

3

Programa experimental

3.1.

Introdução

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova de concreto e caracterizadas as tiras de CFC e as resinas utilizadas nos ensaios.

O objetivo deste estudo experimental é analisar a aderência entre o concreto e compósitos de fibra de carbono, CFC, por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova compostos 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 específicas no concreto e no CFC e calculadas as tensões de aderência.

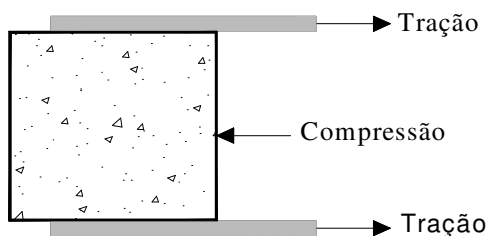


Figura 3.1 – Esquema do ensaio de tração-compressão.

Foram ensaiados 18 corpos-de-prova identificados conforme a seguinte nomenclatura: MCLI-1, MCLI-2, MCLII-1, MCLII-2, MCLIII-1, MCLIII-2, MCRI-1, MCRI-2, MCRI-3, MCRII-1, MCRII-2, MCRIII-1, MCRIII-2, CDLI-1, CDLII-1, CDLIII-1, CDRII-1, CDRIII-1. As letras MC indicam o carregamento monotônico crescente e CD indicam o carregamento em ciclos de carga e descarga. A letra L indica a superfície lisa do bloco e a letra R a superfície rugosa.

Os números I, II e III junto às letras referem-se à resistência do concreto: o número I refere-se a $f_{c,28} = 23,3 \text{ MPa}$, II refere-se a $f_{c,28} = 28,4 \text{ MPa}$ e III refere-se a $f_{c,28} = 37,1 \text{ MPa}$. Os números 1 e 2 no final da nomenclatura indicam que foram

ensaiados um ou dois corpos-de-prova com as mesmas características. Para melhor descrição dos corpos-de-prova, estes foram divididos em quatro grupos: o grupo I é composto de corpos-de-prova com carregamento monótonico crescente e superfície lisa do bloco; o grupo II é composto de corpos-de-prova com carregamento monótonico crescente e superfície rugosa do bloco; o grupo III é composto de corpos-de-prova com carregamento em ciclos de carga e descarga e superfície lisa do bloco; o grupo IV é composto de corpos-de-prova com carregamento em ciclos de carga e descarga e superfície rugosa do bloco.

As superfícies rugosas às quais foram colados o CFC eram as faces superiores das formas dos corpos-de-prova. Durante a concretagem essas faces foram niveladas com colher de pedreiro e a rugosidade simulada passando-se uma vassoura na superfície do concreto fresco. No preparo da colagem do CFC, as partes pontiagudas e com grandes saliências foram lixadas, de modo a evitar que o CFC pudesse se danificar. Entretanto, essas faces continuaram a ter considerável aspereza, quando comparadas com as faces dos corpos-de-prova lisos.

Os carregamentos em ciclo de carga e descarga foram aplicados em incrementos de 2,5 *kN* (força atuando na lateral do CFC), seguido de descarga total.

Todos os corpos-de-prova tinham dimensões de 200 *mm* x 200 *mm* x 200 *mm* e comprimentos de ancoragem do CFC igual a 120 *mm*.

3.2. Concreto

O concreto utilizado na confecção dos corpos-de-prova foi dosado pelo método do ACI – American Concrete Institute para alcançar, aos 28 dias, três diferentes resistências à compressão.

Os corpos-de-prova foram divididos em três séries de acordo com a resistência à compressão do concreto.

Os traços em massa foram: 1:2,61:3,09; 1:1,82:2,40; 1:1,25:1,89 (cimento : areia : agregado graúdo), com relação água cimento de 0,62 , 0,48 e 0,38, para as respectivas resistências, ou séries de corpos-de-prova. O cimento empregado no preparo do concreto foi o CP II F 32. A areia era de rio lavada, com massa

específica igual a $2,65 \text{ g/cm}^3$ com módulo de finura de 2,86, obtidos por meio de ensaios realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, de acordo com a NBR 9776 e NBR 7217. O agregado graúdo era de gnaiss britado número 1, com dimensão máxima característica igual a 19,1 mm, massa específica absoluta igual a $2,62 \text{ g/cm}^3$ e massa específica aparente igual a $1,61 \text{ g/cm}^3$, também obtidas em laboratório de acordo com a NBR 7217 e NBR 9937. Os resultados da análise granulométrica e a da determinação das massas específicas dos agregados graúdo e miúdo encontram-se no Anexo A.

O concreto foi misturado mecanicamente numa betoneira com capacidade de 100 litros.

Os consumos dos materiais empregados e os valores de abatimento do tronco de cone para cada betonada são mostrados na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respectivamente.

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

Material	Quantidade em kg por m^3		
	Série I	Série II	Série III
Cimento CP II F 32	322,6 kg	416,7 kg	526,3 kg
Areia	841,2 kg	756,9 kg	658,6 kg
Brita 1	998,2 kg	998,2 kg	998,2 kg
Água	148,7 l	153,8 l	159,8 l

Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone.

Abatimento de cone (mm)		
Série I	Série II	Série I
80	80	80

Em cada concretagem foram moldados corpos-de-prova cúbicos e corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova cilíndricos foram utilizados para a determinação da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade do concreto. Os corpos-de-prova foram

moldados em obediência à NBR 5738 e tinham as dimensões de 100 mm × 200 mm. Após sete dias, todos os corpos-de-prova foram retirados das formas.

3.2.1

Resistência à compressão simples do concreto

Para cada série foram realizados ensaios de compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 100 mm × 200 mm. Esses foram realizados aos 28 dias e no dia de cada ensaio. 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 do concreto à compressão simples são mostrados na Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto no dia do ensaio de aderência CFC-concreto.

Série	Corpos-de-prova	Data do ensaio	Quantidade de corpos-de-prova	Idade (dias)	f_c médio (MPa)
I	MCLI-1	24/1/2006	2	153	26,3
	MCLI-2	31/1/2006	2	160	28,9
	MCRI-1	3/2/2006	2	155	23,8
	MCRI-2	6/2/2006	2	158	23,4
	MCRI-3	10/2/2006	2	154	24,1
	CDLI-1	7/3/2006	2	179	23,2
II	MCLII-1	22/2/2006	2	182	31,8
	MCLII-2	20/3/2006	2	208	31,7
	MCRII-1	14/3/2006	2	202	32,9
	MCRII-2	21/3/2006	2	201	29,7
	CDLII-1	21/3/2006	2	201	30,5
	CDRII-1	23/3/2006	2	195	28,2
III	MCLIII-1	24/3/2006	2	196	34,5
	MCLIII-2	7/2/2006	2	167	32,7
	MCRIII-1	8/2/2006	2	160	40,8
	MCRIII-2	9/2/2006	2	153	37,4
	CDLIII-1	22/3/2006	2	202	32,1
	CDRIII-1	23/3/2006	2	195	39,8

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto para 28 dias.

Ensaio dos corpos-de-prova aos 28 dias	Quantidade de corpos-de-prova	f_c médio (MPa)
Série I	2	23,3
Série II	1	28,4
Série III	2	37,1

As resistências à compressão aos 28 dias foram usadas apenas para conferir a variação de resistência, pois na data dos ensaios de aderência concreto–CFC foram realizados ensaios de compressão, cujos resultados foram utilizados na análise efetuada.

3.2.2 Resistência à tração indireta do concreto

Para cada série foram realizados ensaios de tração por compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos de dimensões $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$. Os corpos-de-prova foram ensaiados na prensa CONTENCO, com capacidade de 2400 kN , no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio (Figura 3.2). A resistência à tração indireta foi obtida segundo a fórmula:

$$f_{ct,sp} = \frac{2P}{\pi dh} \quad (3.1)$$

onde

P – força lida na célula de carga;

d – diâmetro do corpo-de-prova;

h – altura do corpo-de-prova.



Figura 3.2 – Ensaio à tração por compressão diametral.

Os valores médios da resistência do concreto à tração indireta são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Série	Quantidade de corpos-de-prova	Idade (dias)	$f_{ct,sp}$ médio (MPa)
I	3	258	2,85
II	4	250	3,15
III	4	242	3,52

3.2.3 Módulo de elasticidade do concreto

Foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos de concreto com dimensões 100 mm×200 mm para cada concretagem, de acordo com a NBR 5738. Os corpos-de-prova foram ensaiados para determinação do módulo de elasticidade do concreto na prensa CONTENCO, com capacidade de 2400 kN, no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC – Rio, em obediência à NBR 8522. Para a medida das deformações específicas do concreto durante o ensaio foram utilizados dois extensômetros elétricos de resistência com comprimento de 67

mm, colados à meia altura do corpo-de-prova em posições diametralmente opostas.



Figura 3.3 – Corpos-de-prova cilíndricos de concreto com extensômetros elétricos de resistência colados à sua meia altura.

O ensaio consistiu na aplicação de carregamento crescente preestabelecido em função da resistência à compressão do concreto. Para cada carregamento tem-se uma tensão no concreto e a sua respectiva deformação específica, com a relação constitutiva dada por:

$$\sigma = E_c \varepsilon \quad (3.2)$$

sendo

σ – tensão no concreto;

E_c – módulo de elasticidade do concreto;

ε – deformação específica do concreto.

O procedimento usado para a determinação do módulo de elasticidade do concreto foi o plano de carga tipo III prescrito na NBR 8522, que corresponde à simulação de uma estrutura em seu primeiro carregamento, onde se calcula apenas o módulo de deformação secante, dado por:

$$E_{\text{sec},n} = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (3.3)$$

onde

$E_{\text{sec},n}$ – 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 tensão σ_{inf} ;

σ_{inf} – 0,5 MPa.

A NBR 8522 prescreve que somente devem ser considerados válidos os resultados de ensaios de corpos-de-prova cujas resistências f_{real} não diferem mais de 20 % da resistência prevista f_c . O módulo secante adotado, segundo a NBR 8522, corresponde a $0,3 f_{c,28}$.

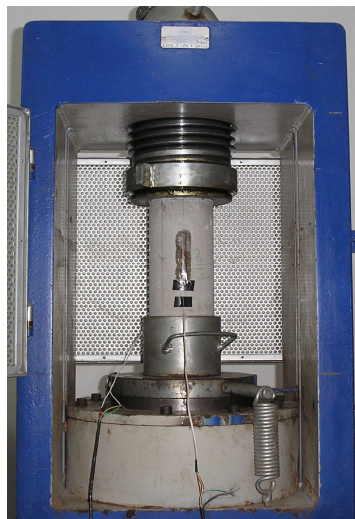


Figura 3.4 – Sistema de aplicação da força ao corpo-de-prova.

Os resultados dos ensaios para cada série estão representados nas Tabelas 3.6 a 3.8 e nos gráficos tensão x deformação específica mostrados nas Figuras 3.5 a 3.9.

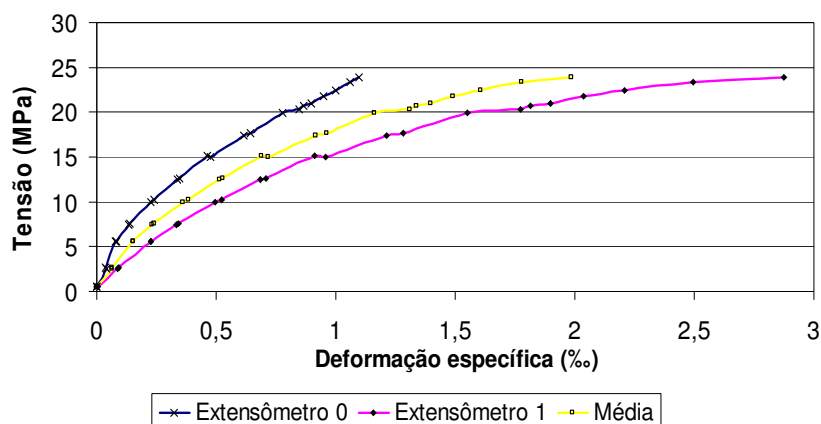


Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série I.

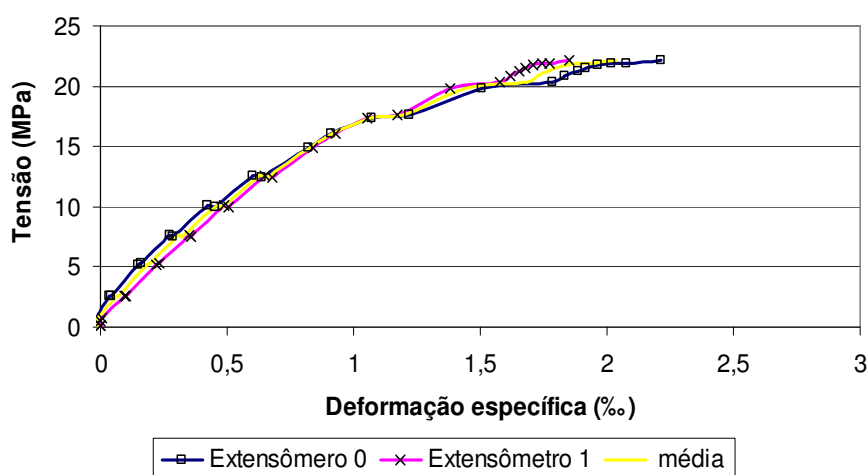


Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série I.

Tabela 3.6 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série I.

Corpo-de-prova	Força de Ruptura P(kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Força para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica para $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	192,18	24,48	1,068	58,43	7,44	0,233	29,73
2	173,91	22,15	2,033	59,53	7,58	0,311	22,04

OBS: O corpo-de-prova 1 da Tabela 3.6 será desconsiderado na análise.

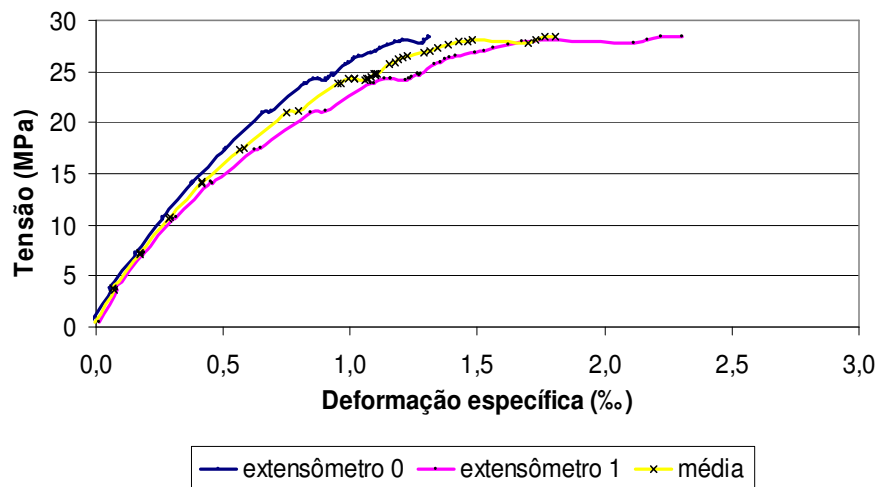


Figura 3.7 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série II.

Tabela 3.7 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série II.

Corpo-de-prova	Força de Ruptura P(kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Força para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica para $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	223,04	28,41	1,806	82,63	10,53	0,292	34,28

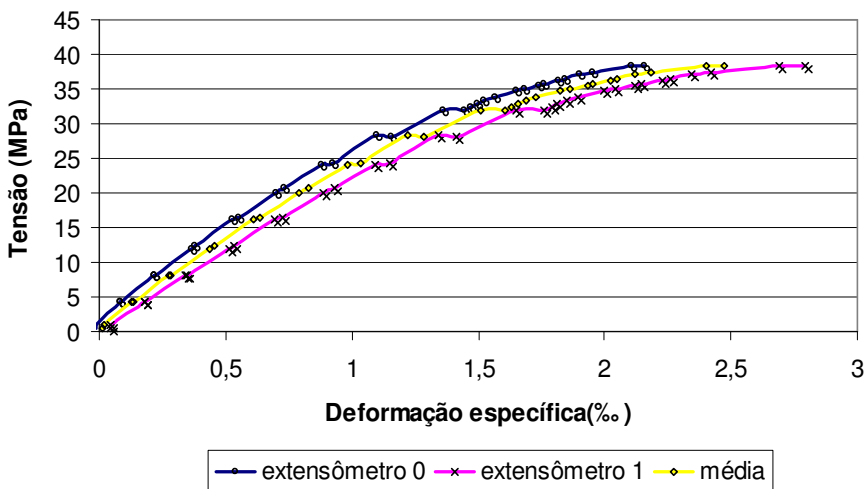


Figura 3.8 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série III.

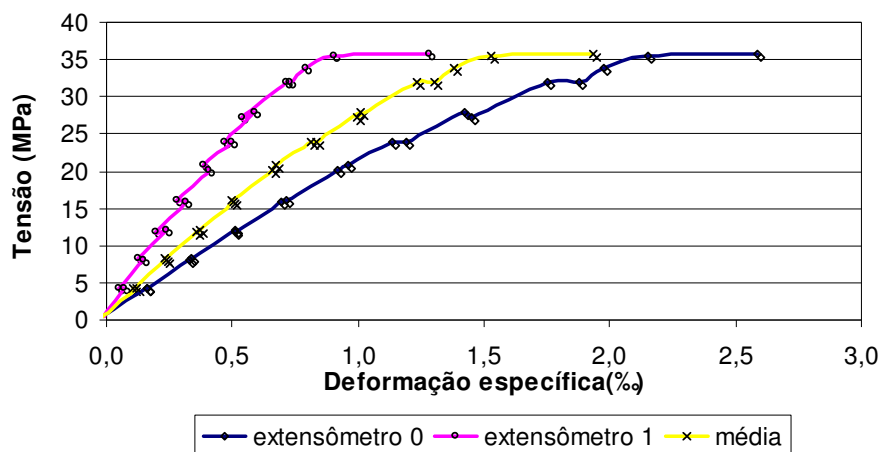


Figura 3.9 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série III.

Tabela 3.8 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série III.

Corpo-de-prova	Força de Ruptura P(kN)	Tensão de Ruptura σ (MPa)	Deformação Específica na Ruptura ϵ_c (‰)	Força para $0,3 f_c$ (kN)	Tensão para $0,3 f_c$ (MPa)	Deformação Específica para $0,3 f_c$ (‰)	Módulo de Elasticidade Secante E_{cs} (GPa)
1	301,75	38,44	2,476	94,19	12,00	0,438	30,26
2	280,36	35,72	1,937	94,58	12,05	0,375	29,90
Média	291,055	37,08	2,206	94,38	12,025	0,407	30,08

A NBR 6118 (2003) prescreve para o módulo de elasticidade secante do concreto a seguinte fórmula:

$$E_{cs} = 0,85 \times 5600 \sqrt{f_c} \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

A Tabela 3.9 mostra uma comparação dos resultados obtidos nos ensaios realizados com os valores calculados pela equação 3.4 prescrita pela NBR 6118 (2003).

Tabela 3.9 – Valores calculados para módulo de elasticidade do concreto.

<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Ensaio E_{cs} (GPa) aos 28 dias</i>	<i>NBR6118 (2003) E_{cs} (GPa)</i>
$f_c = 23,3MPa$	22,04	22,83
$f_c = 28,4MPa$	34,28	25,37
$f_c = 37,1MPa$	30,08	28,98

O módulo de elasticidade E_{cs} para $f_c = 28,4MPa$ foi superior ao módulo de elasticidade do concreto com $f_c = 37,1MPa$. Ressalta-se que para $f_c = 28,4MPa$ foi ensaiado apenas um corpo-de-prova.

Os resultados da Tabela 3.9 indicam que a Equação 3.4 produz em geral módulos secantes inferiores àqueles obtidos em laboratório (Equação 3.3), resultando em deformações maiores que os valores reais.

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

3.3. Compósito de fibra de carbono

3.3.1. Tecido de fibra de carbono

Em Araújo (2002) e Machado (2004) são ensaiadas vigas à flexão com reforço de CFC, cujas características são as mesmas dos tecidos de fibra de carbono que foram usados nesta dissertação. A técnica de aplicação desse produto está detalhada nessas dissertações.

Foram utilizados tecidos de fibra de carbono (Tec-Fiber) fornecidos pela Rheotec Aditivos de Concreto Ltda, do tipo N-300 (Figuras 3.10 e 3.11), com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

- Largura da faixa = 500 mm .
- Espessura = 0,165 mm .
- Área da seção transversal = 82,5 mm² .
- Deformação específica na ruptura = 1,55 % .
- Resistência à tração = 3.550 MPa .

- Módulo de elasticidade = 235 GPa .
- Gramatura (folha) = 300 g/m^2 .



Figura 3.10 – Tecido de fibra de carbono, tipo N-300.



Figura 3.11 – Verso do tecido de fibra de carbono tipo N-300 com destaque para a costura.

Para a colagem do CFC aos cubos de concreto foram utilizadas 18 tiras de $1.720\text{ mm} \times 75\text{ mm}$, enquanto que para o reforço na lateral oposta não instrumentada do bloco móvel foram utilizadas 18 tiras de $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ para garantir que não ocorresse a ruptura no trecho não instrumentado.

3.3.2.

Ensaio de resistência à tração do compósito de fibra de carbono

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



Figura 3.12 – Corpos-de-prova CFC revestidos com resina epóxi.

O ensaio de resistência à tração do CFC foi realizado em obediência à 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 3.13 e Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova adotadas para ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.

<i>Orientação das fibras</i>	<i>Largura (mm)</i>	<i>Comp. (mm)</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Comp. aba (mm)</i>	<i>Espessura aba (mm)</i>	<i>Ângulo aba (°)</i>
<i>0° unidirecional</i>	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
<i>90° unidirecional</i>	25	175	2,0	25	1,5	90
<i>Fios descontínuos</i>	25	250	2,5	-	-	-

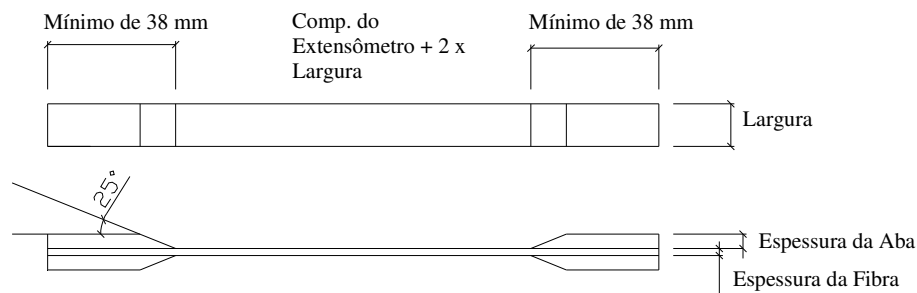


Figura 3.13 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.

Os ensaios foram realizados na máquina EMIC modelo DL 10.000 com capacidade de 100 kN, do Laboratório de ensaios Mecânicos do Departamento de Materiais do IME – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro.

O cálculo da resistência à tração do CFC foi efetuado de acordo com a norma ASTM D 3039 / D 3039M, seguindo-se:

$$f_{tf} = \frac{F_{máx}}{A_f} \quad (3.5)$$

onde

f_{tf} – resistência à tração (MPa);

$F_{máx}$ – força máxima aplicada (N);

A_f – área da seção transversal do corpo-de-prova (largura 15 mm x 0,165 mm de espessura)

O módulo de elasticidade é igual ao coeficiente angular do trecho linear calculado a partir do gráfico tensão x deformação específica do CFC (Figura 3.14). Os resultados dos ensaios constam na Tabela 3.11 e a Figura 3.15 mostra o esquema de ensaio e os corpos-de-prova ensaiados.

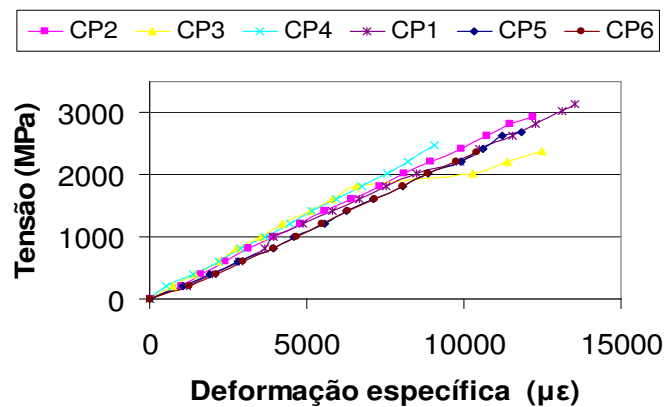


Figura 3.14 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.

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

Corpos-de-prova	Força $F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Resistência f_f (MPa)	Módulo de Elasticidade E_f (GPa)
1	7,76	3.136	232,1
2	7,41	2.993	247,4
3	6,06	2.448	279,3
4	6,24	2.523	272,7
5	6,76	2.729	224,9
6	5,99	2.418	225,6
Média	6,70	2.708	247,0



Figura 3.15 – Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades.

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

3.3.3.

Materiais necessários para a aplicação do tecido de fibra de carbono ao substrato de concreto

Obedecendo-se ao sistema recomendado pelo fabricante, a aplicação do tecido de fibra de carbono foi feita em quatro etapas. Em cada etapa faz-se necessário o uso de um produto específico que permite a correta aplicação do reforço. Os quatro produtos são:

- a) argamassa de reparo,
- b) resina de imprimação,
- c) argamassa epoxídica,
- d) resina epoxídica.

A argamassa de reparo e a argamassa epoxídica são dispensáveis dependendo das condições da superfície. Essas se tornam necessárias quando existem significativas irregularidades na superfície. A argamassa de reparo preenche as possíveis anormalidades da superfície e a argamassa epoxídica promove a regularização final da superfície.

Para a colagem do CFC no substrato de concreto dos corpos-de-prova desse trabalho não houve a necessidade da utilização desses produtos, já que as superfícies se encontravam regulares. A aplicação foi feita utilizando somente a resina de imprimação e a resina epoxídica.

3.3.3.1. Resina de imprimação

Após a preparação da superfície dos corpos-de-prova, feita manualmente com lixas, as superfícies foram limpas com algodão e álcool. Em seguida foi aplicada a Tec-Poxi PR da Rheotec Aditivos de Concreto Ltda (Figura 3.16). A resina de imprimação é responsável pela aderência perfeita da camada de resina epoxídica ao substrato de concreto. Seu uso é obrigatório neste sistema de aplicação. Para 100 gramas da mistura dos componentes A + B, a 22° C tem-se as seguintes propriedades:

- 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).
- Massa específica: $1,050 \text{ g} / \text{cm}^3$.
- 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: $0,218 \text{ mm/mm}$.
- 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.



Figura 3.16 – Resina de imprimação: Componente A e componente B.

3.3.3.2. Resina epoxídica

Seguido da resina de imprimação, ou seja, após 4 a 6 horas de sua aplicação, foi aplicada a Tec-Poxi da Rheotec (Figura 3.17), a resina epoxídica responsável pela perfeita aderência do CFC ao substrato de concreto. Essa resina é um componente fundamental deste sistema de reforço.

Para 100 gramas da mistura dos componentes A + B, temperatura de 22° C , são prescritas as seguintes propriedades dos materiais:

- Componente A: azul.
- Componente B: levemente amarelado.
- Mistura A+B: azul transparente.
- Proporção dos componentes: 66,7% de componente A e 33,3 % de componente B (em peso).
- Viscosidade: 70 a 80 s (CF 4).
- Massa específica: $1,055 \text{ g/cm}^3$.
- 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.
- Resistência de aderência: 1,5 MPa .
- Alongamento por ruptura = 0,300 mm / mm .
- Resistência à tração: $55 \pm 3,0$ MPa após 24 horas.
- Resistência à compressão: mínima de 60 MPa .
- Tempo de aplicação: a 10° C máximo de 2 horas, a 20° C máximo de 1 hora e a 35° C máximo de 20 minutos.



Figura 3.17 – Resina epóxi: componente A e componente B.

3.4. Confecção dos corpos-de-prova

3.4.1. Formas

As formas dos corpos-de-prova foram feitas em madeira e forradas com um plástico. Essas formas são compostas de cinco tábuas que foram devidamente pregadas, como mostra a Figura 3.18.



Figura 3.18 – Formas de madeira para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.

3.4.2.

Corpos-de-prova de concreto

Os corpos-de-prova são compostos por dois blocos iguais (móvel e fixo) de concreto, com dimensões de $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, cujas resistências à compressão aos 28 dias foram de $23,0\text{ MPa}$, $28,4\text{ MPa}$ e $37,08\text{ MPa}$ (Figura 3.19).

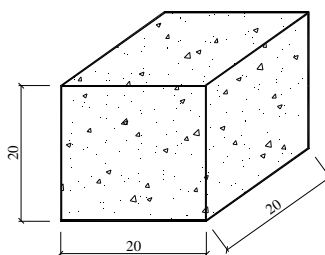


Figura 3.19 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).

3.4.3

Concretagem

As concretagens dos corpos-de-prova foram realizadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM/DEC).

O concreto foi lançado manualmente e o adensamento foi feito por meio de vibrador de imersão com diâmetro de $25,4\text{ mm}$, durante e imediatamente após a colocação do concreto nas formas. A cura foi realizada de forma usual, sem uso de qualquer processo especial.

Os corpos-de-prova foram retirados das formas sete dias após cada concretagem e permaneceram em condições ambientes no laboratório até as datas dos ensaios.

3.5. Colagem do tecido de fibra de carbono

O CFC foi colado aos blocos dos corpos-de-prova por meio do posicionamento dos blocos em cantoneiras fixadas num pórtico para que estes ficassem alinhados, de modo que os eixos das tiras do CFC ficassem no mesmo plano (Figuras 3.20 e 3.21).

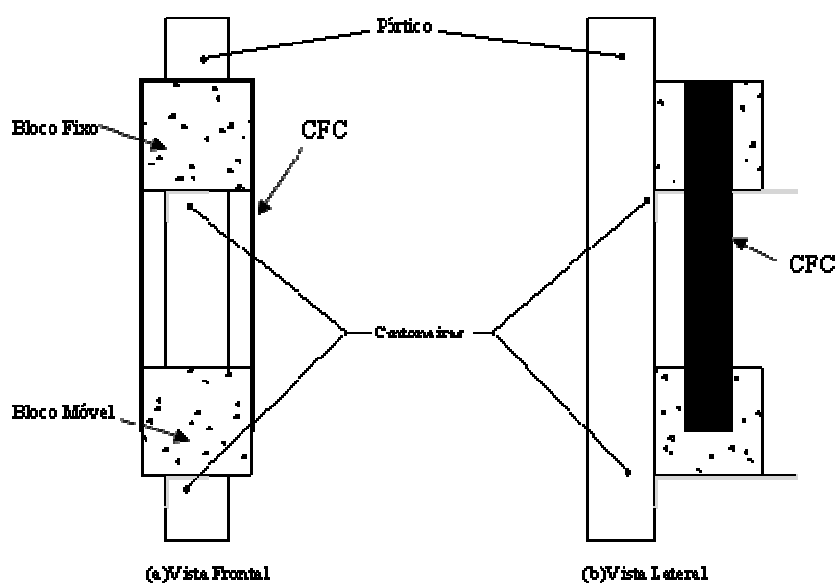


Figura 3.20 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.

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

Com a superfície pronta para receber o CFC, realizou-se a imprimação do substrato. O *primer* é um epóxi que permite um alto poder de impregnação devido à 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 CFC.



Figura 3.21 – Corpos-de-prova após a aplicação do primer.

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 ao concreto e, simultaneamente, uma camada de resina no CFC, finalizando-se a formação do compósito. Fez-se então a aplicação do CFC ao corpo-de-prova, de modo a se retirar todo o ar aprisionado. Após a aplicação do CFC foi necessário esperar seis dias, tempo esse indicado pelo fabricante do material, para que o ensaio pudesse ser realizado.



Figura 3.22 – Aplicação do tecido no corpo-de-prova.

Após seis dias de cura da resina, os extensômetros elétricos de resistência foram colados, os corpos-de-prova foram acoplados à estrutura de ensaio e os LVDT foram instalados.

3.6. Instrumentação dos corpos-de-prova

O comportamento dos corpos-de-prova foi acompanhado durante os ensaios por medições das deformações específicas no CFC e no concreto por meio de extensômetros elétricos de resistência, por meio de medições do deslocamento do corpos-de-prova móvel com LVDT, sendo realizadas leituras das forças aplicadas por intermédio de uma célula de carga com capacidade para 100 *kN*.

Os corpos-de-prova foram instrumentados com cinco extensômetros elétricos de resistência na face lateral da fibra, espaçados de 27,5 *mm* e dois no concreto, com espaçamento de 47,3 *mm*. O comprimento de ancoragem foi de 120 *mm* (Figura 3.23).

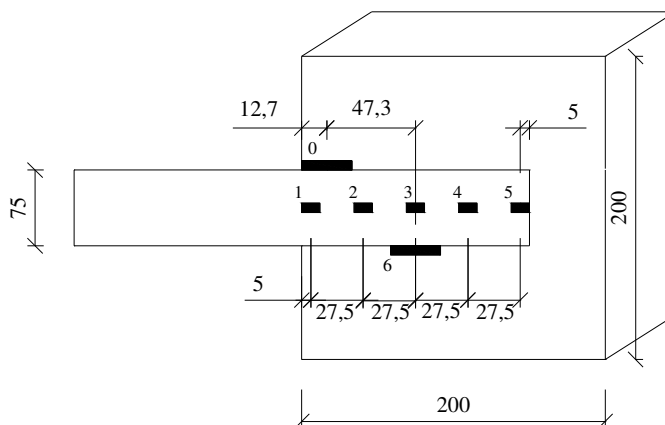


Figura 3.23 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no CFC e no concreto (medidas em mm).

Os extensômetros elétricos colados ao tecido foram numerados de 1 a 5, a partir da extremidade esquerda do comprimento de ancoragem do CFC. Os extensômetros do concreto tiveram os números 0 e 6 (Figura 3.23). A lateral instrumentada do CFC tinha quatro trechos onde foram calculadas as tensões de

aderência e as deformações específicas médias no CFC. Todos os corpos-de-prova tiveram o mesmo posicionamento dos LVDT (Figura 3.24).

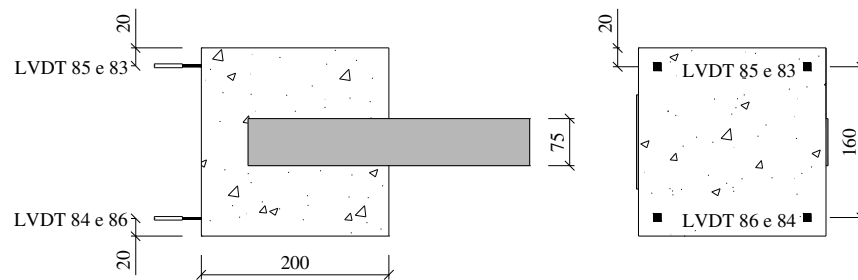


Figura 3.24 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.

3.7. Equipamentos e corpos-de-prova

O aparato empregado nos ensaios foi formado de cantoneiras metálicas e roldanas, com a característica de permitir o deslocamento do bloco móvel (Figuras 3.25 a 3.28) ao longo de um eixo de mesma direção da força aplicada no centro dos blocos de concreto. O bloco fixo serviu de apoio para o macaco hidráulico de 120 *kN* e para a célula de carga 100 *kN*. A força aplicada pelo macaco foi transferida para as tiras de CFC por meio dos blocos de concreto.

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

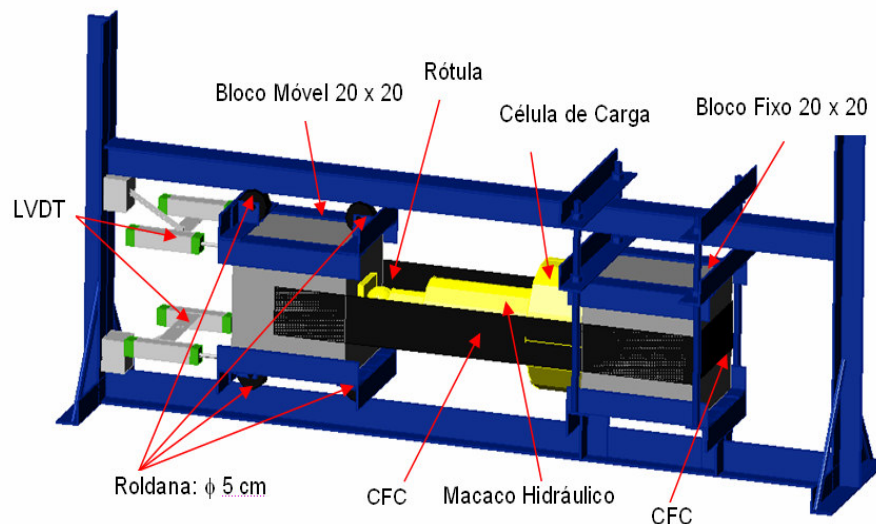


Figura 3.25 – Desenho esquemático e equipamentos do ensaio de tração-compressão.

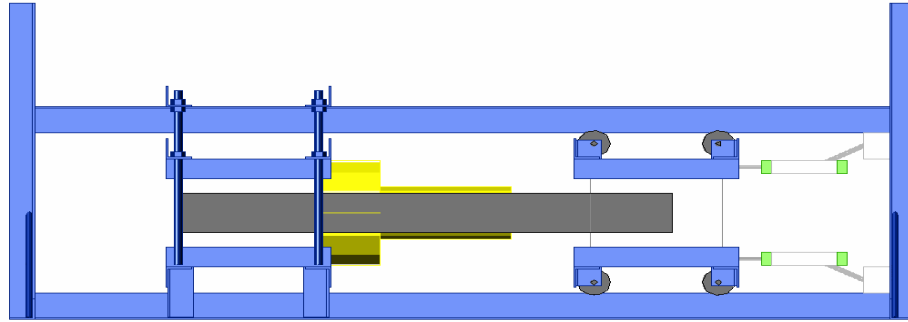


Figura 3.26 – Vista frontal do ensaio de tração-compressão.

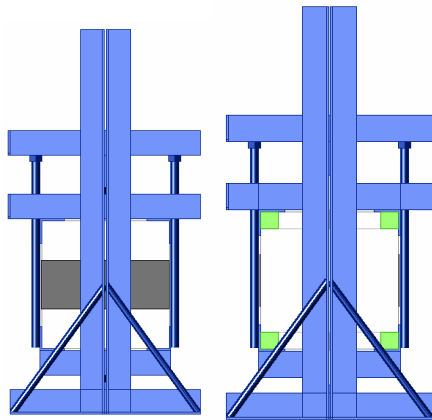


Figura 3.27 – Vistas laterais do ensaio de tração-compressão.

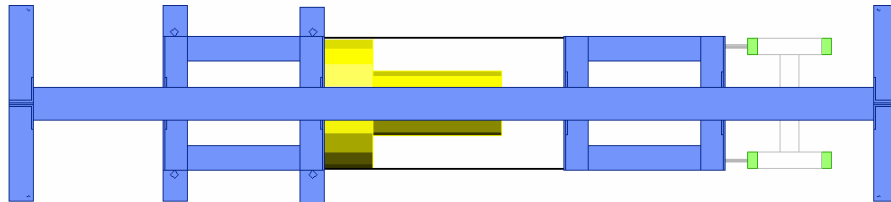
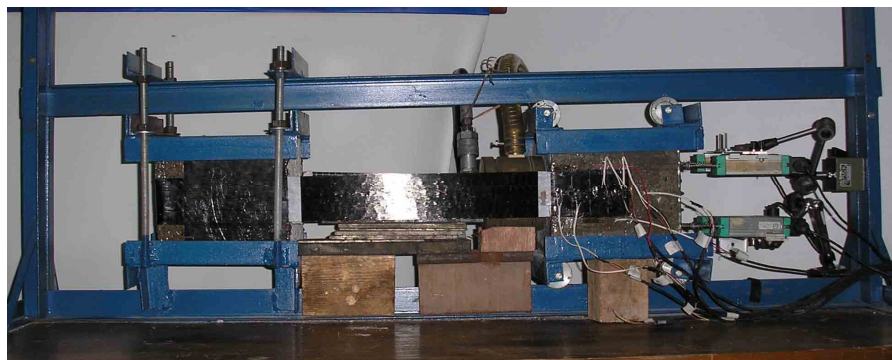


Figura 3.28 – Vista superior do ensaio de tração-compressão.

A Figura 3.29 mostra um corpo-de-prova pronto para ser ensaiado.



(a) Vista Frontal

Figura 3.29 – Esquema do ensaio de aderência com tração-compressão.

3.8. Observações

Foram realizados inicialmente sete ensaios no Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio, com os corpos-de-prova e equipamentos descritos anteriormente, usando-se um CFC fornecido pela Rheotec, cujas características mecânicas eram diferentes do CFC descrito anteriormente.

Os ensaios de aderência mostraram-se inconsistentes e não serão considerados neste estudo. Apenas para documentar esses ensaios, são transcritos os procedimentos e resultados obtidos.

Foram ensaiados à tração três corpos-de-prova desse CFC com 15mm de largura, 250mm de comprimento e abas de alumínio de 20mm de largura por 50mm de comprimento. Os ensaios foram realizados na máquina EMIC modelo DL 10.000 com capacidade de 100 kN, no Laboratório de ensaios Mecânicos do Departamento de Materiais do IME – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro. A Tabela 3.12 mostra os resultados desses ensaios.

Tabela 3.12 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC (material com características inadequadas).

<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Força $F_{máx}$ (kN)</i>	<i>Resistência f_f (MPa)</i>
1	6,40	2.585,86
2	5,57	2.250,51
3	5,12	2.068,69
Média	5,70	2.301,68

Esse material apresentou uma resistência à tração 35% inferior ao valor fornecido pelo fabricante. Na maior parte dos ensaios de aderência a fibra rompeu-se antes da ruptura da aderência. Esse CFC se mostrou frágil após a colagem, pois com o próprio manuseio dos corpos-de-prova as fibras se mostravam quebradiças. O material CFC tinha fibras de pequeno comprimento, e os resultados dos ensaios mostraram que o mesmo não seria adequado para o estudo da aderência.

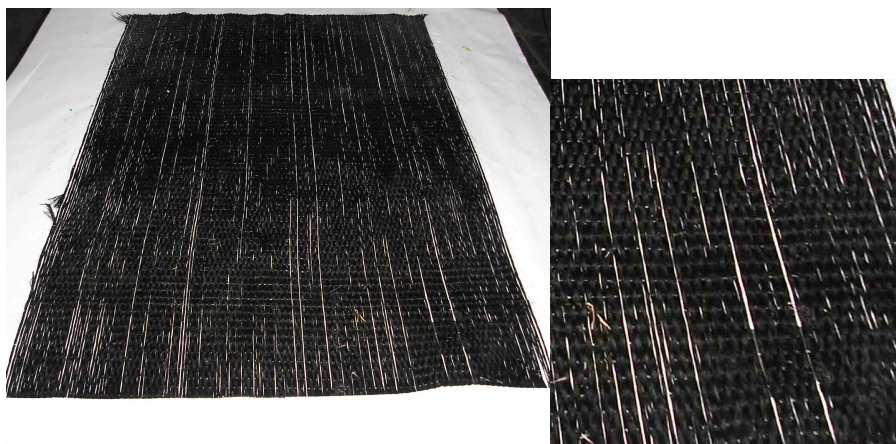


Figura 3.30 – CFC inadequado para os ensaios de aderência, com destaque para as aberturas da malha e sentido das fibras.

Os resultados obtidos são mostrados de forma sumária na Tabela 3.13. Ressalta-se que estes resultados não serão analisados nesta pesquisa, devido à baixa qualidade do CFC.

Tabela 3.13 – Forças e modos de ruptura.

<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>F_u (kN)</i>	<i>Largura do CFC (mm)</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)*</i>	<i>Modos de Ruptura</i>
MCLI-1	13,29	75	24,9	Ruptura do CFC no bloco ancorado seguido de arrancamento do substrato de concreto
MCLI-2	13,85	75	30,0	Arrancamento do substrato de concreto
MCLI-3	9,60	62	25,4	Ruptura do CFC no comprimento descolado
MCLII-1	11,69	75	32,3	Arrancamento do substrato de concreto
MCLII-2	13,37	75	33,6	Ruptura do CFC no comprimento descolado
MCLII-3	6,38	63	30,1	Ruptura do CFC no comprimento descolado
MCLIII-1	11,39	50	37,5	Ruptura do CFC no bloco ancorado seguido de arrancamento do substrato de concreto

* Obtida no dia do ensaio.

Nos corpos de prova MCLI-3 e MCLII-3 a largura que deveria ser de 75mm ficou em 62mm e 63mm respectivamente, pois na colagem o adesivo

escoou do bloco superior, atingindo o CFC protegido, tornando as fibras do mesmo extremamente quebradiças ao manuseio (Figura 3.31).

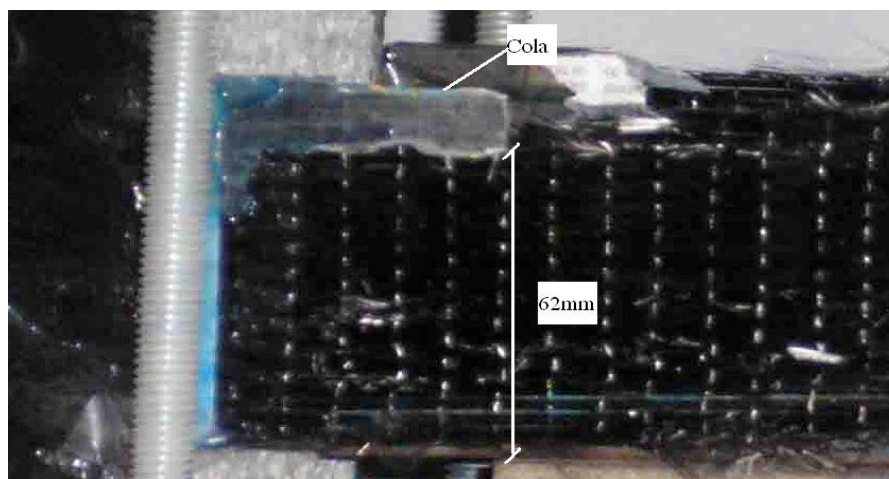


Figura 3.31 – Detalhe da largura do CFC após o manuseio do corpo-de-prova MCLI-3.

A Figura 3.32 mostra um exemplo da ruptura do tecido no comprimento descolado.

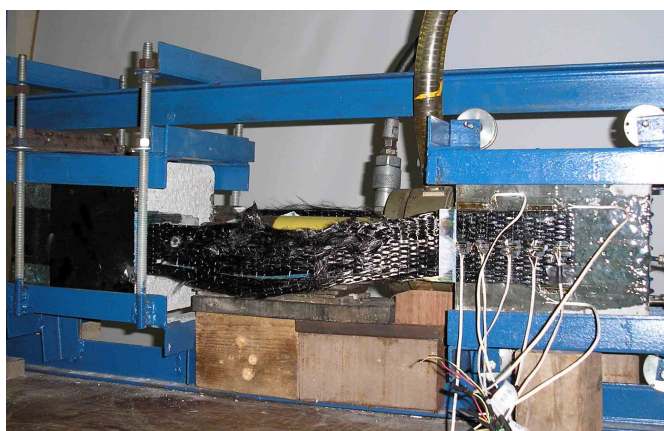


Figura 3.32 – Ruptura do tecido no comprimento descolado do corpo-de-prova MCLII-2.

Conclui-se que esse material de baixa qualidade não é adequado para as aplicações práticas e com ele não foi possível avançar no objetivo desse trabalho, o estudo da aderência CFC-concreto.