

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Introdução

As estruturas de concreto armado apresentam um período de vida útil longo, cujo regime de utilização pode ser modificado, quer seja através do aumento do nível de solicitações ou de alterações em sua geometria. Além disso, o envelhecimento natural ou a deterioração resultante da ação de agentes agressivos altera as condições consideradas no projeto original.

A deterioração das estruturas, muitas vezes prematura e resultante do descaso com aspectos relativos à durabilidade, a inviabilidade de reconstrução em tempo hábil de estruturas vitais, os acidentes naturais e as falhas de projeto, de detalhamento e de execução vêm contribuindo para o aumento da prática de reparo e reforço das estruturas de concreto.

Atualmente, há uma constante evolução nos métodos de reforço, buscando-se praticidade na execução, aumento da vida útil e da capacidade resistente das estruturas. Dentre as técnicas de reparo e reforço de estruturas de concreto armado, a de aplicação de reforços colados tem a vantagem de ser eficiente, de fácil execução e de não aumentar significativamente o peso e as dimensões do elemento estrutural.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono reúnem um conjunto de propriedades que lhes garante um lugar de destaque entre as técnicas de reparo e reforço por colagem externa: têm alta resistência à tração, alto módulo de elasticidade e são leves e resistentes à corrosão.

No presente capítulo são apresentados materiais e técnicas tradicionais de reabilitação e introduz-se a possibilidade do emprego de materiais compósitos como alternativa mais eficaz na solução desses problemas. Essas informações, organizadas sistematicamente, servem como ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho.

2.2. Métodos Convencionais de Reforço Estrutural

No passado, as técnicas de reforço limitavam-se à adição de novos elementos, de mais apoios e no aumento das seções resistentes, métodos que são empregados até hoje. Atualmente, com o surgimento de novas tecnologias, as técnicas de reforço tornaram-se mais sofisticadas.

A mudança de utilização da estrutura, ou uma alternativa para melhorar sua capacidade para suportar determinado conjunto de solicitações, está ligada diretamente à necessidade de reforço estrutural.

Na literatura encontram-se diversas técnicas de reforço, cuja aplicação e desempenho irão depender da configuração geométrica e de carregamento. A escolha, portanto, deverá estar baseada nas seguintes considerações: custo de aplicação, desempenho e durabilidade do reforço, além da facilidade e rapidez na instalação.

2.2.1. Aumento da Seção Transversal

Esta metodologia de reforço consiste na colocação de uma camada adicional de concreto armado em um elemento estrutural existente. Deve-se aplicar uma nova camada à superfície de concreto existente com o objetivo de produzir um elemento monolítico. Também são empregadas argamassas nestas aplicações.

Além de aumentar as solicitações de carregamento na estrutura como um todo, esta técnica demanda tempo e, na maioria das vezes, interrupções nas atividades desenvolvidas no local.

2.2.2. Protensão Externa

Esta técnica contribui para a redução das deformações na estrutura existente, bem como aumenta a capacidade resistente destes elementos. A relativa simplicidade do método construtivo, a ausência de problemas com o cobrimento dos cabos, a possibilidade de inspeção e a eventual reposição dos cabos durante a vida útil são as principais vantagens deste método de reforço.

Apresentam-se como desvantagens desta técnica a sua vulnerabilidade à ação do fogo, à corrosão eletroquímica e a atos de vandalismo, pela localização no exterior de elementos estruturais.

2.2.3. Chapa de Aço Colada com Resina Epóxi

Utiliza-se este método para reparar ou reforçar elementos de concreto com capacidade resistente insuficiente devido a danos estruturais, mudanças de utilização e corrosão das armaduras. Esta técnica consiste em colar chapas ou outros elementos de aço na superfície de elementos de concreto através de adesivos epóxi.

Apesar desta técnica apresentar várias vantagens, como economia, eficiência e aplicação relativamente fácil, a corrosão nas chapas de aço é evidente após longos períodos de exposição. Esta corrosão, ocorrendo ao longo da interface do adesivo, compromete perigosamente a aderência entre os elementos, além de ser muito difícil de ser diagnosticada em inspeções de rotina.

2.3. Materiais Compósitos Utilizados em Reforço

Embora os materiais e tecnologias convencionais sejam adequados em muitas situações, a falta de longevidade em alguns casos, e a rápida deterioração em outros, conduzem à necessidade de um melhoramento em suas propriedades e do desenvolvimento de novas tecnologias. A aplicação de novos materiais, em substituição àqueles tradicionalmente utilizados, impõe a necessidade de conhecer suas propriedades e seu comportamento sob as mais variadas condições.

Os materiais compósitos são definidos como uma combinação macroscópica de dois elementos principais, distintos entre si: uma matriz e um material de reforço, que usualmente é constituído por fibras.

Cabe às fibras suportarem o máximo possível do esforço aplicado, por apresentarem maior resistência e rigidez, enquanto a função principal da matriz é ligar as fibras e transmitir as cargas externas para as mesmas através das tensões tangenciais na interface fibra/matriz.

O comportamento e as propriedades dos materiais compósitos dependem da natureza, da forma, do arranjo estrutural e da interação entre os componentes. Naturalmente, as propriedades e características intrínsecas de cada componente ajudam na determinação das propriedades gerais dos compósitos. Entretanto, a interação entre os componentes resultará em um novo grupo de propriedades, derivadas da combinação das propriedades individuais de cada componente. Portanto, a distribuição e a quantidade relativa de cada componente são fatores importantes que contribuem para o desempenho do compósito. Essas inúmeras variáveis fornecem aos materiais compósitos muito da sua versatilidade (BEBER et al., 2000).

Os compósitos constituídos com fibras são os mais eficientes, uma vez que a forma fibrosa da maioria dos materiais é mais resistente do que o mesmo material em sua forma a granel, tornando-os assim muito interessantes sob o ponto de vista estrutural, destacando-se o carbono, o vidro, o boro e a sílica.

São utilizadas também fibras de polímeros sintéticos como as fibras Kevlar (aramida – ARomatic polyAMID) e Pet fibras. O comportamento tensão-deformação específica de cada fibra típica está mostrado na Figura 2.1.

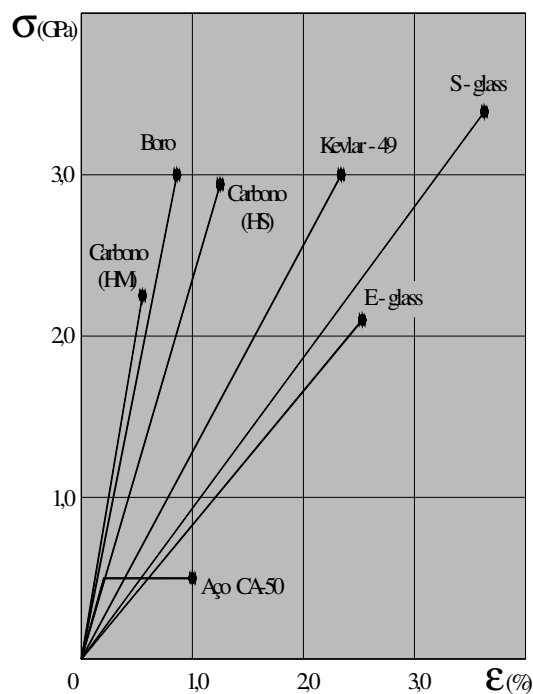


Figura 2.1 - Diagrama tensão-deformação específica de diversos tipos de fibras e aços; adaptado de ARAÚJO (2002b).

As fibras de carbono têm diâmetros entre 0,07 mm e 0,10 mm. Elas podem ser longas, quando forem contínuas, ou curtas, quando são fios cortados (com comprimentos de 3 mm a 50 mm). A relação entre o comprimento e o diâmetro médio das fibras curtas é chamada de fator de tamanho. As propriedades de um compósito com fibras curtas são muito dependentes desta relação – quanto maior o fator de tamanho, maior será a dureza e a resistência do compósito.

Tabela 2.1 – Propriedades típicas de algumas fibras KENDALL (1999).

Propriedade	Vidro-E	Aramida (A) Kevlar 49™	Carbono de elevada resistência (HS)	Carbono de elevado módulo (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração (MPa)	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento)
					550 (ruptura)
Módulo de Elasticidade (GPa)	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação Específica na ruptura (%)	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento)
					6 (ruptura)
Peso específico (kN/m ³)	25,6	14,4	18	19	78,5
Coeficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	5,0	-2 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	12 (longitudinal)
		+59 (transversal)	+17 (transversal)		
Custo da fibra (US\$/kg)	2	22	15 - 22	90	1

2.3.1. Compósitos de Fibra de Carbono

As primeiras pesquisas relativas aos compósitos de fibra de carbono foram desenvolvidas no Japão há aproximadamente 25 anos, devido aos problemas que o país tem enfrentado com abalos sísmicos. Os japoneses costumam reforçar as cabeças dos pilares com a fibra de carbono para enrijecer os nós das estruturas, evitando assim a liquefação, que é o efeito causado pelo abalo sísmico. Atualmente o reforço é colocado em estruturas novas para evitar que estas venham a ruir em virtude de abalos. Os EUA começaram a usar esse tipo de reforço em projetos aeroespaciais da NASA e, posteriormente, sua utilização estendeu-se à indústria automobilística, como revestimento dos carros de Fórmula 1, para a proteção contra esmagamento das pernas dos pilotos em caso de batidas.

As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez, baseadas na força das ligações carbono-carbono, no grafite, e na leveza do átomo de carbono.

O seu alto módulo de elasticidade e, de certo modo, sua alta resistência dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos das fibras.

Os compósitos reforçados com fibras de carbono são os mais apropriados para o reforço de estruturas de concreto armado por causa do alto desempenho mecânico das fibras de carbono, permitindo uma significativa redução nas dimensões do elemento de reforço. É um subproduto de materiais com base em poliacrilonitril, oriundo da indústria de refinação, oxidado a 1500°C. O resultado é um material com base em carbono, em forma de fibra, na qual os átomos ficam perfeitamente alinhados ao longo da fibra.

Trata-se de um sistema de rápida e fácil aplicação, pouco peso, elevada resistência à tração e propriedades anticorrosivas, composto por preparador de superfície, massa reparadora, epóxi saturante e fibra de carbono.

Este sistema só pode ser usado para reforço não dispensando um tratamento adequado na área, no caso de trincas, corrosão de armaduras e similares, para depois entrar com o reforço da fibra. A recuperação estrutural convencional é indispensável.

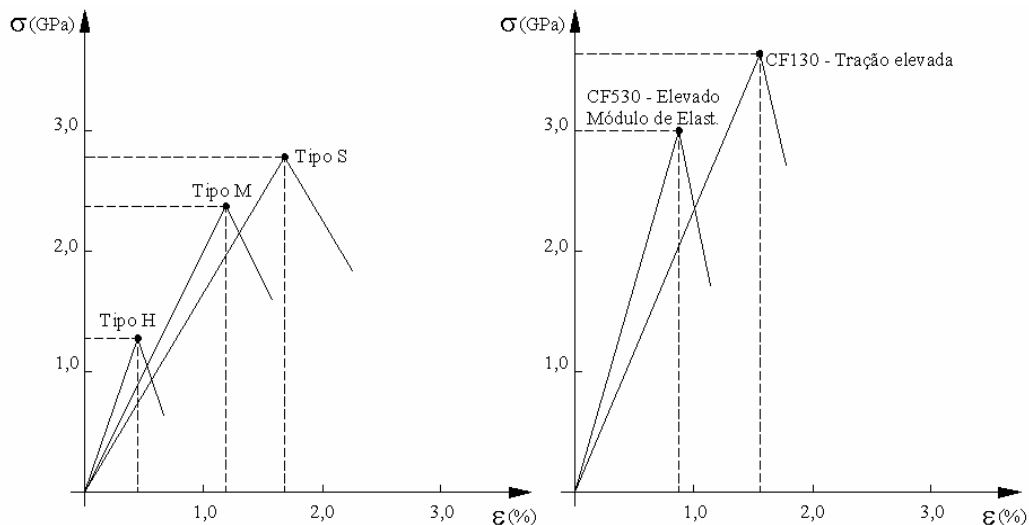


Figura 2.2 – Diagramas “tensão x deformação” de compósitos de fibra de carbono comercializados pela Sika (à esquerda) e por Master Builders Technologies (à direita); adaptado de SOUTO FILHO (2002).

As matrizes destes materiais compósitos são resinas que podem ser termofixas ou termoplásticas. As termofixas são as que não liberam gases durante a ligação interna, e podem ser moldadas usando-se baixas pressões em temperatura ambiente. É o caso das resinas de poliéster não saturado e das resinas de epóxi. As termoplásticas, que também possuem uma grande variedade como bases para reforço, dependem, para a sua utilização, de uma série de fatores que incluem a natureza da aplicação, o ambiente e o custo. É o caso das resinas de polipropileno, nylon, materiais de estireno básico, poliésteres termoplásticos, acetato, policarbonato, etc.

A razão principal para reforçar polímeros é aumentar a sua rigidez e, conseqüentemente, devido às propriedades das fibras, aumentar a resistência à tração, à compressão em estruturas confinadas e ao impacto, além de melhorar a resistência à fadiga. Com isso, selecionando-se dentre as diversas fibras, geometrias e polímeros disponíveis, as propriedades mecânicas e de durabilidade de um material podem se adequar a uma aplicação específica. Os desempenhos estruturais dos materiais compósitos dependem principalmente do tipo e da quantidade de fibras utilizadas numa dada direção.

As resinas reforçadas com fibras oferecem vantagens únicas em muitas aplicações, onde materiais convencionais não conseguem fornecer uma vida útil satisfatória. A alta relação resistência/peso próprio e a excelente resistência à corrosão tornam os materiais compósitos muito atraentes para aplicações estruturais.

Pode-se observar na Figura 2.1, que os compósitos de fibras de carbono (CFC) são mais indicados para o reforço de vigas de concreto armado devido ao alto desempenho mecânico destas fibras, permitindo uma significativa redução em suas dimensões. Vale lembrar que, na maioria dos casos, a matriz utilizada para esses reforços é a resina epóxi.

Existem três sistemas de reforço fabricados com fibras de carbono, BEBER et al. (2000):

- Chapas pultrudadas: são chapas de CFC de alta resistência, impregnadas com resina epóxi ou poliéster, que resultam em perfis contínuos dos mais diversos e complexos formatos, colados sobre a superfície do concreto (Figura 2.3).

- Fios de fibras de carbono: são enrolados sob tensão e colados sobre a superfície do concreto (Figura 2.4a).

- Mantas e tecidos pré-impregnados (“prepreg”): possuem espessura similar a do papel de parede, colados sobre a superfície do concreto com resina epóxi, seguindo exatamente a curvatura do elemento e permitindo a aplicação em “cantos vivos” (Figuras 2.4b e 2.4c).

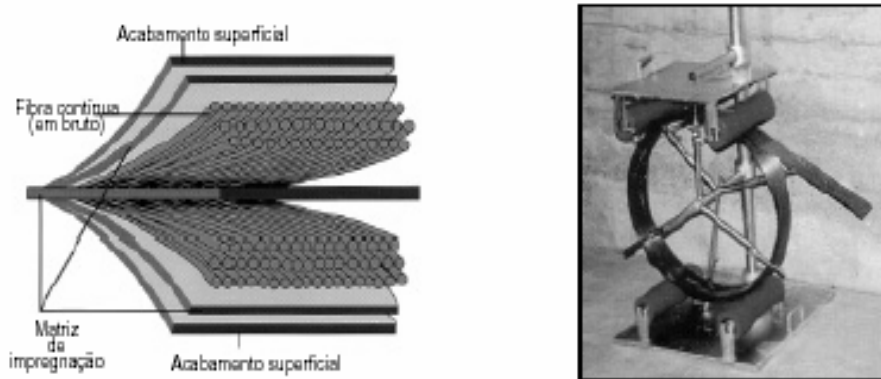


Figura 2.3– Sistema pré-fabricado de CFC unidirecional, laminado ; adaptado de JUVANDES (1999).

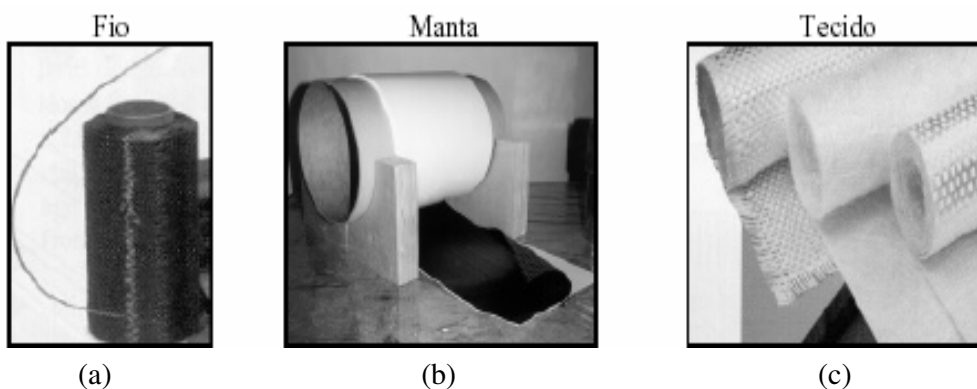


Figura 2.4– Sistema de CFC curados “in situ” ; adaptado de JUVANDES (1999).

2.3.2. Resinas Epoxídicas

As resinas epoxídicas são formadas por monômeros que, ao reagirem com catalisadores, formam polímeros de cadeias de grande extensão. As características desses polímeros variam de acordo com o monômero, com o catalisador utilizado e com as proporções destes para a formação dos polímeros.

Atualmente há uma grande variedade de resinas sintéticas utilizadas na construção civil, tais como as resinas acrílicas, as de poliéster, as poliuretânicas e as resinas de epóxi. Entre as resinas sintéticas utilizadas em reforços e recuperações de estruturas de concreto, destacam-se as resinas epoxídicas, por apresentarem uma série de vantagens sobre as demais. Dentre as vantagens destas resinas, pode-se dar ênfase às suas excelentes propriedades de aderência, resistência e durabilidade, além da compatibilidade que esses materiais possuem com o concreto.

As resinas epoxídicas são derivadas do petróleo, resultante da combinação da epocloridina e do bifenol. De acordo com a proporção desses componentes pode-se obter resinas com propriedades diferentes e com isso alterar o tamanho da molécula. Mas essa resina epóxi, por si só, não apresenta aplicação prática. Portanto, utilizam-se catalisadores que contêm hidrogênio ativo em suas moléculas para reagir com essa resina gerando uma “formulação epóxi”. Para cada situação busca-se uma formulação ideal, ou seja, para cada aplicação a ser realizada tem-se uma proporção ideal de resina epóxi e catalisador, de modo a tornar esse produto final da reação o mais eficaz possível.

Para uma formulação epóxi usual, tem-se as seguintes propriedades físicas e químicas, CEB-FIP (2001):

- Resistência à tração variando de 30 MPa a 90 MPa, e à compressão, de 120 MPa a 210 MPa;
- Excelente adesão ao concreto entre 30 MPa e 50 MPa, rompendo-se geralmente por tração fora da área colada;
- Intervalo de tempo variando de 30 minutos a 10 horas para se adquirir resistência, sendo que a resistência máxima é obtida aos sete dias;
- Retração inferior à do concreto.

A formulação epóxi utilizada, por ser um material isolante, influencia na estrutura dando a ela uma maior resistência à ruptura do conjunto CFC-concreto uma vez que esses dois materiais apresentam coeficientes térmicos diferentes. Outra característica muito importante que este adesivo deve possuir é uma elevada resistência e rigidez. Além disso, a camada de epóxi não deve exceder a 3 mm de espessura para que o endurecimento do epóxi no interior da pasta não seja reduzido, prejudicando assim o reforço realizado. Na prática a sua espessura final fica em torno de 1,5 mm.

A função do adesivo é garantir a aderência do reforço com o concreto, transferindo as tensões tangenciais do reforço para o substrato do concreto, estabelecendo assim a integridade do conjunto reforço-epóxi-concreto. Desta forma, nota-se que a escolha do adesivo a ser utilizado é importantíssima, pois uma grande parte do comportamento mecânico do reforço depende dele.

2.3.3. Reforço Estrutural com Compósito de Fibras de Carbono Colado com Resinas Epóxi

A conveniência da utilização de um determinado sistema CFC, para aplicação estrutural específica e particular, deverá ser confirmada por meio de uma avaliação da estrutura envolvida, de forma a estabelecer da maneira mais exata possível e com margem de segurança confiável a sua capacidade resistente naquele instante, identificando quaisquer deficiências ou anomalias que existam e que possam influenciar na segurança da estrutura, determinando as suas origens e pesquisando a integridade do substrato de concreto.

Devido ao conjunto de materiais empregados nessa técnica, CFC e resinas epoxídicas, esse sistema possibilita um aumento significativo na resistência das estruturas, visando sanar deficiências devido a uma mudança de uso das mesmas, erros de projeto ou de execução, ou ainda por uma necessidade de recuperação estrutural face ao tempo de uso ou por algum acidente que tenha ocorrido.

Além de possuir características semelhantes às encontradas em sistemas de reforços realizados com chapas de aço tais como a enorme variedade de casos em que podem ser empregadas, a rápida, fácil e eficaz aplicação e o fato das dimensões das estruturas permanecerem praticamente inalteradas, apresenta ainda

várias vantagens em relação a esta. O baixo peso específico do sistema de reforço é uma delas. BEBER (2000) afirma que para um mesmo incremento de resistência, 2 kg desse material compósito poderiam substituir 47 kg de aço.

Outras características são a maleabilidade e o comprimento oferecido por certos tipos de CFC. Os tecidos, por exemplo, além de serem fabricados de forma contínua, possuindo assim comprimentos com a medida desejada, permitem o uso em locais mais complexos, onde a utilização das chapas se torna impossível. Essas duas vantagens, aliadas à sua leveza, facilitam a manipulação e aplicação do reforço além de torná-lo, conseqüentemente, ainda mais rápido.

A resistência à corrosão desse sistema também é importante, uma vez que elimina uma série de cuidados necessários quando o reforço é realizado com chapas metálicas, além de que em certas situações se torna impossível a aplicação desse, mesmo que com camadas protetoras.

Esse sistema de reforço com CFC também tem suas desvantagens. A incompatibilidade desses materiais com uma superfície irregular, a sua baixa resistência ao fogo e sua exposição aos raios ultravioletas, são as principais, mas são problemas presentes também em outros sistemas de reforço como os de chapas de aço coladas com epóxi. Além disso, quando esta técnica é comparada com outros sistemas de reforço, apresenta custos mais elevados, que, na maioria das vezes, são compensados pelas vantagens citadas anteriormente.

2.4. Estudos Experimentais sobre Vigas com Reforço Externo de CFC

Neste item são apresentados estudos encontrados na bibliografia sobre o reforço à flexão de vigas de concreto armado utilizando-se compósitos de fibras. Estes dados serão utilizados para fins comparativos com os resultados obtidos do modelo analítico desenvolvido neste trabalho.

2.4.1. Estudo de Souza et al. (1998)

Para este estudo foram concretadas sete vigas de concreto armado, nomeadas como FRD, FRR e F1 a F5, com seção transversal retangular de 12 cm x 20 cm e vão de 210 cm, como mostrado na Figura 2.5.

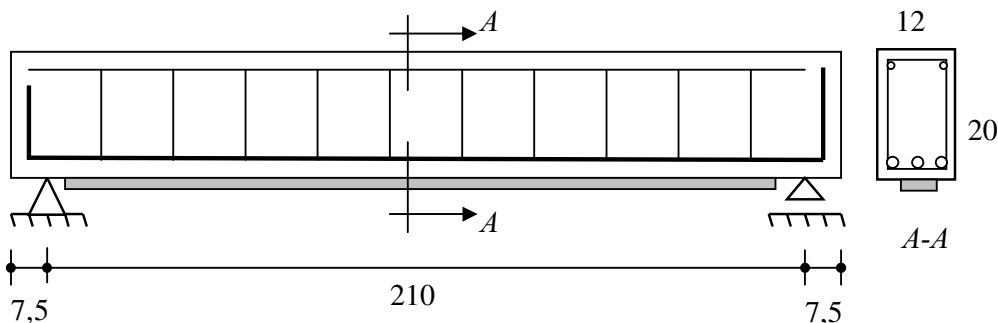


Figura 2.5—Características geométricas das vigas reforçadas à flexão (dimensões em cm).

Duas vigas foram utilizadas como controle. A viga FRD, com a mesma armadura das demais, foi ensaiada até a ruptura sem receber reforço. A viga FRR foi executada com uma barra de aço adicional de modo que a área de aço total fosse equivalente à área de aço mais a área da fibra das demais vigas reforçadas.

A armadura longitudinal inferior de todas as vigas era composta de duas barras com 8 mm de diâmetro, exceto para a viga FRR, que possuía três barras de 8 mm. A armadura superior era composta de duas barras com diâmetro de 6 mm e, a armadura transversal consistia de estribos com 6 mm de diâmetro com espaçamento uniforme de 10 cm, ao longo de todo o comprimento da viga.

Cinco vigas foram reforçadas com tecido bidirecional de fibra de carbono com 70% das fibras no sentido principal e 30% das fibras no sentido transversal e medindo 75 mm de largura. O compósito foi ensaiado à tração e a deformação específica na ruptura foi igual a 0,66%. Os detalhes das vigas reforçadas podem ser encontrados na Tabela 2.2.

O tipo de carregamento utilizado, concentrado ou distribuído, não diferenciou o comportamento das vigas denominadas F1 e F2, reforçadas da mesma forma, salvo o rompimento do compósito na viga F2. A capacidade resistente à flexão foi acrescida em até 70% em relação à viga de referência FRD, embora em serviço não tenha havido grande diferença, sendo sugerido pelos

autores ensaios de modelos com maiores dimensões, mais próximos da realidade das estruturas reais.

Comparando-se as vigas com uma camada e a viga com duas camadas de reforço de flexão, tem-se que a inclusão de mais uma camada aumentou a capacidade resistente à flexão da viga em até 65%, com a ruptura ocorrendo por descolamento do reforço.

Tabela 2.2 – Dados das vigas ensaiadas por SOUZA et al. (1998).

Viga	Reforço	Carregamento	f_{cm} (MPa)	f_y (MPa)	Compósito		M_u (kN.m)	Modo de ruptura*		
					E_f (GPa)	f_f (MPa)				
FRD	-	2 cargas concentradas nos terços dos vãos	33	486	-	-	8,8			
FRR	-				-	-	13,7			
F1	1 cam. de reforço na face inferior	Simulação de carga distribuída			138	1425			14,7	R1
F2									15,4	R2
F3	1 cam. na face inferior + 5 bandas transversais	2 cargas concentradas nos terços dos vãos							17,5	R3
F4	1 cam. na face inferior e outra nas laterais								33,6	R4
F5	2 cam. na face inferior		24,2	R1						

* R1 - Descolamento do reforço de flexão e esmagamento do concreto

R2 - Descolamento e ruptura do reforço de flexão

R3 - Descolamento do reforço de flexão e esmagamento do concreto

R4 - Ruptura do reforço na face lateral e esmagamento do concreto

2.4.2. Estudo de Gemert et al. (1999)

Com o objetivo de analisar o aumento da rigidez e da resistência à flexão dos elementos reforçados com CFC, com ou sem sistema de ancoragem, foram ensaiadas cinco vigas de concreto armado.

As vigas tinham seção transversal retangular de 12,5 cm x 22,5 cm, 150 cm de vão livre, eram simplesmente apoiadas e carregadas com duas cargas concentradas dispostas de acordo com a Figura 2.6.

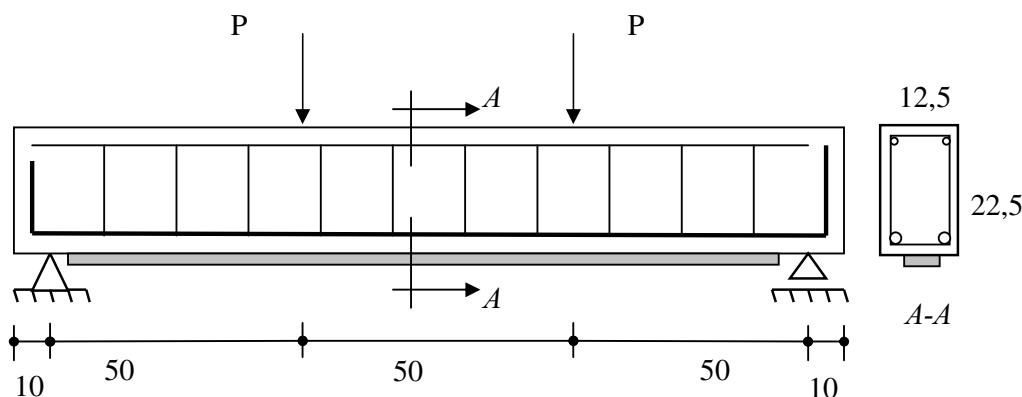


Figura 2.6- Características geométricas e de carregamento das vigas (dimensões em cm).

A armadura longitudinal inferior das vigas era composta de duas barras com 10 mm de diâmetro. A armadura superior era composta de duas barras com diâmetro de 6 mm, e a transversal consistia de estribos com 6 mm de diâmetro e espaçamento uniforme de 11 cm, ao longo de todo o comprimento da viga. A resistência à compressão média do concreto foi de 48 MPa, e a tensão de escoamento das barras da armadura foi de 565 MPa.

Uma das vigas foi de referência e as outras foram divididas em dois grupos com duas vigas em cada um: vigas reforçadas com duas camadas de tecidos de fibra de carbono de mesmo comprimento (130 cm), e vigas reforçadas com duas camadas de tecidos com comprimentos diferentes (130 cm e 100 cm). Uma das vigas de cada um destes dois grupos foi reforçada também com tecido em forma de U nas extremidades. O tecido possuía largura de 7,5 cm e módulo de elasticidade de 240000 MPa. O aumento na resistência à flexão foi de 75% e 79% para as vigas reforçadas somente com as duas camadas de tecido de fibra de

carbono no fundo e 114% e 91% para as vigas reforçadas também com U de tecido nas extremidades. Os dados das vigas ensaiadas, o tipo de reforço e o modo de ruptura são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3- Dados das vigas ensaiadas por GEMERT et al. (1999).

Viga	Grupo	Tipo de Reforço	P_u (kN)	Modo de Ruptura
AF.0	-		55	Flexão
AF.3	1	2 camadas de tecido de fibra de carbono	96,5	Destacamento do tecido de fibra de carbono
AF.3-1	1	2 camadas de tecido de fibra de carbono e 1 U de amarração em cada extremidade	118,0	Destacamento do tecido de fibra de carbono
AF.3*	2	2 camadas de tecido de fibra de carbono	98,5	Destacamento do tecido de fibra de carbono
AF.3**	2	2 camadas de tecido de fibra de carbono e 1 U de amarração em cada extremidade	105,0	Destacamento do tecido de fibra de carbono

2.4.3. Estudo de Matthys (2000)

O autor ensaiou duas séries de vigas com o objetivo de estudar separadamente o comportamento das vigas reforçadas à flexão e ao cisalhamento, utilizando lâminas e tecidos pré-impregnados de CFC como reforço.

Foram ensaiadas 16 vigas com dimensões 20 cm x 45 cm x 400 cm, biapoizadas e com duas cargas concentradas aproximadamente nos terços do vão, conforme mostra a Figura 2.7.

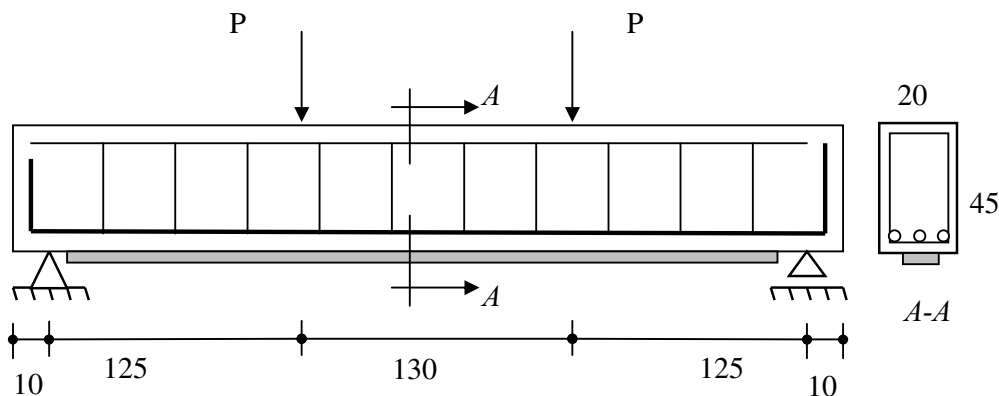


Figura 2.7 – Geometria e carregamento das vigas (dimensões em cm).

A primeira série consistia de nove vigas, sendo duas usadas como referência (BF1 e BF7) e as restantes reforçadas à flexão. As vigas só foram carregadas depois de reforçadas, com exceção das vigas BF4 e BF5 que foram pré-carregadas com 110 kN e fissuradas, sendo que, antes da execução do reforço, BF4 foi descarregada e BF5 foi reforçada sob carregamento. A segunda série não será mostrada, pois esta consistia de vigas reforçadas ao cisalhamento.

Na primeira série de vigas foram obtidos acréscimos de resistência à flexão entre 20% e 40%. Todas as vigas reforçadas tiveram ruptura brusca por descolamento do compósito. A pré-fissuração não diminuiu significativamente o ganho de resistência da viga BF4, assim como a manutenção do carregamento durante o reforço (viga BF5) resultou em carga de ruptura apenas 4% inferior à da sua similar que não foi inicialmente carregada.

Os compósitos de CFC aumentaram a rigidez das vigas reforçadas e tornaram o padrão de fissuração mais uniforme, com menores aberturas de fissuras, influenciando positivamente o estado limite de serviço. No entanto, sua influência foi maior no estado limite último. A ductilidade das vigas reforçadas diminuiu consideravelmente, mas se manteve aceitável segundo o autor.

Tabela 2.4 – Dados das vigas reforçadas à flexão de MATTHYS (2000).

Viga	Reforço				f_{cm} (MPa)	f_y (MPa)	ρ_s (%)	P_u (kN)	Modo de Ruptura
	tipo	f_f	E_f	ρ_f (%)					
BF1	sem reforço	-	-	-	33,7	590	0,96	144,2	EA/EC
BF2	Lâmina de PRFC ⁽¹⁾	32000	159	0,14	36,5			185	DC(EA)/EC
BF3					34,9			186	
BF4					30,8			184,2	
BF5					37,4			177	
BF6					Lâmina de PRFC ⁽¹⁾ + ancoragem com tecido PRFC ⁽²⁾		35,9	183	
BF7	sem reforço	-	-	-	38,5		0,48	80,7	EA/EC
BF8	Lâmina de PRFC ⁽¹⁾	32000	159	0,14	39,4			111,3	DC(EA)
BF9	Tecido de PRFC ⁽³⁾	35000	233	0,026	33,7			95,8	DC(EA)/EC

(1) – Carbodur 10 x 0,12 cm

(2) – Replark 33 x 0,0111 cm

(3) – 2 camadas de Replark 10 x 0,0111 cm

EA/EC - Escoamento do aço seguido de esmagamento do concreto

DC(EA) – Descolamento do compósito, após escoamento do aço

2.4.4. Estudo de Cerqueira (2000) e Pinto (2000)

Estes trabalhos foram realizados simultaneamente e visaram investigar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão, ao cisalhamento e ao cisalhamento e à flexão com adição externa de lâminas de fibra de carbono coladas com resina epóxica.

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 400 cm. Elas foram simplesmente apoiadas, um apoio de 1º e outro de 2º gênero, e carregadas com duas cargas concentradas aplicadas a 135 cm destes apoios conforme Figura 2.8.

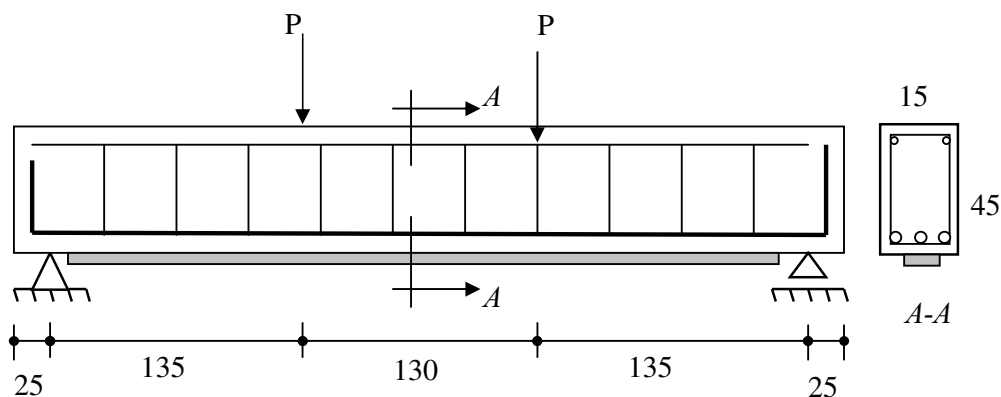


Figura 2.8 – Geometria e carregamento das vigas ensaiadas (dimensões em cm).

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 um 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.

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). As barras de aço utilizadas nas vigas foram de aço CA-50 ou CA-60. A armadura transversal era composta de barras de diâmetro de 5,0 mm, 6,3 mm e 8,0 mm. A armadura longitudinal tracionada era composta de barras de diâmetro de 16,0 mm, e a longitudinal comprimida era composta de barras de diâmetro 8,0 mm.

O valor do carregamento inicial, no qual as vigas foram submetidas, não foi fornecido no estudo disponível da literatura, portanto as deformações iniciais foram desprezadas.

A seguir são apresentadas as Tabelas 2.5 e 2.6 com as características do compósito de fibra de carbono utilizado e a quantidade de material de reforço com a descrição da colagem deste nas vigas, respectivamente.

Tabela 2.5 – Características do compósito de fibra de carbono utilizado.

Tração min (GPa)	Deformação Específica (%)	Módulo de Elasticidade Mínimo (GPa)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área de Seção transversal (mm ²)
2,4	>17	165	1,2	50	60

Tabela 2.6 – 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
V3	Sika Carbodur S-512 bf=50mm; ef=1.2mm	Três lâminas de fibra de carbono coladas na face tracionada da viga

bf= largura da lâmina

ef= espessura da lâmina

A seguir são fornecidos, na Tabela 2.7, os dados das vigas ensaiadas à flexão, o tipo de reforço e o modo de ruptura das vigas.

Tabela 2.7 – Dados das vigas de PINTO (2000).

Viga	f_{cm} (MPa)	ρ_t (%)	ρ_l (%)	P_u (kN)	Reforço à flexão	Modo de Ruptura
V1	34,8	0,67	0,96	140	2 lâminas na face tracionada da viga	Escoamento da armadura longitudinal interna e destacamento da lâmina
V3	38,3	0,67	0,96	150	3 lâminas na face tracionada da viga	Escoamento da armadura longitudinal interna e destacamento da lâmina

2.4.5. Estudo de Araújo (2002a)

Foram ensaiadas quatro vigas de seção retangular, denominadas VC-1R, VC-1, VC-2 e VC-3. A viga VC-1 foi reforçada ao cisalhamento, a viga VC-2 foi reforçada à flexão e a viga VC-3 foi reforçada tanto à flexão quanto ao cisalhamento. A viga VC-1R não recebeu reforço e serviu de referência para as demais vigas ensaiadas.

As quatro vigas do programa experimental possuíam seção transversal retangular de 15 cm x 45 cm e comprimento total de 450 cm. As vigas foram bi-apoiadas em um apoio do 1º gênero e outro do 2º gênero e carregadas conforme mostrado na Figura 2.9.

A armadura longitudinal inferior das vigas era composta de três barras com 16 mm de diâmetro. A armadura superior era composta de duas barras com diâmetro de 8 mm, e a transversal consistia de estribos com 8 mm e 6,3 mm de diâmetro e espaçamento uniforme de 10 cm, ao longo de todo o comprimento da viga. A resistência à compressão média do concreto foi de 33,8 MPa, e a tensão de escoamento das barras da armadura foi de 567 MPa à tração e de 603 MPa à compressão.

A carga última experimental de ruptura foi de 175 kN. O compósito possuía largura de 10 cm e módulo de elasticidade experimental de 92000 MPa. No total, foram empregados 4,125 cm² de reforço na região tracionada da viga estudada VC-2.

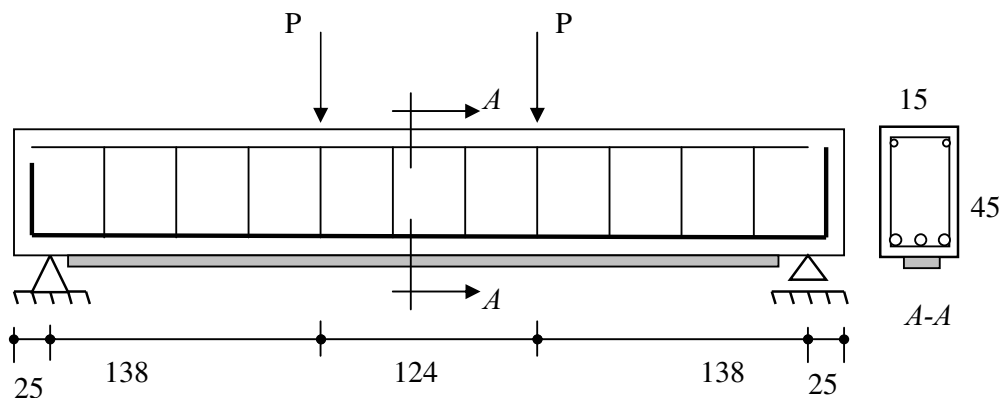


Figura 2.9 – Geometria e carregamento da VC-2 (dimensões em cm).

2.4.6. Estudo de Araújo (2002b)

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 1° e outro de 2° gênero, com um vão em balanço e carregadas com uma carga no centro do vão bi-apoiado e outra no extremo do balanço, conforme a Figura 2.10.

A armadura longitudinal positiva era composta de três barras de 12,5 mm, a negativa de duas barras de 5,0 mm e a armadura transversal com barras de 6,3 mm. O concreto foi dosado para uma resistência característica f_{ck} igual a 20 MPa.

Todas as vigas possuíam 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 era por ruptura do tecido. 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 foram mais reforçadas nos balanços.

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, esperando-se que a ruptura ocorresse na região de momento máximo positivo ou por descolamento do tecido do substrato.

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 a 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.

Para o reforço das vigas utilizou-se tecido de fibra de carbono do tipo N-300 da Rheotec, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 2.8. As dimensões indicadas se referem ao tecido em rolo, como entregue pelo fabricante.

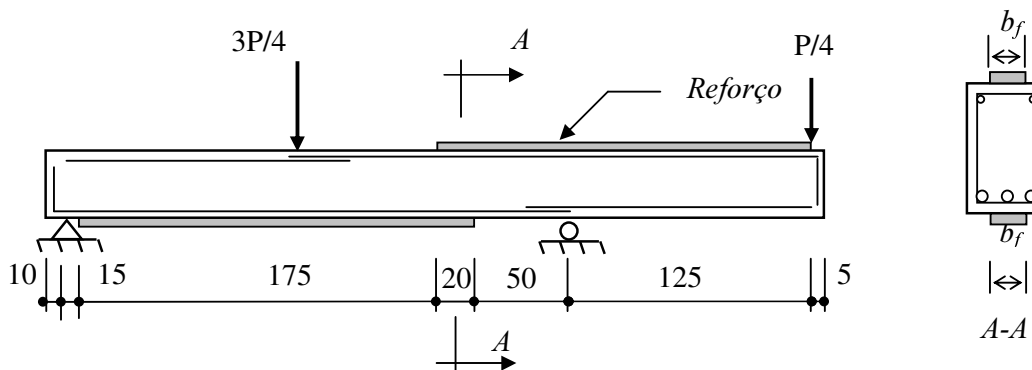


Figura 2.10 – Características geométricas e de carregamento das vigas testadas (dimensões em cm).

Nas Tabelas 2.9 e 2.10 são apresentadas as cargas experimentais, os modos de ruptura e os dados geométricos das vigas ensaiadas.

Tabela 2.8 – Características do compósito de fibra de carbono N-300.

Resistência à tração min (GPa)	Deformação Específica (%)	Módulo de Elasticidade Mínimo (GPa)	Área de Seção transversal (mm ²)	Largura do tecido (mm)	Espessura do tecido (mm)
3,55	>15,5	235	82,5	500	0,165

Tabela 2.9 – 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_f (MPa)	Tipo de ruptura	P_{exp} (kN)	$P_{teórico}$ (kN)	$\frac{P_{exp}}{P_{teórico}}$	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	16,5	642	29,10	2062	Flexão no balanço	227,97	183,68	1,241	24,11
V5	8,25	16,5	642	29,10	2062	Flexão no vão	207,50	183,68	1,130	12,97
V6	8,25	16,5	642	29,20	2071	Flexão no vão	215,46	183,68	1,172	17,20

Tabela 2.10 – Dados experimentais e geométricos das vigas ensaiadas.

Dados comuns a todas as vigas						
$b = 15$ cm	$f_y = 64,2$ kN/cm ²	$f_y' = 83,0$ kN/cm ²	$A_s = 3,75$ cm ²			
$h = 30$ cm	$E_s = 21400$ kN/cm ²	$E_s' = 20244$ kN/cm ²	$A_s' = 0,4$ cm ²			
$d = 28$ cm	$E_f = 23500$ kN/cm ²	$\epsilon_y' = 0,0041$	$\epsilon_{fu} = 0,0155$			
$d' = 2$ cm	$\epsilon_y = 0,003$	$\epsilon_{ci} = 0$	$\phi_s = 1,00$			
$d'' = 2$ cm	$\epsilon_{cu} = 0,0035$	$\epsilon_{si} = 0$	$\phi_f = 1,00$			
Dados diferentes para as vigas						
Dado	V1	V2	V3	V4	V5	V6
f_c (kN/cm ²)	2,61	2,90	2,90	2,91	2,91	2,92
P_{exp} (kN)	206,15	219,55	200,52	227,97	207,50	215,46
M_{exp} (kN.cm)	6442	6861	6266	7124	6224	6463

2.4.7. Estudo de Beber (2003)

Este programa experimental compreendeu a investigação do comportamento de vigas de concreto armado, de seção retangular, reforçadas externamente com compósitos de fibra de carbono. O número de vigas e seu respectivo dimensionamento foram elaborados buscando-se atender a uma série de restrições.

Foram concretadas 44 vigas, com seção transversal 15 x 30 cm e comprimento de 300 cm, como mostrado na Figura 2.11.

A armadura longitudinal inferior foi composta por duas barras de aço CA-50, com 12,5 mm de diâmetro, correspondendo a uma taxa de armadura de $\rho = 0,0055$. A armadura superior foi composta igualmente por aço CA-50 com 6,3 mm de diâmetro. A armadura transversal consistiu de estribos com diâmetro de 6,3 mm e espaçamento uniforme de 7 cm. A armadura foi colocada com um cobrimento de 1,5 cm. O concreto foi dosado para uma resistência à compressão média de 32,8 MPa.

Estas vigas foram divididas em dois grupos. O primeiro, denominado Grupo F, totalizando 14 vigas reforçadas à flexão e o segundo, denominado Grupo C, em um total de 30 vigas reforçadas ao cisalhamento. O número de exemplares do grupo F foi definido em função do número de sistemas de reforço disponíveis (três sistemas). Além das vigas de controle (sem reforço), cada sistema foi utilizado para reforçar um conjunto de quatro vigas.

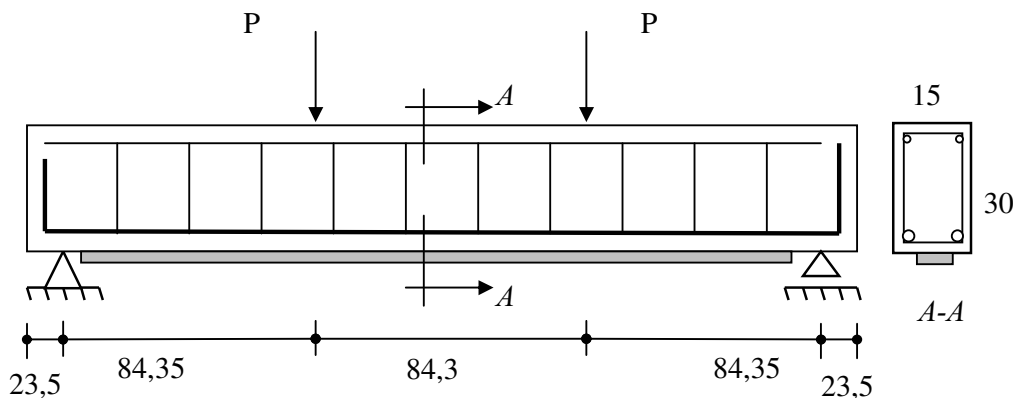


Figura 2.11 - Características geométricas e de carregamento das vigas ensaiadas (dimensões em cm).

Para cada uma das configurações de reforço estudada foram construídos dois exemplares. Assim, as 14 vigas do grupo F foram distribuídas em 7 pares. As vigas V1_A e V1_B não receberam qualquer reforço e foram denominadas vigas de controle, a partir das quais seriam estabelecidas considerações a respeito do desempenho do reforço. As vigas reforçadas com os sistemas de reforço *Replark 20* e *C-240 sheet* foram reforçadas com a mesma seção transversal para que fosse possível estabelecer comparações entre seu desempenho.

Na Tabela 2.11 são mostrados os sistemas de reforço com suas características geométricas, para os seis grupos de vigas.

Tabela 2.11 – Esquema de reforço das vigas do grupo F ; adaptado de BEBER (2003).

Vigas	Esquema de Reforço	
V2_A V2_B		CFK 200/2000 (1 tira) $b_f = 5$ cm $A_f = 0,70$ cm ² $L = 238$ cm
V3_A V3_B		CFK 200/2000 (2 tiras) $b_f = 10$ cm $A_f = 1,40$ cm ² $L = 238$ cm
V4_A V4_B		Replark 20 (1 camada) $b_f = 15$ cm $A_f = 0,1665$ cm ² $L = 238$ cm
V5_A V5_B		Replark 20 (6 camadas) $b_f = 15$ cm $A_f = 0,999$ cm ² $L = 238$ cm
V6_A V6_B		C-240 sheet (1 camada) $b_f = 9,5$ cm $A_f = 0,1672$ cm ² $L = 238$ cm
V7_A V7_B		C-240 sheet (4 camadas) $b_f = 15$ cm (3 camadas) $b_f = 11,75$ cm (1 camada) $A_f = 0,999$ cm ² $L = 238$ cm

No caso particular das vigas do grupo F, as principais implicações estruturais da aplicação dos compósitos de CFC estão associadas a significativos incrementos em resistência e rigidez. A utilização de diferentes sistemas de reforço (laminados pré-fabricados e mantas flexíveis) embora permita resultados expressivos tanto no incremento da resistência quanto da rigidez, apresentam, inerentemente, pequenas diferenças quanto à sua eficiência.

A partir da avaliação do comportamento experimental das vigas do grupo F, notadamente suas cargas e modos de ruptura, foi possível confirmar o excelente desempenho do CFC no reforço à flexão de vigas de concreto armado. Os incrementos de resistência são evidentes, chegando até 78,9%. Contudo, a aplicação dos compósitos conduz a modificações severas no comportamento de uma viga reforçada, influenciando, principalmente, seu modo de ruptura.

Na Tabela 2.12, são apresentadas as principais características das vigas reforçadas, suas cargas e modos de ruptura.

Tabela 2.12 – Cargas e modos de rupturas das vigas do grupo F ; adaptado de BEBER (2003).

Viga	Sistema de reforço	A_r (cm^2)	A_f/A_s	Modo de ruptura	Carga de ruptura	Incremento (%)
V1_A	Sem reforço			Alongamento excessivo da armadura longitudinal	104,63	-
V1_B					102,72	-
V2_A	Laminado CFK	0,70	0,286	Descolamento na interface adesivo / compósito	117,89	13,7
V2_B					116,66	12,5
V3_A	Laminado CFK	1,40	0,572	Descolamento na interface adesivo / compósito	139,69	34,7
V3_B					148,10	42,8
V4_A	Manta Replark	0,167	0,068	Ruptura por fissuração excessiva de flexão	132,81	28,1
V4_B					130,05	25,4
V5_A	Manta Replark	0,999	0,408	Arrancamento do cobrimento	185,49	78,9
V5_B					170,39	64,3
V6_A	Manta C-Sheet	0,167	0,068	Ruptura por fissuração excessiva de flexão	118,56	14,4
V6_B					118,50	14,3
V7_A	Manta C-Sheet	0,999	0,408	Descolamento na interface concreto / reforço	167,07	61,1
V7_B					154,79	49,3

2.5.**Estudos Teóricos sobre Vigas com Reforço Externo de CFC****2.5.1.****Estudo de Chaallal et al. (1998)**

Este estudo consistiu na determinação do reforço à flexão de uma viga existente em concreto armado, através de um modelo analítico, na qual foram aplicados carregamentos majorados que a solicitavam com um momento fletor máximo de 50380 kN.cm.

Com os cálculos efetuados de acordo com a normatização do estudo de CHAALLAL et al. (1998), as características mecânicas dos materiais constituintes e de carregamento da viga estudada já encontram-se modificadas pelos seus coeficientes de segurança, como mostrado na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 - Dados da viga estudada por CHAALLAL et al. (2001).

$b=35 \text{ cm}$	$\epsilon_{cu}=0,0035$
$h=60 \text{ cm}$	$\epsilon_{ci}=0$
$d=53,5 \text{ cm}$	$\epsilon_{si}=0$
$d'=6,5 \text{ cm}$	$A_s=24 \text{ cm}^2$
$d''=5,5 \text{ cm}$	$A_s'=4,0 \text{ cm}^2$
$f_{ck}=2,5 \text{ kN/cm}^2$	$E_f=15000 \text{ kN/cm}^2$
$f_{yk}=40,0 \text{ kN/cm}^2$	$\epsilon_{fu}=0,014$
$f_{yk}'=40,0 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_c=0,72$
$E_s=20000 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_s=0,85$
$E_s'=20000 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_f=0,80$
$\epsilon_y=0,002$	$M_d=50380 \text{ kN.cm}$
$\epsilon_y'=0,002$	

2.5.2. Estudo do ISIS CANADA (2001)

Este estudo consistiu em exemplos de vigas de seção retangular em concreto armado que foram reforçadas externamente com CFC, utilizando-se o modelo analítico desenvolvido no trabalho analisado. Desconsiderando as deformações iniciais tanto no concreto quanto na armadura, questiona-se quanto a estrutura suporta sabendo-se que esta possui um reforço pré-determinado.

Os valores dos momentos últimos das vigas encontrados no estudo são apresentados nas Tabelas 2.14 e 2.15, já afetados pelos coeficientes de segurança.

Com os cálculos efetuados de acordo com a normatização do ISIS CANADA (2001), as características mecânicas dos materiais e de carregamento das vigas V1 e V2 estudadas já encontram-se modificadas pelos seus coeficientes de segurança, como mostrado nas Tabelas 2.14 e 2.15, respectivamente.

Tabela 2.14- Dados da V1 estudada em ISIS CANADA (2001).

$b=10,5 \text{ cm}$	$\epsilon_{cu}=0,0035$
$h=35 \text{ cm}$	$\epsilon_{ci}=0$
$d=32,5 \text{ cm}$	$\epsilon_{si}=0$
$d'=2,5 \text{ cm}$	$A_s=3,0 \text{ cm}^2$
$d''=2,5 \text{ cm}$	$A_s'=1,005 \text{ cm}^2$
$f_{ck}=3,75 \text{ kN/cm}^2$	$E_f=15500 \text{ kN/cm}^2$
$f_{yk}=43,0 \text{ kN/cm}^2$	$\epsilon_{fu}=0,0155$
$f_{yk}'=43,0 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_c=0,72$
$E_s=21000 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_s=0,85$
$E_s'=21000 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_f=0,75$
$\epsilon_y=0,002$	$M_d=5780 \text{ kN.cm}$
$\epsilon_y'=0,002$	

Tabela 2.15 - Dados da V2 estudada em ISIS CANADA (2001).

$b=40$ cm	$\epsilon_{cu}=0,0035$
$h=60$ cm	$\epsilon_{ci}=0$
$d=54,6$ cm	$\epsilon_{si}=0$
$d'=5,4$ cm	$A_s=9,0$ cm ²
$d''=5,4$ cm	$A_s'=4,0$ cm ²
$f_{ck}=3,75$ kN/cm ²	$E_f=15500$ kN/cm ²
$f_{yk}=40,0$ kN/cm ²	$\epsilon_{fu}=0,0155$
$f_{yk}'=40,0$ kN/cm ²	$\phi_c=0,72$
$E_s=21000$ kN/cm ²	$\phi_s=0,85$
$E_s'=21000$ kN/cm ²	$\phi_f=0,75$
$\epsilon_y=0,002$	$M_d=39700$ kN.cm
$\epsilon_y'=0,002$	

2.5.3. Estudo de Machado (2002)

Este estudo também apresentou uma metodologia de cálculo de reforço para vigas solicitadas à flexão.

Para a verificação deste estudo analisou-se uma viga existente em concreto armado, que seria reforçada para receber carregamentos majorados que a solicitavam com um momento fletor nominal máximo de 20592 kN.cm. O momento fletor devido ao peso próprio da viga foi de $M_g=2900$ kN.cm. O reforço utilizado foi o CF-130 do Sistema MBraceTM. As características da viga e do reforço são fornecidas na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 – Dados da viga estudada por MACHADO (2002).

$b=20 \text{ cm}$	$\varepsilon_{cu}=0,0035$
$h=69 \text{ cm}$	$\varepsilon_{ci}=0,00001$
$d=65 \text{ cm}$	$\varepsilon_{si}=0,00023$
$d'=4 \text{ cm}$	$A_s=9,45 \text{ cm}^2$
$d''=2,5 \text{ cm}$	$A_s'=1,6 \text{ cm}^2$
$f_{ck}=2,0 \text{ kN/cm}^2$	$E_f=22800 \text{ kN/cm}^2$
$f_{yk}=50,0 \text{ kN/cm}^2$	$\varepsilon_{fu}=0,014$
$f_{yk}'=50,0 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_s=0,72$
$E_s=21000 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_s=0,87$
$E_s'=21000 \text{ kN/cm}^2$	$\phi_f=1,0$
$\varepsilon_y=0,0021$	$M_d=28828,8 \text{ kN.cm}$
$\varepsilon_y'=0,0021$	