

2. Reforço Externo à Flexão de Elementos Estruturais em Concreto Armado

2.1. Introdução

Neste capítulo discutem-se diversos aspectos do reforço de elementos estruturais em concreto armado. São analisados os fatores que geram a necessidade de reforço, diversas técnicas e materiais que podem ser utilizados, e são descritos alguns estudos realizados sobre comportamento de vigas reforçadas à flexão.

2.2. Utilização de Reforços Estruturais

A necessidade de intervenção surge quando determinado elemento estrutural ou a estrutura como um todo, não é mais capaz de resistir aos esforços provocados por ações externas, cabendo ao especialista em recuperação de estruturas fazer uma avaliação econômica para escolher entre abandonar a estrutura, demoli-la ou recuperá-la. O reforço também pode ser utilizado quando há necessidade de aumentar a carga atuante devido a modificações em seu regime de utilização, ou através do aumento de solicitações, ou por alterações em sua geometria.

2.2.1. Problemas Estruturais

Os problemas estruturais podem se manifestar de diversas formas e podem ser atribuídos a erros de origem humana, à deterioração dos materiais e aos acidentes.

Os erros humanos podem ser identificados em vários estágios da concepção de um empreendimento, e geralmente a ruína de elementos estruturais ocorre pela combinação de falhas nas diversas fases. Estas falhas podem ser devidas à falta de qualidade técnica na execução, seleção inadequada dos materiais, projetos e detalhes incompletos, modelos de cálculo incorretos, erro na avaliação do carregamento e instalações não previstas.

A deterioração dos materiais pode ser atribuída ao envelhecimento natural, aos ataques químicos (cloretos, sais, ácidos e sulfatos) e biológicos (raízes, fungos e esgotos), a má utilização e à falta de manutenção necessária nas estruturas.

Quanto aos acidentes, eles podem ser de origem humana (explosões, incêndios, choques, aterros, dragagem, etc.) ou natural (cheias, sismos, etc.).

2.2.2.

Mudanças na Utilização Definida em Projeto

Atualmente há um acelerado processo de globalização, onde não é muito difícil observar empresas mudando de sede, alterando o layout de escritórios e fábricas, adequando empreendimentos já existentes às suas necessidades. Em paralelo, as cidades crescem em um ritmo acelerado, superando previsões, aumentando a necessidade de ruas mais largas e conseqüentemente pontes, túneis e viadutos mais largos.

Dentro das ocorrências mencionadas acima, entre outras, a necessidade de alterar e reforçar estruturas de concreto armado já faz parte do dia a dia do engenheiro estrutural.

2.3.

Técnicas de Reparo e Reforço

As técnicas de reparo podem ser divididas em reparos superficiais e reparos estruturais, objetivando-se o restabelecimento das condições originais, físicas e estruturais, do elemento ou da estrutura. O processo de reforço consiste em aumentar a capacidade resistente frente a novos esforços atuantes no elemento, ou estrutura a ser reforçada.

Para a execução de reparos e reforços deve-se seguir alguns procedimentos:

- Diagnosticar o problema e tomar as medidas emergenciais necessárias;
- Analisar a viabilidade do projeto;
- Investigar o estado da estrutura com o auxílio de ensaios não destrutivos, considerando sua rigidez e redistribuição de cargas;
- Selecionar o material e a melhor técnica a ser utilizada;
- Elaboração do projeto detalhado;
- Executar o projeto com um rigoroso controle de qualidade.

Os materiais utilizados devem possuir características especiais, tais como:

- Maior durabilidade;
- Baixa permeabilidade;
- Boa resistência estrutural;
- Boa aderência ao concreto e ao aço;
- Baixa retração;
- Boa trabalhabilidade;
- Fácil aplicação;
- Propriedades compatíveis com o concreto e o aço, com objetivo de garantir a eficiência do processo de reparo e/ou reforço.

O reforço de elementos de concreto armado pela adição de armaduras exteriores (chapas de aço coladas com resina de epóxi ou perfis metálicos) é uma técnica adequada nos casos onde há deficiência nas armaduras existentes, sem haver deficiência nas dimensões dos elementos estruturais ou na qualidade do concreto. Outra alternativa a estes sistemas é a adição de compósitos armados com fibras de carbono (ou de vidro), que são comercializados sob diversas formas, sendo os mais comuns os laminados pré-fabricados, os tecidos bidirecionais e as lâminas flexíveis unidirecionais impregnadas.

Estes compósitos são utilizados mais frequentemente como elementos de reforço de estruturas de concreto armado, com o objetivo de aumentar a ductilidade e a resistência de pilares de pontes e viadutos (por confinamento passivo), e de aumentar a capacidade resistente à flexão e ao cortante de vigas e lajes. Este processo requer cuidado na escolha do sistema de ancoragem do compósito, assim como a análise de tensões na ligação entre o compósito e o substrato de concreto.

A seguir, são apresentadas algumas técnicas de reforço que podem ser relacionadas ao desenvolvimento deste trabalho.

2.3.1. Adição de Chapas de Aço

Trata-se de uma técnica utilizada no reforço à flexão e/ou ao cisalhamento de estruturas de concreto armado, consistindo na colagem de chapas metálicas na superfície de concreto através de um adesivo epóxico. Sua aceitação em grande parte se deve ao fato de ser um sistema de execução simples, não gerar grandes

alterações geométricas na estrutura e possibilitar rápida reentrada em serviço da estrutura.

A superfície de concreto onde a chapa será colada deve ser escareada e limpa, retirando-se a camada superficial e pedaços soltos de concreto. A superfície da chapa de aço deve ser esmerilhada, para aumento da aderência e retirada de escaras e oxidação. Devem também ser removidos os óleos e a gordura. Após o tratamento das superfícies de contato, é feita a aplicação homogênea do adesivo na chapa de aço e no concreto.

O adesivo tem como função transmitir os esforços atuantes na estrutura para a chapa de aço. O sucesso de sua aplicação depende de sua qualidade, da preparação das superfícies do concreto, da chapa e de sua cura.

Após a colagem e durante a cura da resina, é necessário aplicar uma pressão leve e constante na chapa contra o concreto, somente desta forma é garantida a perfeita ligação entre adesivo, chapa e concreto.

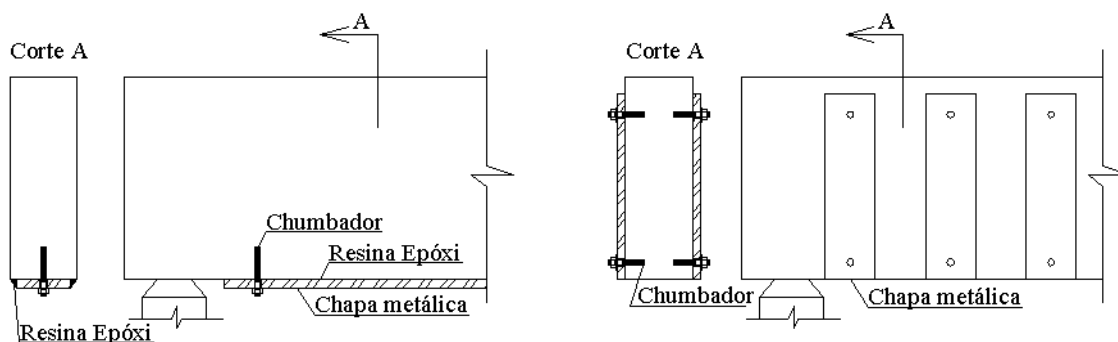


Figura 2. 1 – Uso de chapas coladas para reforço ao cisalhamento e à flexão.

O CEB (1983) recomenda alguns cuidados para que se obtenha resultados confiáveis, como:

- Perfeita aderência entre a superfície de concreto, o adesivo epóxico e a chapa, com tratamentos superficiais especiais para o concreto e para a chapa de aço;
- A espessura máxima da camada aplicada do adesivo epóxico igual a 1,5 mm;
- A espessura da chapa não deve ser maior que 3,0 mm, quando não se utilizar dispositivos especiais de ancoragem nas extremidades, tais como chumbadores químicos ou de expansão;

- Manter uma pressão leve e uniforme na colagem da chapa de aço contra a superfície de concreto, de acordo com tempo especificado pelo fabricante do adesivo para início de cura e aderência inicial (mínimo de 24 horas);
- Proteção do reforço contra mudanças de temperatura e, em especial contra o fogo.

Quando as chapas forem coladas com o objetivo de reforço à flexão, deve-se prever uma largura de chapa um pouco menor que a largura da viga, cobrindo as extremidades com adesivo para evitar a penetração de água. Se a chapa necessitar de um comprimento de ancoragem superior ao espaço físico disponível na estrutura, deverá ser previsto o encamisamento do pilar junto à viga com chapas soldadas, ou utilizar estribos pré-tracionados nas extremidades, estes podendo ser em barras rosqueadas de aço ASTM A36.

Quando as chapas forem coladas com o objetivo de reforço ao cisalhamento, para garantir o aproveitamento da chapa de aço, deve-se prever o uso de chumbadores, pelo menos nas extremidades da chapa, pois há grande tendência de descolamento nesta região devido à concentração de tensões. Além de evitar o descolamento por excesso de esforço na cola, os chumbadores servem para a fixação dos estribos externos de chapa durante o período de cura, e se acontecer a ruptura, esta se dará de forma mais dúctil.

As principais desvantagens relacionadas a esta técnica de reforço são:

- Baixa resistência da chapa ao fogo. É necessário fazer a proteção por meio de um revestimento isolante (Vermiculita por exemplo);
- Impossibilidade de detectar a corrosão na face oculta da chapa ou de visualizar fissuras na região sob a chapa colada;
- Tendência de descolamento dos bordos da chapa devido à concentração de tensões.

2.3.2. Adição de Compósitos de Fibras

O reforço de elementos estruturais em concreto armado por colagem de compósitos armados com fibras constitui um método muito simples e de rápida

execução, que em decorrência do seu peso reduzido e do processo de aplicação pode, eventualmente, dispensar a utilização de escoramento.

Para a análise mecânica do compósito é necessário o conhecimento do arranjo estrutural das fibras, de sua natureza, forma física e da interação entre as fibras e os componentes da matriz. Independente da concepção física do compósito, as fibras, com altíssima resistência e elevada rigidez, têm a função de resistir aos esforços gerados no sistema, cabendo aos componentes da matriz, geralmente composto por uma resina epóxica, envolver e transmitir esforços tangenciais entre as fibras. Como materiais utilizados em sua forma fibrosa para confecção de compósitos de reforço, pode-se citar o carbono, o vidro, o boro, a sílica, fibras de Kevlar ou aramida e Pet fibras.

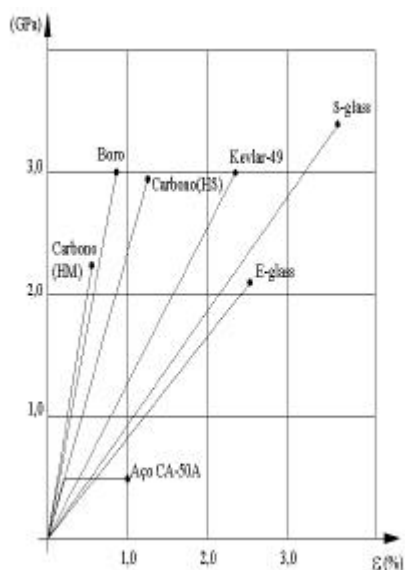


Figura 2. 2 – Diagrama “tensão x deformação” de diversos tipos de fibras
(Master Builders Technologies)

A Figura 2.2 mostra que a relação “tensão x deformação” para diversos tipos de fibra tem um comportamento elástico-linear, apresentando ruptura frágil. Este comportamento se repete em grande parte dos compósitos que utilizam estas fibras.

Os compósitos de fibra de carbono combinam filamentos de fibras de carbono imersos em uma matriz de resina epóxi, possuindo comportamento elástico-linear e o módulo de elasticidade variando entre 100 GPa e 300 GPa. A resina epóxica que forma a matriz do compósito tem a função de envolver e

proteger as fibras de agressões ambientais e aglutiná-las, permitindo a transferência de forças entre estas. A contribuição da resina à resistência à tração é muito pequena.

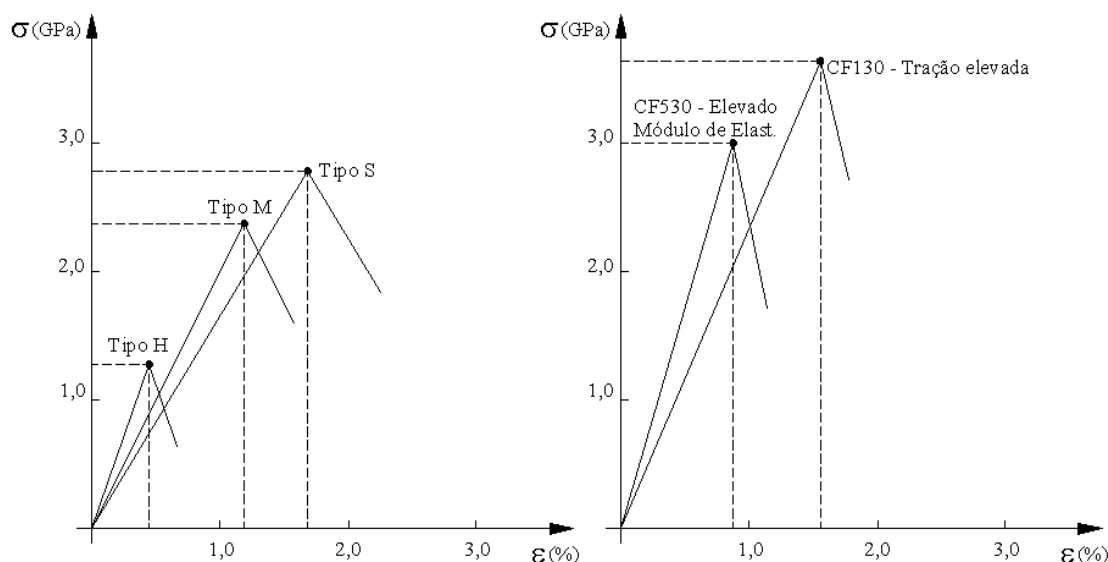


Figura 2.3 – Diagrama “tensão x deformação” de compósitos de fibra de carbono comercializados pela Sika e por Master Builders Technologies, respectivamente.

As fibras de carbono se destacam das demais fibras (aramida, vidro) devido à sua resistência à corrosão, resistência a ataques químicos em geral, ótimo comportamento quanto à fadiga sob atuação de cargas cíclicas, leveza, alta rigidez e estabilidade térmica e reológica.

Existem atualmente no mercado compósitos de fibra de carbono em três formas diferentes:

- Chapas poliméricas reforçadas com fibra de carbono, que podem ser coladas para reforço de elementos estruturais em geral;
- Tecidos em fibra de carbono, pré-impregnados para colagem em elementos estruturais através de resinas epoxídicas;
- Folhas flexíveis unidirecionais para colagem sobre o concreto, que podem ser utilizadas como elemento confinante.

Com objetivo de garantir uma aderência compatível do reforço utilizando compósito de fibra de carbono colado à superfície de elementos estruturais em concreto, a superfície de colagem na peça de concreto deve ser preparada antes de receber o compósito, devendo ser escareada e limpa, estando livre de qualquer

impureza. Sendo o compósito na forma de lâmina, este também deve ser limpo e só então aplicado o adesivo na superfície do concreto e na lâmina. No caso da utilização de tecido, o procedimento segue uma seqüência de escareamento e limpeza da superfície, aplicação de argamassa para reparo quando necessária, aplicação de resina de imprimação, massa epoxídica e resina epoxídica, sendo esta última responsável pela aderência da argamassa ao tecido de fibra de carbono. O tempo de cura e o procedimento de colagem variam de acordo com o fabricante do adesivo e/ou do sistema utilizado.

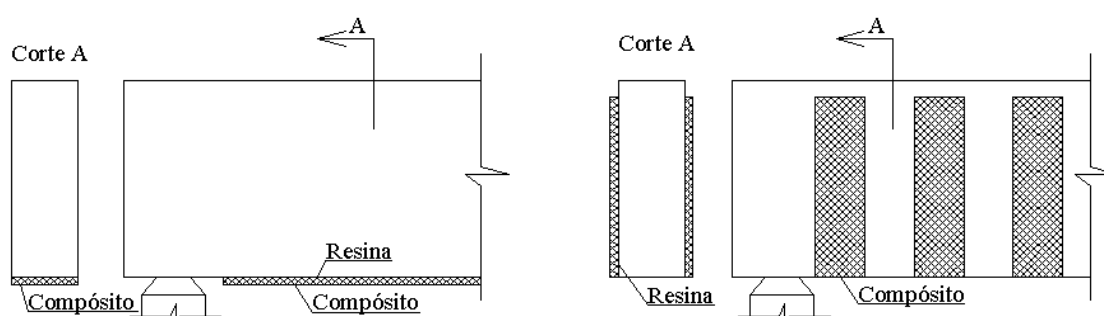


Figura 2. 4 – Reforço à flexão e ao cisalhamento utilizando lâminas de fibras de carbono.

A ruptura de vigas reforçadas com compósitos de fibra de carbono, como mencionado, se dá de maneira frágil, podendo ocorrer por destacamento da camada de cobrimento do concreto, descolamento do compósito ou ruptura do compósito. Adicionar sistemas de ancoragem nas extremidades dos elementos de reforço pode ser útil para evitar a falha do elemento estrutural por destacamento, contribuindo para o aumento da ductilidade da viga reforçada.

Algumas vantagens do reforço com adição de compósitos de fibras de carbono são relacionadas abaixo:

- Rapidez na execução, devido ao baixo peso e simplicidade de aplicação;
- Espessura reduzida e comprimento qualquer;
- Alta resistência química a ácidos e bases;
- Resistente à corrosão;
- O sistema é flexível, adaptando-se com facilidade a diversas formas.

E como desvantagens:

- Alto custo do compósito;
- Necessidade de superfícies regulares para sua aplicação;

- Ruptura frágil;
- A impossibilidade de visualizar fissuras sob o reforço;
- Tendência de descolamento dos bordos devido à concentração de tensões;
- O coeficiente de dilatação térmica não é igual ao do concreto;
- Precisa de proteção contra incêndio e radiação ultravioleta.

De acordo com Pinto (2000), o dimensionamento do reforço com compósitos de fibra de carbono e fibra de vidro pode ser feito utilizando-se as mesmas regras aplicadas ao caso das chapas coladas, sendo fundamental a caracterização mecânica (relação “tensão x deformação”) do compósito efetivamente aplicado no local, e o estabelecimento do limite de deformação a considerar, tanto no estado limite último como em serviço.

2.3.3. Técnica de Estribos Externos Pré-Tencionados

A técnica consiste no uso de um sistema mecânico composto por barras de aço rosqueadas, para os estribos isolados, cantoneiras, arruelas e porcas para fixação. A aplicação da pré-tração deve ser feita por meio de torquímetro, e serve para compatibilizar o reforço aos níveis de tensão e deformação atuantes na estrutura, evitando-se perdas por acomodação e deslocamento inicial das peças que compõe o reforço. No caso de elementos estruturais em concreto armado danificados em serviço pela insuficiência de estribos, a aplicação da pré-tração nas barras coloca o sistema imediatamente em ação, compatibilizando o conjunto com as ações externas atuantes.

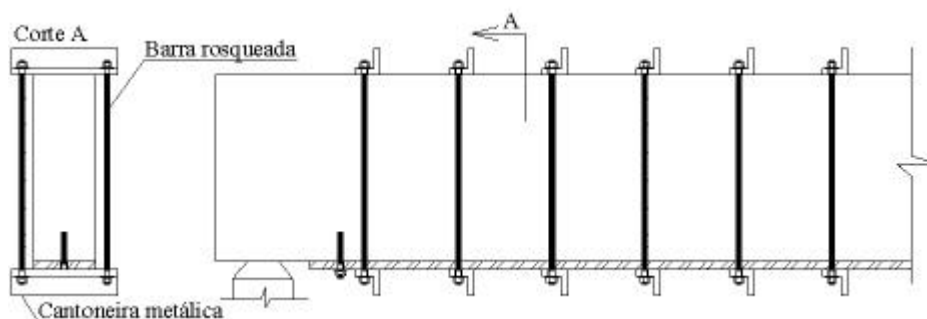


Figura 2.5 – Viga reforçada ao cisalhamento com o uso de estribos externos pré-tencionados

Por ser uma técnica de fácil execução e manutenção, consistindo-se em um sistema simples e de baixo custo, é indicada sempre que se busca o aumento de

resistência ao cisalhamento de peças previamente carregadas ou não, e o controle de aberturas das fissuras existentes, reduzindo rapidamente as deformações das armaduras internas das peças reforçadas.

2.3.4 Técnica de Vergalhões Colados

A técnica consiste na execução de sulcos na região a ser reforçada, onde os estribos e/ou armadura longitudinal são colados com resina epóxica, após uma adequada limpeza do substrato. Esta técnica é utilizada para o reforço ao cisalhamento e à flexão de vigas de concreto armado com ou sem carregamento prévio. Ela é mais eficiente ao cisalhamento quando a colagem é feita utilizando-se a laje como ancoragem final dos estribos de reforço.

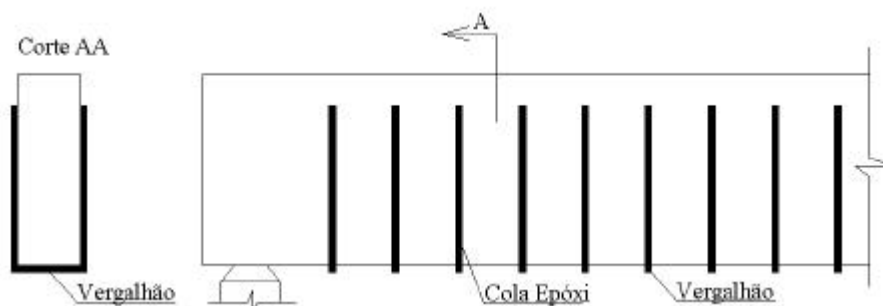


Figura 2. 6 – Viga reforçada à flexão e cisalhamento com o uso de vergalhões colados

Trata-se de uma técnica econômica, na qual os estribos ou armaduras longitudinais podem ser provenientes de sobras de obras, contudo é trabalhosa e diretamente dependente da mão-de-obra que vai executá-la.

2.4. Propriedades dos Materiais Utilizados em Reforço

De acordo com as técnicas de reforço apresentadas, foi montado um quadro onde estão listados alguns materiais utilizados, com suas respectivas características físicas e mecânicas.

Tabela 2. 1 – Propriedades físicas de compósitos utilizados em reforço de estruturas.

		Peso Específico kN/m ³	Limite de Escoamento f _y MPa	Resistência à Ruptura f _u MPa	Módulo de Elasticidade GPa	Limite de Deformação %
Fibra de Vidro (MBT*)	GE-30	25,5	-	> 1550	> 74	> 0,21
Compósito de Fibra Carbono (Sika)	Tipo S	15	-	> 2800	> 165	> 1,70
	Tipo M	16	-	> 2400	> 210	> 1,10
	Tipo H	16	-	> 1300	> 300	> 0,45
Compósito de Fibra Carbono (MBT*)	CF130	18,2	-	> 3550	> 235	> 1,55
	CF530	18,2	-	> 3000	> 300	> 0,79
Aço Chapas	MR240	77	240	> 370	205	-
	MR250		250	> 400		> 20,00
	AR345		345	> 450		> 18,00
Aço Barras	CA-50A	77	500	> 550	210	> 1,00

* - MBT – Master Builders Technologies.

2.5.

Estudos Experimentais Sobre Técnicas de Reforço Externo

Neste item são apresentados estudos experimentais encontrados na bibliografia sobre o reforço ao cisalhamento e à flexão de vigas de concreto armado utilizando-se compósitos de fibras. Estes dados serão utilizados para validação do programa computacional desenvolvido neste trabalho.

2.5.1.

Estudo de Cerqueira (2000) e Pinto (2000)

Cerqueira (2000) estudou reforço ao cisalhamento e Pinto (2000) o reforço à flexão. Todo o programa experimental foi desenvolvido e executado em conjunto, e cada pesquisadora coletou e avaliou os dados pertinentes a seu trabalho.

O programa experimental consistiu na confecção de cinco vigas (V1,V2,V3,V4 e V5) em concreto armado com seção transversal retangular de 15 cm x 45 cm e vão de 450 cm. Elas foram simplesmente apoiadas, um apoio de 1°

e outro de 2º gênero, e carregadas com duas cargas concentradas aplicadas a 135 cm destes apoios.

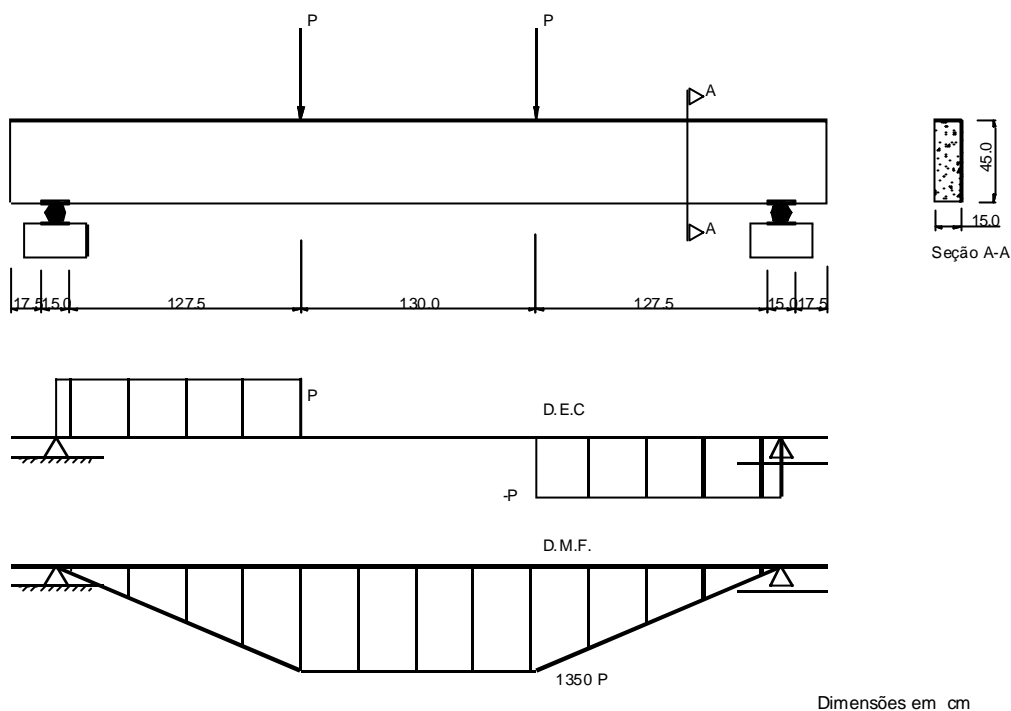


Figura 2.7 – Sistema estrutural, diagrama de esforço cortante e momento fletor de V1 a V5.

As vigas V1 e V3 possuíam taxas de armadura interna diferentes, mas sua armadura longitudinal foi dimensionada para que atingisse a tensão de escoamento antes da armadura de cisalhamento, e foram reforçadas somente à flexão. As vigas V2 e V4 possuíam taxas de armadura interna idênticas, e sua armadura transversal foi dimensionada para que atingisse a tensão de escoamento antes da armadura de flexão, e foram reforçadas somente ao cortante. A viga V5 foi reforçada tanto ao cisalhamento quanto à flexão, sendo confeccionada com a mesma taxa de armadura transversal interna das demais, porém, com a armadura longitudinal interna dimensionada para escoar junto com a transversal.

O sistema de reforço foi formado pelo adesivo Sikadur[®] 30 e lâmina Sika Carbodur[®] S 512. As três vigas foram reforçadas ao cisalhamento com lâminas inclinadas a 45° e a 90° em relação ao eixo da viga, utilizando-se em algumas sistema de ancoragem nas suas extremidades. Cada viga ensaiada foi primeiramente submetida a dois ciclos de carregamento e depois reforçada (sob carregamento constante), e então carregada até a ruptura. O comportamento das vigas ensaiadas foi acompanhado por meio do monitoramento das flechas e das deformações da armadura interna, das lâminas de reforço e do concreto.

A seguir são apresentadas as características dos materiais utilizados no estudo experimental relativas à análise numérica efetuada no Capítulo 5.

Tabela 2. 2 – Resistência média à compressão e à tração do concreto (NBR5739 e NBR7222).

Viga	$f_{t,ind}$ (MPa)	f_c (MPa)
V1	3,63	34,8

As barras de aço utilizadas nas vigas foram de CA-50 ou CA-60. As da armadura transversal tinham diâmetro de 5,0 mm, 6,3 mm e 8,0 mm, as da armadura longitudinal de tração 16,0 mm, e as da armadura longitudinal de compressão 8,0 mm.

Tabela 2. 3 – Características das barras de aço utilizadas.

ϕ (mm)	ϕ_{ef} (mm)	f_y (MPa)	f_{st} (MPa)	ϵ_y^* (‰)	ϵ_y (‰)	E_s GPa
Viga V1e V3						
5,0	4,7	688	750	3,6	5,8	191
6,3	6,3	575	730	2,9	4,8	205
8,0	7,9	590	785	3,0	5,0	200
16,0	15,8	630	730	3,3	3,3	191

ϕ e ϕ_{ef} - diâmetro nominal e efetivo das barras de aço

ϵ_y^* - deformação de escoamento correspondente ao diagrama tensão-deformação bilinear.

** Viga V4.

O adesivo SIKADUR-30 foi utilizado para colagem do reforço de lâminas Sika Carbodur, e segundo o fabricante apresenta as resistências mecânicas aproximadas (aos 10 dias e 15°C):mostradas na tabela 2.4.

Tabela 2. 4 – Características do adesivo epóxico utilizado.

Massa Específica Kg/l	Tensão				Modulo de Elasticidade Gpa
	Compressão MPa	Flexotração MPa	Cisalhamento MPa	Aderência MPa	
1.77	95	28	15	4	12,8

Foram utilizadas para o reforço de todas as vigas as lâminas de fibra de carbono em matriz de epóxi Sika Carbodur® S tipo S512. De acordo com o fabricante elas possuem no máximo 68% de conteúdo de fibras no volume e resistem à temperatura de no máximo 150°C. As outras propriedades fornecidas constam da tabela 2.5.

Tabela 2. 5 – Características do compósito de fibra de carbono utilizado.

Peso Específico	Tração mín.	Tração méd. na ruptura	Deformação Específica	Modulo de Elasticidade Mínimo	Área de Seção transversal
g/cm ³	GPa	GPa	%	GPa	mm ²
1,5	2,4	3,1	>17	165	60

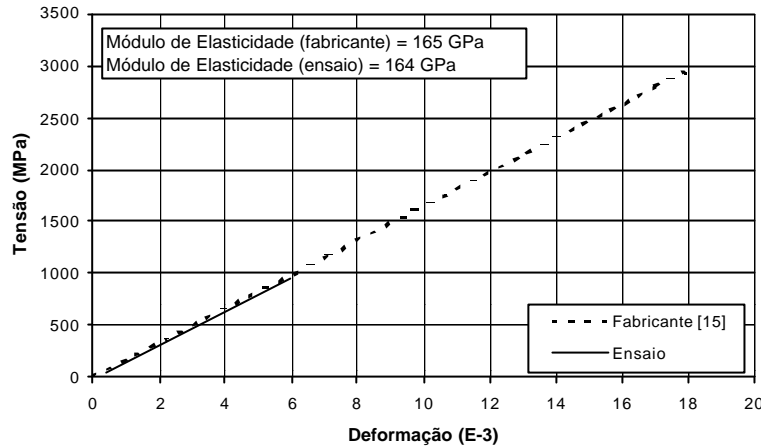


Figura 2. 8 – Diagrama de “tensão x deformação” da Lâmina Sika Carbodur tipo S utilizada.

As vigas foram armadas de acordo com o desenho mostrado na Figura 2.9.

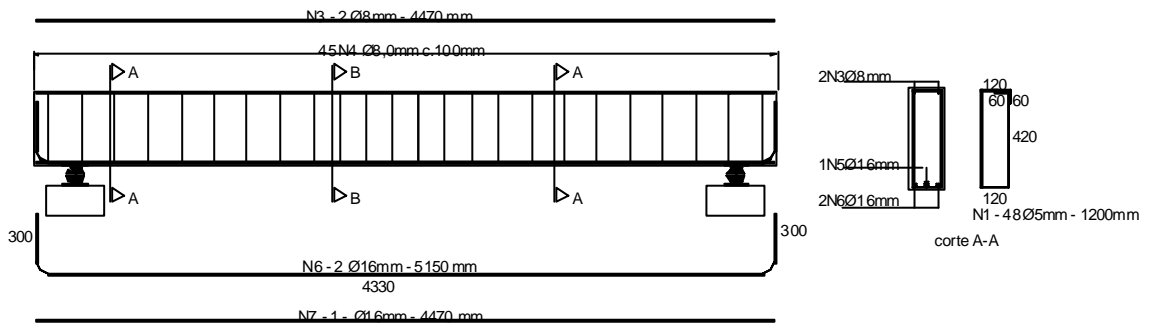


Figura 2. 9 – Detalhamento da armadura interna da viga V1.

De acordo com o estudo apresentado em Pinto e Cerqueira (2000), a previsão teórica para o comportamento da viga sem reforço é apresentada na Tabela 2.6.

Tabela 2. 6 – Resistência à flexão teórica das vigas sem reforço.

Viga	A _s (mm ²)	A _s ' (mm ²)	d' (mm)	D (mm)	M _R (kN m)	M _R * (kN m)	P _u (kN)	P _u * (kN)
NBR-6118/80								
V1	603	101	27	420	147	119	108,6	87,9
Software utilizado por Pinto e Cerqueira (2002)								
V1	603	101	27	420	146	118	108,1	87,4

* Adotando-se valores nominais: ε_y=2,5% e f_y=500 MPa.

A resistência ao cortante, V_R , de uma viga com estribos pode ser considerada igual à soma do cortante resistido pelo “concreto”, V_c , e o cortante resistido pelos estribos, V_{sw} .

Tabela 2. 7 – Resistência ao cortante teórica V_R .

Viga	V_R^*		V_R^{**}	
	$V_c^1 + V_{sw}$	$V_c^2 + V_{sw}$	$V_c^1 + V_{sw}^{**}$	$V_c^2 + V_{sw}^{**}$
V1	285	308	255	278

¹ NBR6118/80

*calculado com valores experimentais

² NBR6118/2000

**calculado com valores nominais

A seguir é apresentada a Tabela 2.8. com a quantidade de material de reforço utilizado e a descrição da colagem deste na viga.

Tabela 2. 8 – Reforço utilizado nas vigas

Viga	Material	Reforço
V1	Sika Carbodur S-512 Bf=50mm; ef=1.2mm	Duas lâminas de fibra de carbono coladas na face tracionada da viga (Figura 2.10)

A seguir são mostrados na Figura 2.10. os desenhos detalhados para execução do reforço na viga do experimento e analisada no Capítulo 5.

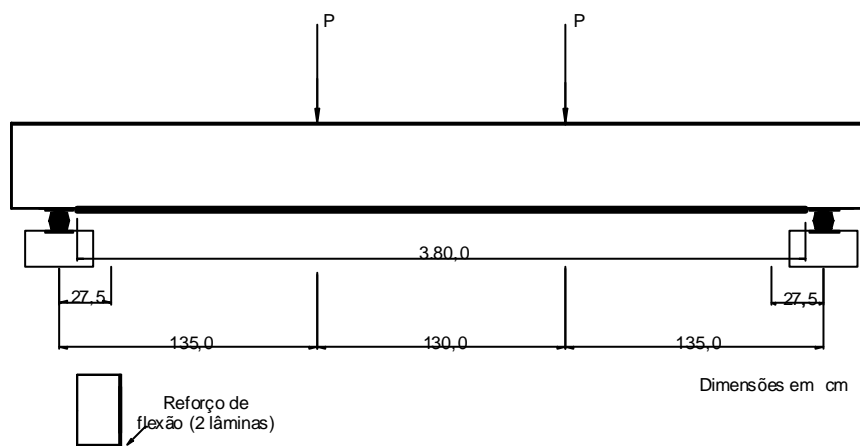


Figura 2. 10 – Reforço da viga V1.

O acompanhamento do comportamento estrutural da viga durante o ensaio foi feito com auxílio de medições realizadas com extensômetros mecânicos, elétricos e deflectômetros.

Os deflectômetros foram posicionados na parte inferior da viga, sob o ponto de aplicação das cargas.

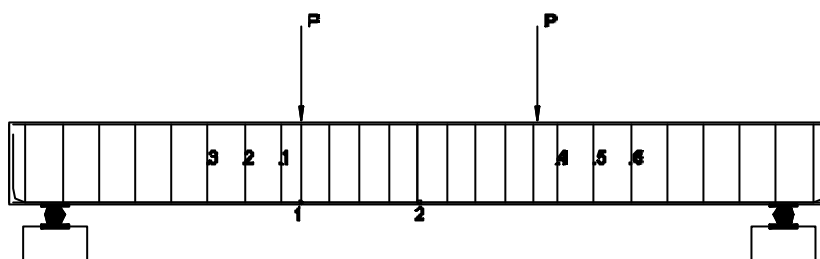


Figura 2. 11 – Posição em que foram medidas deformações nas armaduras internas das vigas.

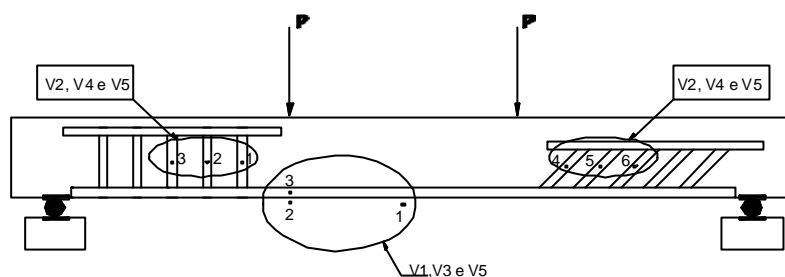


Figura 2. 12 – Posição em que foram medidas deformações nas lâminas do reforço das vigas.

No primeiro ensaio as vigas foram submetidas a dois ciclos de carregamento para depois serem reforçadas.

No primeiro ciclo o carregamento variou de 0 kN, com incrementos de 10 kN, até a carga de 70 kN, no segundo ciclo de carregamento a carga variou de 0 kN até 60 kN, com incrementos de 20 kN. No fim deste ciclo de carregamento as vigas foram atirantadas a uma placa de reação, onde procurou-se atingir uma carga constante de aproximadamente 40 kN.

De acordo com Pinto (2000) a Tabela 2.9 apresenta os valores de tensão e deformação nas lâminas de reforço à flexão.

Tabela 2. 9 – Resistência à flexão teórica das vigas reforçadas.

Viga	f_c MPa	A_s mm ²	A_s' mm ²	f_y MPa	A_f mm ²	d_f mm	E_f GPa	ϵ'_s ‰	$\epsilon_{c,r}$ ‰	$\epsilon_{s,r}$ ‰	ϵ_s ‰	ϵ_f ‰	U_m KN.m	P_u kN
V1	34,8	603	100,5	630	120	450,6	165	2,77	2,75	6,20	7,90	6,86	195,5	144,8

Os valores desta tabela são baseados na tensão de escoamento experimental do aço (ϵ_y e f_y dos ensaios do aço) e $\epsilon_c=3,5\%$

O valor da tensão máxima de cisalhamento entre a fibra e o concreto deve ser verificada para previsão de descolamento da fibra.

Tabela 2.10 – Tensão cisalhante longitudinal.

Viga	b_f mm	e_f mm	E_f GPa	ϵ_f ‰	σ_f MPa	f_{tm} MPa	τ_{ff} MPa	τ_{im} MPa
V1	50	1,2	165	6,86	1131,9	3,63	1,15	1,14

Pode-se notar que existiu uma previsão teórica de ruptura simultânea por flexão e descolamento da fibra para a viga V1.

A Tabela 2.11 apresenta as cargas últimas teóricas calculadas com valores experimentais de f_y e f_{yw} , e as cargas de ruptura alcançadas nos ensaios.

Tabela 2.11 – Valores de carga e modo de ruptura das vigas.

Viga	Carga última teórica (kN)								Carga última exp. (kN)		Modo de ruptura Experimental
	Antes do reforço				Depois do reforço				Cortante	Flexão	
	Flexão	Cortante		Flexão	Cortante						
		(1)	(2)		lâminas verticais		lâminas inclinadas				
				(1)	(2)	(1)	(2)				
V1	109	285	308	145	-	-	-	-	-	140	Descolamento e destacamento da lâmina

(1) V_c da NBR6118/80 [20]

(2) V_c da NBR6118/2000 [22]

2.5.2.

Estudo de Araújo (2002)

O programa experimental consistiu na confecção de sete vigas (VR,V1,V2,V3,V4,V5 e V6) em concreto armado com seção transversal retangular de 15 cm x 30 cm e comprimento de 400 cm. Elas foram simplesmente apoiadas, um apoio de 1º e outro de 2º gênero, com um vão em balanço e carregadas com uma carga no centro do vão bi-apoiado e outra no extremo do balanço.

Todas as vigas possuem taxas de armadura transversal e longitudinal idênticas, mas sua armadura longitudinal foi dimensionada para que atingisse a tensão de escoamento antes da armadura de cisalhamento, e foram reforçadas somente à flexão. Neste caso, o objetivo do estudo seria avaliar o comportamento e o desempenho de vigas de concreto armado com vão em balanço e reforçadas à flexão com tecidos de fibra de carbono, através da medição de flecha, deformação do concreto, deformação das armaduras internas e de reforço, e obtenção da carga de ruptura para as vigas reforçadas de modo a avaliar-se a ductilidade das mesmas.

A programação inicial para execução dos reforços era de que V1, V2 e V3 fossem igualmente reforçadas com a colagem de uma camada de tecido em fibra

de carbono na face inferior, entre os apoios, e na face superior, na região do balanço. O tipo de ruptura esperado seria por descolamento das fibras.

Porém, com a realização dos ensaios das vigas V1, V2 e V3 a ruptura na três vigas aconteceu na região de momento negativo, por flexão e no compósito de fibra de carbono. Este comportamento, diferente do esperado, alterou a programação original para as vigas V4, V5 e V6, que seriam reforçadas nas extremidades para combater o descolamento do compósito.

Desta maneira, julgou-se interessante estudar as vigas V4, V5 e V6, reforçadas à flexão com uma camada de tecido com as mesmas dimensões que a utilizada nas vigas V1, V2 e V3 para a região de momento positivo e com o dobro da largura do tecido para a região de balanço, ou seja, o dobro da armadura de reforço, e, esperando-se que a ruptura ocorresse na região de momento máximo positivo ou por descolamento do tecido do substrato.

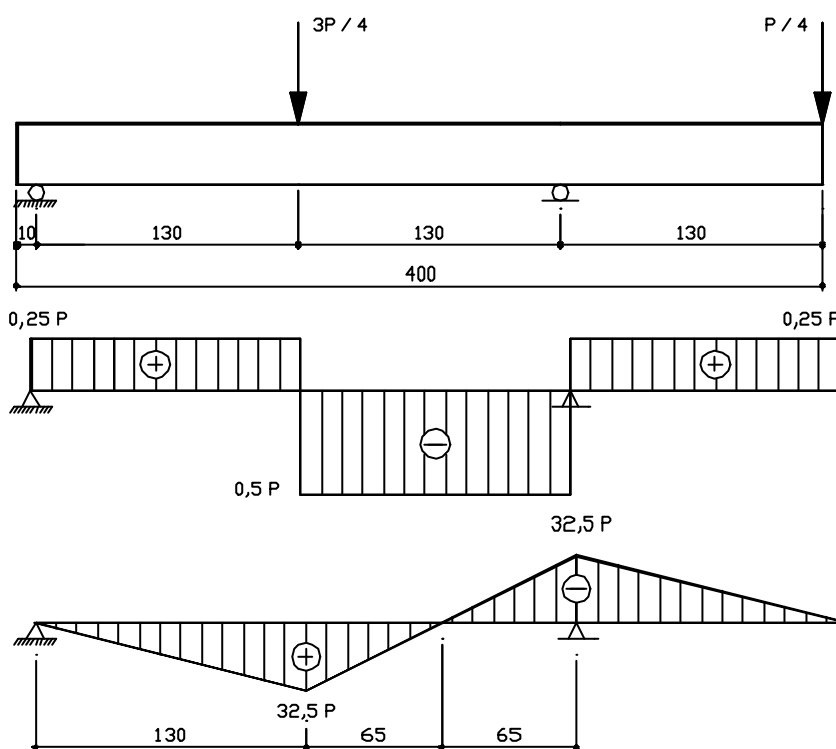


Figura 2. 13 – Sistema estrutural, diagrama de esforço cortante e momento fletor de V1 a V6.

A primeira viga ensaiada, VR, foi utilizada como viga de referência para possibilitar as comparações de incremento de resistência e rigidez após o reforço. A viga rompeu à flexão na região de momento máximo negativo.

O ensaio da viga de referência foi realizado em uma única etapa já que não seria realizado nenhum tipo de reforço. Para as demais vigas o ensaio foi realizado

em duas etapas, uma vez que existia uma preocupação em simular uma situação mais próxima da real. Assim, as vigas foram pré-ensaiadas, reforçadas sob carregamento teoricamente constante e posteriormente levadas à ruptura. Desenvolveu-se então um sistema de manutenção de carga com o objetivo de conservar o carregamento aplicado durante o tempo necessário para aplicação e cura do reforço.

São apresentadas na Tabela 2.12 as características dos materiais utilizados no estudo experimental.

Tabela 2. 12 – Resistência média à compressão do concreto de acordo com NBR5739 e NBR7222.

Ensaio da viga	Idade (dias)	Quantidade de corpos-de-prova	f_c (MPa)
VR	35	5	26,1
V3	94	4	29,0
V5	120	4	29,1
V7	134	4	29,2

As barras de aço utilizadas nas vigas foram de CA-50 e CA-60. A da armadura transversal tem diâmetro de 6,3 mm, a armadura longitudinal de tração 12,5 mm, e a da armadura longitudinal de compressão 5,0 mm (Tabela 2.13).

Tabela 2. 13 – Características das barras de aço utilizadas.

ϕ (mm)	f_y (MPa)	f_{st} (MPa)	ϵ_y * (%)	ϵ_y (%)	E_s GPa
Viga VR e V1 a V6					
6,3	550	800	5,0	5,0	-
12,5	635	680	7,0	7,0	-

ϕ - diâmetro nominal

ϵ_y * - deformação de escoamento correspondente ao diagrama tensão-deformação bilinear.

Para o reforço das vigas utilizou-se tecido de fibra de carbono do tipo CF130 com as propriedades apresentadas na Tabela 2.14.

Tabela 2. 14 – Características do compósito de fibra de carbono utilizado.

Tração min.	Deformação Específica	Modulo de Elasticidade Mínimo	Área de Seção transversal	Largura do tecido	Espessura do tecido
Gpa	%	Gpa	mm ²	mm	mm
3,55	>15,5	235	82,5	50	0,165

O comportamento “tensão x deformação” do tecido de fibra de carbono foi admitido elástico-linear, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

As vigas VR e V1 a V6 foram armadas de acordo com o desenho mostrado na figura 2.14.

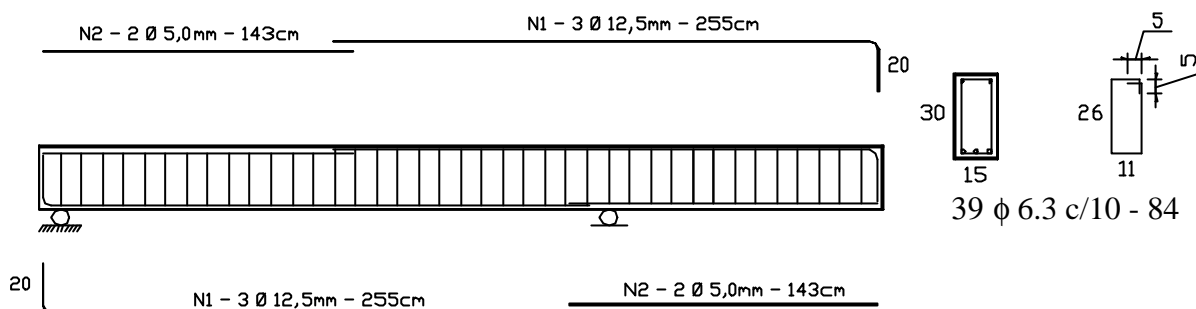


Figura 2. 14 – Detalhamento da armadura interna das vigas VR e V1 a V6

A previsão teórica para o comportamento das vigas sem reforço é apresentada na tabela 2.15.

Tabela 2. 15 – Resistência teórica à flexão e ao cortante das vigas sem reforço.

Resultados teóricos	f_c (MPa)	$f_y (\phi = 6,3)$ (MPa)	$f_y (\phi = 12,5)$ (MPa)	x (mm)	z (mm)	M_u (kN.m)	P (kN)	V_u (kN)	a_{sw} (cm ² /m)
Valor nominal	20,0	500	500	116	91	49,63	152,71	76,36	5,58
VR e V1	26,1	568	642	89	77	52,84	162,60	81,30	5,94
V2 e V3	29,0	568	642	80	72	53,90	165,84	82,92	6,06
V4 e V5	29,1	568	642	80	72	53,93	165,94	82,97	6,07
V6	29,2	568	642	79	72	53,96	166,04	83,02	6,07

Nos dimensionamentos à flexão e ao cortante, foram utilizados os valores nominais e os valores reais encontrados nos ensaios dos corpos-de-prova do concreto e do aço. A armadura longitudinal composta de três barras de 12,5 mm, armadura transversal com barras de 6,3 mm, e concreto com f_{ck} igual a 20 MPa. As vigas não foram armadas à compressão, e as barras com diâmetro de 5 mm têm função de porta estribos.

A quantidade de material de reforço utilizado e a descrição da colagem deste nas vigas é apresentado na Tabela 2.16.

Tabela 2. 16 – Reforço utilizado nas vigas.

Viga	Material	Reforço
V1 a V3	Sika Carbodur S-512 Bf = 50mm; ef = 1,65mm	Uma lâmina de tecido colada em cada face tracionada da viga (Figura 2.15)
V4 a V5	Sika Carbodur S-512 Bf = 50mm; ef = 1,65mm	Duas lâminas de tecido coladas em cada face tracionada da viga (Figura 2.16)

As Figuras 2.15 e 2.16 detalham os reforços executados em cada uma das vigas envolvidas no experimento.

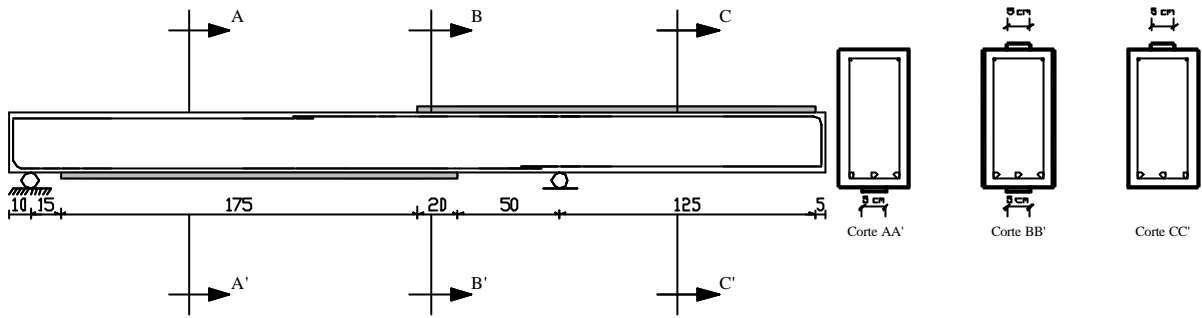


Figura 2. 15 – Reforço da viga V1 a V3.

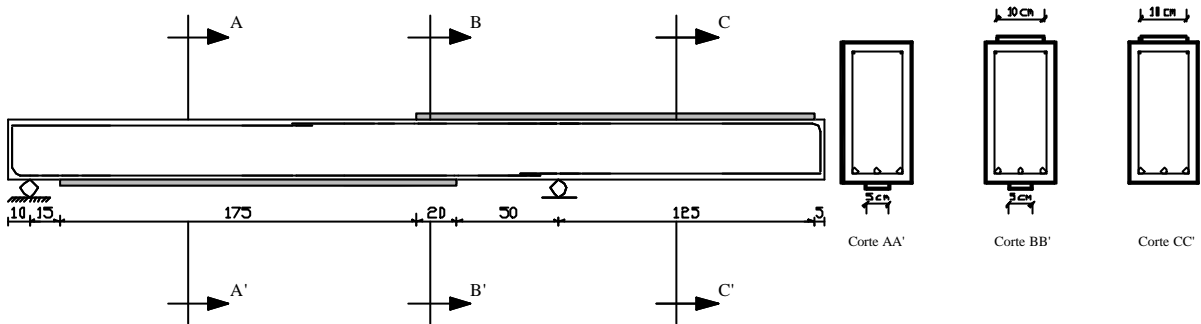


Figura 2. 16 – Reforço das vigas V4 a V6.

O acompanhamento do comportamento estrutural da viga durante o ensaio foi feito com auxílio de medições realizadas com extensômetros elétricos e deflectômetros, posicionados de acordo com as Figuras 2.17 e 2.18.

Os deflectômetros foram posicionados na parte inferior da viga, sob o ponto de aplicação das cargas. A determinação das cargas aplicadas foi realizada através de um transdutor com capacidade para 500 kN, e a leitura de aberturas de fissuras em alguns estágios de carregamento foi obtida com a utilização de um fissurômetro.

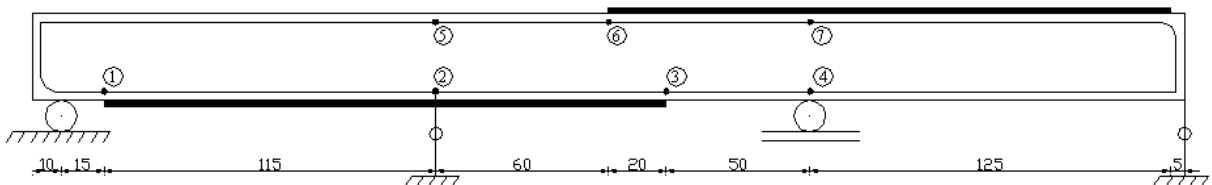


Figura 2. 17 – Posição para medição de deformações e deslocamentos das vigas VR, V1 e V4.

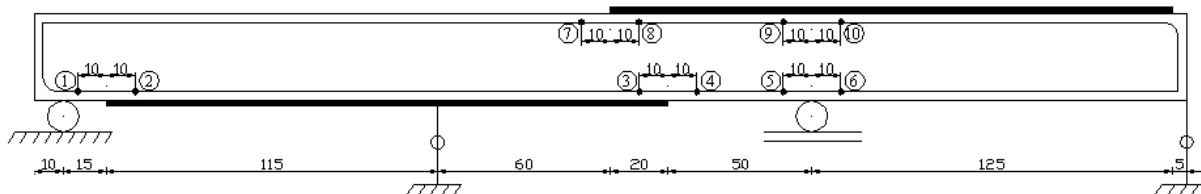


Figura 2. 18 – Posição para medição de deformações e deslocamentos das vigas V2, V3, V5 e V6.

Os ensaios das vigas, com exceção da viga VR, foram divididos em duas etapas de carregamento:

- 1) Primeira etapa, consistindo na aplicação de uma carga máxima entre 90 e 100 kN ou abertura de fissuras na faixa de 0,2 mm, com travamento do elemento estrutural para aplicação do reforço ao final da etapa;
- 2) Segunda etapa, consistindo no procedimento para aplicação do reforço e retomada do carregamento em incrementos de 10 kN até a ruptura.

Descreve-se a seqüência de carregamento correspondente a cada viga ensaiada na Tabela 2.17.

Tabela 2. 17 – Seqüência para carregamento utilizado nos ensaios.

Viga	ΔP Incremento de carga (kN)	P_{Parada} Carga de parada p/ reforço (kN)	P_{retorno} Carga de retorno do reforço (kN)	P_{rupt} Carga de ruptura (kN)
VR	10	-	-	176
V1	10	70	32	206
V2	10	90	40	220
V3	10	90	50	200
V4	10	70	30	228
V5	10	90	-	207
V6	10	90	0,8	216

Nesta fase do experimento as vigas foram reforçadas à flexão, como descrito anteriormente, e sua resistência teórica calculada para a nova situação de acordo com metodologia proposta no trabalho.

Tabela 2. 18 – Resistência à flexão teórica das vigas reforçadas.

Viga	M_u sem reforço (kN.m)	M_u com reforço (kN.m)	$P_{\text{teórico}}$ com reforço (kN)
V1	73,98	85,5	263,22
V2 e V3	75,46	88,26	271,57
V4 e V5	75,50	88,34	271,62
V6	75,55	88,43	272,08

De acordo com Araújo (2002), as tabelas a seguir apresentam os valores teóricos esperados no ensaio, o tipo de ruptura, fissuras máximas constatadas e a carga real de ruptura verificada no ensaio.

Tabela 2. 19 – Carga de ruptura das vigas e maiores aberturas observadas.

Reforço	Viga	Carga de ruptura (kN)		$w_{kmáx}$ (mm)	$w_{kseção}$ (mm)
		Vão	Balanço		
Sem reforço	VR	-----	176,22	0,80	0,80
vão = A_f balanço = A_f	V1	-----	206,15	1,20	1,20
	V2	-----	219,55	1,30	0,30
	V3	-----	200,52	1,00	0,50
vão = A_f balanço = $2A_f$	V4	-----	227,97	1,10	1,10
	V5	207,50	-----	1,00	0,20
	V6	216,79	-----	0,90	0,20

Sendo $w_{kmáx}$ a abertura de fissura máxima encontrada na viga, e $w_{kseção}$ a abertura de fissura na seção onde ocorreu a ruptura.

Tabela 2. 20 – Valores de carga e modo de ruptura das vigas ensaiadas.

Viga	Armadura de reforço A_f (mm ²)		f_y (MPa)	f_c (MPa)	f_r (MPa)	Tipo de ruptura	P_{exp} (kN)	$P_{teórico}$ (kN)	P_{exp} $P_{teórico}$	Variação (%)
	Momento									
	positivo	negativo								
VR	0,00	0,00	642	26,10	-	Flexão no balanço	175,77	162,60	1,081	8,10
V1	8,25	8,25	642	26,10	1788	Flexão no balanço	206,15	179,43	1,149	14,89
V2	8,25	8,25	642	29,00	2051	Flexão no balanço	219,55	183,50	1,196	19,65
V3	8,25	8,25	642	29,00	2051	Flexão no balanço	200,52	183,50	1,093	9,28
V4	8,25	16,50	642	29,10	2062	Flexão no balanço	227,97	183,68	1,241	24,11
V5	8,25	16,50	642	29,10	2062	Flexão no vão	207,50	183,68	1,130	12,97
V6	8,25	16,50	642	29,20	2071	Flexão no vão	215,46	183,84	1,172	17,20