

## **Análise teórica comparativa entre os tipos de reforço estrutural aplicados em vigas de concreto armado**

**Comparative theoretical analysis between types of structural reinforcement applied in reinforced concrete beam**

**Análisis teórico comparativo entre tipos de refuerzos estructurales aplicados en vigas de hormigón armado**

Recebido: 02/09/2021 | Revisado: 10/09/2021 | Aceito: 01/10/2021 | Publicado: 03/10/2021

### **Tarcísio Gomes Parente Neto**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3842-3303>  
Faculdade Luciano Feijão, Brasil  
E-mail: [tarcisiogparente@gmail.com](mailto:tarcisiogparente@gmail.com)

### **José Levi Chaves de Sousa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2174-1863>  
Faculdade Luciano Feijão, Brasil  
E-mail: [levichaves1@hotmail.com](mailto:levichaves1@hotmail.com)

### **Beatriz Fernandes Macário Sousa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8232-2764>  
Faculdade Luciano Feijão, Brasil  
E-mail: [biafms02@gmail.com](mailto:biafms02@gmail.com)

### **José Igor Pereira Frota**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4537-4917>  
Faculdade Luciano Feijão, Brasil  
E-mail: [igor2705@outlook.com](mailto:igor2705@outlook.com)

### **Ésio Magalhães Feitosa Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8531-3337>  
Faculdade Luciano Feijão, Brasil  
E-mail: [esiomf@hotmail.com](mailto:esiomf@hotmail.com)

### **Resumo**

Existem diversas estruturas que estão passando por um processo de aumento de carga, seja pelo acréscimo de cômodos ou alteração do uso do ambiente atual. Para que isso ocorra sem comprometer a integridade física de seus usuários e da estrutura é necessária a utilização de reforços estruturais, que sirvam para aumentar a performance da estrutura, equipando-a de mais rigidez e/ou resistência. A pesquisa teve como objetivo descrever as principais vantagens e desvantagens das técnicas de reforço em vigas de concreto armado por protensão externa, colagem e/ou chumbamento de chapas de aço, colagem de fibras de carbono e pelo método do encamisamento, para que assim seja possível tomar a decisão de qual técnica utilizar. A metodologia deste trabalho é baseada em uma pesquisa bibliográfica descritiva, utilizando o método comparativo, que estuda as diferenças e semelhanças entre diferentes fatos. A escolha da técnica de reforço mais adequada deve ser realizada após uma avaliação criteriosa das principais características da peça a ser reforçada e dos métodos que podem ser empregados. A definição pode ser baseada por: desempenho do reforço, preservação da arquitetura, custo de aplicação, facilidade e rapidez na instalação e facilidade de encontrar o material e a mão de obra.

**Palavras-chave:** Reforço estrutural; Concreto Armado; Vigas.

### **Abstract**

There are several structures that are going through a load increase process, either by adding rooms or changing the use of the current environment. For this to occur without compromising the physical integrity of its users and the structure, it is necessary to use structural reinforcements, which serve to increase the performance of the structure, equipping it with more rigidity/or resistance. The research aimed to describe the main advantages and disadvantages of reinforcement techniques in reinforced concrete beams by external prestressing, bonding and/or anchoring steel sheets, bonding carbon fibers and the jacketing method. So that you can make the decision on which technique to use. The methodology of this work is based on a descriptive bibliographic research. Using the comparative method, which studies the differences and similarities between different facts. The choice of the most appropriate reinforcement technique must be made after a careful evaluation of the main characteristics of the piece to be reinforced and the methods that can be used. The definition can be based on: reinforcement performance, preservation of the architecture, application cost and ease and speed of installation and ease of finding the material for labor.

**Keywords:** Structural Reinforcement; Reinforced Concrete; Beams.

## Resumen

Hay varias estructuras que están pasando por un proceso de aumento de carga, ya sea agregando habitaciones o cambiando el uso del entorno actual. Para que esto ocurra sin comprometer la integridad física de sus usuarios y la estructura, es necesario utilizar refuerzos estructurales, que sirven para incrementar el rendimiento de la estructura, dotándola de mayor rigidez y / o resistencia. La investigación tuvo como objetivo describir las principales ventajas y desventajas de las técnicas de refuerzo en vigas de hormigón armado por pretensado externo, pegado y / o anclaje de chapas de acero, pegado de fibras de carbono y por el método de encamisado, de manera que sea posible tomar la decisión sobre qué técnica a utilizar. La metodología de este trabajo se basa en una investigación bibliográfica descriptiva, utilizando el método comparativo, que estudia las diferencias y similitudes entre diferentes hechos. La elección de la técnica de refuerzo más adecuada debe realizarse tras una cuidadosa evaluación de las principales características de la pieza a reforzar y los métodos que se pueden utilizar. La definición puede basarse en: rendimiento del refuerzo, preservación de la arquitectura, costo de la aplicación, facilidad y velocidad de instalación y facilidad para encontrar material y mano de obra.

**Palabras clave:** Refuerzo estructural; Concreto armado; Vigas.

## 1. Introdução

Desde o início da civilização, o homem tem se preocupado com a construção de estruturas que satisfaçam as suas necessidades, sejam elas habitacionais (casas e edifícios), trabalhistas (escritórios, indústrias, silos, galpões etc.) e de infraestrutura (pontes, cais, barragens, metrô, aquedutos etc.). Para construir, o ser humano teve de procurar um forte aliado: a técnica, desenvolvendo concepções, cálculos, análises, detalhamentos das estruturas, tecnologias, sistemas de produção e novos materiais.

Dentre as técnicas, o emprego do concreto armado (CA) veio para revolucionar o método de como se constrói. Surgindo no século XIX e se firmando no século XX como um dos mais importantes instrumentos de engenharia estrutural, o concreto armado é o material mais largamente usado na construção civil devido à facilidade com que seus componentes estruturais podem ser executados, numa diversidade de tamanhos, formas e por suas características. O concreto é o dito “material de construção” mais empregado no mundo.

O concreto armado possui em seu interior barras de aço para melhorar a sua atuação. Isso é fundamental porque o concreto apresenta certa deficiência quanto à resistência aos esforços de tração, que é suprida pela a adição do aço, uma liga formada por ferro e carbono, que tem uma ótima resistência à tração, mas que precisa ser protegido da corrosão. Contudo, o concreto apresenta uma boa resistência aos esforços de compressão, sendo aproximadamente 10 vezes maior que a de tração, tornando desse modo uma combinação vantajosa entre os dois elementos.

Apesar dessa profícua combinação de materiais, o CA não fica eximido de complicações. De acordo com (Beber, 2003), as estruturas feitas com concreto armado são esbeltas e não têm uma reserva tão grande de capacidade resistente comparada com as mais velhas, que eram superdimensionadas. As estruturas de CA têm uma vida útil, ocorrem falhas involuntárias durante o processo de concepção e há os casos de imperícia. Esses fatores geraram estruturas com defeitos, com desempenho insatisfatório e com conseqüente deterioração.

A patologia das construções é o ramo da Engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema (Helene, 1988 apud Escobar, 2003).

Uma dessas soluções para essas patologias podem ser o uso de reforço estrutural. O reforço é uma intervenção que aumento da capacidade da estrutura para atendimento a novas solicitações de uso. Diferente de uma intervenção de recuperação, que busca reaver as propriedades para as quais a estrutura foi projetada. De maneira geral, podemos utilizar a palavra *reabilitação*, que pode significar tanta recuperação, quanto reforço de uma estrutura de concreto (Reis, 1998).

Em geral, o processo de reforçar uma estrutura é mais burocrático do que construir uma do zero. Atenção com o material presente, pois o acesso para reforçar certos elementos da estrutura pode ser penoso devido à sua localização e à falta

dos projetos da estrutura, ou mesmo quando estão presentes, mas não retratam a realidade. Esses são alguns dos fatores que dificultam tal ação terapêutica.

O reforço estrutural deve ser utilizado em circunstância onde ocorre o acréscimo de cômodos na estrutura e em cenário de alteração do uso do ambiente atual no imóvel, situações estas que aumentaram a carga da estrutura. O presente trabalho é sobre reforços que sirvam para aumentar a performance da estrutura, equipando-a de maior rigidez e/ou resistência. Não é o foco relatar a recuperação de falhas estruturais.

Logo, o reforço age diretamente com os elementos estruturais: fundações, pilares, lajes e vigas. A viga é a peça da estrutura analisada nesta pesquisa, que foca nestes quatro tipos de intervenções: reforços estruturais através de cabos de protensão, pelo uso de chapas de aço que podem ser coladas ou aparafusadas, pela colagem de fibras de carbono e pelo método do aumento da seção transversal com concreto armado.

## 2. Metodologia

A metodologia desse trabalho é baseada em uma pesquisa bibliográfica descritiva. Utilizando o método comparativo, que estuda as diferenças e semelhanças entre diferentes fatos.

A pesquisa bibliográfica aborda o tema Reforço Estrutural, com ênfase no reforço estrutural de vigas de concreto armado com a utilização das técnicas apresentadas no trabalho.

A coleta de dados se dá pela documentação indireta, retiradas de teses, monografias, revistas e endereços eletrônicos. Para a elaboração da parte inicial do estudo, recorreu-se a uma revisão bibliográfica da literatura especializada a fim de selecionar textos e outros materiais que fundamentassem o referencial teórico da pesquisa. Para isso, foram utilizados artigos de eventos e periódicos, livros e sítios da internet, dentre os quais foram pesquisados os sítios da *Scientific Eletronic Library* (SciELO) e Google Acadêmico, com o propósito de buscar materiais variados para melhor embasar o tema. Para refinar essa busca, utilizou-se as seguintes palavras-chaves: “reforço estrutural”, “vigas” e “concreto armado”.

A pesquisa foi realizada a partir de duas etapas. Em um primeiro momento, houve o levantamento quantitativo de trabalhos que podem ser considerados como universo de pesquisa. Em seguida, sob uma abordagem qualitativa, analisou-se o alinhamento dos conceitos apresentados na amostra selecionada com a essência trabalhada sobre a temática. Na etapa final de análise foram listados os métodos dos reforços em vigas de concreto armado, bem como suas vantagens e desvantagens.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1 Intervenção de Reforço

Segundo Souza e Ripper (1998), ao adotar procedimentos de execução do reforço de vigas, deve-se avaliar a necessidade que o projeto deve suprir, sendo por aumento de armadura de flexão (positiva ou negativa), aumento de armadura transversal, colagem de chapas de aço, protensão exterior ou aumento das armaduras longitudinais ou transversais com aumento da seção transversal de concreto. Fazer uma avaliação criteriosa das armaduras efetivas existentes, seguido dos testes para verificação da qualidade do concreto concebido na execução do projeto inicial da estrutura. As vigas de concreto armado sofrem algumas fissuras, que podem ser causadas por flexão (fissuras verticais), esforço cortante ou cisalhamento (fissuras formam um ângulo de 45° com a horizontal próximo aos apoios) e por torção (fissuras formam um ângulo de 45° e aparecem nas duas faces laterais da viga).

É elementar conhecer as técnicas de reparos e reforço estruturais e cabe ao corpo técnico responsável tomar a decisão apropriada sobre o que deverá ser feito a respeito da estrutura analisada. Quando a estrutura apresenta um bom desempenho quanto aos esforços em que é solicitada, se intervém com manutenções para aumentar a sua vida útil. Caso a estrutura

apresente mau desempenho, pode-se tomar ações de recuperação, de reforço, impor limitações de uso ou demolição. A Figura 1, de forma simples, ilustra essa tomada de decisão (Araújo, 2018).

**Figura 1** - Esquema simples de decisões sobre estrutura com desempenho insatisfatório.



Fonte: Adaptada de Souza e Rippler (1998).

Ao se optar pela intervenção com reforço, os materiais que serão usados para reforçar a estrutura devem ter: boa resistência, boa durabilidade, boa trabalhabilidade, baixa permeabilidade e boa aderência ao concreto e ao aço. A peça deve ter um comportamento monolítico, garantindo a união dos substratos ao reforço e que os materiais dos reforços sejam bem aplicados, pois a técnica de intervenção não será eficiente se o que foi planejado não for executado adequadamente.

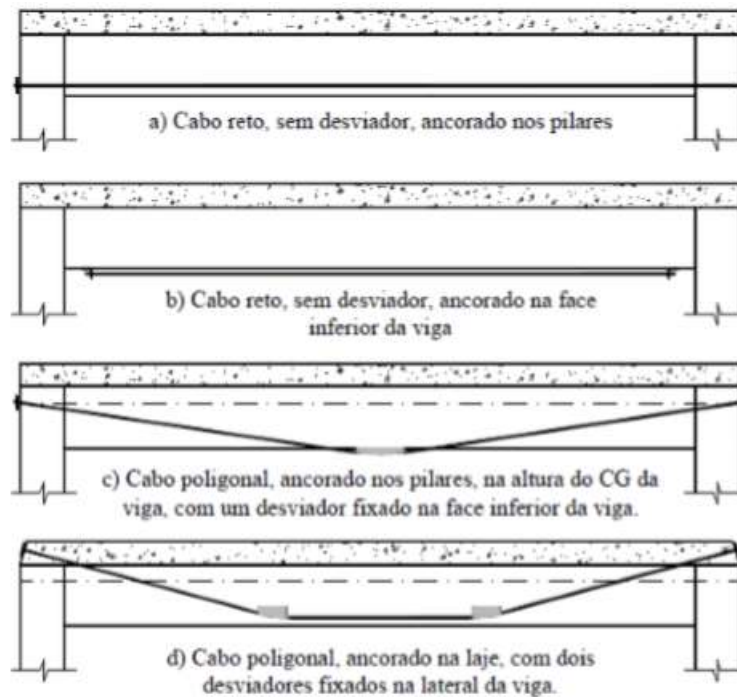
## 3.2 Reforço de Vigas de Concreto Armado

### 3.2.1 Reforço por protensão externa

A utilização da protensão melhora a atuação em serviço e aumenta a capacidade portante das vigas. O aumento de rigidez gerado pela protensão, decorrente do melhor controle da fissuração do concreto, pode reduzir as flechas e a vibração das pontes, bem como reduzir a variação de tensões, aumentando a resistência à fadiga (SIMÕES, 2007). Segundo (Mariano, 2015, p. 27), “o método consiste na incorporação de cordoalhas externas à estrutura, longitudinal ou transversalmente, utilizando desviadores metálicos de forma a reestabelecer as condições originais ou reforçando a mesma para suportar cargas superiores às projetadas”.

Segundo Almeida (2001), a depender da situação que se tenha e do modo de esforço que se queira introduzir na estrutura, podem ser utilizados cabos retos ou poligonais atracados nos pilares, em vigas de apoio ou nas lajes, e com ou sem desviadores. Por exemplo, quando a viga se encontra fissurada, pode-se promover uma costura dessas fissuras pretendendo-se um tirante entre as suas extremidades, como na Figura 2 a) ou b). No caso da presença de flechas excessivas, essas podem ser reduzidas por meio da protensão de cabos retos ou poligonais. Quando se deseja modificar vãos por meio da eliminação de um pilar intermediário, pode-se também introduzir cabos poligonais, como na Figura 2 c), gerando-se assim forças verticais em substituição ao apoio oferecido pelos pilares. Uma outra possibilidade é a introdução dos cabos externos para substituir armaduras internas corroídas que deixam de resistir à tração. Neste caso, qualquer configuração mostrada na Figura 2 pode ser escolhida, devendo-se analisar caso a caso. Por fim, a protensão pode ser utilizada para aumentar a capacidade portante da estrutura devido a uma mudança no nível das solicitações. Nesta situação, a escolha da configuração do cabo depende da intensidade e da forma que as ações estão sendo introduzidas.

**Figura 2 - Geometria dos cabos de protensão.**

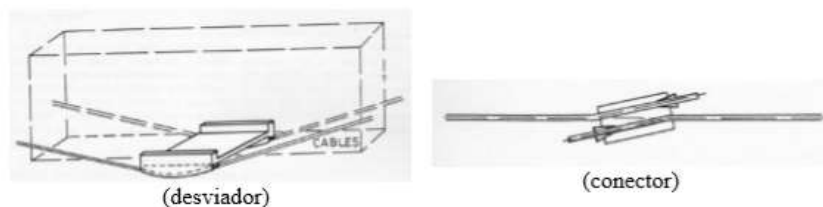


Fonte: Almeida (2001).

Outro aspecto importante que deve ser considerado é que o aumento da resistência à flexão e ao esforço cortante vem acompanhado de uma redução da ductilidade das vigas. Isto se deve ao fato de que a ruína se dá por ruptura do concreto e geralmente sem que os cabos de protensão entrem em escoamento.

No detalhamento, cuidados específicos devem ser tomados com relação aos desviadores e conectores (Figura 3). Os dispositivos de desvio devem ser aptos a transmitir à estrutura as tensões radiais e tangenciais geradas pelos cabos e devem ser lisos para diminuir o atrito entre os desviadores e os cabos. Os conectores, elementos cilíndricos pelos quais passam dois cabos a serem ancorados, são muito utilizados nos casos em que não é possível ancorar os cabos isoladamente (Souza & Ripper, 1998).

**Figura 3 - Desviador e conector típico utilizado em protensão externa.**



Fonte: C&novas (1988).

Por esse âmbito, quanto maior o vão, mais econômico é fazer o reforço com a protensão externa, por isso é tão utilizado para reforçar pontes (Mariano, 2015).

Segundo (Simões, 2007, p. 35), as vantagens da aplicação dos reforços por protensão externa são:

- Pode-se aumentar a resistência à flexão e ao esforço cortante sem aumentar significativamente o peso próprio das vigas;
- Fissuras de flexão existentes antes da execução do reforço podem se fechar completamente com a protensão;
- O equipamento necessário é leve e de fácil operação, principalmente se for utilizado o sistema momocordoalha;
- A excentricidade dos cabos pode ser aumentada, fixando-os por meio de desviadores na face inferior da viga;
- Os cabos podem ser facilmente inspecionados, re-protendidos e até substituídos, sem implicar em acréscimos significativos de custo;

Dentre as desvantagens da aplicação, segundo (Almeida, 2001) e (Reis, 2003) apud (Simões, 2007):

- Realização de um esquema de proteção eficaz dos cabos externos contra o fogo e corrosão, pois eles encontram-se mais expostos às influências ambientais;
- O detalhamento dos desviadores e das ancoragens devem considerar levar a concentração de tensões nas regiões de sua localização;
- Necessidade de analisar o estado de tensões em que está submetido o concreto para que o acréscimo de força axial não cause sua ruptura. Isto pode ser importante, principalmente, se o concreto for de baixa resistência ou estiver deteriorado.

### 3.2.2 Reforço por chapas metálicas

Os primeiros trabalhos reportam a L'hermite e Bresson, que utilizaram desta técnica de reforço na Suíça e Alemanha, em 1930. A técnica, que utiliza chapas de aço coladas ao concreto com resinas epóxi ou com o uso de parafusos auto fixantes, tem como objetivo criar uma armadura secundária que se solidariza ao elemento estrutural e aumenta em até 50% a resistência aos esforços cortantes, de flexão e de torção. Exemplos de aplicação dessa técnica podem ser vistos na Figura 4 (Santos, 2017).

**Figura 4** - Reforço de vigas com adição de elementos metálicos.



Fonte: Chastre (2014).

As chapas devem combinar com o concreto, criando uma ligação ideal, a fim de que elas possam receber as cargas que estão atuando sob o concreto (Oliveira, 2015). Há diversos métodos de se reforçar vigas com chapas de aço, dentre eles tem-se:



- Reforço com duas chapas laterais: esse reforço consiste em duas chapas acopladas nas laterais da viga (mesmo tipo usado na calibragem);
- Reforço com chapa na base: esse tipo de reforço consiste em uma chapa acoplada na base da viga;
- Reforço com perfil U: esse tipo de reforço consiste em um perfil U envolvendo por completo a base e as laterais da viga;
- Reforço com perfil U à parcial: esse tipo de reforço é similar ao anterior, porém envolvendo apenas metade da altura da viga;
- Reforço com perfil T invertido: esse tipo de reforço requer um corte no meio da viga no sentido longitudinal, onde se encaixa a alma de um perfil T, cuja mesa se acopla na base da viga reforçada.

A técnica é interessante quando a deficiência é das armaduras existentes, sem, entretanto, haver deficiências nas dimensões e qualidade do concreto. Possibilita-se, dessa forma, aumentar a resistência da peça estrutural a momentos fletores e forças cortantes, obtendo-se ainda um aumento de rigidez. (Reis, 2001) não recomenda utilizar essa técnica para o aumento da resistência à compressão do concreto, pois, devido às diferenças entre os módulos de elasticidade dos materiais da seção transversal, poderá ocorrer o descolamento da ligação.

É importante salientar que todas as etapas de execução devem ser feitas por profissionais capacitados e com seus respectivos equipamentos de proteção (Ximango, 2020).

**Figura 5** - Reforço com Chapa Metálica.



Fonte: [www.docplayer.com.br](http://www.docplayer.com.br).

Segundo Souza e Ripper (1998), é a resistência a tração do concreto que condiciona a resistência última da ligação, já que a resistência a tração da resina é muito superior que a do concreto, sendo que essa diferença depende diretamente da espessura da resina.

Vantagens para aplicação do reforço por chapas metálicas segundo (Reis, 1998):

- Velocidade de execução;
- Aumento irrelevante na seção das peças estruturais, não comprometendo o espaço da área a ser recuperada;
- Obra rápida e limpa (não se utiliza materiais molhados), causando menor transtorno aos usuários;
- Baixo nível de ruídos;

Desvantagens segundo (Reis, 1998):

- Peso excessivo das chapas, limitando a utilização para vãos maiores e o manuseio por parte da mão de obra;
- Limitações decorrentes da temperatura. A resina epóxi perde parte da sua resistência
- Dificuldade na detecção e localização de possíveis corrosões na ligação entre a chapa e o adesivo;
- A necessidade de cura mínima da cola por sete dias, o que retarda a agilidade da solução;
- Necessidade da criação de juntas de dilatação nas chapas devido às limitações do comprimento;

### 3.2.3 Reforço por fibras de carbono

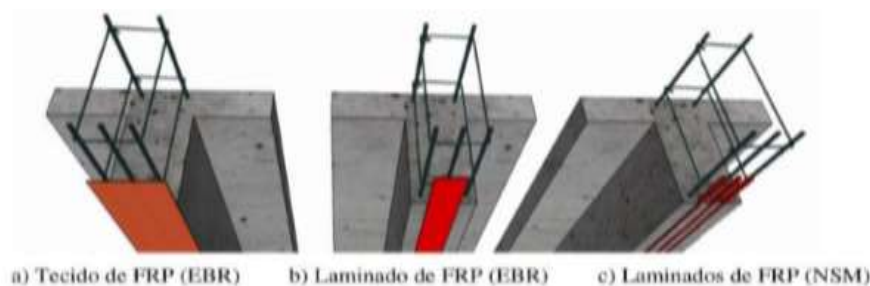
A técnica do uso de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), ou, em português, polímero (plástico) reforçado com fibras (PRF), foi desenvolvida como uma opção para substituir os reforços com chapas de aço coladas, já que algumas características peculiares à técnica foram sendo fatores limitantes para a concepção de alguns projetos, pois eram necessários equipamentos pesados na instalação e o aço tem um alto poder de corrosão, segundo o *American Concrete Institute* (ACI, 2017). Beber, 2000) afirma que, para um mesmo incremento de resistência, 2 kg desse material compósito poderiam substituir 47 kg de aço.

Segundo Souza e Ripper (1998 apud Araujo, 2018, p. 21):

O CFRP já era largamente utilizado como reforço nas indústrias automobilísticas, aeronáutica, aeroespacial e naval. Na Alemanha, em meados de 1978, já existiam experimentos utilizando CFRP para o reforço de peças de concreto armado (Wolf & Miessler, 1989, apud Araujo, 2018). No Japão, na década de 1980, o CFRP foi usado afim de preparar estruturas já existentes para suportar ações excepcionais devido a ameaças de um intenso terremoto (Souza; Rippler, 1998 apud Araújo, 2018, p. 21).

A Figura 6 ilustra alguns dos tipos mais comuns de reforços à flexão de vigas de concreto armado com fibra de carbono. Nesta ilustração são mencionadas as técnicas EBR – *Externally Bonded Reinforcement* – e NSM – *Near-Surface Mounted*.

**Figura 2 -** Reforço de vigas à flexão com fibra de carbono.



Fonte: Chastre (2014).

O compósito é formado por dois elementos principais, a matriz polimérica e as fibras, que juntos têm suas propriedades mecânicas superiores às dos materiais que o constituem.

Segundo (Hollaway e Leeming, 1999), a matriz polimérica tem a função de:

- I. Unificar as fibras e proteger sua área superficial durante o manejo, a fabricação e por toda a vida útil;
- II. Dispersar e separar, ordenadamente, as fibras com o objetivo de evitar a propagação de fissuras e consequente ruptura do compósito;
- III. Transmitir completamente as tensões para as fibras por adesão ou atrito;
- IV. Ser harmonizada termicamente e quimicamente com a fibra.

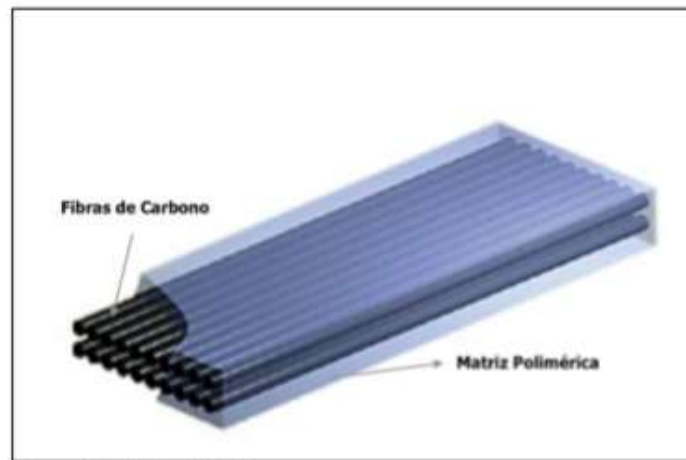


As resinas termorrígidas mais usadas para reforçar estruturas com compósitos são: poliéster, éster-vinílico, uretano metacrilato, fenol e epóxi (Hollaway; Leeming,1999).

Segundo o mesmo autor, os principais atributos das fibras utilizadas na produção de compósitos são:

- I. Demonstrar alto modulo de elasticidade e resistência;
- II. Diminuir a variação de resistência entre fibras individualmente;
- III. Ser estável e ter a capacidade de manter suas propriedades durante o processo de produção e uso;
- IV. Ter regularidade do tamanho da sua superfícies e diâmetro.

**Figura 7** - Esquema de compósito de fibras de carbono.

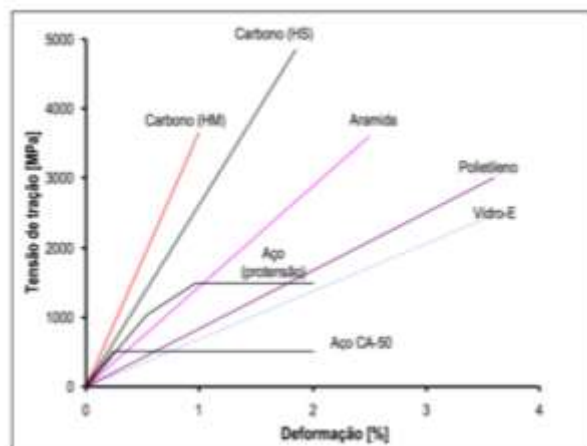


Fonte: Machado (2002).

De acordo com Hollaway e Leeming (1999), existe uma grande variedade de configurações das fibras, que podem ser divididas em três grandes grupos:

- i. Unidirecional: todas as fibras alinhadas em uma única direção;
- ii. Bidirecional: as fibras estão alinhadas perpendicularmente em duas direções;
- iii. Aleatórias: as fibras são distribuídas aleatoriamente nas várias direções em um mesmo plano.

**Figura 8** - Diagrama tensão-deformação de fibras e aços.



Fonte: Beber (2003).

Os compósitos são matérias heterogêneas, suas propriedades dependem de vários aspectos. Porém, o que mais influência é a orientação das fibras e a proporção entre fibra e matriz. Segundo (Araújo, 2018), a maioria das fibras de carbono possuem elevada resistência e rigidez. Sua resistência geralmente varia de 1500 a 5000 MPa e seu módulo de elasticidade varia de 230 a 640 GPa. Os polímeros reforçados com fibra têm baixa densidade, variando entre 1,2 a 2,1 g/cm<sup>3</sup>. Esses valores são de quatro a seis vezes mais baixos que os do aço (Tabela 2) (ACI 440.2R, 2017).

**Tabela 1** - Densidade dos polímeros reforçado com fibras.

Densidades (g/cm <sup>3</sup> )			
Aço	FRP de Vidro (GFRP)	FRP de Carbono (CFRP)	FRP de Aramida (AFRP)
7.9	1.2 - 2.1	1.5 - 2.1	1.2 - 1.5

Fonte: Adaptada da ACI 440.2r (2017).

Estudos mostram que a resistência à fadiga dos compósitos unidirecionais de fibra de carbono pode ser superior à resistência de outros metais e até mesmo de outros compósitos. Entretanto, em algumas situações como as de solicitação oblíqua à direção das fibras ou uma baixa resistência da matriz, a resistência à fadiga pode sofrer redução (ACI 440.2R, 2017). O coeficiente de expansão térmica para compósitos com configuração unidirecional varia tanto na direção longitudinal como na transversal. Portanto, essa característica confere ao material a possibilidade de se adequar a situações específicas (Araújo, 2018).

A aplicação de compósitos de fibras de carbono no reforço à flexão de vigas de concreto armado consistiu-se em uma técnica já consolidada. No entanto, incrementos de resistência são somente alcançados se os modos de ruptura prematuros (falha de aderência ou colapso por cisalhamento) forem evitados (Beber, 2003).

**Figura 9** - Reforço de vigas à flexão com fibras de carbono.



Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono.

O método mais eficiente de reforço ao cisalhamento é o envolvimento total – *wrapping*, ou seja, o completo envolvimento da seção transversal da viga, como pode ser observado na figura 19(a). Porém, a presença de lajes ou outro elemento contíguo à viga frequentemente impede que seja possível envolver o topo da seção. O método mais comum de reforço ao cisalhamento caracteriza-se pela colagem do reforço nas laterais e base da seção, conforme a figura 19(b). Esse método é denominado “*U*” *wrap*. Esse envolvimento é bastante eficiente em regiões de momento positivo. Em algumas

situações, pode não ser possível envolver a base da viga. Nesses casos é possível simplesmente colar o reforço em ambos os lados, conforme a Figura 19(c) (MBT, 1998 apud Beber, 2003).

**Figura 10** - Possíveis configurações de um reforço ao cisalhamento.



Fonte: Beber (2003).

**Figura 11** - Reforço de viga ao corte com fibras de carbono.

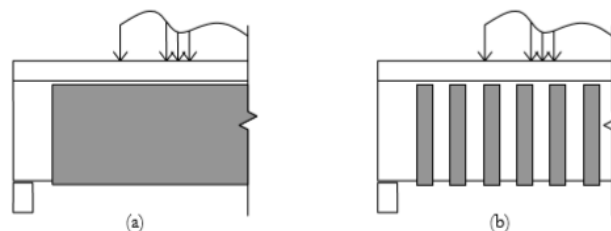


Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono.

Baseado em resultados experimentais disponíveis, pode-se afirmar que o reforço ao cisalhamento com compósito de CFRP colados somente nas laterias é o mais suscetível ao deslocamento, enquanto que o completo apresenta metodologia mais eficiente e do tipo “U” apresenta um desempenho intermediário.

O reforço trasnversal com compósitos de CFRP pode ser executado de forma contínua, ou sob a forma de tiras ou bandas convenientemente espaçadas.

**Figura 12** - Exemplos de distribuição do reforço com compósitos de CFRP.



Fonte: Beber (2003).

**Figura 13** - Reforço de vigas à flexão e ao corte com fibras de carbono.



Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono.

Vantagens segundo (Viana, 2004):

- Leveza (baixa densidade, chega a ser de 4 a 6 vezes menor que a do aço) e facilidade de manuseio; simples a aplicação;
- Grande resistência a ataques químicos;
- Sua resistência varia de 1500 a 5000 Mpa e seu módulo de elasticidade de 230 a 640Gpa.
- A manta de carbono resiste a temperaturas em torno de 1000°C;

Limitações:

- Alto custo do compósito (R\$ 200,00 metro<sup>2</sup>) e não é tão fácil de achar o material;
- Necessidade de proteção devido à vulnerabilidade a acidentes e ao vandalismo;
- Necessidade de proteção contra fogo e raios ultravioletas. Apesar da fibra de carbono suportar altas temperaturas, as resinas suportam temperaturas da ordem de 60°C;
- Dificuldade de aplicação em superfícies irregulares;

### 3.2.4 Reforço por encamisamento

Essa técnica de reforço de estrutura é a mais antiga e se faz por meio do aumento da seção transversal, que se compõe na adição de concreto tendo ou não armadura. Todos os elementos que compõem a estrutura podem ter suas seções reforçadas para aumentar sua capacidade resistente, de ductilidade etc.

**Figura 14** - Reforço com aumento da seção transversal em concreto armado.



Fonte: Chastre (2014).

Segundo (Piancastelli, 1997), o maior cuidado nos reforços com concreto refere-se à aderência entre o concreto de reforço e o concreto da peça a ser reforçada. É de grande relevância que esses materiais trabalhem unidos, como uma estrutura monolítica, para garantir que exista uma transferência das tensões e deformação na ligação entre eles. Para isso, é necessário que seja realizado o tratamento da superfície do substrato a ser reforçado.

O método reforço de vigas com elementos estruturais é um sistema muito empregado e tem como principal vantagem a economia e seus materiais podem ser encontrados facilmente. Quando bem executada, essa técnica apresenta resultados mais satisfatórios em relação aos outros tipos de reforços, inclusive superando o processo com perfis laminados. Porém, pode apresentar elementos estruturais com dimensões superiores às do projeto inicial, podendo criar problemas em alguns casos, seguido do tempo determinado de espera necessário para cura do concreto, retardando o carregamento de uso da parte estrutural afetada (Cánovas, 1988).

A ABNT NBR 6118:2014 é usada pelos projetistas como referência para execução de projetos novos e também para realizar consultas para calcular o reforço estrutural, devido à inexistência de uma norma técnica específica para reforços e soluções patológicas das estruturas.

(Cánovas, 1988) evidencia que no caso de flexão, a falha pode-se produzir por várias causas, a seguir destacadas:

- Falta de armadura de tração, que provocará fissuras na parte da viga e que inclusive pode provocar a sua ruptura se a falta de armadura for grave;
- Falta de capacidade de resistência à compressão da viga, seja por deficiência de seção de aço na zona de compressão, seja pela baixa qualidade do concreto armado;
- Acréscimo de armadura na seção, para cargas maiores de serviço solicitantes à mesma viga de concreto armado.

Vantagens:

- Não necessita de mão de obra especializada;
- Facilidade na aquisição dos materiais (fôrma, concreto e armação) próximo às obras;
- Permite a execução com a edificação em uso, sem necessidade de demolição da estrutura existente;
- Proteção das armaduras de reforço ao fogo e atos de vandalismo.

Desvantagens:

- Perda de área livre devido ao aumento da seção das peças;
- Aumento considerável do peso da estrutura, sendo um problema, principalmente, para estruturas elevadas;
- Consumo excessivo de materiais e mão de obra;
- Grande mobilização de equipamentos como fôrmas, escoramentos e equipamentos de transportes;
- Peça reforçada só poder ser solicitada após o concreto ter atingido a sua resistência de projeto e a retração do concreto novo, que pode prejudicar a aderência entre os dois concretos.

### 3.3 Análise de Resultados

A escolha da técnica de reforço mais adequada deve ser realizada após uma avaliação criteriosa das principais características da peça a ser reforçada e dos métodos que podem ser empregados.

A definição pode ser baseada por: desempenho do reforço, preservação da arquitetura, custo de aplicação, facilidade e rapidez na instalação e facilidade de encontrar o material e a mão de obra.

Ao se definir a técnica mais eficiente para o reforço de uma estrutura, é importante considerar possíveis interrupções no uso da estrutura. O tempo em que essas estruturas estarão interrompidas poderá causar prejuízos financeiros, aliado ao custo do reparo em si e os custos de manutenção, além dos riscos envolvendo cada técnica, que também são parâmetros a serem analisados. Foi comprovado que em circunstância em que se queria reforçar grandes vãos, a técnica de protensão externa se sobressai às demais, pois quanto maior é o vão a ser reforçado, mais econômica se torna a técnica.

A escolha do cabo de protensão depende da intensividade e da forma que as ações estão sendo introduzidas. Nesse método não há aumento significativo no peso próprio da viga, é fácil de ser inspecionados e re-protendidos caso precise, além do que, pode ser executado sem a interrupção do uso da construção. Contudo, não é tão fácil de se encontrar mão de obra de qualidade para executá-lo.

A técnica das chapas de aço é interessante quando a deficiência é das armaduras existentes, sem haver deficiência nas dimensões e qualidade do concreto. Não é recomendado utilizar essa técnica para o aumento da resistência de compressão do concreto devido às diferenças entre os módulos de elasticidade dos materiais da seção transversal, pois poderá ocorrer o deslocamento da ligação. As chapas de aço se sobressaem em situações onde se queria preservar a área do espaço a ser reforçado, pois a área ocupada pelo material de reforço é desprezível e propicia ter uma obra limpa. Contudo, não é recomendada para reforçar grandes vãos devido incorporar bastante peso à estrutura e dificultar o manuseio por parte da mão de obra.

A técnica com as fibras de carbono é a que tem maior resistência entre as quatro. É bastante leve, fácil de ser empregada e tem muita versatilidade. Com o seu uso é possível ter uma obra limpa e a arquitetura do cômodo é preservada devido ser um reforço bastante discreto. Bastante recomendada em casos de ocorrências de fissuras por causas mecânicas devido principalmente à sua elevada resistência à tração. No entanto, o custo para empregar esse método é alto e não é tão fácil de encontrar o material. Os reforços em concreto armado são muito utilizados, principalmente pelo fato de exigirem procedimentos, em sua maioria, análogos aos empregados em obras novas. Os procedimentos específicos são de fácil execução, não exigindo mão de obra muito especializada. Desde que criteriosamente detalhados e especificados, seus materiais podem ser encontrados com fácil acesso e é um método mais econômico que os demais. No entanto, condicionam a perda de área livre devido ao aumento da seção da peça, e é necessário esperar o tempo de cura do concreto, retardando o carregamento de uso e impõem mais peso na estrutura. Esse método se torna desvantajoso para estruturas elevadas.

A Tabela 2 mostra as principais características dos métodos mais comumente utilizados para reforçar estruturas. A partir dela, podemos entender qual o método recomendado para cada propriedade.



**Tabela 2** - Métodos de reforço recomendado para cada tipo de característica.

<b>MÉTODO DE REFORÇO</b>				
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>PROTENSÃO EXTERNA</b>	<b>CHAPAS DE AÇO</b>	<b>FIBRAS DE CARBONO</b>	<b>ENCAMISAMENTO</b>
<b>CUSTO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>
<b>TEMPO DE APLICAÇÃO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>
<b>FACILIDADE DE ENCONTRAR O MATERIAL</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>
<b>FACILIDADE DE ENCONTRAR MÃO DE OBRA</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>
<b>ACRESCIMO DE PESO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>
<b>PRESERVAÇÃO DA AQUITETURA</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>
<b>FACILIDADE DE EXECUÇÃO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>NÃO RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>
<b>DESEMPENHO DO REFORÇO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>	<b>RECOMENDADO</b>

Fonte: Autores.

#### 4. Conclusão

As técnicas de reforço surgem como uma solução para que se possa ter acréscimo de cargas na edificação sem comprometer a integridade física de seus usuários e da estrutura. Há diversas técnicas que podem aumentar a capacidade portante em vigas de CA no mercado e é de suma importância conhecer as principais características de cada método para que assim se possa escolher aquela que melhor servirá, evitando assim futuros problemas, pois o método usado pode não ser o adequado para a situação à qual será exposto, além de buscar ter um bom custo/benefício na escolha.

Para determinar qual tipo de reforço usar, deve-se verificar suas características a fim de se fazer a escolha que melhor se adequará à situação. As principais particularidades a serem analisadas são: custo de aplicação, facilidade e rapidez na instalação, facilidade de encontrar o material e a mão de obra para execução, desempenho do reforço, o acréscimo de peso à estrutura e a preservação da arquitetura.

O método de protensão externa permite inspecionar facilmente as cordoalhas durante toda a sua vida de utilização, e as cordoalhas externas podem ser retiradas e substituídas se liberam força de protensão devido à deterioração da proteção de corrosão. Nesse método não há aumento significativo no peso próprio da viga, além de poder ser executado sem a interrupção do uso da construção. Contudo, não é tão fácil encontrar mão de obra de qualidade para executá-lo.

O reparo com concreto armado é a opção mais simples de reforço no sentido de os materiais empregados na técnica serem de fácil acesso e de uso corriqueiro nas construções. A mão de obra é relativamente simples, pois o preparo da superfície existente não exige equipamentos que não sejam de uso comum nas obras corriqueiras. Apesar de ser uma técnica mais barata, exige na maioria das vezes aumento de sessão, interferindo na arquitetura. Exige também a suspensão do uso da estrutura enquanto o reforço está sendo executado e enquanto ocorre o ganho de resistência do concreto adicionado, além da sujeira envolvida e do elevado nível de ruído.

Nos reforços com placas e perfis metálicos, ocorre a necessidade de manutenção recorrente e o agravante de que a chapa ou perfil metálico bloqueia a visibilidade da estrutura original, dificultando a identificação de novas fissuras no concreto. Os polímeros reforçados com fibras mostram-se como uma ótima opção para reparo e reforço de peças de concreto armado,

pois sua elevada resistência, baixo peso específico e durabilidade a ataques químicos tornam o sistema vantajoso, aumentando sua resistência à tração na flexão, compressão e cisalhamento, conferindo desempenho superior e ganho de capacidade portante.

Sugere-se para futuros trabalhos a realização de ensaios que permitam avaliar a resistência de um pré-carregamento durante a execução de cada um dos métodos de reforços.

## Referências

- ACI – American Concrete Institute. (2017). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI Committee 440. Detroit.
- Araújo, R. Y. A. (2018) Reforço à flexão de vigas de concreto armado com fibras de carbono utilizando o ACI 440.2R e a NBR 6118 adaptada. Natal: 81 p. Monografia -Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Beber, A. (1999). Reforço de estruturas de concreto com compósitos de fibra de carbono. *PPGEC/UFRGS*.
- Beber, J. A., Campos Filho, A., & Campagnolo, J. L. (2000). IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. In Estudo Teórico-Experimental de Vigas de Concreto Reforçadas com Tecidos de Fibra de Carbono.
- Beber, A. J. (2003). Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.
- Cánovas, M. F. (1988). Patologia e terapia do concreto armado, tradução de M. Celeste Marcondes, Beatriz Cannabrava. Pini.
- Chastre, C. (2014). Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão-potencialidade e limitações. In *REHABEND 2014-Congresso Latinoamericano "Patología de la construcción, Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio"*. Santander. 10p.
- de Almeida, T. G. M. (2001). Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos.
- de Aquino Viana, R. D. (2004). *Programa Para Dimensionamento De Reforço À Flexão E Ao Cisalhamento De Vigas De Concreto Armado* (Doctoral dissertation, Universidade Federal Do Rio De Janeiro).
- de Oliveira, J. C. C. (2015). *Técnicas Para Intervenção Em Estruturas De Concreto Armado* (Doctoral dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro).
- Escobar, C. J. (2003) Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de CFRP tensionadas. Curitiba: Dissertação (Mestrado em Engenharia / Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Engenharia.
- Hollaway, L. C., & Leeming, M. (Eds.). (1999). *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. Elsevier.
- Machado, A. D. P. (2002). Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono. Pini.
- Mariano, J. R. (2015). Recuperação estrutural com ênfase no método da protensão externa.
- Piancastelli, E. M. (1997). Patologia e Terapia das Estruturas Uma Visão Global.
- Reis, L. S. N. (1998). *Dissertação de Mestrado em Ingeniería de Estructuras, Escuela Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos, p. 293* (Doctoral dissertation).
- Reis, L. S. N. (2001). Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado.
- Santos, F. P. S. L. D. (2017). Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado.
- Simões, M. L. D. F. (2007). Reforço à flexão de vigas de concreto armado por encamisamento parcial. *Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 162p*.
- Sousa, V. C. M.; & Ripper, T. (1998). Patologias, recuperação e reforço de estruturas de concreto armado. Editora Pini.
- Ximango, J. H. S. Comparativo entre os métodos de reforço estrutural aplicados em pilares de concreto armado.2020. Monografia (Graduação)- Faculdade Ari de Sá.