

3

Programa Experimental

3.1.

Introdução

Este estudo experimental tem como objetivo avaliar a aderência entre o concreto e compósitos de tecido de fibra de carbono por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova constituídos de dois blocos de concreto (móvel e fixo) ligados por tiras de tecidos de CFC coladas em duas laterais opostas. Nos ensaios foram medidas as deformações no concreto e no tecido de fibra de carbono, e calculadas as tensões de aderência e os deslocamentos relativos entre o concreto e o compósito.

Foram ensaiados nove corpos-de-prova identificados conforme a seguinte nomenclatura: L50-R25-1(piloto), L50-R25-2, L50-R35-1, L50-R35-2, L50-R45-1, L50-R45-2, L100-R25, L100-R35e L100-R45. A letra L significa a largura do tecido da lateral instrumentada que foi de 50 *mm* e 100 *mm* e a letra R significa a resistência pretendida à compressão dos corpos-de-prova na idade do ensaio. Os números 1 e 2 no final da nomenclatura indicam que foram ensaiados dois corpos-de-prova iguais. Para melhor descrição dos corpos-de-prova, estes foram divididos em dois grupos: grupo A, referente aos corpos-de-prova com largura da lateral instrumentada do tecido igual a 50 *mm* e grupo B, referente aos corpos-de-prova com largura da lateral instrumentada do tecido igual a 100 *mm*.

Todos os corpos-de-prova tinham dimensões de 200 *mm* x 200 *mm* x 200 *mm* e comprimentos de ancoragem de 150 *mm*.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova, as características desses elementos, os esquemas de concretagem e de instrumentação dos corpos-de-prova, os dispositivos de ensaio, os sistemas de aplicação da carga e de leitura das deformações, a descrição das etapas de aplicação do tecido, além de todas as etapas dos ensaios.

3.2. Materiais

3.2.1. Concreto

O concreto dos corpos-de-prova foi dosado pelo método do ACI – American Concrete Institute para alcançar resistências à compressão de 25 *MPa*, 35 *MPa* e 45 *MPa* com o objetivo principal de se obter valores diferindo de aproximadamente 10 *MPa*.

Os traços, em massa, dos concretos dos corpos-de-prova foram: 1: 2,59 : 3,07, 1:1,77 : 2,37 e 1:1,22 : 1,88 (cimento : areia : agregado graúdo), com relação água cimento de 0,62, 0,48 e 0,38 respectivamente.

O cimento empregado no preparo do concreto foi o CII F32. A areia era de rio, lavada, com massa específica de $2,60 \text{ g/cm}^3$, e módulo de finura de 2,86 obtidos por meio de análise feita no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, de acordo com a NBR 9776 e NBR 7217. O agregado graúdo era de gnaíse, brita 1, com dimensão máxima característica de 19 mm, módulo de finura de 6,95, massa específica absoluta de $2,63 \text{ g/cm}^3$ e massa específica aparente de $1,61 \text{ g/cm}^3$, também obtidas no laboratório de acordo com a NBR 7217 e NBR 9937. A análise granulométrica e a determinação das massas específicas dos agregados graúdo e miúdo encontram-se nos Anexos A e B, respectivamente.

O concreto foi misturado mecanicamente numa betoneira com capacidade de 100 ℓ, de forma a se obter $0,12 \text{ m}^3$ de material para cada dosagem. Foram necessárias duas betonadas para cada concretagem dos corpos-de-prova.

O consumo por metro cúbico de concreto dos materiais empregados e os valores de abatimento do tronco de cone para cada betonada são dados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.

<i>Material</i>	<i>Quantidade / m^3</i>		
	$f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$
Cimento CII F32	323 kg	417 kg	526 kg
Areia	835 kg	737 kg	644 kg
Brita 1	990 kg	990 kg	990 kg
Água	148 ℓ	165 ℓ	171 ℓ

Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone em mm.

<i>Betonada</i>	<i>Abatimento de Tronco de Cone (mm)</i>		
	$f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$	$f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$
1º	90	90	60
2º	95	95	40

3.2.1.1.**Resistência à Compressão Simples do Concreto**

Foram realizados, para cada dosagem, ensaios de compressão simples em 15 corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, foram moldados em obediência à NBR 5738/1994. Após sete dias os corpos-de-prova foram desformados. Os ensaios de resistência à compressão do concreto foram realizados aos sete e 28 dias e no dia de cada ensaio. Como os ensaios foram realizados com mais de 120 dias após as concretagens e as resistências tiveram pouca variação, foi feita uma média das resistências obtidas nos ensaios dos corpos-de-prova com mesma resistência. Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão simples na prensa CONTENCO com capacidade de 2400 kN, no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, em obediência à norma NBR 5739. Os valores médios da resistência à compressão simples são mostrados nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5, e nos diagramas resistência x dias de concretagem apresentados nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 \text{ MPa}$.

<i>Ensaio dos Corpos-de-Prova</i>	<i>Idade do Concreto (dias)</i>	<i>Quantidade de Corpos-de-prova</i>	<i>$f_{c,médio}$ (MPa)</i>
	7	3	16,5
	28	3	20,5
L50-R25-1	129	3	26,6
L50-R25-2	183	3	26,6
L100-R25	215	3	26,6

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 \text{ MPa}$.

<i>Ensaio dos Corpos-de-Prova</i>	<i>Idade do Concreto (dias)</i>	<i>Quantidade de Corpos-de-prova</i>	<i>$f_{c,médio}$ (MPa)</i>
	7	3	21,7
	28	3	28,7
L50-R35-1	183	3	34,6
L50-R35-2	191	3	34,6
L100-R35	219	3	34,6

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 \text{ MPa}$.

<i>Ensaio dos Corpos-de-Prova</i>	<i>Idade do Concreto (dias)</i>	<i>Quantidade de Corpos-de-prova</i>	<i>$f_{c,médio}$ (MPa)</i>
	7	3	30,9
	28	3	38,1
L50-R45-1	183	3	44,9
L50-R45-2	184	3	44,9
L100-R45	206	3	44,9

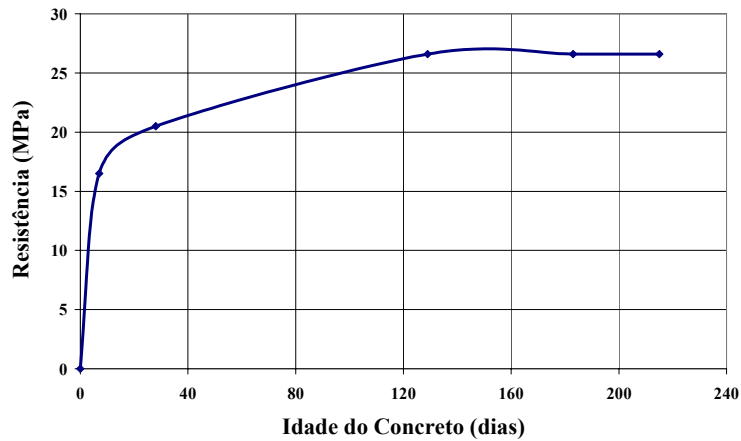


Figura 3.1 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.

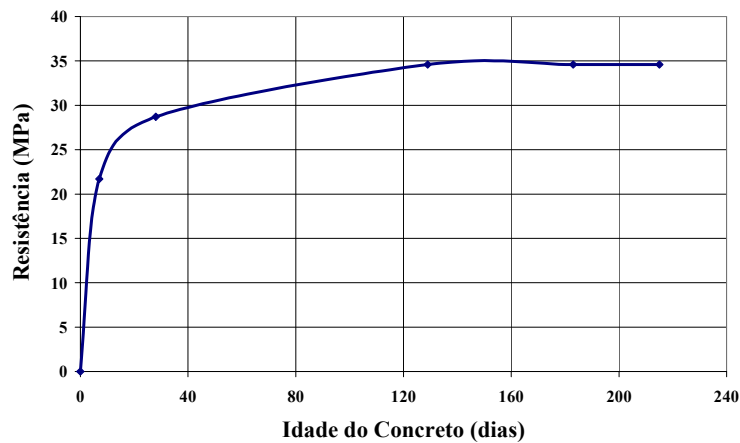


Figura 3.2 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.

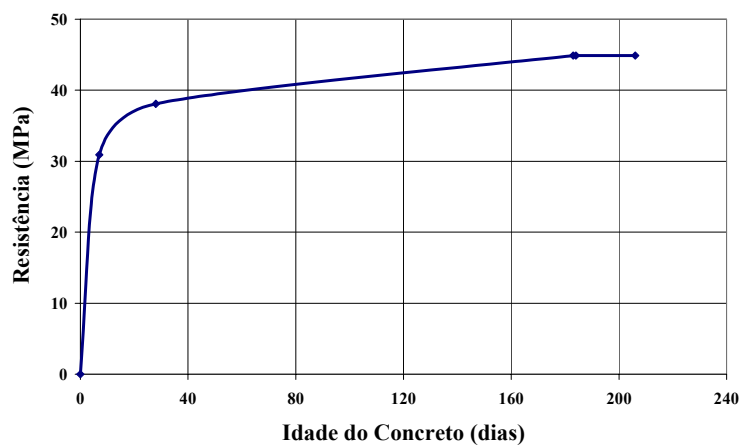


Figura 3.3 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.

3.2.1.2.**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 em obediência à NBR 5738/1994, com dimensões $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ para cada dosagem. Nestes ensaios, as deformações foram medidas por meio de dois extensômetros elétricos com comprimento de 67 mm , colados à meia altura do corpo-de-prova em posições diametralmente opostas.

Este ensaio, realizado em obediência à NBR 8522, consiste na aplicação de carregamento crescente preestabelecido em função da resistência à compressão do concreto medida previamente.

O procedimento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade do concreto é o correspondente à simulação de uma estrutura em seu primeiro carregamento (Plano de carga tipo III), sendo calculado somente o módulo de deformação secante de acordo com a equação 3.1, sendo este o módulo correspondente a $0,3 f_c$, dado por:

$$E = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (3.1)$$

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 ;

$\sigma_{\text{inf}} = 0,5\text{MPa}$.

De acordo com a NBR 8522, somente devem ser considerados válidos os resultados de ensaios de corpos-de-prova cujas resistências f_{real} não diferem mais de 20 % das resistências previstas f_c .

Os resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8, e os gráficos tensão x deformação específica dos corpos-de-prova válidos para cada concretagem são mostrados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6.

Tabela 3.6 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25MPa$.

Corpos-de-Prova	Carga de Ruptura P (kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Carga para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
2	162,96	20,75	3,10	48,27	6,14	0,28	18,52
3	141,91	18,07	3,10	48,32	6,15	0,31	18,02
Média	152,43	19,41	3,10	48,30	6,15	0,30	18,27

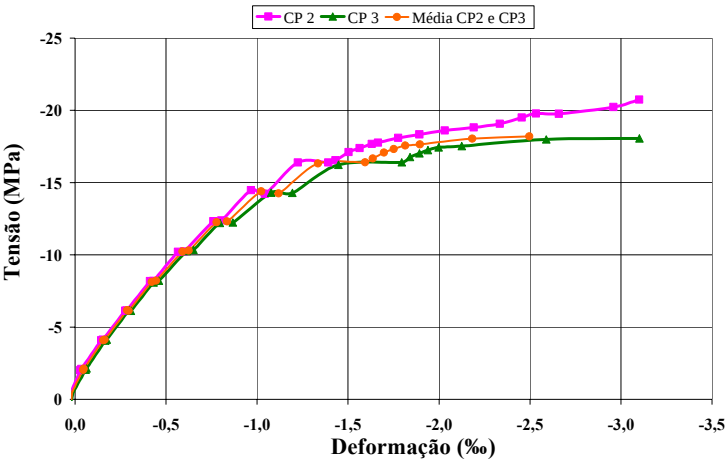


Figura 3.4 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25MPa$.

O CP1 não foi considerado, pois sua f_{real} estava abaixo de 20 % das resistência prevista f_c .

Tabela 3.7 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35MPa$.

Corpos-de-prova	Carga de Ruptura P (kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Carga para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	218,48	27,82	2,11	64,57	8,22	0,33	23,03
2	228,13	29,05	1,72	63,58	8,09	0,29	25,23
3	196,27	24,99	2,02	63,55	8,09	0,31	23,52
Média	214,29	27,29	1,95	63,90	8,13	0,31	23,93

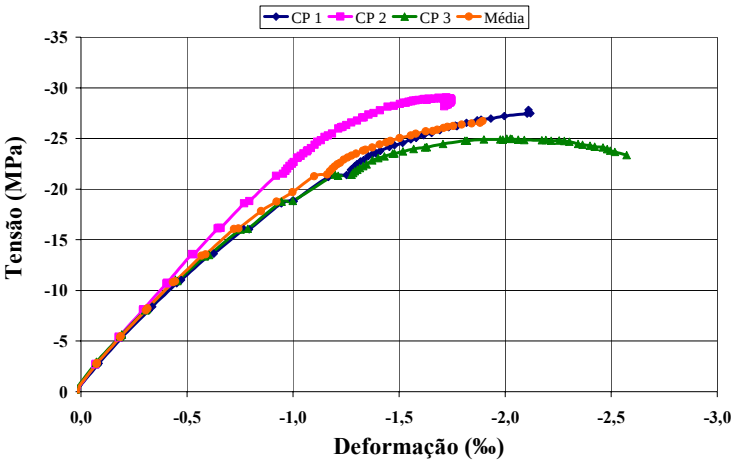


Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.

Tabela 3.8 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.

Corpos-de-prova	Carga de Ruptura P (kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Carga para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	323,49	41,19	2,72	88,99	11,33	0,45	22,88
2	295,14	37,58	2,36	89,14	11,35	0,47	23,03
3	288,32	36,71	2,61	89,05	11,34	0,46	22,42
Média	302,32	38,49	2,56	89,06	11,33	0,46	22,78

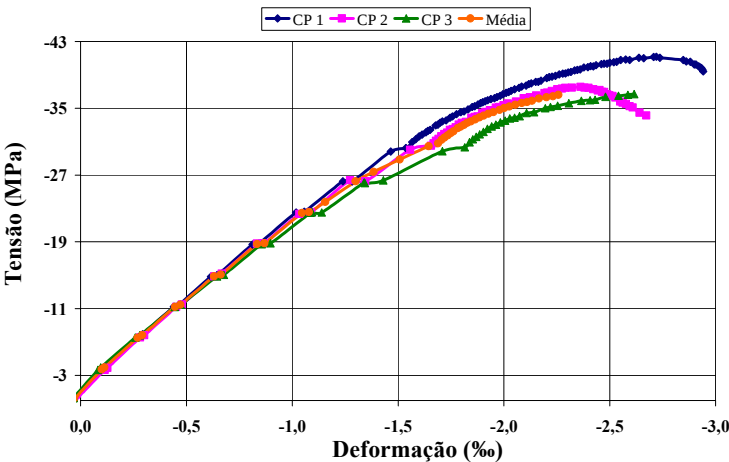


Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.

A NBR 6118 prescreve para o módulo de elasticidade secante do concreto a seguinte fórmula:

$$E_{cs} = 0,85 \times 5600 \sqrt{f_c} \quad (MPa) \quad (3.2)$$

A Tabela 3.9 mostra uma comparação dos resultados obtidos no ensaio com os valores calculados pela NBR 6118.

Tabela 3.9 – Comparações do módulo de elasticidade secante encontrado no ensaio com o prescrito pela NBR 6118.

<i>Corpos-de-Prova ($f_{c,28\text{ dias}}$)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante (Ensaio) E_{cs} (GPa) (aos 28 dias)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Secante (NBR 6118) E_{cs} (GPa) (aos 28 dias)</i>
$f_{c,dosagem} = 25\text{ MPa}$	18,27	20,97
$f_{c,dosagem} = 35\text{ MPa}$	23,93	24,87
$f_{c,dosagem} = 45\text{ MPa}$	22,78	29,53

O esquema do ensaio, da aplicação das cargas e das medidas de deformações é mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Sistema de aplicação das cargas e corpo-de-prova após o ensaio.

Todos os dados, resultados e gráficos obtidos nos ensaios do módulo de elasticidade encontram-se no Anexo C.

3.2.2. Tecido de Fibra de Carbono

Foram utilizados tecidos de fibra de carbono (Tec-Fiber) fornecidos pela Rheotec Aditivos de Concreto Ltda, do tipo N-300 (Figuras 3.8 e 3.9), com as seguintes características, fornecidas pelo fabricante:



Figura 3.8 – Tecido de fibra de carbono com destaque para o sentido das fibras.

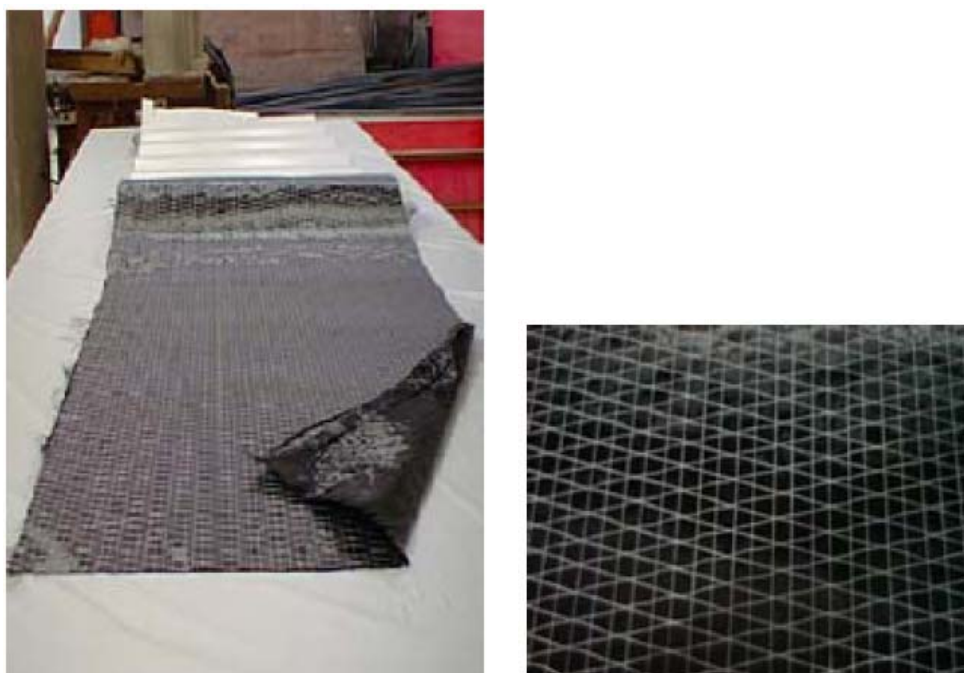


Figura 3.9 – Verso do tecido de fibra de carbono com destaque para a costura (em contato com o concreto).

- Largura da faixa = 500 mm ;
- Espessura = $0,165\text{ mm}$;
- Área da seção transversal = $82,5\text{ mm}^2$;
- Deformação específica na ruptura = $1,55\%$;
- Resistência à tração = 3.550 MPa ;
- Módulo de elasticidade = 235 GPa ;
- Peso do material (folha) = 300 g/m^2

Para a colagem dos CFC aos corpos-de-prova foram utilizadas tiras de $760\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ e $760\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ para a lateral instrumentada, $1160\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ e $1160\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ para a lateral oposta à instrumentada. No total foram utilizados $1,674\text{ m}^2$ de tecido.

3.2.2.1

Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibra de Carbono

O método de ensaio empregado foi o da norma ASTM D 3039 / D 3039M – *Standard Test Method for Tensile Properties of Matrix Composite Material*, que especifica os procedimentos para a determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compostos de fibras reforçados com matriz polimérica (ou resina epóxi).

Essa norma estabelece dimensões mínimas para os corpos-de-prova, de modo que estes tenham um número suficiente de fibras em sua seção transversal que represente as propriedades do material. Essas dimensões são mostradas na Figura 3.10, e a Tabela 3.10 apresentam algumas destas dimensões em função da orientação das fibras.

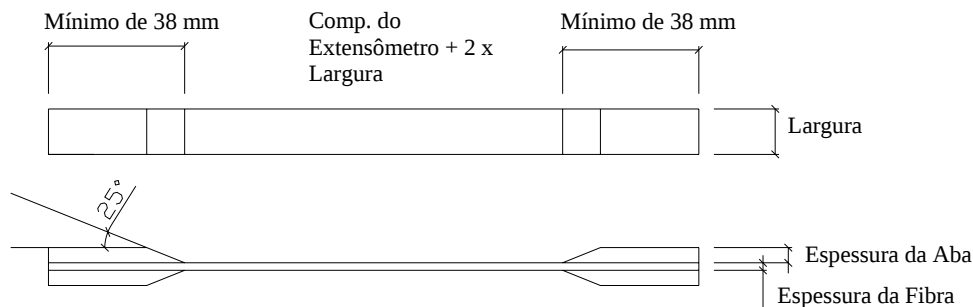


Figura 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.

Tabela 3.10 – Geometria dos corpos-de-prova recomendada 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° 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	-	-	-

Os corpos-de-prova unidirecionais devem ser confeccionados com abas de alumínio (*tabs*), com o objetivo de evitar o surgimento de falhas prematuras quando da aplicação das cargas.

Foram ensaiados à tração seis corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibra de carbono revestidos com resina epóxi, com 25mm de largura, 250mm de comprimento e abas de alumínio de 25mm de largura por 60mm de comprimento. Cada corpo-de-prova foi instrumentado com um extensômetro elétrico de resistência em seu centro, e as deformações específicas no CFC foram lidas por meio do indicador manual de deformações VISHAY.

Os ensaios foram realizados na máquina universal AMSLER com capacidade de 20kN, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ITUC - Instituto de Tecnologia da PUC-Rio.

De acordo com a norma ASTM D 3039 / D 3039M, o cálculo da resistência à tração do compósito de fibras de carbono é dado por:

$$f_{tf} = \frac{F_{máx}}{A} \quad (3.3)$$

onde

f_{tf} – resistência à tração (MPa);

$F_{máx}$ carga máxima aplicada (N);

A – área do corpo-de-prova (mm^2).

O módulo de elasticidade é calculado a partir do gráfico tensão x deformação específica do CFC (Figura 3.11), sendo igual ao coeficiente angular do trecho linear do mesmo.

Os resultados do ensaio constam na Tabela 3.11, e as Figuras 3.12 e 3.13 mostram o esquema de ensaio e os corpos-de-prova ensaiados, respectivamente.

Dois corpos-de-prova foram descartados, pois os resultados destes ficaram discrepantes em relação aos outros.

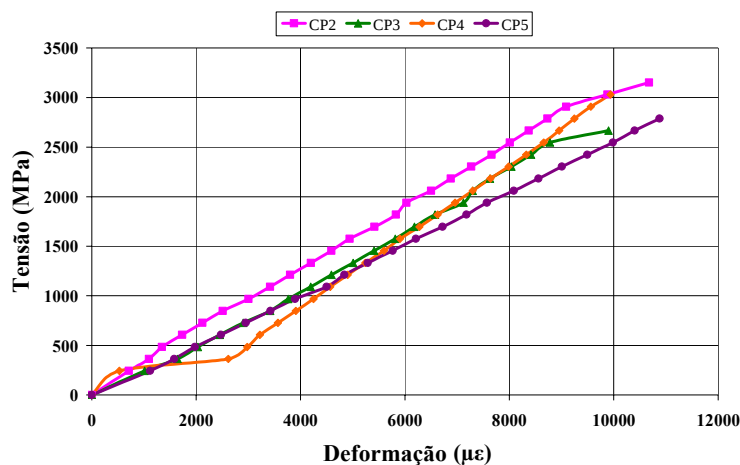


Figura 3.11 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova de CFC.

Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.

<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Carga $F_{máx}$ (N)</i>	<i>Resistência f_{tf} (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade E_f (GPa)</i>
2	13.500	3.272,73	309,2
3	11.500	2.787,88	304,2
4	12.500	3.030,30	361,8
5	11.500	2.787,88	260,1
Média	12.250	2969,70	308,8



Figura 3.12 – Corpos-de-prova de tecidos de fibra de carbono revestidos com resina epóxi.



Figura 3.13 – Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades: (a) vista frontal do corpo-de-prova antes do ensaio; (b) ruptura do corpo-de-prova.

Todos os dados, resultados e gráficos obtidos nos ensaios de resistência à tração do CFC encontram-se no Anexo D.

3.2.2.2.

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, devem-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, dependendo das condições da superfície, são dispensáveis. A argamassa de reparo se torna necessária se houver significativas irregularidades na superfície. A argamassa epoxídica promove a regularização final da superfície. Em superfícies sem muitas irregularidades o uso dessas argamassas se torna dispensável.

Na aplicação do tecido de fibra de carbono no substrato de concreto dos corpos-de-prova 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.

3.2.2.2.1. Resina de Imprimação

Após a limpeza da superfície do corpo-de-prova foi aplicada a Tec-Poxi PR da Rheotec Aditivos de Concreto Ltda. (Figura 3.14). 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 dos componentes 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: mínimo de 40 min.
- Secagem ao toque: 4 horas máximo.
- Secagem ao manuseio: 6 horas máximo.
- Secagem completa: 10 horas máximo.

- Cura total: 7 dias.
- Alongamento por 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, 20° C máximo de 1 hora e a 35° C máximo de 15 minutos.



(a)



(b)

Figura 3.14 – Resina de imprimação: (a) preparação; (b) mistura pronta para a aplicação.

3.2.2.2.2

Resina Epoxídica

Foi aplicada a Tec-Poxi da Rheotec (Figura 3.15), resina epoxídica responsável pela perfeita aderência do reforço com tecido de fibra de carbono e o substrato de concreto, transferindo as tensões do reforço para esse. Essa resina é uma componente básica deste sistema de reforço.

Algumas das suas propriedades, numa quantidade de 100 gramas da mistura dos componentes A + B, temperatura de 22° C , são:

- Componente A: azul.
- Componente B: levemente amarelado.
- Mistura A+B: azul transparente.
- Proporção dos componentes: 72% de componente A e 28 % de componente B (em peso).
- Viscosidade: 70 a 80 s (CF 4).

- Peso específico: $1,055 \text{ g} / \text{cm}^3$.
- Sólido por volume: mínimo de 98 %.
- Tempo de vida útil da mistura: mínimo de 40 min.
- Secagem ao toque: 4 horas máximo.
- Secagem ao manuseio: 6 horas máximo.
- Cura total: 7 dias.
- Aderência: $1,5 \text{ MPa}$.
- Alongamento por ruptura = $0,300 \text{ mm} / \text{mm}$.
- Resistência à tração: $55 \pm 3,0 \text{ MPa}$ 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 e a 35° C máximo de 20 minutos.



(a)



(b)

Figura 3.15 – Resina epóxi: (a) componentes A e B; (b) preparação da resina para a aplicação.

3.3. Confecção dos Corpos-de-Prova

3.3.1. Formas

As formas dos corpos-de-prova foram feitas de aço, compostas de cinco peças que se encaixam, presas com quatro parafusos (Figura 3.16).

Nas superfícies internas das formas foram aplicadas camadas de desmoldantes, de modo a promover a vedação das mesmas e facilitar o processo de desmoldagem.



Figura 3.16 – Formas de aço para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.

3.3.2. Corpos-de-Prova de Concreto

Para a realização dos ensaios foram utilizados corpos-de-prova compostos por dois blocos iguais (móvel e fixo) de concreto, com dimensões de $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, cujas resistências à compressão aos 28 dias foram de $20,5\text{ MPa}$, $28,7\text{ MPa}$ e $38,1\text{ MPa}$, respectivamente (Figura 3.17).

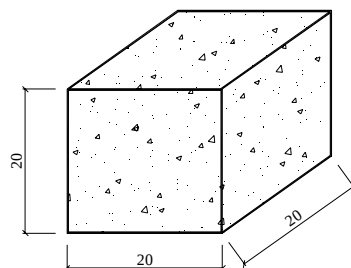


Figura 3.17 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).

3.3.3. Concretagem

Os corpos-de-prova foram concretados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM/DEC).

O lançamento do concreto foi realizado de forma manual, e o adensamento deu-se por meio de vibrador de imersão com diâmetro de $25,4\text{ mm}$ durante e

imediatamente após o lançamento do concreto nas formas. Não foi realizado nenhum processo especial de cura.

Após sete dias de cada concretagem os corpos-de-prova foram desformados e permaneceram em condições ambientes no laboratório até as datas dos ensaios.

3.3.4. Colagem do Tecido de Fibra de Carbono

Os blocos dos corpos-de-prova - móvel e fixo - foram posicionados em cantoneiras fixadas num pórtico para que estes ficassem alinhados, de modo que os eixos das tiras de tecido ficassem no mesmo plano (Figura 3.18).

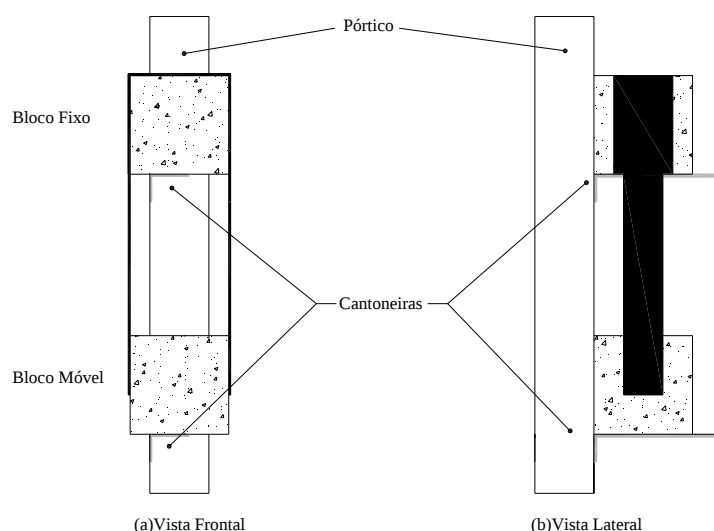


Figura 3.18 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.

A aplicação dos tecidos de fibra de carbono foi feita em várias etapas de acordo com as instruções do fabricante. O tecido foi previamente cortado com estilete nas dimensões pré-determinadas, e os componentes do primer e da resina foram homogeneizados em separado, suas massas aferidas em balança digital, de acordo com as proporções exatas, e misturados manualmente. Em seguida preparou-se a superfície do substrato de concreto que recebeu o tecido. Nesta etapa a superfície do substrato foi limpa, deixando-a livre de qualquer resíduo ou poeira.

Com a superfície pronta para receber o tecido, 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 tecido.

Cerca de três horas após a aplicação do “primer”, tempo necessário para se chegar ao ponto de viscosidade ideal da resina de imprimação, aplicou-se a primeira camada de resina epóxi no concreto, e, simultaneamente, uma camada de resina no tecido que foi aplicado, finalizando a formação do compósito. Fez-se então a aplicação do tecido na estrutura, de modo a se retirar todo o ar aprisionado. 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.

Antes da cura da resina (seis dias), os corpos-de-prova foram acoplados à estrutura de ensaio, os extensômetros elétricos de resistência, os mecânicos (somente no corpo-de-prova L50-R25-1/piloto) e os LVDT foram instalados nos mesmos.

3.3.5. Instrumentação dos Corpos-de-Prova

O comportamento estrutural dos corpos-de-prova foi acompanhado durante os ensaios por medições das deformações no tecido de fibra de carbono e no concreto por meio de extensômetros elétricos de resistência, por meio de medições do deslocamento dos corpos-de-prova com LVDT e a leitura das cargas aplicadas realizadas por intermédio de uma célula de carga com capacidade para 100 kN.

O corpo-de-prova piloto (L50-R25-1) foi instrumentado com sete extensômetros de resistência na face lateral da fibra de 50mm de largura, com espaçamento de 23mm entre eles. Sete medidas de deformação específica no concreto foram efetuadas por meio de extensômetros mecânicos. Os extensômetros elétricos no tecido foram numerados de 0 a 6 a partir da extremidade esquerda do comprimento de ancoragem do tecido (Figura 3.19). Logo, a lateral instrumentada do tecido possuiu seis trechos, denominados trecho 0-1, trecho 1-2, trecho 2-3, trecho 3-4, trecho 4-5 e trecho 5-6, onde foram calculadas as tensões de aderência e as deformações médias.

Este teste piloto foi realizado para prever a carga de ruptura, o funcionamento dos extensômetros e o deslocamento do corpo-de-prova.

A Figura 3.19 mostra o posicionamento dos extensômetros elétricos e mecânicos no tecido e no concreto.

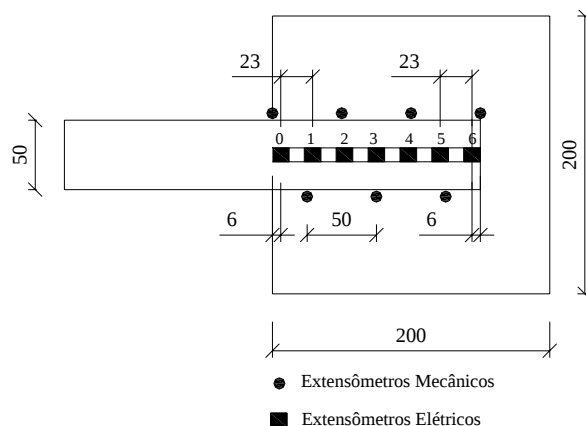


Figura 3.19 – Posicionamento dos extensômetros elétricos, mecânicos no corpo-de-prova L50-R25-1/piloto (medidas em mm).

Como os dois últimos extensômetros não mediram deformações no tecido, decidiu-se diminuir de sete para cinco extensômetros, posicionados ao longo do comprimento de ancoragem com igual espaçamento. Permaneceu-se com o extensômetro da extremidade direita da ancoragem para confirmar a ausência ou não de deformação nesta extremidade nos outros corpos-de-prova.

Os extensômetros mecânicos não forneceram deformações no concreto, talvez por serem imprecisos, portanto, decidiu-se substituí-los por dois extensômetros elétricos posicionados no concreto nas duas extremidades do comprimento de ancoragem do tecido (Figura 3.20).

Os corpos-de-prova L50-R25-2, L50-R35-1, L50-R35-2, L50-R45-1 e L50-R45-2 (grupo A) foram instrumentados com cinco extensômetros elétricos de resistência na face lateral da fibra de 5 cm de largura, com espaçamento de 3,5 cm entre eles, e dois no concreto com espaçamento de 11,7 cm (Figura 3.20).

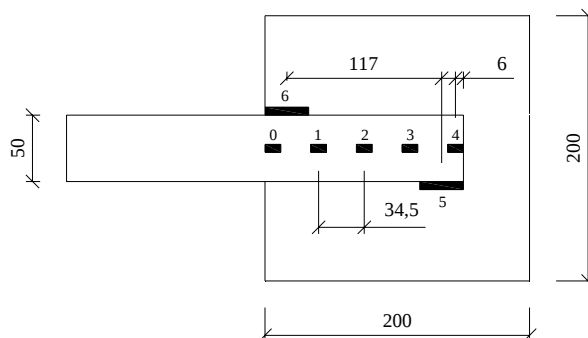


Figura 3.20 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo A exceto o L50-R25-1/piloto (medidas em mm).

Os extensômetros elétricos colados no tecido, para os corpos-de-prova do grupo A, foram numerados de 0 a 4 a partir da extremidade esquerda do comprimento de ancoragem do tecido, e os extensômetros do concreto foram numerados de 5 a 6 (Figura 3.20). Logo, a lateral instrumentada do tecido possuiu quatro trechos onde foram calculadas as tensões de aderência, deformações médias no CFC e os deslocamentos.

Como não foram lidas deformações no extensômetro 5 (extremidade não carregada) do concreto nos corpos-de-prova anteriores, decidiu-se que esse extensômetro seria retirado dos demais corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova do grupo B (L100-R25, L100-R35 e L100-R45) foram instrumentados com cinco extensômetros elétricos de resistência na face lateral do tecido de 10 cm de largura, com espaçamento de 3,5 cm entre eles e um extensômetro no concreto. O sistema de numeração dos trechos foi igual ao dos corpos-de-prova do grupo A (Figura 3.21).

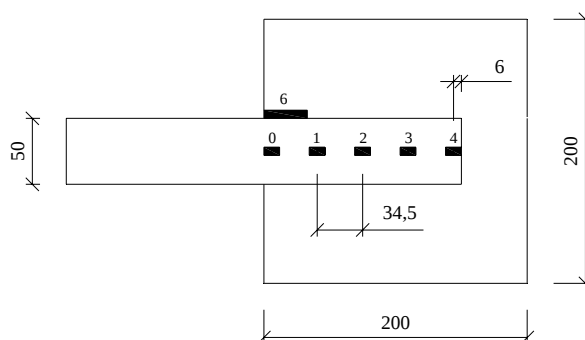


Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo B (medidas em mm).

Todos os corpos-de-prova tiveram o mesmo posicionamento dos LVDT (Figura 3.22).

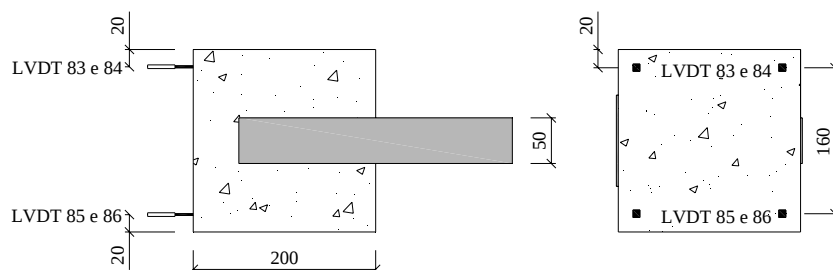


Figura 3.22 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.

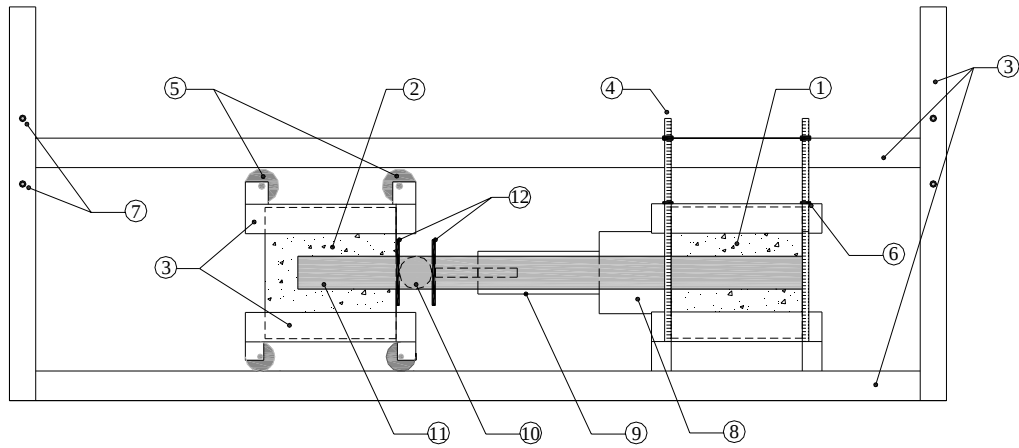
3.4. Descrição dos Ensaios

3.4.1. Montagem

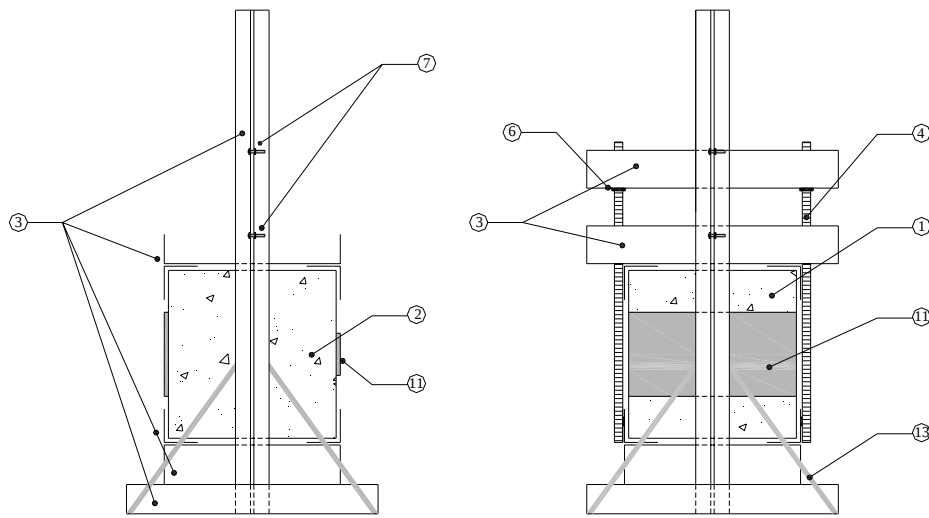
O aparato empregado nos ensaios é formado de cantoneiras metálicas e roldanas. Tem a característica de permitir o deslocamento do bloco móvel (Figura 3.23) ao longo de um eixo de mesma direção da carga que é aplicada no centro dos blocos de concreto. O bloco fixo serve de apoio para o macaco hidráulico de 120 *kN* e para a célula de carga 100 *kN*. A carga aplicada pelo macaco é transferida para as tiras do tecido de fibra de carbono através dos blocos de concreto.

Uma chapa de aço foi colada ao bloco móvel para que a carga se distribuísse de modo uniforme, e entre essa chapa e o macaco foi colocada uma rótula de aço.

A Figura 3.24 mostra um corpo-de-prova pronto para ser ensaiado.



(a) Vista frontal.

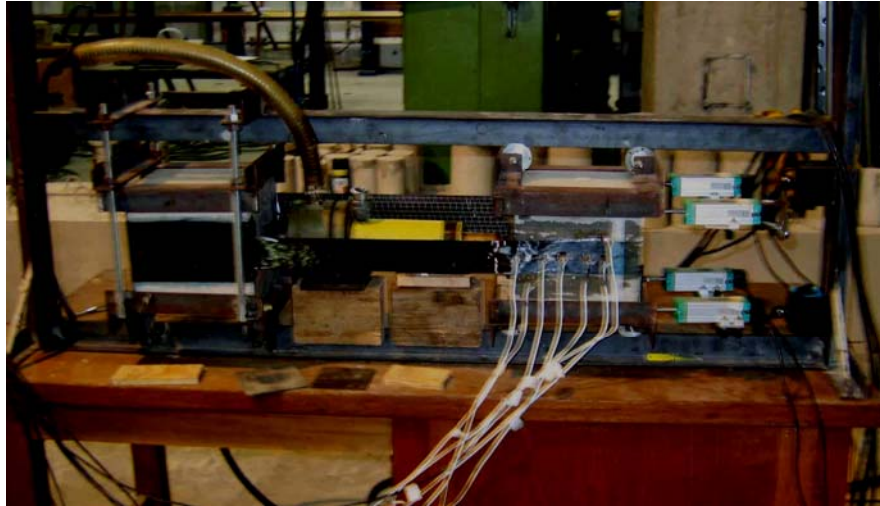


(b) Vistas laterais.

Legenda:

- | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| ① Bloco Fixo | ⑤ Roldanas | ⑨ Macaco Hidráulico | ⑬ Barra de Fixação |
| ② Bloco Móvel | ⑥ Porcas | ⑩ Rótula | |
| ③ Cantoneiras | ⑦ Parafusos | ⑪ CFC | |
| ④ Barra Rosqueada | ⑧ Célula de Carga | ⑫ Chapas de Aço | |

Figura 3.23 – Equipamento do ensaio de tração-compressão.



(a) Vista Frontal



(b) Vista Posterior

Figura 3.24 – Esquema do ensaio.

Foi realizado o mesmo ensaio utilizando chapas metálicas com as mesmas áreas transversais das tiras de tecido de fibra de carbono para a verificação da distribuição exata das cargas na lateral em estudo. Estas chapas foram instrumentadas com dois extensômetros de resistência posicionados nas duas laterais opostas, entre os dois blocos. Verificou-se que as cargas foram igualmente distribuídas entre as duas chapas metálicas, portanto, o mesmo pode ser aplicado às tiras de tecido do ensaio.