com altura de 200 mm foram fixadas em outra viga "U" com altura de 250 mm (perfil 1, na Figura 3.3), uma por solda (perfil 2A, na Figura 3.3) e a outra por parafuso (Perfil 2B, na Figura 3.3); para separar os blocos foram utilizadas peças de madeira com dimensões de 200 mm x 150 mm x 20 mm revestidas com adesivo plástico e barras rosqueadas de \$\phi\$ 6 mm para prender as peças de madeira nos seus devidos lugares.

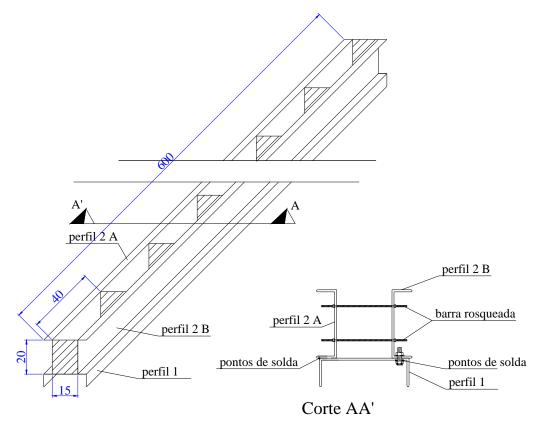


Figura 3.3 – Detalhe da fôrma para molde dos blocos, medidas em cm.

A principal variável adotada foi a taxa de carregamento da força normal às fibras que variou de um mínimo de 0,054 kN/s (estático) até o máximo de 33.766 kN/s (dinâmico). As características dos corpos-de-prova são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características dos corpos-de-prova.

Corpo-de-	$T_c (kN/s)$	H(cm)	Superfície	$l_a\left(cm\right)$	$d_{a.}(cm)$	Impregnação
prova						
VE I 01	0,0748	0	rugosa	12	1,50	parcial
VE I 02	0,1011	0	rugosa	12	1,50	parcial
VD I 03	22.193	230	rugosa	12	1,50	parcial
VE II 04	0,0851	0	lisa	12	1,50	parcial
VE II 05	0,1008	0	lisa	12	1,50	parcial
VE II 06	0,0535	0	lisa	12	1,50	parcial
VD II 07	20.211	230	lisa	12	1,50	parcial
VD II 08	7.247	100	lisa	12	1,50	parcial
VD II 09	5.269	50	lisa	12	1,50	parcial
VD III 10	7.711	25	lisa	12	1,50	parcial
VE III 11	0,0988	0	lisa	12	1,50	parcial
VD III 12	28.708	230	rugosa	12	1,50	parcial
VE III 13	0,1730	0	rugosa	12	1,50	parcial
VDM III 14	19.331	230	rugosa	6	6,00	parcial
VEM III 15	0,0554	0	rugosa	6	6,00	parcial
VDM III 16	11.326	100	rugosa	6	6,00	parcial
VDM II 17	22.018	150	rugosa	6	6,00	parcial
VDM III 18	11.766	50	rugosa	6	6,00	parcial
VDM III 19	7.288	25	rugosa	6	6,00	parcial
VDM II 20	33.766	230	rugosa	6	6,00	total
VDM II 21	26.943	150	rugosa	6	6,00	total
VDM II 22	19.214	100	rugosa	6	6,00	total
VDM III		50	rugosa	6	6,00	total
23	8.620					

T_c é a taxa de carregamento

3.4 Materiais Utilizados nos Corpos-de-Prova

3.4.1 Concreto

O concreto empregado apresentou resistências à compressão entre 26 MPa e 42 MPa na ocasião dos ensaios. Os resultados encontram-se no capítulo 4.

Para a moldagem dos blocos foram necessárias três concretagens: na primeira foi utilizado o traço 1:2,59:3,07 com relação água cimento de 0,67 para uma resistência de f_c = 25 MPa; na segunda foi utilizado o traço 1:1,97:2,29 com relação água cimento de 0,55 para f_c = 35 MPa e na terceira concretagem foi utilizado o traço 1:2,10:2,88 relação água cimento de 0,62 para f_c = 30 MPa.

H é a altura de queda do martelo

l_a é o comprimento de ancoragem;

d_a é a distância da ancoragem a extremidade do bloco de concreto

Para a primeira etapa de concretagem foram moldados oito blocos e 16 corpos-de-prova, e para as demais etapas foram moldados 12 blocos e 18 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 100 mm x 200 mm. Os corpos-de-prova foram moldados segundo recomendações da NBR 5738:1984.

Tabela 3.2 – Consumo de material por m³ de concreto.

Material	Qua	ntidade em kg por	m^3
	Série I	Série II	Série III
Cimento CP II F 32	339,45	394,42	338,71
Areia	878,83	777,01	711,29
Brita 1	1041,70	903,21	975,48
Água	227,43	216,93	210,00

Os materiais empregados no concreto foram: cimento CPII F32; agregado miúdo de areia de rio, com massa específica de 2,62 g/cm³ e módulo de finura de 3,46; agregado graúdo de gnaisse, brita 1, com dimensão máxima característica de 19 mm, massa específica absoluta de 2,50 g/cm³ e massa específica aparente de 1,60 g/cm³. As características desses materiais foram obtidas por meio de ensaios prescritos nas normas NBR 9776, NBR 7217 e NBR 9937 e executados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC – Rio.

3.4.2 Tecidos de Fibras de Carbono

Foram utilizados tecidos de fibras de carbono SikaWrap – 230 C, com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

Base: tecido de fibras de carbono unidirecional.

Cor: preta.

Conteúdo de fibras em volume: 99%.

Densidade: 1,78 g/cm³.

Peso: $220 \text{ g/m}^2 \pm 10 \text{ g/m}^2$.

Largura da faixa = 300 mm.

Espessura = 0,122 mm.

Deformação específica na ruptura = 1,7%.

Resistência à tração = 4100 MPa.

Módulo de elasticidade = 230 GPa.

As tiras empregadas nos corpos-de-prova tinham 75 mm de largura e aproximadamente 300 mm de comprimento. Para corpos-de-prova com comprimento de ancoragem de 12 cm foram utilizados duas tiras com dimensões de 75 mm x 15 mm com reforço adicional em um dos blocos, com o intuído de direcionar a ocorrência de ruptura para o bloco onde foram colados extensômetros elétricos, conforme ilustrado na Figura 3.1.

3.4.3 Adesivo Epóxi

O adesivo epóxi utilizado para garantir a transferência das tensões de cisalhamento entre o substrato de concreto e o CFC foi Sikadur 330, cujas propriedades fornecidas pelo fabricante são:

Cor (componente A): branco;

Cor (componente B): cinza escuro;

Relação em peso: 4:1;

Vida útil da mistura (*Pot-life*) 40 min. (25°C/ 50% UR)

Deformação específica na ruptura = 1,5%.

Resistência à tração = 30 MPa.

Módulo de elasticidade = 3800 MPa.

3.4.4 Características dos ensaios nas Fibras de Carbono

Para o dimensionamento de um sistema de reforço estrutural, deve-se obter as propriedades do material compósito, resistência à tração e módulo de elasticidade, por ensaios coerentes.

Esses ensaios são normalizados pela norma ASTM D 3039 / D 3039M – Standard Test Method for Tensile Properties of Matrix Composite Material, cujas dimensões mínimas para os corpos-de-prova são apresentadas na Tabela 3.3 e Figura 3.4.

Tabela 3.3 – Dimensões dos corpos-de-prova adotadas para ensaio de tração em
materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.

Orientação das fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Espessura (mm)	Comp. aba (mm)	Espessura aba (mm)	Ângulo aba (⁰)
0_0	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
unidirecional 90 ⁰ unidirecional	25	175	2,0	25	1,5	90

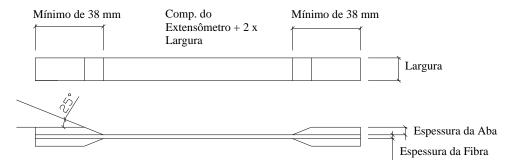


Figura 3.4 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.

Os valores da resistência à tração e do módulo de elasticidade do CFC foram obtidos em trabalhos anteriores Silva Filho (2007) e Spagnolo (2007) desenvolvidos no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC – Rio. Os resultados dos ensaios constam na Tabela 3.4 e na Figura 3.5

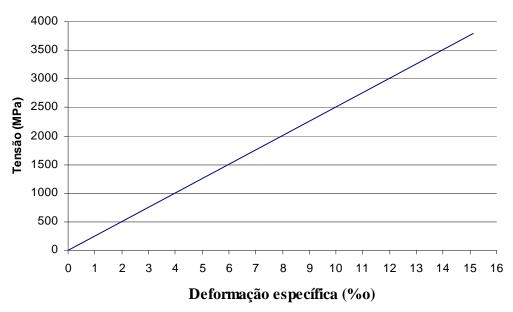


Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de CFC; adaptado de Silva Filho (2007).

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.

Autor/ensaio		\mathcal{E}_{u} (‰)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	
Spagnolo (2007)	CP1	11,223	2798,96	249,387	
	CP3	11,477	3081,75	268,523	
	CP4	13,411	3703,44	276,147	
	CP5	10,256	2766,93	269,798	
	CP6	11,812	2991,04	253,211	
Spagnolo (2007)	Média	11,64	3068,42	263,410	
	DP	1,15	378,46	11,51	
	CV	9,88%	12,33%	4,37%	
Silva Filho (2007)	CP1	12,091	3391,29	281,778	
	CP3	12,778	3257,87	256,946	
	CP4	13,465	3329,89	248,086	
	CP5	14,437	3615,41	254,301	
	CP6	15,113	3794,19	252,850	
	CP7	13,324	3375,28	253,624	
	CP8	12,822	3303,24	258,570	
Silva Filho (2007)	Média	13,43	3438,17	258,020	
	DP	1,04	194,40	10,99	
	CV	7,72%	5,65%	4,26%	

Adotou-se a média dos valores dos trabalhos acima como sendo à deformação última, resistência à tração máxima e o módulo de elasticidade. Ressaltando-se que para carregamentos dinâmicos a deformação específica última e o módulo de elasticidade não são os mesmos obtidos em ensaios estáticos.

Para início das análises os valores da deformação específica última e do módulo de elasticidade estáticos são considerados como sendo válidos para os carregamentos estáticos e dinâmicos.

Os valores adotados para a deformação especifica última, resistência máxima à tração e do módulo de elasticidade são mostrados na Tabela 3.5

Tabela 3.5 – Valor adotado para deformação específica última, resistência à tração máxima e módulo de elasticidade do CFC.

	$\mathcal{E}_{U}\left(\%_{o} ight)$	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)
CFC	12,53	3.253,30	260,72

3.5 Aplicação do CFC

A preparação da superfície, sobre o qual o CFC é aplicado foi feita manual e também mecanicamente.

A preparação manual foi feita com lixa de granulometria entre 24 a 36 com o intuito de retirar a nata de cimento. Em seguida a superfície foi apicoada com um ponteiro pequeno e martelo, tomando-se o cuidado para não deixar a superfície com furos maiores que 2 mm. Após passa-se a escova de aço para retirar qualquer pedaço de concreto solto (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Detalhe da área preparada para o recebimento do reforço.

Na preparação mecânica empregou-se uma lixadeira elétrica com lixa de granulometria 60.

A remoção da poeira em ambos os casos foi feita com o uso de aspirador de pó e estopa com álcool 93 % para também retirar as substâncias oleosas.

As tiras de tecido de fibras de carbono foram cortadas com estiletes e foram coladas fitas adesivas nas extremidades da tira para evitar o desfiamento.

Para garantir que os blocos ficassem alinhados utilizaram-se dois perfis metálicos nas laterais dos blocos, ligados por parafusos pressionando-os contra os blocos (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Detalhe da fixação dos blocos com os perfis metálicos.

Com os blocos alinhados foi colocada a rótula, formada por duas chapas metálicas com dimensões de 150 mm x 100 mm e um rolete soldado em uma delas. Utilizou-se massa plástica para a fixação das chapas metálicas nos blocos de concreto (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Detalhe da fixação rótula.

A região destinada à aplicação do CFC foi medida com paquímetro, demarcada com lápis, e foram empregadas fitas adesivas para proteger as demais áreas do contato com a resina (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Detalhe da marcação da área destinada a aplicação do CFC nos corpos-deprova com impregnação total.

Utilizou-se o adesivo epóxi Sikadur 330 como camada de imprimador na superfície de colagem do compósito de fibras de carbono, aplicado com espátulas numa quantidade de 700 g/m². O imprimador tem como objetivo penetrar nos poros do substrato de concreto, preenchendo-os para que haja uma transferência de solicitações eficiente entre o tecido e o concreto. Após esse processo colocaram-se as tiras do tecido de carbono nas áreas demarcadas passando o rolo para deixar as fibras esticadas, para retirar bolhas de ar e garantir um perfeito contato com o adesivo. Uma camada de saturação de adesivo epóxi foi aplicada sobre o tecido, com um consumo de 500 g/m², para garantir uma total penetração do adesivo nas fibras. Com o auxilio de uma espátula foi feita à regularização da superfície para colagem dos extensômetros elétricos de resistência. Esse procedimento foi executado para os corpos-de-prova com impregnação parcial e total das fibras de carbono, e também para as tiras de reforço adicional no bloco não instrumentado.

Os corpos-de-prova que receberam reforço com impregnação parcial tiveram a região central do reforço protegidas com fita adesiva evitando o contado com a resina epóxi. Colou-se fita adesiva entre a extremidade do bloco de concreto e o início da ancoragem, evitando-se a aderência da fibras fora da região demarcada (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Detalhe do reforço do bloco de concreto não instrumentado, nas vigas com impregnação parcial das fibras.

3.6 Instrumentação

A força aplicada foi medida por meio de célula de carga com capacidade de 200 kN, posicionada sobre o vão central da viga presa por meio de um sistema de chapas metálicas, de modo que se fizesse a leitura da força transferida pelo martelo (Figura 3.11).

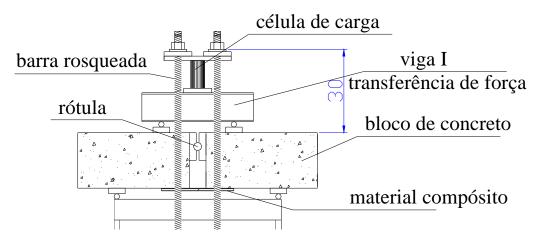


Figura 3.11 – Detalhes do posicionamento da célula de carga.

Nos corpos-de-prova VDM II 20 a VDM III23 foi usada mais uma célula de carga com capacidade de 100 kN posicionada em um dos apoios do corpo-de-prova (Figura 3.12).

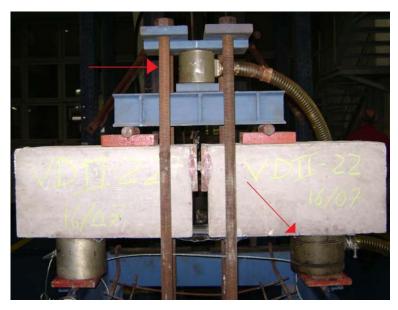


Figura 3.12 – Detalhes dos posicionamentos das células de carga.

Os corpos-de-prova VE I 01, VE I 02 e VEM III 15 foram instrumentados com LVDT localizado no meio do vão, para se conhecer o deslocamento máximo. Os corpos-de-prova VE II 04, VE II 05, VE II 06 e VD III 12 foram instrumentados com cinco extensômetros elétricos de resistência (EER), posicionados ao longo do comprimento de ancoragem com espaçamento de 2,75 cm entre si e distantes da borda da fibra de 3,75 cm (Figura 3.13). Nos corpos-de-prova VE III 13 a VDM III 23 foi usado apenas um EER posicionado entre os blocos no centro do CFC (Figura 3.14).

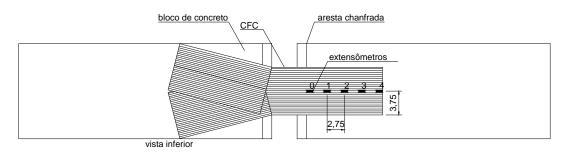


Figura 3.13 – Detalhes dos EER posicionados no CFC.

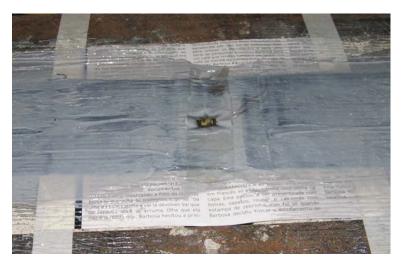


Figura 3.14 – Detalhe do EER entre os blocos de concreto e no centro do reforço (viga com impregnação total).

3.7 Aquisição de Dados

Para aquisição dos dados dos ensaios estáticos das vigas foi utilizado o equipamento 3497A DATA ACQUISITION/CONTROL UNIT do fabricante HP (Hewllet Packard), interligado a um computador portátil por meio do software LABVIEW 7.1 do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS S/A.

Para aquisição dos dados dos ensaios dinâmicos foi utilizado o equipamento NI DAQ 7 do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS S/A, interligado ao mesmo computador com o mesmo *software*.

3.8 Aplicação de Força

3.8.1 Carregamento Estático

O carregamento estático foi aplicado em duas etapas. A primeira por um sistema hidráulico usado para suspender o peso próprio da estrutura. Liberando-se todo o peso da estrutura para o corpo-de-prova, continuava a aplicação do carregamento por um cilindro hidráulico com capacidade de 30 toneladas, localizado e travado sobre o martelo de aço, até a ruptura do elemento do corpo-de-prova.

3.8.2 Carregamento Dinâmico

A força dinâmica foi aplicada por meio de um martelo solto de diferentes alturas sobre a extremidade em balanço de uma viga, como representado na Figura 3.15.

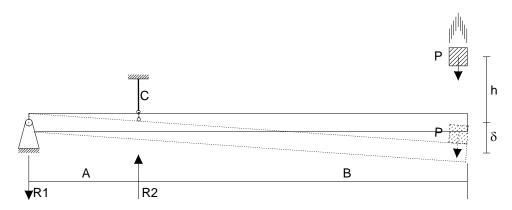


Figura 3.15 – Viga bi-apoiada com extremidade em balanço, adaptada de Martins Junior (2006).

Para aplicar o carregamento dinâmico foi adaptado um sistema baseando-se no aparato utilizado por Martins Junior (2006). A força de impacto amplificada foi alcançada por meio de um martelo de massa conhecida, solto de uma altura, sobre a extremidade em balanço de um perfil metálico I (255 mm x 175 mm) com rigidez à flexão elevada. Na outra extremidade do perfil metálico foi instalado um apoio com restrição nos eixos vertical e horizontal e livre a rotação. Para evitar a rotação de todo o sistema de transferência de força empregou-se uma rótula, anulando-se quaisquer solicitações não verticais no elemento de viga (Figura 3.16).

Foram montadas estruturas de aço reforçadas na face inferior do perfil metálico I (255 mm x 175 mm) e no topo do elemento de viga, fixadas por quatro barras com rosca e porcas $\phi=25$ mm. Com isso a força de impacto gerada pelo martelo foi transmitida à viga, sendo amplificada devido ao braço de alavanca, sem que o sistema absorvesse energia.

Por meio de várias combinações de altura de queda do martelo pode-se alcançar diversas taxas de carregamento.

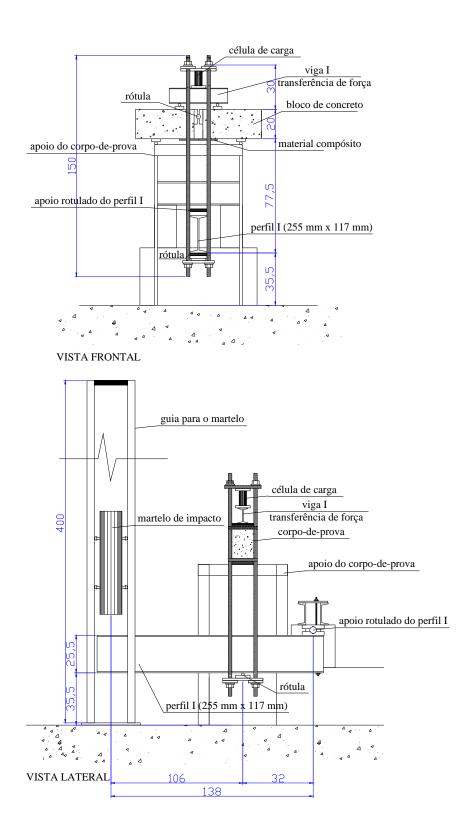


Figura 3.16 – Detalhes do aparato de ensaio.

3.9 Força Normal Aplicada no CFC

Para obtenção da força no reforço foram utilizadas as expressões 3.1 e 3.2. Estas expressões são resultados do equilíbrio das forças aplicada no sistema, como mostra a Figura 3.17:

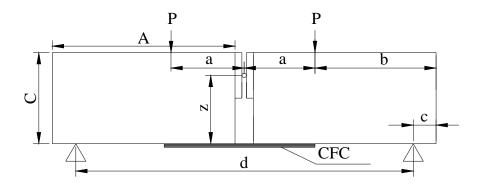


Figura 3.17 – Esquema das distâncias dos pontos de aplicação de carga e apoio.

$$F_f = \frac{N}{2z} \left(\frac{d}{2} - .a \right) \tag{3.1}$$

$$F_f = \frac{R}{z} \left(\frac{d}{2} - a \right) \tag{3.2}$$

sendo

 F_f – força normal aplicada no CFC, kN;

N – força lida pela célula de carga localizada no topo a viga, kN;

R – força lida pela célula de carga localizada no apoio da viga, kN;

A e C – dimensões do bloco de concreto (40 x 20 x 15 cm);

P – força aplicada;

a – distância do ponto de aplicação da força ao eixo da rótula, 16 cm;

b – distância do ponto de aplicação da força ao ponto de apoio, 26 cm;

c – distância do ponto de apoio à extremidade do bloco, 14 cm;

d – distância entre os apoios do corpo-de-prova, 56 cm;

z – distância do eixo da rótula ao CFC, braço de alavanca, 15 cm;

3.10 Tensão de Aderência do CFC

A tensão de aderência da ancoragem é determinada usando-se o valor da ${\cal F}_f$, é dada por:

$$\tau_{ad} = \frac{F_f}{b_f l_a} \tag{3.3}$$

sendo

 τ_{ad} – tensão de aderência;

 F_f – força normal aplicada ao CFC;

 b_f – largura do CFC;

 l_a – comprimento de ancoragem do CFC.

3.11 Tensão Normal no CFC

A tensão normal no CFC é determinada por:

$$\sigma_{fibra} = \frac{F_f}{b_f t_f} \tag{3.4}$$

sendo:

 σ_{fibra} – tensão normal;

 b_f – largura do CFC;

 t_f – espessura da seção transversal do CFC.