

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. NOTAS INICIAIS

O trabalho experimental buscou verificar o comportamento do concreto e do reforço com compósitos de fibras de carbono na resistência de vigas de concreto submetidas à torção sem influência da armadura de aço.

A armadura interna das vigas limitou-se aos extremos, região de aplicação de cargas e apoios, para evitar a ruptura local e forçar a ocorrência de fissuras na região central. Nas séries reforçadas, a região central, e em alguns casos nos extremos das vigas, receberam estribos de CFC. A variação da configuração do reforço foi necessária porque as taxas de reforço adotadas elevaram o limite de resistência da região de observação acima da resistência da zona periférica.

As vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência (EER) e transdutores lineares visando a obtenção das tensões superficiais e do ângulo de torção por unidade de comprimento.

Os ensaios para caracterizar o concreto obedeceram as normas brasileiras e, no caso do CFC, a ASTM.

4.2. MATERIAIS

4.2.1. CONCRETO

A concretagem das vigas e dos corpos de provas foi executada no dia 20 de setembro de 2012 com concreto usinado dosado para atingir a resistência à compressão mínima de 30 *MPa* aos 28 dias. O tempo decorrido foi de aproximadamente uma hora e 45 minutos, tendo-se utilizado uma bomba e uma equipe de doze pessoas. O adensamento foi feito com auxílio de um vibrador mecânico.

O cimento utilizado na mistura foi do tipo CP-III-40-RS (Cimento Portland de Alto Forno). Foi utilizado um caminhão betoneira com capacidade de $8 m^3$ para transportar os $7,3 m^3$ de concreto necessários para concretagem das 13 vigas e dos corpos de prova. O consumo dos materiais utilizados é apresentado na Tabela 4.1 e corresponde a um abatimento de 14 *cm*.

Tabela 4.1 - Consumo de materiais do concreto.

Material	Quantidade
Cimento	3200 <i>kg</i>
Brita 0	4,11 m^3
Areia	4,28 m^3
Água	2161,46 <i>l</i>
Aditivo FibroMAC 12	3,15 <i>kg</i>
Aditivo Plastificante RT144	25,59 <i>l</i>

Para o controle tecnológico do concreto utilizado na pesquisa, durante a concretagem foram moldados 60 corpos de prova de 15 *cm* de diâmetro e 30 *cm* de altura e 30 corpos de prova de 10 *cm* de diâmetro e 20 *cm* de altura seguindo as recomendações da NBR-5738/03.

Nos ensaios de caracterização do concreto utilizou-se a prensa CONTENCO do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM/DEC) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, com capacidade de 2.400 *kN*.

Os corpos de prova foram ensaiados em cinco etapas. As três primeiras, correspondentes aos 7, 14 e 28 dias após a concretagem e foram descartadas devido a observação da incompatibilidade entre as resistências obtidas com as esperadas pela idade do concreto.

Constatou-se uma falha no pistão de aplicação de carga da prensa devido à corrosão superficial. O problema foi sanado e procedeu-se a recalibração do sistema de captação de dados.

Após a validação do sistema, no dia 16 de janeiro de 2013, 106 dias após a concretagem, foram realizados ensaios de compressão simples com 10 corpos de prova de 10 *cm* de diâmetro e 20 *cm* de altura. A metade dos CP foi ensaiada no laboratório da PUC-Rio e os demais no laboratório da Universidade Estadual do

Rio de Janeiro. Os resultados apresentaram divergência máxima de 10%, validando a prensa CONTENCO do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Os ensaios de caracterização que geraram as informações utilizadas na pesquisa foram realizados no dia 9 de abril de 2013, 202 dias após a concretagem. Os mesmos são descritos nas seções 4.2.1.1 a 4.2.1.3.

4.2.1.1. Resistência à Compressão

A determinação da resistência à compressão simples do concreto utilizado na pesquisa foi obtida de acordo com as prescrições da NBR-5739/07. Foram ensaiados cinco corpos de prova de 15 cm x 30 cm.

A média das resistências obtidas para o concreto analisado com idade avançada foi de $f_{c,m} = 44,4 \text{ MPa}$, valor superior à resistência de dosagem, com desvio padrão de 3,6 e coeficiente de variação de 8,1%. A Figura 4.1 apresenta os valores da resistência à compressão obtidos em cada um de cada corpos de prova.

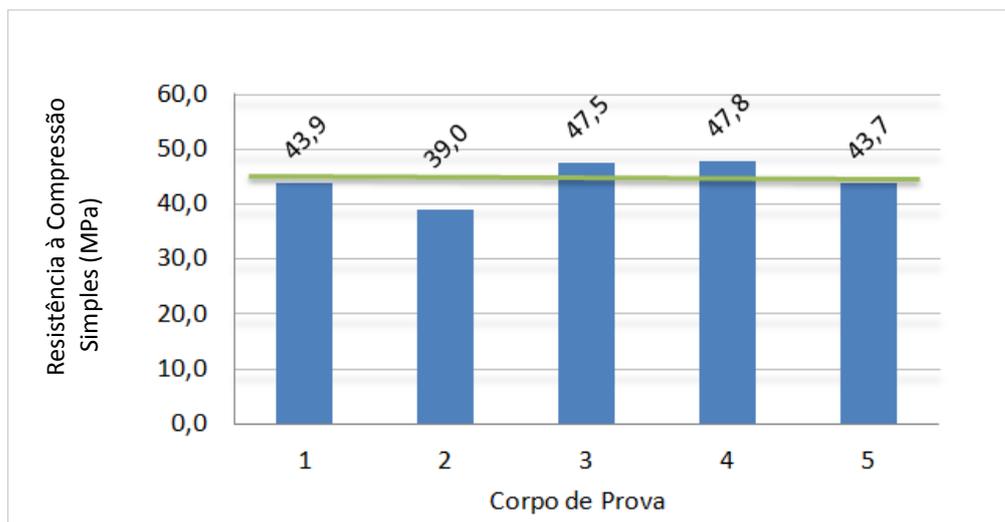


Figura 4.1 – Resistência à compressão simples do concreto.

4.2.1.2. Resistência à Tração

A determinação da resistência à tração do concreto foi realizada por meio de ensaios de compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos, seguindo as recomendações da NBR-7222/11. Foram ensaiados dez CP de 15 cm x 30 cm (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Ensaio de compressão diametral dos corpos de prova de concreto.

A resistência à tração de um corpo de prova cilíndrico de concreto é determinada por:

$$f_{tD,i} = \frac{2F}{\pi d L} \quad (4.1)$$

onde

$f_{tD,i}$ – resistência à tração do CP de concreto, comprimido diametralmente;

F – força máxima aplicada, equivalente à carga de ruptura;

d – diâmetro do corpo de prova;

L – altura do corpo de prova.

A resistência média à tração foi de $f_{tD,m} = 4,10 \text{ MPa}$, coerente com o resultado obtido para compressão simples. O desvio padrão e coeficiente de variação obtidos foram 0,3 e 7,0%, respectivamente.

A Figura 4.3 apresenta os valores da resistência à compressão diametral obtidos em cada um dos corpos de prova.

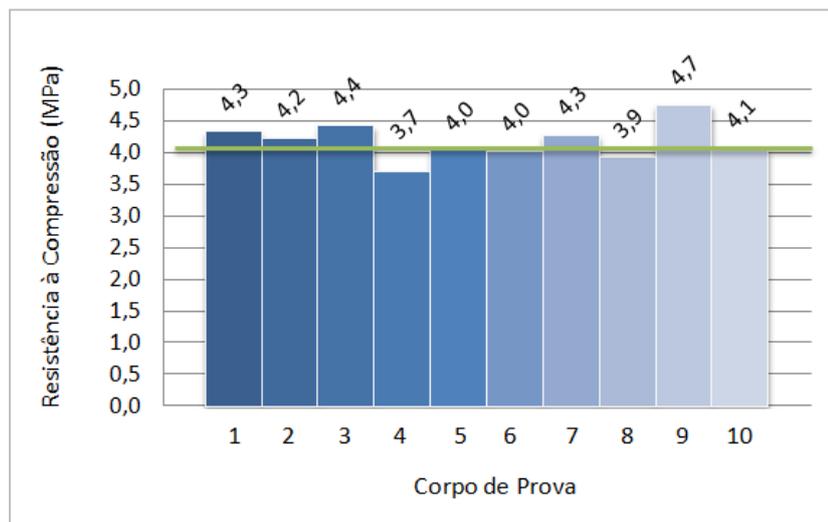


Figura 4.3 – Resistência à compressão diametral do concreto.

4.2.1.3. Módulo de Elasticidade e Diagrama Tensão *versus* Deformação Específica

A determinação do módulo de elasticidade secante do concreto seguiu as recomendações da NBR-8522/08. O equipamento utilizado foi o mesmo usado nos experimentos descritos nas seções 4.2.1.1 e 4.2.1.2. A previsão da força de ruptura baseou-se nos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples dos corpos de prova cilíndricos realizados na mesma data.

Foram utilizados quatro corpos de prova de dimensões $15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, os quais foram instrumentados com dois EER cada (Figura 4.4). Esses foram colados à meia altura, em lados opostos das amostras para medir a deformação específica do concreto durante o ensaio. Por conta da tomada de informações independentes foi necessária uma compatibilização das leituras dos extensômetros, a qual foi realizada de acordo com as recomendações do Anexo A da NBR-8522/08.

Após a calibração procedeu-se à aplicação de carregamentos crescentes com incrementos de 10% da previsão da tensão de ruptura, e com leitura das

deformações específicas em cada estágio de 60 segundos. Em cada etapa foram realizadas pequenas correções na aplicação da carga buscando-se manter o carregamento aproximadamente constante.

Até alcançar 80% de f_{cm} foram realizadas dezoito leituras das deformações específicas para cada corpo de prova. As leituras iniciais, $l_{0,1}$ e $l_{0,2}$ referem-se à tensão base recomendada pela norma de $\sigma_{inf} = 0,5 MPa$, e foram obtidas pelos EER 1 e 2, respectivamente. As leituras seguintes, como $l_{1,1}$ e $l_{1,2}$, referem-se ao primeiro estágio de incremento, logo correspondem a 10% da tensão de ruptura ($0,1 f_{cm}$). As demais seguem o mesmo raciocínio. Após as leituras do oitavo estágio ($l_{8,1}$ e $l_{8,2}$), prosseguiu-se o carregamento do corpo de prova à velocidade constante de $0,5 MPa/s$ até a sua ruptura.



Figura 4.4 – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade secante e a curva tensão-deformação específica dos corpos de prova de concreto.

O módulo de deformação tangente inicial é obtido por uma secante considerando uma tensão de 30% da de ruptura, sendo determinado para cada um dos corpos de prova por:

$$E_{ci,i} = \frac{\sigma_{0,3} - \sigma_{inf}}{\varepsilon_{0,3} - \varepsilon_{inf}} \quad (4.2)$$

onde

$E_{ci,i}$ – módulo de deformação tangente inicial para o corpo de prova;

$\sigma_{0,3}$ – tensão correspondente à 30% da carga de ruptura;

σ_{inf} – tensão mais próxima de 0,5 MPa que conseguiu-se aplicar no corpo de prova;

$\varepsilon_{0,3}$ – média dos valores de deformação específica fornecidas pelas leituras dos dois extensômetros, associada à tensão $\sigma_{0,3}$;

ε_{inf} – média dos valores de deformação específica fornecidas pelas leituras dos dois extensômetros, associada à tensão σ_{inf} .

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para cada um dos corpos de prova.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto.

CP	Tensão Máx. (MPa)	$\varepsilon_{med,max}$ (‰)	$E_{ci,i}$ (MPa)
1	38,6	1,535	29917,18
2	45,8	2,077	28025,85
3	47,3	2,586	23838,98
4	48,4	2,562	26740,21
MÉDIA	45,0	2,2	27130,6
D.P.	4,4	0,5	2553,0
COV.	9,9%	22,6%	9,4%

O módulo de elasticidade secante do concreto a ser utilizado nas análises elásticas foi definido por:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci,m} \quad (4.3)$$

onde

E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto;

$E_{ci,m}$ – média corrigida dos valores obtidos para o módulo de deformação tangente inicial.

O módulo de elasticidade secante utilizado na análise dos resultados das vigas de concreto foi $E_{cs} = 23061 \text{ MPa}$. A Figura 4.5 mostra os gráficos tensão *versus* deformação específica dos corpos de prova ensaiados.

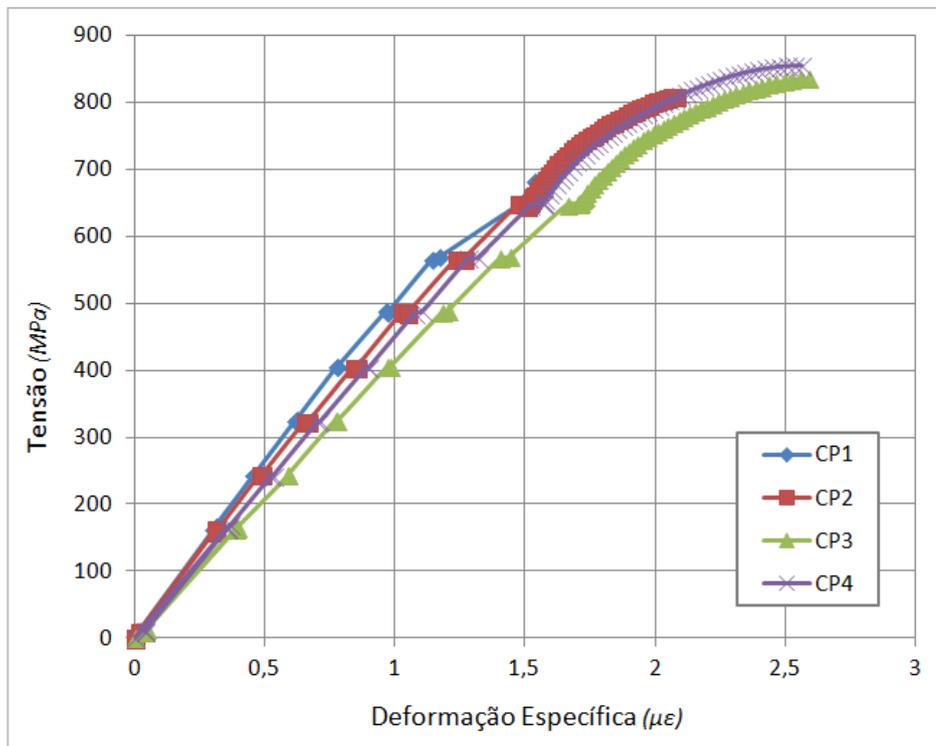


Figura 4.5 – Gráficos tensão *versus* deformação específica dos corpos de prova de concreto.

4.2.2. CFC

O sistema de reforço com compósitos de fibras de carbono utilizado na pesquisa foi fabricado pela MC-Bauchemie. Esse sistema é composto pelo tecido unidirecional de fibras de carbono MC-DUR CF-Sheets[®], pelo adesivo tixotrópico MC-DUR 1209TX[®] e pela resina epóxi MC-DUR 1209[®].

As aplicações e características de cada um desses componentes segundo o manual do fabricante são:

- i. MC-DUR CF-Sheets[®]
 - Manta de fibra de carbono unidirecional fornecida em rolos de comprimento e largura variável.
 - Seção transversal: $172 \text{ mm}^2/\text{m}$ (rolo com largura de 30 cm).

- Resistência à tração: 3860 *MPa*.
- Módulo de Elasticidade: 242 *GPa*.
- Raio mínimo para aplicação nos cantos: 2,5 *cm*.

ii. MC-DUR 1209TX[®]

- Adesivo tixotrópico à base de resina epóxi bicomponente sem solvente, usado como *primer* e camada de regularização para rugosidades até 1,0 *mm*.
- Proporção 3:1 da mistura entre os componentes A e B.
- Densidade: 1,33 *g/cm³*.
- Tempo de trabalhabilidade: 50 minutos.
- Resistência de aderência: 14 *MPa*.
- Módulo de Elasticidade: 4,7 *GPa*.
- Condições para aplicação:
Temperatura entre 8° e 30 °;
Umidade relativa do ar máxima = 85%.
- Consumo: 1,4 *kg/m²*.
- Estado: Pastoso;
Cor: Cinza.

iii. MC-DUR 1209[®]

- Resina epóxi bicomponente sem solvente, usado para colagem (impregnação e proteção) da manta de fibras de carbono.
- Proporção 3:1 da mistura entre os componentes A e B.
- Densidade: 1,12 *g/cm³*.
- Tempo de trabalhabilidade: 45 minutos.
- Resistência de aderência: 14 *MPa*.
- Módulo de Elasticidade: 3,0 *GPa*.
- Condições para aplicação:
Temperatura entre 8° e 30 °;
Umidade relativa do ar máxima = 85%.
- Consumo: 0,5 *kg/m²*.
- Estado: Fluido;
Cor: Cinza.

Para caracterização das propriedades mecânicas do CFC foram realizados ensaios seguindo as recomendações da ASTM D3039/3039M, que especifica os procedimentos para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compósitos compostos por fibras revestidas com resina epoxídica.

A resistência à tração do CFC corresponde à média aritmética das tensões de ruptura das amostras ensaiadas levando-se em consideração a área inicial da seção transversal. A resistência de um corpo de prova é dada por:

$$f_{t,i} = \frac{P_{máx,i}}{A} \quad (4.4)$$

onde

$f_{t,i}$ – resistência à tração do CP;

$P_{máx,i}$ – carga de ruptura do CP;

A – área inicial da seção transversal.

O módulo de elasticidade é determinado pela Lei de Hooke baseado na premissa que o material é elástico-linear e de ruptura frágil. O módulo de cada corpo de prova é determinado na ruptura de acordo com a norma americana. O módulo de elasticidade do material é a média aritmética dos obtidos para todas as amostras.

$$E_i = \frac{\sigma_{rup}}{\varepsilon_{máx}} \quad (4.5)$$

onde

σ_{rup} – tensão de ruptura do CP;

$\varepsilon_{máx}$ – deformação específica máxima do CP;

E_i – módulo de elasticidade do CP.

A ASTM D3039/3039M especifica dimensões mínimas necessárias para que os corpos de prova tenham um número de fibras em sua seção transversal, e que seja suficiente para representar suas características (Figura 4.6). A Tabela 4.3 apresenta algumas das dimensões recomendadas.

Tabela 4.3 – Geometria dos corpos-de-prova de CFC recomendada pela ASTM D3019/3039M.

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

Foram realizados ensaios de tração em doze corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibra de carbono revestidos com resina epóxi, sendo sete destes da primeira amostra do MC-DUR CF-Sheets[®] e os outros cinco da segunda amostra.

Foi utilizada a máquina EMIC do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, com capacidade de carga de 30 *kN*. A velocidade do ensaio foi de 2 mm/min de acordo com a recomendação da ASTM D3039/3039M.

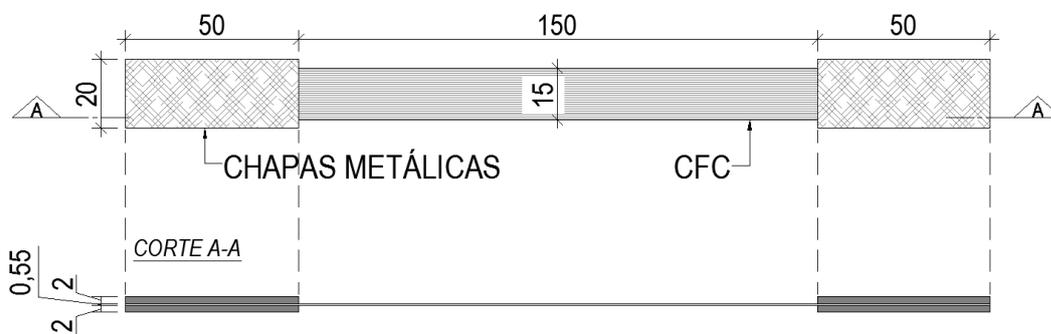


Figura 4.6 – Geometria dos corpos-de-prova de CFC recomendada pela ASTM D3019/3039M.

Os CP tinham 15 mm de largura e 250 mm de comprimento, e foram instrumentados com EER para leitura da deformação específica do compósito. Para auxiliar na fixação do corpo-de-prova à máquina de ensaio foram coladas placas de alumínio de pequena espessura em cada face das extremidades do corpo de prova. O processo foi realizado com a mesma resina epoxídica utilizada na formação do compósito. Visando-se melhorar a aderência das chapas metálicas na interface de contato com o compósito, e evitar escorregamento da garra de fixação durante o ensaio, foram feitas ranhuras nas duas superfícies das placas metálicas (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Ensaio do CFC.

Os resultados dos ensaios e as propriedades obtidas a partir desses constam na Tabela 4.4. Para determinação da tensão de ruptura foi considerada a espessura de 0,172 mm. A Figura 4.8 apresenta os diagramas tensão versus deformação específica dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios do CFC.

	CP	P _{max,i} (kN)	Tensão Rup (MPa)	ε _{máx} (‰)	E _i (GPa)
Amostra 1	1	7,06	3856,92	15,080	255,77
	2	10,01	5471,04	19,154	285,64
	3	11,27	6158,47	22,287	276,32
	4	10,02	5477,05	19,270	284,23
	5	10,35	5655,74	19,859	284,79
	6	10,50	5737,70	20,023	286,56
	7	10,06	5499,45	19,694	279,24
Amostra 2	8	7,50	4098,36	15,627	262,26
	9	7,52	4109,29	15,731	261,22
	10	9,50	5191,26	18,953	273,90
	11	7,70	4207,65	15,122	278,25
	12	7,80	4262,30	15,948	267,26
Média		9,8	5331,1	19,1	277,29
D.P.		1,5	805,1	2,4	10,62
C.V. (%)		15,1%	15,1%	12,7%	3,8%

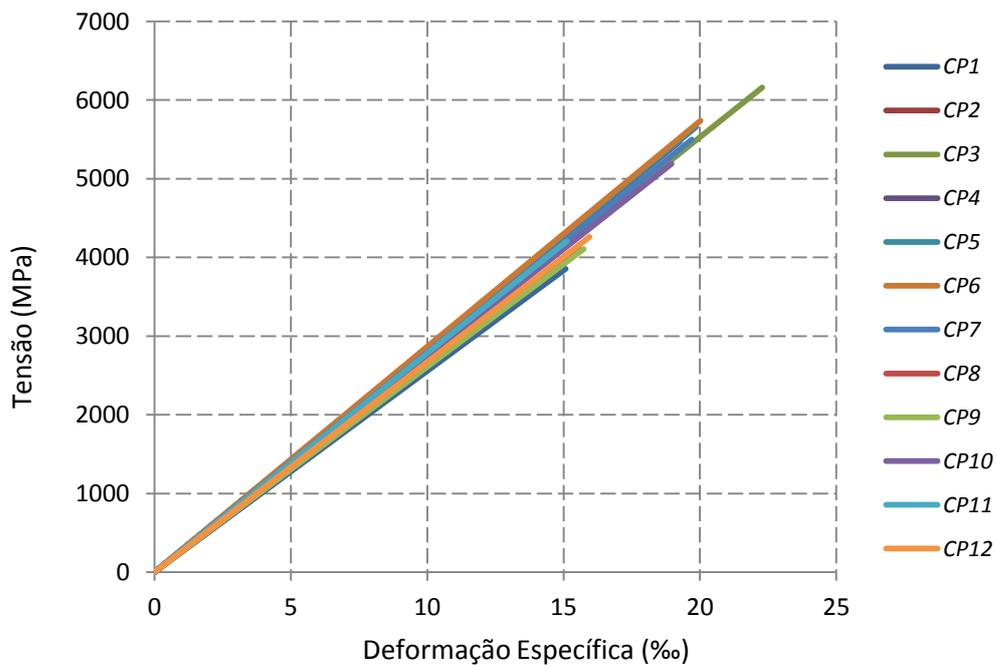


Figura 4.8 – Diagramas tensão versus deformação específica dos corpos de prova de CFC.

4.3. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Para realização do programa experimental foram testadas treze vigas de concreto, as quais foram divididas em quatro séries: a de referência, composta por quatro vigas, e três séries de vigas reforçadas externamente com estribos de CFC, cada uma delas composta por três vigas. Nas três séries de vigas reforçadas a única variável foi o valor da taxa do reforço sendo o reforço de taxa A $\rho_{t,A} = 0,860\%$, de taxa B $\rho_{t,B} = 1,032\%$ e de taxa C $\rho_{t,C} = 1,290\%$. A Figura 4.9 mostra com clareza a organização do programa.

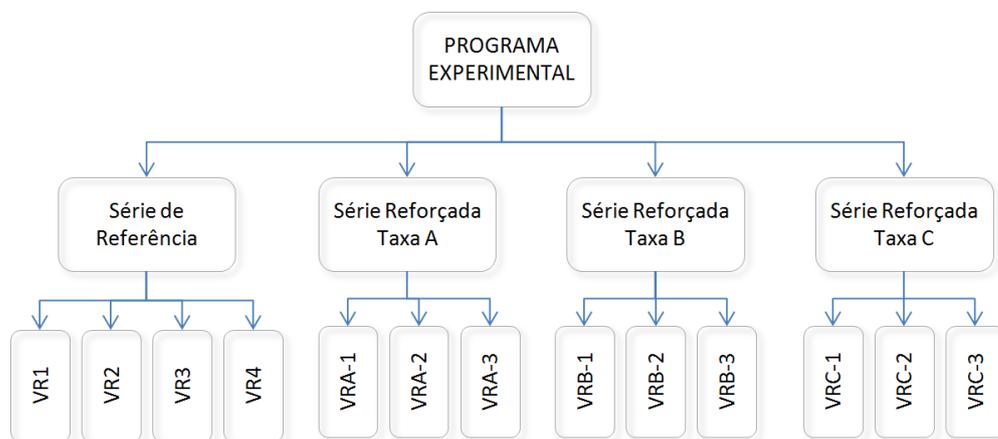


Figura 4.9 – Fluxograma de descrição do programa experimental.

4.3.1. ESQUEMA DE APLICAÇÃO DA CARGA

O esquema de apoio e aplicação de carga baseou-se no utilizado por Bazant e Li em 1989 (Figura 4.10). A estrutura foi composta basicamente de:

- um macaco hidráulico para aplicação do carregamento;
- um perfil para transferência da carga do macaco para os dois aparelhos de apoio;
- três perfis metálicos formando um pórtico;
- dois perfis auxiliares fazendo o contraventamento do pórtico;
- blocos de concreto, utilizados no apoio da viga.

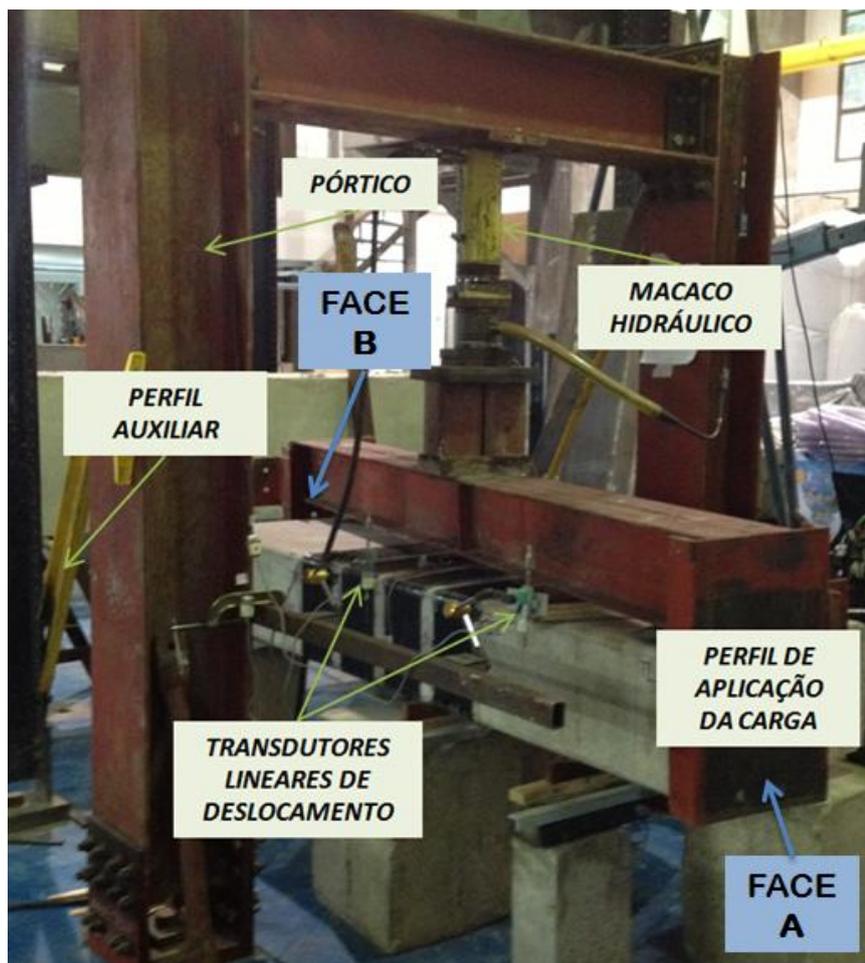


Figura 4.10 – Pórtico de ensaio.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, e utilizando-se um macaco hidráulico com capacidade de 500 *kN*.

Devido à estabilidade do sistema ser dependente do carregamento, os apoios da viga e do perfil de aplicação de carga só eram retirados com registros acima de 10 *kN* no macaco hidráulico. Diversas vezes manteve-se o apoio de um dos lados da viga para melhorar a estabilidade do conjunto.

Até a carga de 100 *kN* adotaram-se acréscimos de 10 *kN*, com 30 *s* de intervalo. A partir desse nível passou-se a adotar acréscimos de 5 *kN*.

4.3.2. GEOMETRIA E ARMADURA DAS VIGAS

Todas as vigas tinham as mesmas dimensões: seção transversal de 30 cm x 60 cm e comprimento total de 2,0 m.

Quando realiza-se um reforço estrutural, em geral, pode-se mensurar a resistência devido ao concreto levando em consideração as dimensões do elemento estrutural, o nível de fissuração, a época em que a edificação foi construída. Na maioria dos casos é impossível prever a armadura interna utilizada e o seu estado, muito menos a contribuição efetiva à solicitação analisada. Por esse motivo a presente pesquisa buscou estudar a influência do reforço de CFC na rigidez das vigas de concreto sem interferência da contribuição de uma armadura interna. Entretanto utilizou-se armadura interna de aço nos extremos das vigas, região com grande concentração de tensões devido ao apoio e aplicação da carga, conforme esquema da Figura 4.11.

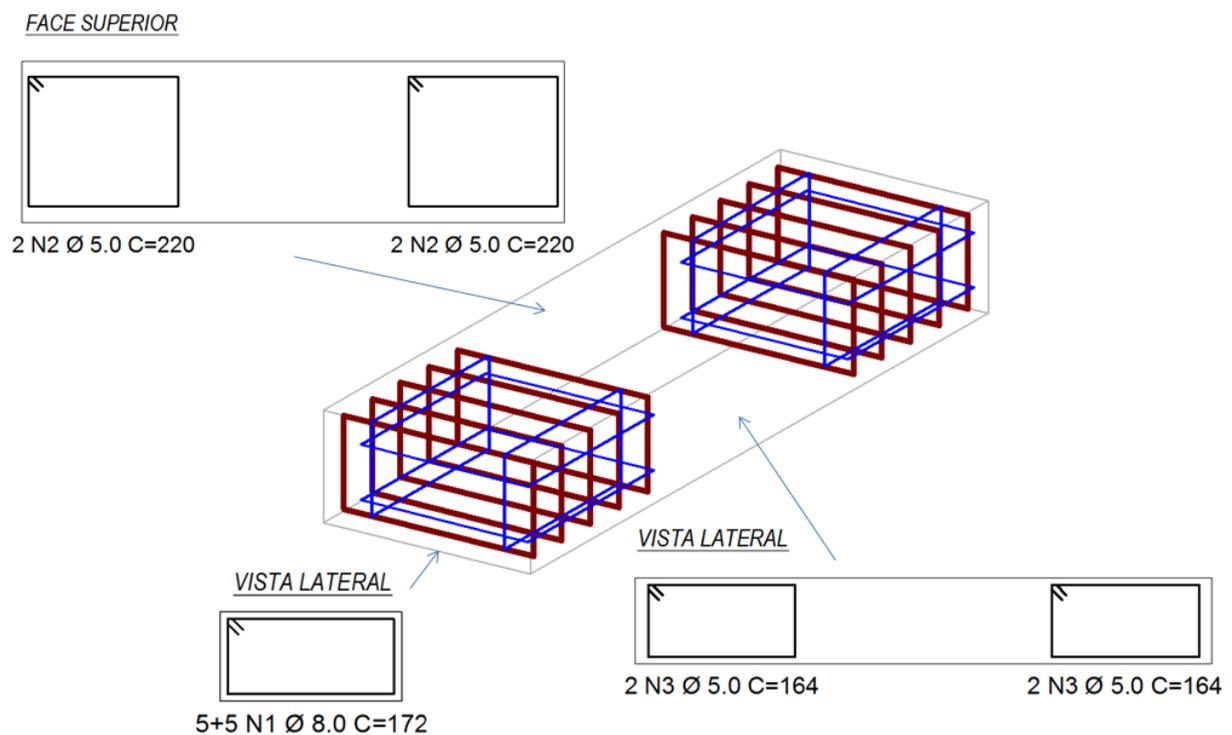


Figura 4.11 – Armaduras das Vigas.

4.3.3. REFORÇO COM CFC

4.3.3.1. Serviços Preliminares e a Execução do Reforço

Segundo as recomendações do fabricante, para aplicação do reforço com CFC é necessário que a superfície a ser reforçada esteja íntegra, seca (umidade residual $\leq 6\%$) e livre de impurezas. Os agregados devem estar expostos, mas não devem existir ondulações maiores que 5,0 mm.

A preparação para o reforço começou antes da concretagem, com a adoção de meias calhas de PVC produzidas através de cortes de tubos para esgotamento. As calhas foram posicionadas nas quinas das formas visando minimizar os cortes de cantos vivos com talhadeira, que são de difícil execução. Devido à possibilidade de fixação com silicone, a solução produziu excelentes resultados nas arestas das faces inferiores das vigas, enquanto na face superior, foi necessária uma regularização posterior com lixadeira (Figura 4.12).

Para exposição dos agregados e apicoamento utilizou-se ponteiros e equipamento de ar comprimido. Para reparo e estucamento das irregularidades no substrato utilizou-se a argamassa DENVERTEC700[®], que foi adotada por ser tixotrópica, de modo a facilitar o manuseio e a aplicação, dispensando formas, além de apresentar cura de apenas três dias com uma resistência à compressão de 20 MPa, chegando a 40 MPa aos 28 dias.



Figura 4.12 – Regularização dos cantos vivos.

Durante o apicoamento das vigas da série B observou-se a existência de brocas na região dos apoios, as quais foram preenchidas com adesivo estrutural à base de resina epóxi SIKADUR32[®].

Para limpeza de impurezas presas à superfície do substrato injetou-se ar comprimido em todas as faces a serem reforçadas. De acordo com recomendações do fabricante utilizou-se para pesagem das resinas epóxi uma previsão de consumo de 1,4 kg/m^2 do componente MC-DUR 1209TX[®], utilizado como *primer*, e de 0,5 kg/m^2 do componente MC-DUR 1209[®], utilizado para impregnação e camada de proteção. A Figura 4.13 mostra a sequência de execução do reforço e as ferramentas utilizadas; a Figura 4.14 mostra a execução do reforço.



Figura 4.13 – Sequência de execução do reforço com CFC da MC-Bauchemie.



Figura 4.14 – Execução da segunda camada de reforço de uma das vigas da série RA.

4.3.3.2. Série Reforçada com Taxa A

As três vigas da série reforçada A, denominadas VRA-1, VRA-2 e VRA-3, tinham a mesma armadura interna das vigas de referência e foram reforçadas externamente na região de observação com estribos de CFC.

Adotou-se duas camadas de estribos de tecido de fibras de carbono com 15 cm de largura e espaçadas a cada 10 cm na região sem armadura interna (Figura 4.15). Esses estribos envolveram totalmente a viga e foram transpassados 10 cm para garantir a ancoragem.

As vigas da série RA foram as primeiras a serem ensaiadas, e todos os ensaios foram bem sucedidos.

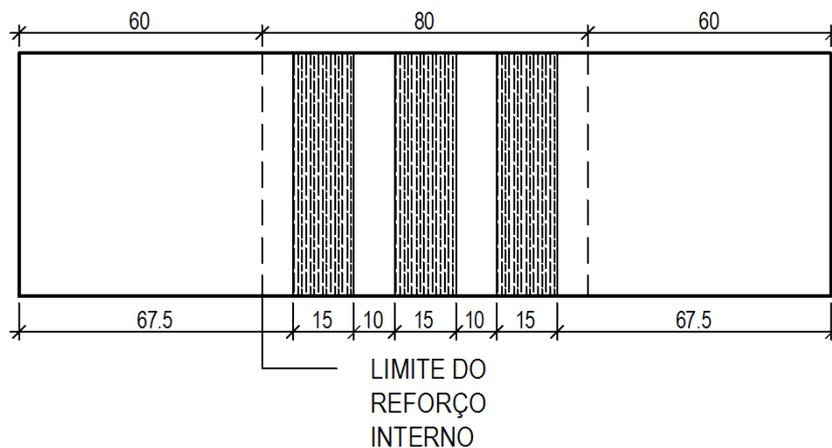


Figura 4.15 – Configuração do reforço das vigas da série RA.

4.3.3.3. Série Reforçada com Taxa B

As três vigas da série reforçada B, denominadas VRB-1, VRB-2 e VRB-3, de forma análoga às vigas da série RA, tinham a mesma armadura interna das vigas de referência.

Como será detalhado na seção 4.3.3.4, a série com taxa de reforço mais elevada RC foi executada antes da série RB. As vigas VRC-1 e VRC-2 apresentaram problemas de rompimento prematuro e fora da região de observação,

prejudicando seus resultados. Por precaução, procedeu-se ao reforço externo com estribos de CFC ao longo de todos o comprimento das vigas da série RB.

Foram utilizadas duas camadas de estribos de tecido de fibras de carbono com 15 *cm* de largura espaçados a cada 10 *cm* na região sem armadura interna (Figura 4.16), e a cada 5 *cm* nos extremos das vigas. Para não haver superposição dos estribos com largura de 15 *cm* na seção de transferência entre as regiões com e sem armadura interna, também se adotou estribos de 27,5 *cm* de largura. Todos os estribos envolveram totalmente a viga e foram transpassados 10 *cm* para garantir a ancoragem.

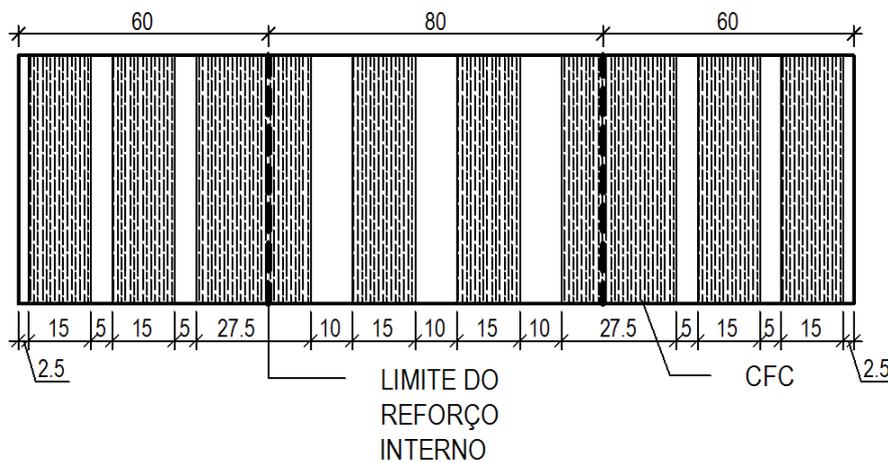


Figura 4.16 – Configuração do reforço das vigas da série RB.

4.3.3.4. Série Reforçada com Taxa C

As três vigas da série reforçada C, denominadas VRC-1, VRC-2 e VRC-3, também tinham a mesma armadura interna das vigas de referência. Executadas após a série de ensaios das vigas reforçadas com taxa A, as vigas da série RC tiveram que ser submetidas a diferentes configurações de reforço devido aos problemas identificados durante a execução dos ensaios.

O reforço da viga VRC-1 consistia em estribos de tecido de fibras de carbono com 15 *cm* de largura, espaçados a cada 5 *cm* na região sem armadura interna (Figura 4.17). Devido à adição do reforço com CFC a rigidez da região central da viga ficou maior que a dos extremos. A viga rompeu na região de

aplicação da carga próxima à face B (Figura 4.18) e não foi possível estudar a região central.

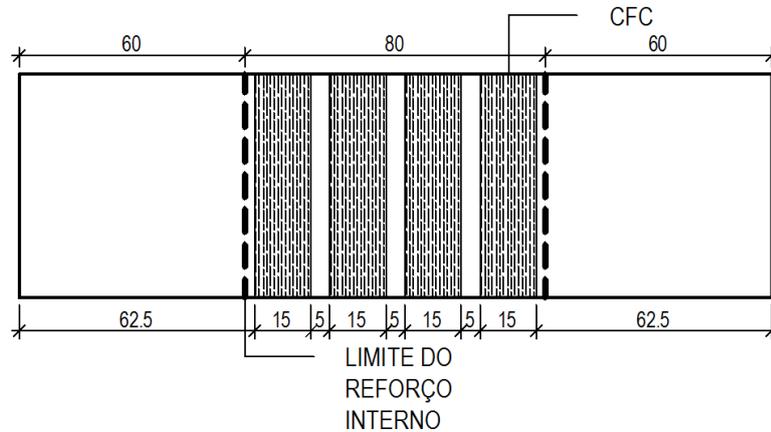


Figura 4.17 – Configuração do reforço da viga VRC-1.



Figura 4.18 – Face inferior da viga VRC-1.

O reforço da viga VRC-2 foi composto de duas camadas de estribos de tecido de fibras de carbono com 15 cm de largura, espaçados a cada 5 cm na região sem armadura interna, e uma camada de estribos de 15 cm espaçados a cada 5 cm nos extremos da viga (Figura 4.19). O reforço na periferia não foi suficiente para compensar o acréscimo de rigidez na região central, e o ensaio foi interrompido com um aparecimento de grande fissura no extremo próximo à face A, semelhante ao caso da VRC-1.

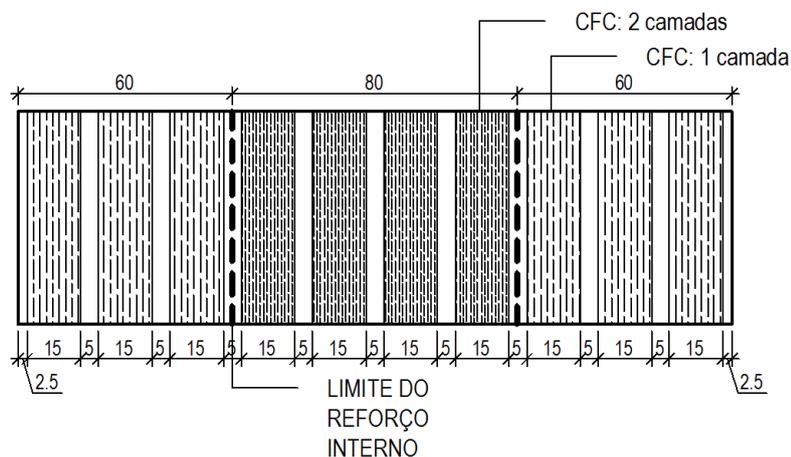


Figura 4.19 – Configuração do reforço da viga VRC-2.

O reforço da viga VRC-3 foi composto de duas camadas de estribos de tecido de fibras de carbono com 15 *cm* de largura, espaçados a cada 5 *cm* em todo o comprimento da viga (Figura 4.20). A viga não foi levada à ruptura devido ao momento de torção, mas devido ao esmagamento do concreto na região de aplicação da carga (Figura 4.21).

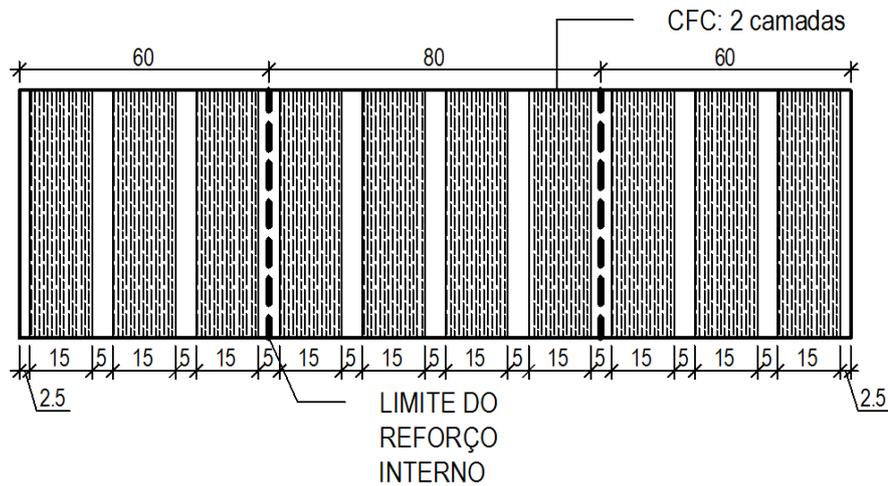


Figura 4.20 – Configuração do reforço da viga VRC-3.



Figura 4.21 – Viga VRC-3 junto à face A, após interrupção do ensaio.

As dificuldades durante a execução dos ensaios das vigas da série RC levaram à adoção do reforço com duas camadas de CFC ao longo de todo o

comprimento das vigas da série B, e à mudança do posicionamento das rótulas de aplicação de carga e apoio, visando evitar a ruptura prematura.

4.3.4. INSTRUMENTAÇÃO

Foram instalados quatro transdutores lineares de deslocamento para possibilitar a medição do ângulo de torção por unidade de comprimento. A Figura 4.22 mostra a localização das régulas metálicas que foram fixadas nas faces inferiores das vigas. Os transdutores foram posicionados nos extremos das régulas, à 30 *cm* das faces laterais das vigas.

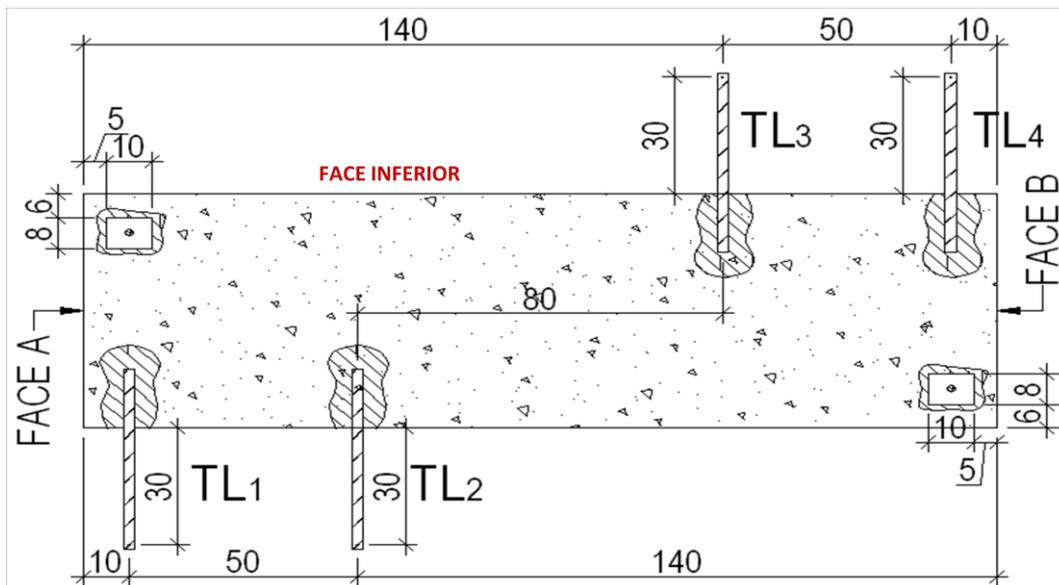


Figura 4.22 – Localização dos transdutores lineares.

Para avaliar as deformações específicas superficiais foram utilizados extensômetros elétricos de resistência. Devido à inexistência de armadura interna na região de observação, os EER foram colados na superfície do concreto e do reforço de CFC. De acordo com as diferentes configurações de reforço, houve uma adaptação nas seções utilizadas para monitorar as deformações. As Figuras Figura 4.23 a Figura 4.38 apresentam as seções que foram instrumentadas e a numeração dos EER para cada série.

4.3.4.1. Posição dos EER nas vigas de referência (Série VR)

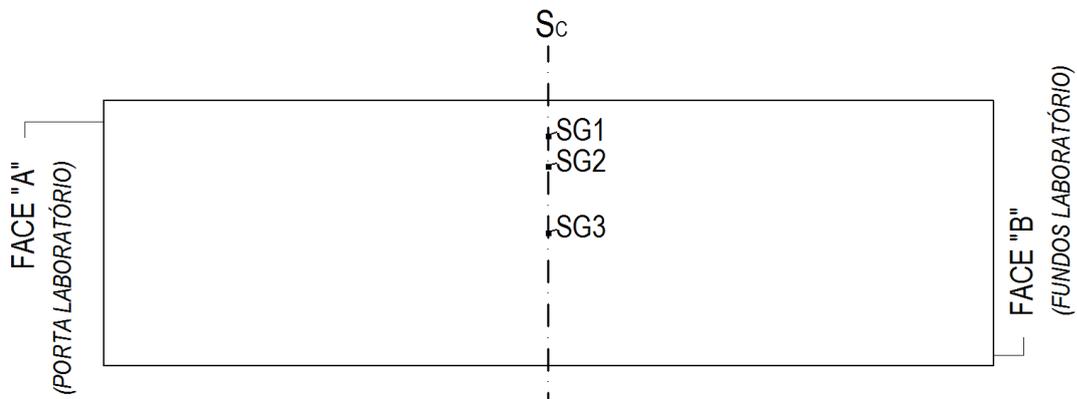


Figura 4.23 – Vista da face superior das vigas de referência.

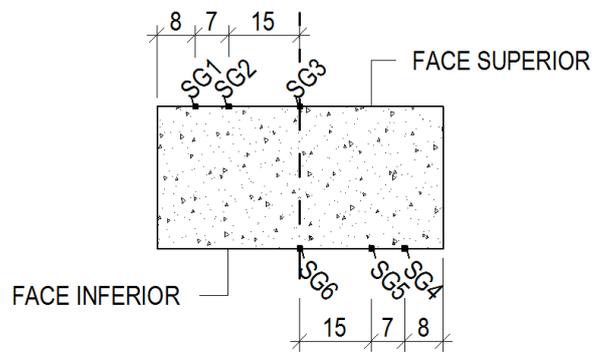


Figura 4.24 – Seção S_c das vigas de referência.

4.3.4.2. Posição dos EER nas vigas de reforçadas com taxa A (VRA)

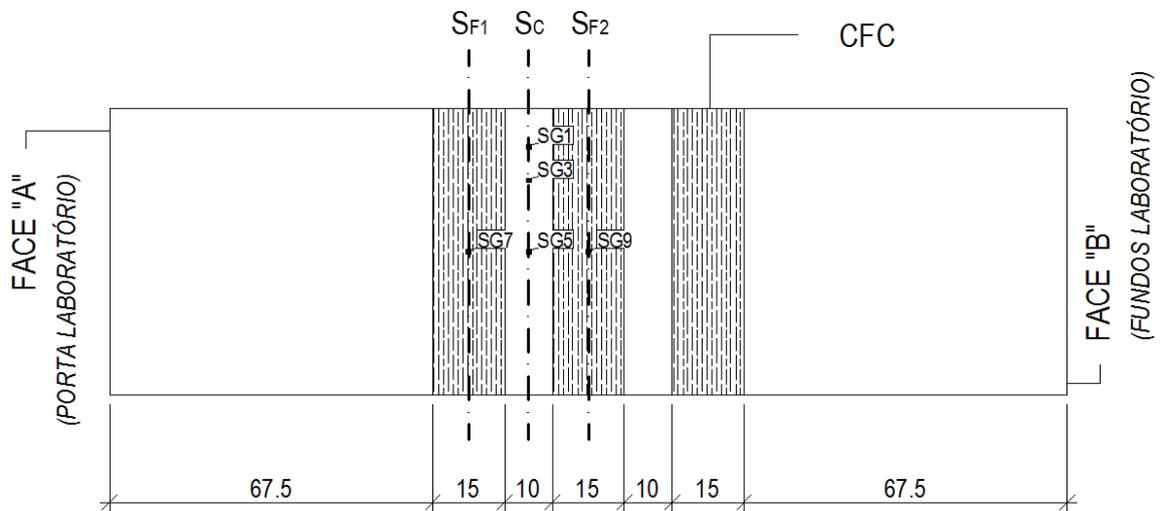


Figura 4.25 – Vista da face superior das vigas da série RA.

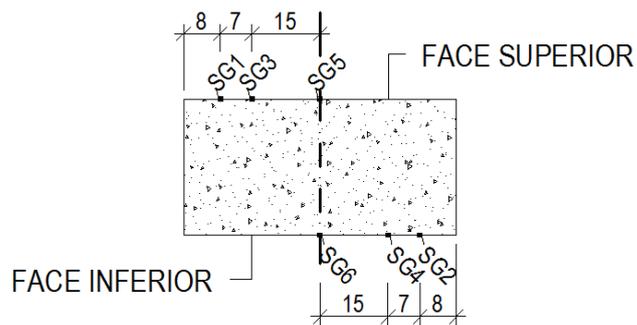


Figura 4.26 – Seção S_c das vigas da série RA.

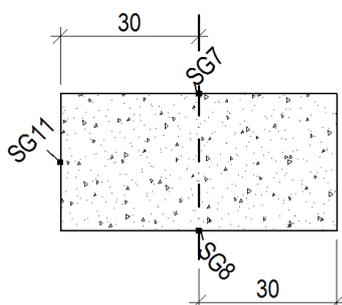


Figura 4.27 – Seção S_{F1} das vigas da série RA.

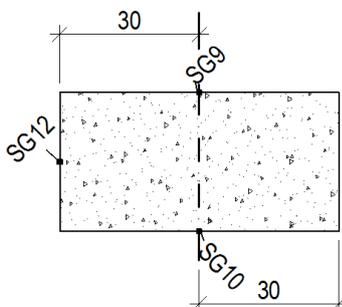


Figura 4.28 – Seção S_{F2} das vigas da série RA.

4.3.4.3. Posição dos EER nas vigas de reforçadas com taxa B (VRB)

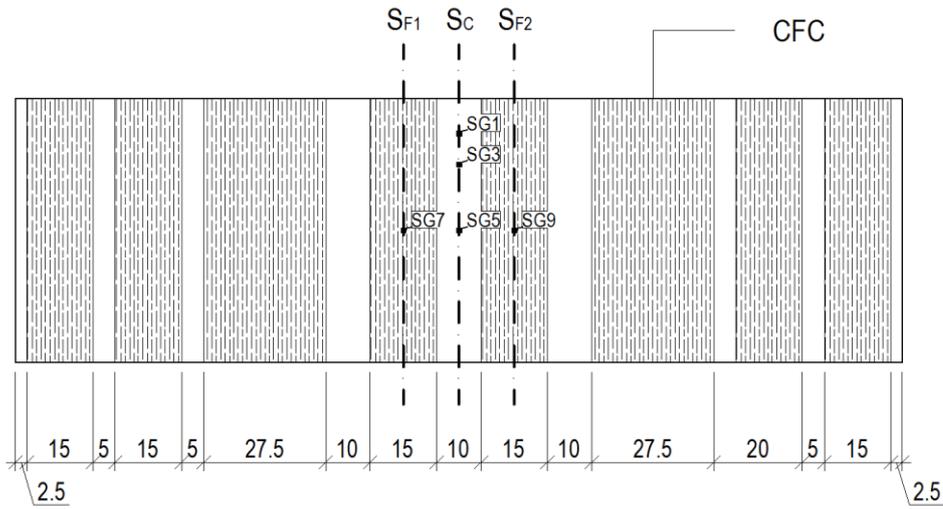


Figura 4.29 – Vista da face superior das vigas da série RB.

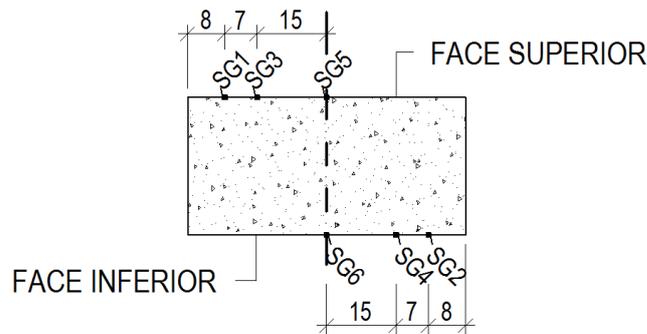


Figura 4.30 – Seção S_C das vigas da série RB.

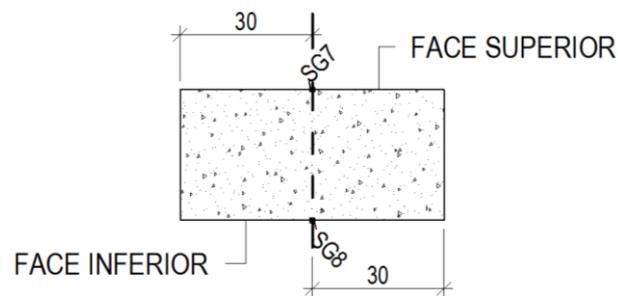


Figura 4.31 – Seção S_{F1} das vigas da série RB.

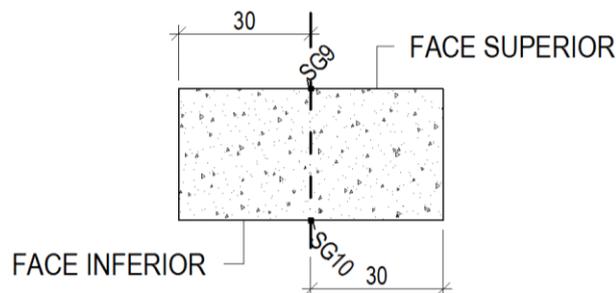


Figura 4.32 – Seção S_{F2} das vigas da série RB.

4.3.4.4. Posição dos EER nas vigas de reforçadas com taxa C (VRC)

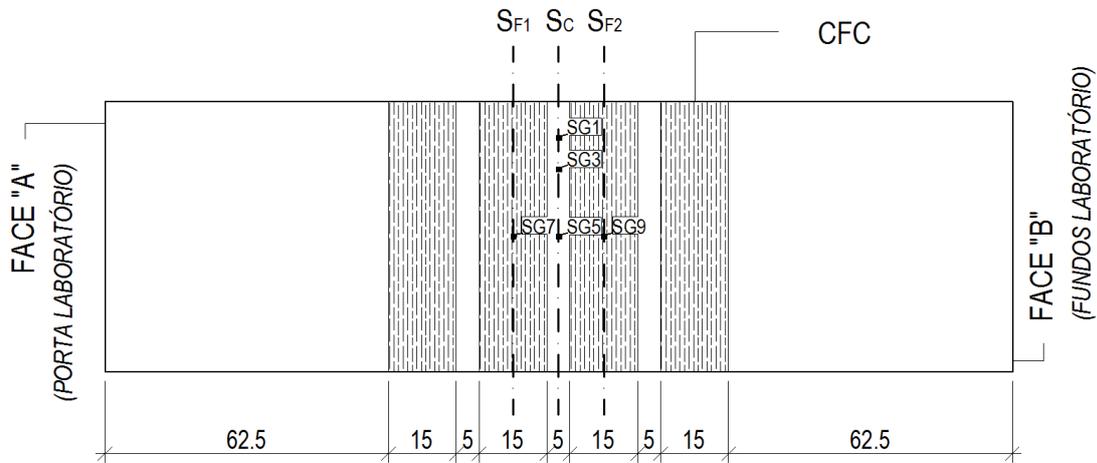


Figura 4.33 – Vista da face superior da viga VRC-1.

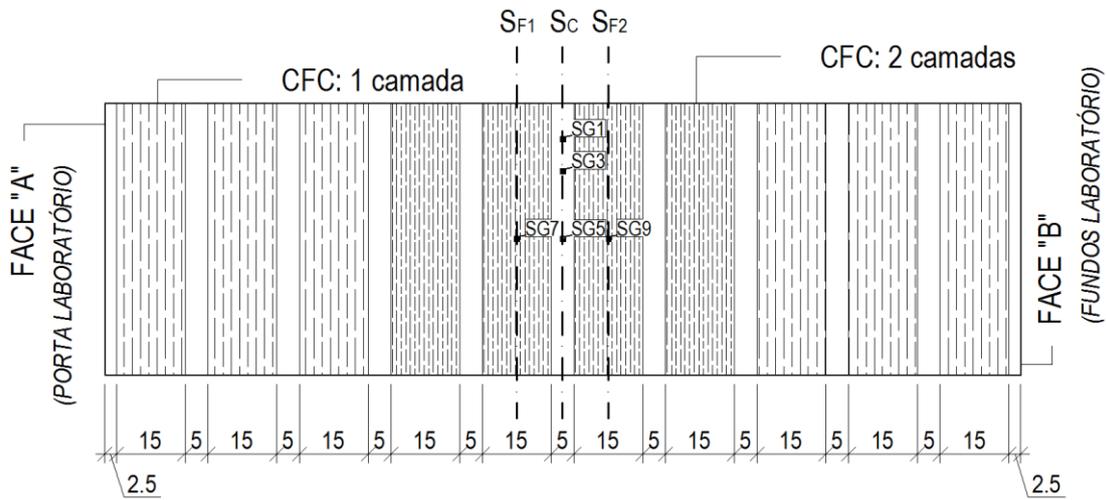


Figura 4.34 – Vista da face superior da viga VRC-2.

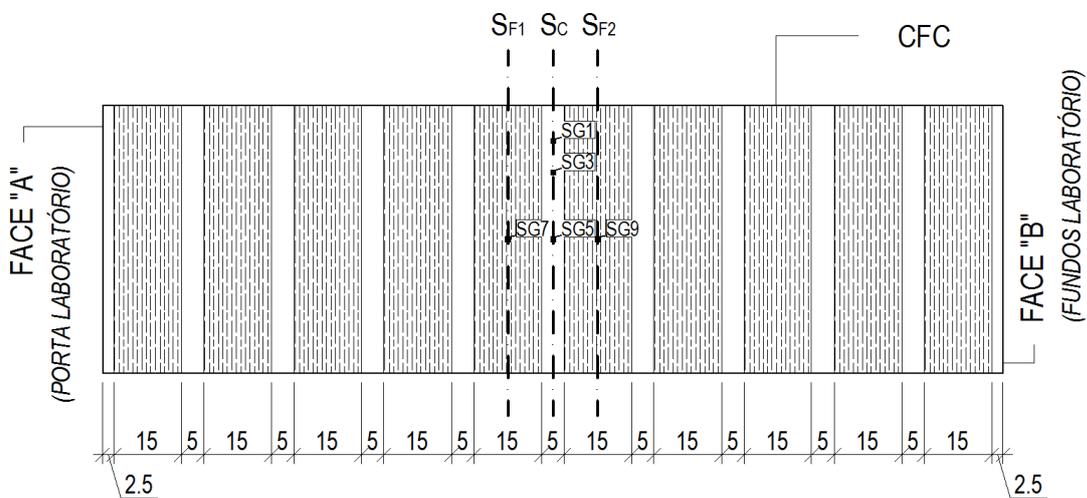


Figura 4.35 – Vista da face superior da viga VRC-3.

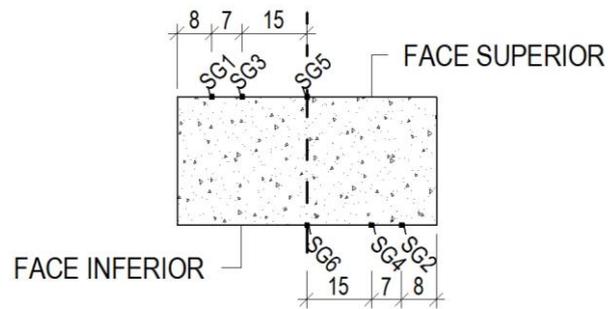


Figura 4.36 – Seção S_c das vigas da série RC.

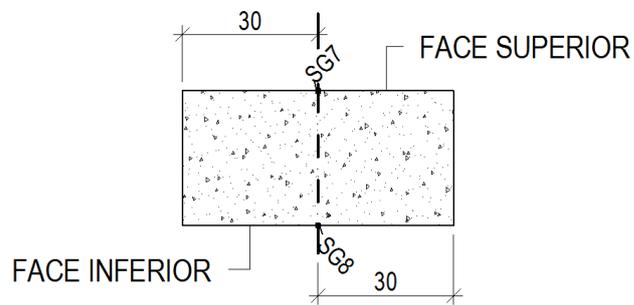


Figura 4.37 – Seção S_{F1} das vigas da série RC.

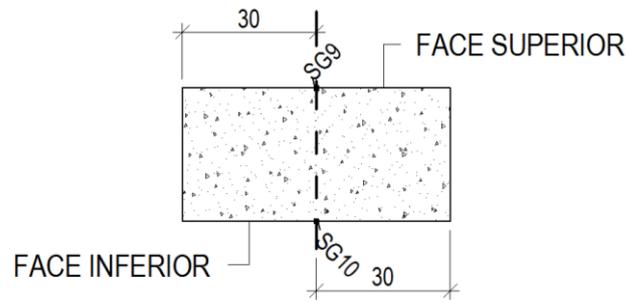


Figura 4.38 – Seção S_{F2} das vigas da série RC.