

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5446>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 16/02/2021

APROVADO 05/04/2021

PUBLICADO ON-LINE 22/08/2021

PUBLICADO 30/09/2022

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

Avanços no estudo experimental e analítico de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com PRF – um estudo na literatura

 Maicon de Freitas Arcine ^[1]*

 Nara Villanova Menon ^[2]

[1] maiconarcine@hotmail.com
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Brasil

[2] nvmenon@uem.br
Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Brasil

RESUMO: Por apresentar alta resistência, leveza e propriedades não corrosivas, o Polímero Reforçado com Fibras (PRF) é um material compósito inovador e tem sido usado em muitas estruturas de concreto armado como reforço. Esse material é composto por fibras, sejam elas de carbono, vidro, basalto ou aramida, embebidas em uma matriz polimérica. Uma viga reforçada com tal material ao cisalhamento possui diversos modos de falha. Entre eles, destaca-se o descolamento da interface devido a fissura crítica de cisalhamento, o que torna o estudo mais complexo. Baseado em estudos existentes da literatura, este trabalho tem por objetivo revisar e apresentar os avanços e aplicações dos materiais PRF no reforço de vigas de concreto armado sujeitas ao cisalhamento. De início, foram introduzidas as propriedades fundamentais do PRF, seu modo de fabricação e suas principais formas de aplicação ao cisalhamento. Posteriormente, os principais estudos experimentais e analíticos sobre o assunto são revistos, desde o início da utilização dos materiais compósitos até atualmente, destacando os avanços mais relevantes de cada pesquisa. Em todos os estudos, o PRF se mostrou bastante eficiente, no entanto, a falha por descolamento ainda foi um grande problema. Esse fato fez com que os pesquisadores desenvolvessem diversos métodos de ancoragem, os quais foram eficazes em aumentar a eficiência do reforço. Essa revisão foi útil para compreender e melhorar a forma como os profissionais de engenharia aplicam o reforço ao cisalhamento com PRF.

Palavras-chave: cisalhamento; material compósito; reforço; vigas de concreto armado.

Advances in the experimental and analytical study of shear reinforced concrete beams with FRP – a study in the literature

*Autor para correspondência.

.....

ABSTRACT: *Due to its high strength, lightness and non-corrosive properties, Fiber Reinforced Polymer (FRP) is an innovative composite material and has been used in many RC structures as a strengthening. Such material consists of fibers, whether carbon, glass, basalt or aramid, embedded in a polymeric matrix. A beam strengthening with such material when shearing has several failure modes. Among them, the debonding of the interface stands out due to the critical shear crack, which makes the study more complex. Based on existing studies in the literature, this work aims to review and present the advances and applications of FRP materials in strengthening RC beams under to shear. At first, the fundamental properties of FRP, its manufacturing method and its main forms of application to shear were introduced. Subsequently, the main experimental and analytical studies on the subject are reviewed, from the beginning of the use of composite materials until today, highlighting the most relevant advances in each research. In all studies, the FRP proved to be very efficient; however, the debonding failure was still a major problem. This fact led the researchers to develop several methods of anchoring, which were effective in increasing the efficiency of the strengthening. This review was useful for understanding and improving the way in which engineering professionals apply strengthening to shear with FRP.*

.....

Keywords: *composite material; RC beams; shear; strengthening.*

.....

1 Introdução

O uso do concreto armado trouxe novas e ousadas estruturas, as quais grandes vãos e mudanças de utilização do sistema se tornaram práticas comuns em nossos dias. Além desses, envelhecimento, incêndios, corrosão da armadura, impacto de veículos, erros de projeto, cálculo e construção podem afetar o desempenho estrutural. Mehta e Monteiro (1994) citam que 40% do total dos recursos da construção civil em países industrialmente desenvolvidos é destinado para recuperação, reforço e manutenção das estruturas existentes. Tal situação tem promovido novos estudos sobre o assunto (EL-SAIKALY; CHAALLAL, 2015; ESLAMI *et al.*, 2020; KARZAD *et al.*, 2019), o que possibilitou o desenvolvimento de técnicas capazes de reabilitar e fortalecer uma estrutura em concreto armado.

Materiais compósitos surgiram como alternativa de reforço para casos em que o emprego dos materiais tradicionais, como chapas de aço e concreto, não é adequado. O *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) ou Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) são materiais compósitos (matriz e reforço) constituídos por fibras embebidas em uma matriz polimérica. De acordo com Machado e Machado (2015), a vantagem desses materiais sobre outros é sua não-corrosividade, alta relação resistência/peso, neutralidade eletromagnética e sua versatilidade na utilização do reforço e reabilitação para estruturas de concreto armado, alvenaria, aço e madeira. O uso dos compósitos tem demonstrado enorme potencial nos últimos 30 anos e tem ganhado espaço em países do Oriente, como Japão e China, no continente europeu, em destaque, a Itália e no continente americano, podemos citar Estados Unidos e ainda, Brasil. Segundo dados da ALMACO (Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos)¹, em 2016, o setor brasileiro de materiais compósitos consumiu cerca de 159 mil toneladas do material. O campo da construção civil permanece à frente, com 36% desse uso.

¹ Disponível em: <http://almaco.org.br/category/compositos/>. Acesso em: 2 fev. 2021.

As vigas em concreto armado são, normalmente, projetadas para ter uma resistência ao cisalhamento maior que a flexão. Assim, o modo de falha frágil devido a esforços cortantes pode ser evitado. No entanto, essas mesmas estruturas podem se tornar frágeis ao cisalhamento por causa de vários fatores já mencionados, como mudança de carregamento ou corrosão do aço dos estribos causada por uma cobertura insuficiente. Além disso, quando tais estruturas são reforçadas à flexão, a capacidade de cisalhamento pode se tornar insuficiente (LI; LEUNG, 2016; YU *et al.*, 2019). Logo, o reforço ao esforço cortante se torna necessário e muito importante.

Os sistemas compostos têm se revelado eficientes para aumentar a capacidade da resistência de peças de concreto armado ao corte (BEBER, 2003; KHALIFA; BELARBI; NANNI, 2000; MENON, 2008). Esse incremento é conseguido através do envelopamento total ou parcial do elemento. As fibras do sistema composto podem ser orientadas transversalmente ao eixo das peças, mas também perpendiculares (ou com diversas inclinações) às potenciais fissuras de cisalhamento, que funcionarão como estribos adicionais. Ademais, podem ser dispostas em várias camadas ou únicas (MACHADO; MACHADO, 2015).

No entanto, apesar do bom desempenho dos materiais compósitos como reforço ao cisalhamento, o risco de colapso da estrutura ainda é uma possibilidade. Colalillo e Sheikh (2014) evidenciaram o descolamento do material de reforço e, em seguida, a falha ao cisalhamento da estrutura. Isso pode ser observado entre as extremidades dos laminados, onde há grandes concentrações de tensões nos arredores do reforço. Esse modo de falha é mais observado quando o compósito é aderido ao substrato do concreto lateralmente ou em forma de U. Atualmente, muitos autores vêm desenvolvendo técnicas de ancoragem para evitar esse tipo de falha (BAGGIO; SOUDKI; NOËL, 2014; ESLAMI *et al.*, 2020; SARIBIYIK; ABODAN; BALCI, 2020). Outro modo de falha constantemente observado é a ruptura do PRF, geralmente observado quando há um envolvimento total da viga.

Este artigo tem como objetivo apresentar os avanços experimentais e analíticos de vigas em concreto armado reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF). Os inúmeros trabalhos apresentados levam em consideração os avanços e a eficiência do método utilizado pelo autor do estudo. Diversas perspectivas para vigas reforçadas a esforços cortantes são apresentadas.

2 Materiais compósitos

Os compósitos constituem uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos, podendo ser ou não poliméricos, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (*componente estrutural*), e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse esforço (*componente matricial*). Estes componentes atuam concentradamente e as propriedades do conjunto são superiores às de cada componente individual. A interface entre eles tem influência dominante sobre as suas características. São, em geral, empregados como materiais de engenharia, formados por elementos de reforço em grau variável de ordenação, que se distribuem em uma matriz flexível (MANO, 2000).

O componente estrutural é responsável pela resistência e rigidez do material compósito, com módulo de elasticidade elevado e alta resistência à tração, dependendo do grau de orientação das fibras. Essas características, geralmente, são encontradas em fibras. Estas, se apresentam sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, de baixa densidade e comportamento frágil.

Os diagramas tensão x deformação de algumas fibras encontradas comercialmente são expostos na Figura 1. Nota-se a diferença de resistência do material carbono, principalmente em relação ao aço. O aço apresenta uma rigidez semelhante ao carbono, mas sua ruptura é dúctil e o derivado do petróleo é frágil.



Figura 1 ►

Diagrama tensão x deformação de barras de aço e algumas fibras comerciais.

HM: Alto módulo de elasticidade

Fonte: adaptado de Rousakis (2014)

As matrizes, geralmente constituídas de resinas, configuram geometricamente o material compósito, garantindo que as fibras funcionem em conjunto. Os esforços cisalhantes são transferidos de umas fibras às outras, protegendo-as das agressões ambientais, dos danos mecânicos e dos fenômenos de instabilidade. As resinas mais utilizadas nos PRF são as termoendurecíveis da classe dos poliésteres insaturados, do vinil ésteres e do epóxi (MENON, 2008).

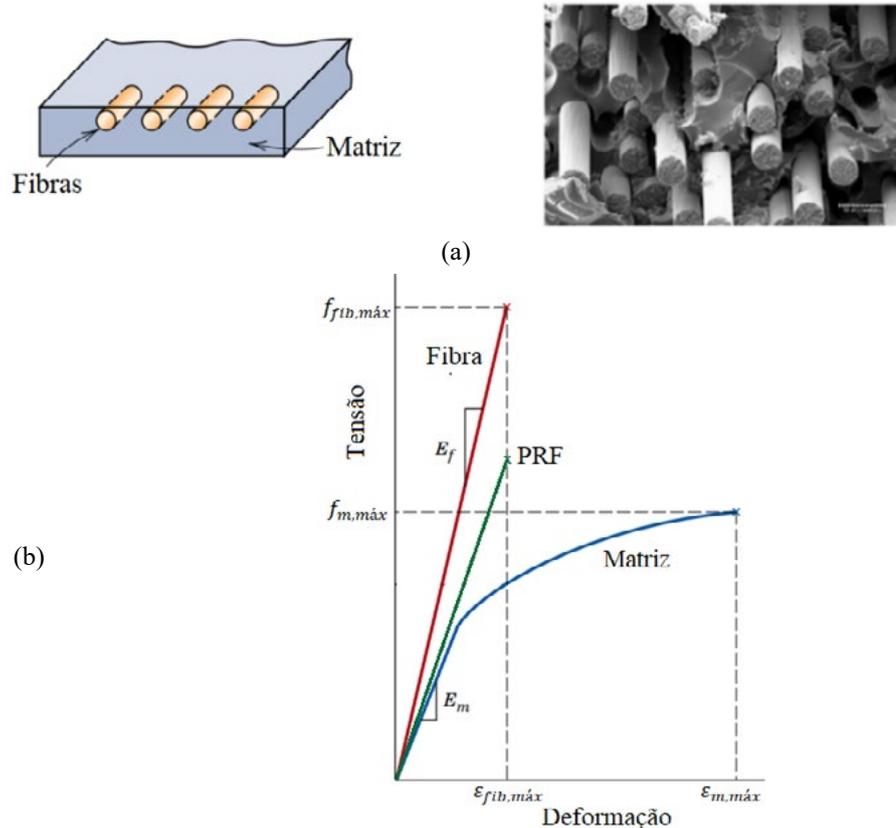
Da junção desses componentes (estrutural e matricial) se obtém a família dos *Fiber Reinforced Plastic* (ou Polymer) (FRP), ou seja, Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) e as suas relevantes propriedades mecânicas, físicas e químicas. A configuração das fibras no interior da matriz pode ser definida como sendo unidirecionais (fibras orientadas em uma mesma direção), bidirecionais (fibras orientadas em duas direções), orientadas aleatoriamente (esteiras ou descontínua), ortogonais (tecidos), e tridimensionais, quando as fibras são orientadas em um espaço tridimensional (tecidos multidimensionais). A escolha entre um tipo de fibra e uma matriz depende, fundamentalmente, da aplicação que será dada ao material compósito. O custo também é um fator relevante na escolha entre um ou outro componente. Além disso, deve-se observar a compatibilidade entre as fibras e matrizes (MENON, 2008). A representação de um PRF para fibras unidirecionais é apresentada na Figura 2a.

Pela Figura 2b, a rigidez do PRF é menor que as fibras e falha com a mesma deformação $\epsilon_{fib,máx}$, das próprias fibras, sendo uma característica elástica-linear com ruptura frágil. Enquanto isso, a matriz polimérica possui uma rigidez muito menor, grandes deformações e uma ruptura dúctil (MACHADO, MACHADO, 2015).

Figura 2 ▶

Tensão x deformação para as fibras, matriz e PRF (a) e representação esquemática de um sistema de PRF para fibras unidirecionais (b).

Fonte: adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2007), Machado e Machado (2015)



As fibras de carbono são as mais rígidas e resistentes dentre as fibras utilizadas para o reforço de polímeros (BEBER, 2003; MENON, 2008; ROUSAKIS, 2014). Dentre as mais importantes propriedades dos materiais compósitos, destacam-se: elevada resistência mecânica (comportamento linear até a ruptura), resistência à fadiga e a cargas cíclicas, resistência a ataques químicos e à corrosão, por ser um produto inerte e, leveza, devido ao baixo peso específico. Em alguns casos, seu peso próprio é desprezado. Contudo, esse material possui boa condutividade elétrica, logo, podem possibilitar corrosão do tipo galvânica quando em contato com metais.

2.1 Processo de fabricação

Os processos de fabricação de fibras e compósitos encontram-se altamente desenvolvidos, são relativamente baratos e apresentam uma excelente relação custo-benefício (BEBER, 2003). Dois dos métodos de produção dos compósitos PRF se destacam: pultrusão (pré-fabricados) e processo de produção pré-impregnado (*in situ*).

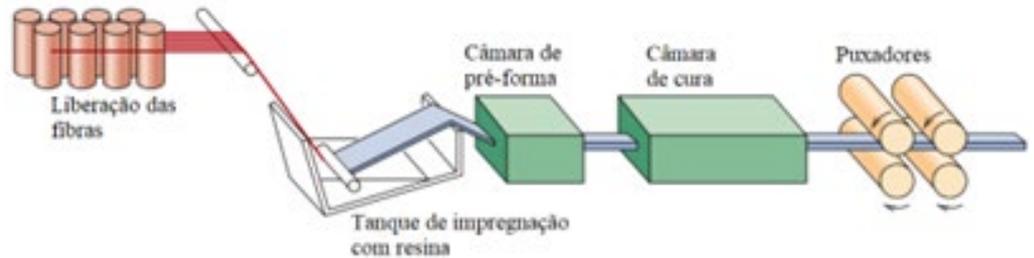
2.1.1 Pultrusão (pré-fabricado)

Os sistemas pré-fabricados resultam da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras (sistema unidirecional) por uma resina termoendurecível, consolidados por um processo de pultrusão, com controle de forma (espessura e largura) do compósito (JUVANDES, 1999). Pultrusão é um processo de modelagem contínua que combina as fibras e uma matriz termoendurecível para formar compósitos de PRF em uma seção transversal constante (MATTHYS, 2000), como pode ser observado na Figura 3.

Nesse caso, são produzidos laminados semirrígidos de PRF. Os principais materiais de reforço são: vidro, carbono e aramida, geralmente, adicionados em concentrações entre 40% e 70% (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2007).

Figura 3 ▶

Diagrama esquemático do processo de pultrusão.
Fonte: adaptado de Callister Jr e Rethwisch (2007)

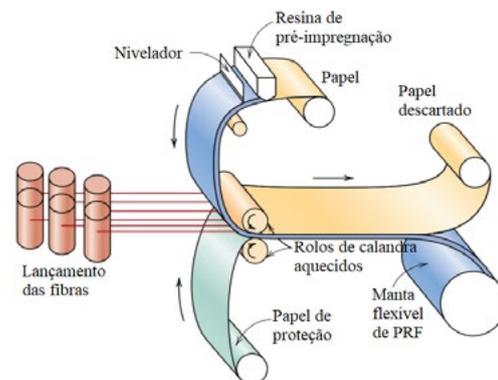


2.1.2 Pré-impregnado (in situ)

O sistema curado *in situ* é constituído por fibras contínuas, com a forma de fios, mantas ou tecidos em estado seco ou pré-impregnado. Somente se torna um compósito de PRF após a execução do reforço no local, ou seja, aplicado *in situ* sobre um adesivo epóxi previamente espalhado sobre a superfície do elemento de concreto a ser reforçado (JUVANDES, 1999; BEBER, 2003). Os fios de fibras são puxados e pressionados entre folhas de papel e rolos pré-aquecidos, processo denominado calandragem. O produto final pré-impregnado consiste em fibras contínuas e alinhadas incorporadas em uma resina parcialmente curada, como na Figura 4. Provavelmente, esse é o material compósito mais amplamente utilizado para aplicações estruturais. No caso dos sistemas pré-fabricados, o adesivo é um material distinto do compósito de PRF. Nos sistemas *in situ*, o agente adesivo é a própria resina de impregnação das fibras e de polimerização do compósito. Tal adesivo, desempenha o papel de matriz do compósito e promove a transferência de esforços entre as fibras e destas para o substrato (BEBER, 2003; CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2007).

Figura 4 ▶

Diagrama esquemático do processo de produção pré-impregnado (*in situ*).
Fonte: adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2007)



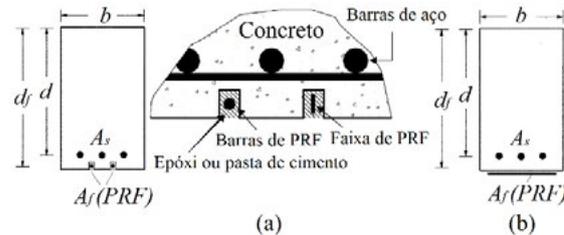
2.2 Sistemas de aplicação

Existem diversas aplicações do PRF na construção civil em que tais materiais podem promover reforço estrutural. Dentre as aplicações, duas técnicas de reforço se destacam

abreviadas de NSM e EBR. A técnica denominada *Near Surface Mounting* (NSM) refere-se a efetuar cortes mecânicos em regiões dos elementos estruturais a serem reforçados e inserir o material de PRF nessas áreas (MACHADO, MACHADO, 2015) (Figura 5a). A técnica *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) significa a colagem externa de mantas, tecidos ou laminados sem a necessidade de cortes na estrutura (FIB, 2001) (Figura 5b).

Figura 5 ►

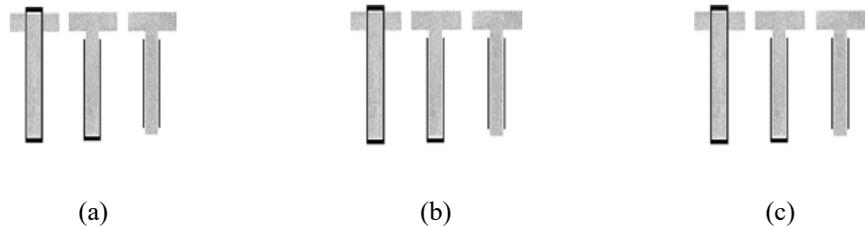
Técnica *Near Surface Mounting* (NSM) (a) e *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) (b).
Fonte: adaptado de ACI 440.2R (ACI, 2008)



Em relação a esforços cortantes, a capacidade de uma viga pode ser aumentada pela colagem externa de mantas, tecidos ou laminados de PRF no concreto. Da mesma maneira que os estribos de aço em vigas de concreto armado, o reforço ao corte introduzido pelo PRF também tem sua geometria e espaçamento regulamentado por normas, como a americana ACI 440.2R (ACI, 2008) e o documento informativo europeu Fib Bulletin 14. De acordo com o ACI 440.2R (ACI, 2008), as fibras podem ser orientadas transversalmente ao eixo das peças como perpendiculares (diversas inclinações) às possíveis fissuras de cisalhamento, quando utilizadas em tais reforços. Existem três formas de reforço à cortante, são elas: totalmente na seção transversal (Figura 6a), em forma de U (Figura 6b) e apenas nas laterais da viga (Figura 6c).

Figura 6 ►

Configurações possíveis do reforço ao cisalhamento.
Fonte: ACI 440.2R (ACI, 2008)



A configuração indicada na Figura 6a apresenta a menor vulnerabilidade ao descolamento e alta eficiência, atuando como ancoragem mecânica para reforço à flexão. É recomendada em situações que não possuem lajes em sua parte superior ou inferior. Caso exista esse elemento estrutural (superior ou inferior), essa solução nem sempre é economicamente viável de ser executada, pois há a necessidade de demolições localizadas na laje que está incorporada à viga, de tal forma que possibilitem a passagem do PRF. Já a disposição indicada na Figura 6b, devido a existência de laje na parte superior da viga, acaba sendo a mais utilizada e recomendada. Essa é uma solução de fácil execução e que permite razoável incremento na resistência nominal de cisalhamento da peça. Finalmente, a configuração da Figura 6c será necessária quando a parte superior e a inferior estiverem limitadas a aplicação do PRFC. É a configuração menos eficiente, pois mesmo com facilidade de aplicação, apresenta limitações de ancoragem. Deve ser evitada sempre que algum dos outros dois esquemas de envolvimento possam ser utilizados (MACHADO, MACHADO, 2015). Como exemplos de aplicações de reforço ao cisalhamento, tem-se

na Figura 7a, a ponte *Burrard*, construída em 1930-1932 em Vancouver, Canadá. No Brasil, segundo Machado e Machado (2015), o viaduto Santa Tereza (Belo Horizonte, MG), construído em 1927, foi a primeira aplicação do sistema na América Latina em 1998. Esse foi reforçado à flexão e ao cisalhamento, como é apresentado Figura 7b.

Figura 7 ►

Ponte Burrard (a) e viaduto Santa Tereza (b).
Fonte: Retro Group¹, adaptado de Machado e Machado (2015)

¹Disponível em: <https://retrogroup.ca/portfolio-item/burrard-bridge-concrete/>. Acesso em: 1 fev. 2021.



(a)



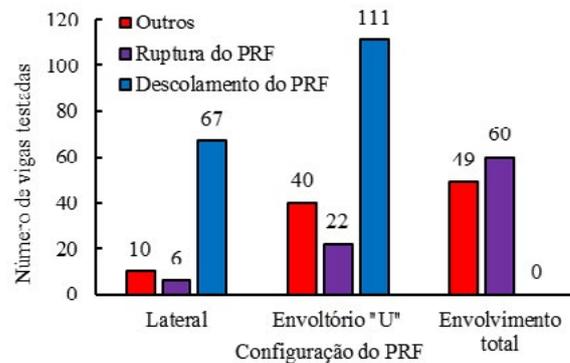
(b)

2.3 Falha por descolamento

Belarbi *et al.* (2011) forneceram um levantamento de 49 estudos experimentais publicados contendo mais de 500 resultados de testes. Esses estudos cobriram todos os resultados relevantes, detalhados e específicos de testes relacionados a reforço ao cisalhamento por PRF. É indicado na Figura 8, parte do levantamento com os modos de falha observados mais frequentes para as três configurações de reforço, como na Figura 6.

Figura 8 ►

Modos de falha relacionados à configuração de reforço externo ao cisalhamento.
Fonte: adaptado de Belarbi *et al.* (2011)



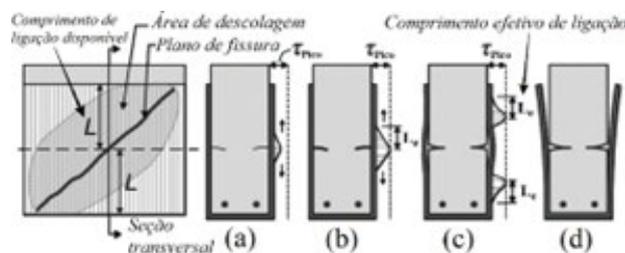
Nota-se, pela Figura 8, que a descolagem é o modo de falha dominante para o PRF colado lateralmente e em U. Os outros modos de falha se dividem em: ruptura do PRF, tensão diagonal no material de reforço, falha de compressão de cisalhamento na zona de compressão e falha na flexão. Em sistemas com envoltório completo, a descolagem quase nunca foi observada.

Em aplicações externas, a resina epóxi atua como um material de interface ligando o reforço ao concreto, desenvolvendo adesão sob a forma de forças de resistência à tração e ao cisalhamento. Como resultado, tem-se um sistema composto que depende da ligação entre a superfície do concreto e as lâminas de PRF (BSISU; HUSSEIN; SARGAND, 2017). As tensões de cisalhamento no concreto são transferidas para os laminados pelo

adesivo que, geralmente, são influenciadas pelas propriedades físicas e mecânicas do PRF, concreto e adesivo (BELARBI; ACUN, 2013).

Um processo de descolagem de sistemas em U pode ser observado na Figura 9, com um comprimento de ligação disponível L , medido entre o plano de fissura e a borda livre da viga. O processo se inicia em uma fissura quando as tensões são induzidas ao PRF por meio da interface (adesivo), como na Figura 9a. Com o alargamento da trinca, as tensões da interface aumentam ao longo do comprimento efetivo da ligação (L_e) até que a tensão de pico (τ_{pico}) seja atingida (Figura 9b). A descolagem local ocorre perto da fissura, onde o pico de tensão foi atingido e o comprimento efetivo necessário para transferir tensões migra para longe da área descolada (Figura 9c). Essa separação intermediária continua em direção à borda livre até que um comprimento de ligação insuficiente seja alcançado e não seja mais possível a transferência de tensões, conseqüentemente, a falha da interface (Figura 9d). Todo esse sistema também vale para vigas reforçadas lateralmente. Para envolvimento total de uma viga em concreto armado, o PRF continuaria transferindo tensões diretamente sobre a área intermediária até que se rompa (COLALILLO; SHEIKH, 2014).

Figura 9 ▶
- Processo de descolagem de vigas em concreto armado reforçadas ao cisalhamento em U.
Fonte: adaptado de Colalillo e Sheikh (2014)



3 Estudos experimentais usando técnicas de reforço externa (EB) e NSM ao cisalhamento com PRF

Desde 1940, os materiais compósitos desempenham funções estruturais importantes no campo da engenharia militar, aeroespacial, náutica, ferroviária e automobilística (JUVANDES, 1999). Sua utilização como reforço em estruturas de concreto, em substituição ao aço, deu início na década de 50 (TENG *et al.*, 2002). Na década de 70, pesquisas e desenvolvimentos do PRF iniciaram na Europa, assim como na América do Norte e Japão. Os produtos comerciais tornaram-se gradualmente disponíveis a partir do final dos anos 1970, seguindo as primeiras aplicações práticas em estruturas de concreto em meados dos anos 1980 (demonstração e projetos). Os primeiros estudos baseados no comportamento do PRF foram realizados por laboratórios suíços EMPA pelo pesquisador Meier (1997) (MATTHYS, 2000). Para estudo, o autor usou laminados pré-fabricados de PRFC colados sobre o concreto, usando adesivos epóxi, até então, utilizados apenas em reforço com chapas de aço coladas. Os resultados demonstraram excelente desempenho dessa técnica de reforço (BEBER, 2003). Segundo Meier (1997), a primeira aplicação de um sistema de reforço com PRF ocorreu na Alemanha, na ponte *Kattenbusch Bridge* de 478 m, entre 1986 e 1987, em que utilizaram 20 tiras de laminados de polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV). Desde então, o uso do PRF como reforço estrutural ganhou força.

Os primeiros estudos experimentais se concentraram em analisar vigas reforçadas à flexão, como o trabalho de Plevris e Triantafillou (1994). Mas, nos anos seguintes, Norris, Saadatmanesh e Ehsani (1997) e Grace *et al.* (1999) estudaram o reforço ao cisalhamento e demonstraram em seus resultados que o aumento de carga e o modo de falha estão relacionados com a orientação das fibras e disposição dos reforços. Ademais,

o uso adequado de fibras horizontais e verticais pode dobrar a capacidade de carga ao cisalhamento final da viga e adicionar ductilidade à estrutura. Em 1998, Triantafillou (1998) realizou um estudo experimental sobre o assunto. O pesquisador concluiu que o descolamento/destacamento do PRF e sua ruptura são os principais modos de falha, dependendo, principalmente, das condições de ligação e sistema de ancoragem do reforço. Portanto, os tecidos não são completamente solicitados devido a tais modos de falha. Triantafillou (1998) também estudou diversas vigas analisadas por inúmeros pesquisadores. Fundamentado nisso, o autor propôs equações de dimensionamento, que hoje são adotadas por códigos normativos como a Fib Bulletin 14 (FIB, 2001) e ACI 440.2R-08 (ACI, 2008).

No ano 2000, Khalifa e Nanni (2000) observaram que o uso de mais camadas de reforço não aumenta consideravelmente a resistência da estrutura. Mais tarde, Khalifa, Belarbi e Nanni (2000) e Khalifa e Nanni (2002) realizaram um novo programa experimental envolvendo vigas T e retangulares reforçadas ao cisalhamento com PRFC. Ambas as pesquisas citam a relação entre o compósito de reforço e os estribos internos. Além disso, foi confirmado que o compósito pode ser usado para reforçar vigas contínuas e a proporcionalidade da contribuição dos tecidos foi atribuída ao vão de cisalhamento $(a/d)^2$. Em 2001, De Lorenzis e Nanni (2001) usaram barras de PRFC para reforçar vigas T de concreto armado ao cisalhamento, por meio da técnica NSM (Figura 10). O método se mostrou eficiente para vigas sem estribos em aço, com ganhos de resistência entre 27,6% e 105,6%. Com a adição da armadura transversal em aço, a resistência aumentou em 35%. Os autores enfatizam que para evitar o modo de falha como descolamento das barras, deve-se diminuir seu espaçamento e manter a inclinação em 45°.

Figura 10 ►
Experimento de De Lorenzis e Nanni (2001).
Fonte: De Lorenzis e Nanni (2001)



Teng *et al.* (2002), após uma extensa revisão bibliográfica, desenvolveram um modelo analítico para determinar a contribuição do reforço externo em PRFC, válido para reforço em faixas e contínuo. Os autores enfatizam que o uso de laminados em faixas apresenta maior flexibilidade no uso, no entanto, sua aplicação é mais trabalhosa. Já os tecidos em forma contínua são mais fáceis de aplicar, contudo, reduz a flexibilidade no controle da quantidade de PRFC. Outra afirmação feita por Teng *et al.* (2002) é que o uso de fibras bidirecionais, laminados e tecidos em posições 0°/90° ou 45°/135° é mais efetivo que o uso das fibras inclinadas a 45° para combater fissuras de cisalhamento, contudo, requer uma maior quantidade de fibras.

Carolin (2001, 2003) mostrou a possibilidade de aumentar a resistência ao cisalhamento em até 175% com reforço. A não uniformidade das deformações e o descolamento prematuro provocaram uma superestimação da capacidade resistente calculada por métodos analíticos. Já em estudos experimentais executados por Beber (2003), a capacidade ao cisalhamento dos ensaios chegou até 255,6%. Novamente, segundo o autor, o modo de falha predominante foi o descolamento da interface.

Conhecendo a interação entre os estribos de aço e o reforço em PRF, já observado por pesquisadores anteriormente, Mohamed Ali, Oehlers e Seracino (2006) enfatizam que os materiais compósitos aderidos externamente ao substrato de concreto funcionam como as armaduras transversais em aço. Contudo, o aço está ancorado e possui características flexíveis, podendo atingir o escoamento enquanto isso, o PRF externo pode se descolar devido às deformações e formações de fissuras de cisalhamento. Portanto, não há garantias de que as forças cortantes verticais de pico, em ambos os materiais, coincidam. Sabendo disso, os autores desenvolveram um modelo analítico para quantificar essa interação de cisalhamento.

Em ambas as pesquisas de Pellegrino e Modena (2002, 2006), foram comprovadas que a armadura transversal em aço tem um efeito significativo na eficácia do reforço ao cisalhamento, as quais não foram consideradas em nenhuma recomendação de dimensionamento. A simplificação das normas superestima a contribuição do compósito na resistência ao cisalhamento, que não é apenas dependente das características geométricas e mecânicas do PRF, mas também da armadura transversal em aço. Ainda em 2006, e dando continuidade em 2008, Pellegrino e Modena (2008) se basearam nas observações experimentais e desenvolveram um modelo analítico, que permite estimar as contribuições interativas entre a capacidade de cisalhamento dos estribos e do reforço em PRF.

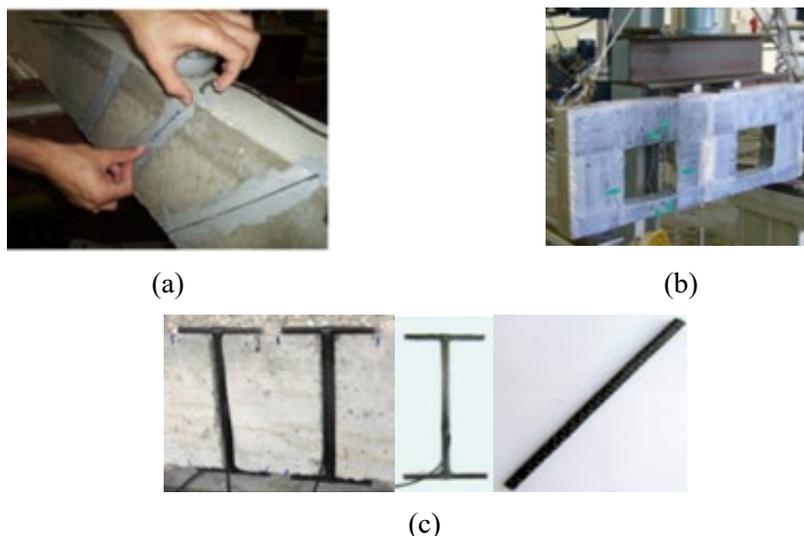
No mesmo ano, Menon (2008) observou que os protótipos reforçados com laminados embutidos no sentido da espessura da lâmina (Figura 11a) tiveram um ganho de até 538,74% em sua resistência. Esses tiveram a menor quantidade de reforço e obtiveram o maior acréscimo de carga, semelhante as vigas totalmente envoltas; logo, é o mais recomendado. Em contrapartida, o autor não recomenda o uso do sistema de laminados colados nas laterais e embutidos no sentido da largura, pois apresentaram uma maior variabilidade nos resultados. Outra observação importante foi quando os laminados aderidos sobre os estribos descolaram e observou-se uma fissura diagonal de cisalhamento, enquanto o reforço entre a armadura transversal se rompeu por flexão e não descolou. No ano seguinte, El Maaddawy e Sherif (2009) avaliaram vigas em concreto armado com aberturas reforçadas ao cisalhamento com tecidos de PRFC (Figura 11b). Foi observado que o ganho de resistência máximo (72%) ocorreu quando a abertura se deu na parte superior da viga. Já quando essa foi posicionada no do vão, o aumento da rigidez foi notável. Além disso, com uma abertura de 200 mm, a rigidez era ainda maior que a viga sem reforço com abertura de 150 mm.

Em seus estudos, Lee *et al.* (2011) notaram que a orientação $0^\circ/0^\circ$ foi o único teste que não apresentou falha devido a diagonal de compressão. Contrária aos outros testes, a dupla camada horizontal ($0^\circ/0^\circ$) forneceu maior contribuição na resistência ao cisalhamento. No ano seguinte, Jalali *et al.* (2012) propuseram um novo sistema de reforço em NSM com PRF feito manualmente. O método se baseia em hastes de madeira envolvidas por folhas de PRFC (Figura 11c), nomeada de *Manually Made FRP* (MMFRP). A nova técnica de reforço ao cisalhamento foi eficaz e mudou o modo de falha de descolagem para uma fissura crítica de cisalhamento, seguido da separação da cobertura de concreto.

Figura 11 ▶

Experimentos de Menon (2008) (a), El Maaddawy e Sherif (2009) (b) e Jalali *et al.* (2012) (c).

Fonte: Menon (2008), El Maaddawy e Sherif (2009) e Jalali *et al.* (2012)



Em 2015, El-Saikaly e Chaallal (2015) realizaram testes de vigas reforçadas ao cisalhamento sujeitas a cargas cíclicas. Os pesquisadores observaram que esse sistema de fortalecimento também é eficaz para carregamentos de fadiga. Outro ponto importante foi a existência de interação entre o reforço e os estribos internos de aço para vigas sujeitas a cargas cíclicas. No ano seguinte, com os estudos experimentais e baseados em resultados da literatura, Mofidi *et al.* (2016) propuseram um novo modelo matemático para prever a contribuição ao cisalhamento das barras de PRF (reforço NSM). O modelo mostrou uma maior precisão em comparação com os existentes na literatura.

Karzad *et al.* (2017, 2019) examinaram vigas retangulares em concreto armado já danificadas reparadas com epóxi e, seguidamente, reforçadas com tecidos de PRFC. Em ambos os estudos, os pesquisadores observaram a descolagem como principal forma de falha. No entanto, o reforço aumentou em 95% a capacidade de cisalhamento em comparação com a viga original recuperada, o que comprova a eficiência do reforço externo com PRFC como solução para reparo e reforço de estruturas de concreto armado já danificadas. Assim como estudos anteriores, os autores comprovaram, experimentalmente, que a eficácia do reforço é afetada pela quantidade de estribos. Por fim, também afirmaram que o aumento de camadas do compósito não foi proporcional a resistência ao cisalhamento.

Yu *et al.* (2019) estudaram a influência do grau de pré-fissuração³ em vigas retangulares reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC. Com baixo grau de pré-fissuração, a aderência PRFC/Concreto melhorou. Assim como estudos de Khalifa e Nanni (2002) e Li e Leung (2016), Yu *et al.* (2019) notaram que com o aumento do vão de cisalhamento (a/d), o número de mantas que contribuem no reforço aumenta e não se observa o rompimento do PRFC. Outra observação importante foi a pouca influência do grau de pré-fissuração na rigidez dos testes com os compósitos aderidos no concreto. No caso da relação momento versus curvatura, essa tem um comportamento linear com o carregamento. Para mais, um modelo analítico foi proposto, com a finalidade de estimar a capacidade de cisalhamento do PRFC levando em consideração a distribuição de deformação e o grau de pré-fissuração.

3 Dano inicial adicionado aos testes até surgirem pré-fissuras, sendo esse carregamento menor que a capacidade das vigas. A relação entre a carga pré-fissurada e a carga máxima suportada é definida como um grau de pré-fissuração.

Nos estudos realizados por Li *et al.* (2020), polímeros reforçados com fibras de carbono foram aderidos externamente ao cisalhamento em vigas retangulares de concreto armado com estribos corroídos. Em seus resultados, os autores afirmaram que quando a armadura transversal está severamente corroída, a capacidade de cisalhamento não pode ser restaurada pelo reforço com PRFC. Além disso, as normas vigentes não consideram o efeito da corrosão no cálculo do reforço, o que pode superestimar a contribuição ao cisalhamento do compósito para altos níveis de corrosão. No mesmo ano, Benzeguir, El-Saikaly e Chaallal (2020) atribuíram a diminuição da resistência a esforços cortantes ao aumento do tamanho da viga, independente do reforço ser ou não ancorado nas abas de uma viga T. Portanto, existe uma relação entre o nível de contribuição do PRFC e o tamanho da viga.

Ibrahim, Wakjira e Ebead (2020) usaram a técnica NSM com fibras híbridas de vidro/carbono para reforçar ao cisalhamento vigas curtas de concreto armado. Tal método consistiu em realizar cortes na estrutura onde as fibras foram inseridas (Figura 5). O sistema híbrido pode ser usado para melhorar a capacidade de carga, aumentar as deflexões e diminuir a largura das fissuras, além de ter aumentado a deformação de tração do aço longitudinal e de compressão na superfície do concreto. Os autores confirmaram a existência da interação entre o sistema híbrido NSM e a armadura transversal em aço. Ademais, um modelo baseado na teoria dos campos de compressão modificada (MCFT em inglês) foi usado para prever a capacidade de cisalhamento das vigas testadas.

4 Sistemas de ancoragem

Como já visto anteriormente, existem três métodos de reforço ao cisalhamento: envoltório total, lateralmente e em U. O primeiro possui uma ancoragem natural, mas é pouco usual devido a sua dificuldade de aplicação. O segundo não apresenta qualquer ancoragem e é o menos usual. O método de reforço em U é o mais comum, mas devido ao modo de falha por descolamento, acaba se tornando menos eficiente. Contudo, atualmente, tem-se realizado diversos testes experimentais para investigar a eficácia de técnicas de ancoragem aplicadas nas extremidades dos compósitos em U. Segundo Godat, Hammad e Chaallal (2020), os sistemas de ancoragem podem ser: extensão do PRF, PRF horizontal em uma extremidade do reforço, cordões de PRF, âncoras metálicas, placas sanduíche, técnicas NSM, entre outros. De início, pode ser destacado o trabalho de Khalifa *et al.* (1999). O estudo consistiu em desenvolver um novo sistema de ancoragem usando barras de PRF e a técnica NSM (Figura 12). A nova técnica se mostrou eficiente para reforço em U. Esse sistema também foi utilizado em estudos de Micelli, Annaiah e Nanni (2002) e Foster *et al.* (2016).

Figura 12 ►

Sistema de ancoragem proposto por Khalifa et al. (1999).

Fonte: adaptado de Khalifa et al. (1999)



Tanarslan, Ertutar e Altin (2008) avaliaram um sistema de ancoragem para reforço com PRFC ao cisalhamento em sistema U e lateralmente usando cantoneiras aparafusadas de aço (Figura 13a). Os resultados confirmaram a melhora na resistência a esforços cortantes e na rigidez, além de prevenir o descolamento prematuro dos compósitos. Em outro estudo, Galal e Mofidi (2010) desenvolveram um método de ancoragem semelhante. Tal técnica se baseia em enrolar o PRF em barras de aço e, em seguida, são ancoradas nos cantos das abas da viga T com parafusos mecânicos (Figura 13b). Os resultados mostraram um aumento de 27% na capacidade de cisalhamento para as vigas ancoradas, em comparação com as sem o novo sistema. Além disso, eliminou o descolamento do reforço.

Figura 13 ►

Método de ancoragem de Tanarslan, Ertutar e Altin (2008) (a) e Galal e Mofidi (2010).

Fonte: adaptado de Tanarslan, Ertutar e Altin (2008), Galal e Mofidi (2010)



(a)

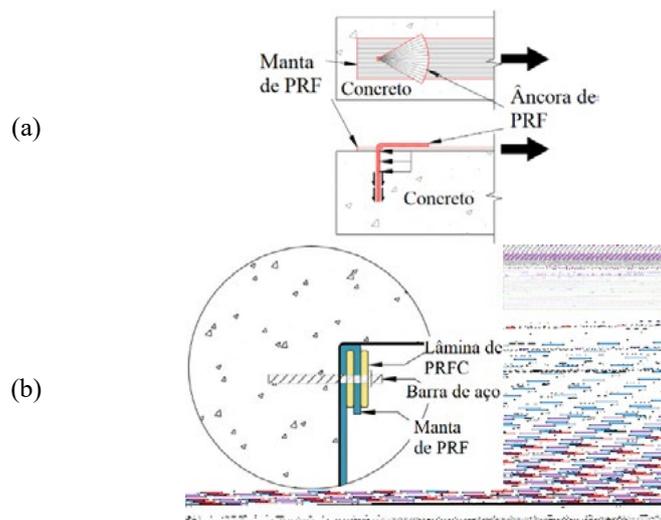
(b)

Kim (2008) propôs um novo método de ancoragem que se baseia em realizar orifícios sobre o concreto e o compósito, inserir âncoras do mesmo material que o reforço e espalhá-las sobre o PRF (Figura 14a). Nesse estudo, somente reforço à flexão foi realizado, mas em 2009, Quinn (2009) avaliou tal sistema para vigas sujeitas a esforços cortantes. Esse método se mostrou eficiente, principalmente para vão de cisalhamento (a/d) maior que 2. Os autores também estabeleceram vários requisitos para garantir um bom desempenho das ancoragens. Nos anos seguintes, os estudos de Kim *et al.* (2011), Koutas e Triantafyllou (2013), Baggio, Soudki e Noël (2014) e Saribiyik, Abodan e Balci (2020) também contribuíram para comprovar a eficiência da técnica.

Figura 14 ►

Âncoras de PRF (a) e ancoragem com chumbadores (b).

Fonte: adaptado de Quinn (2009) e Manos, Theofanous e Katakalos (2014)



(a)

(b)

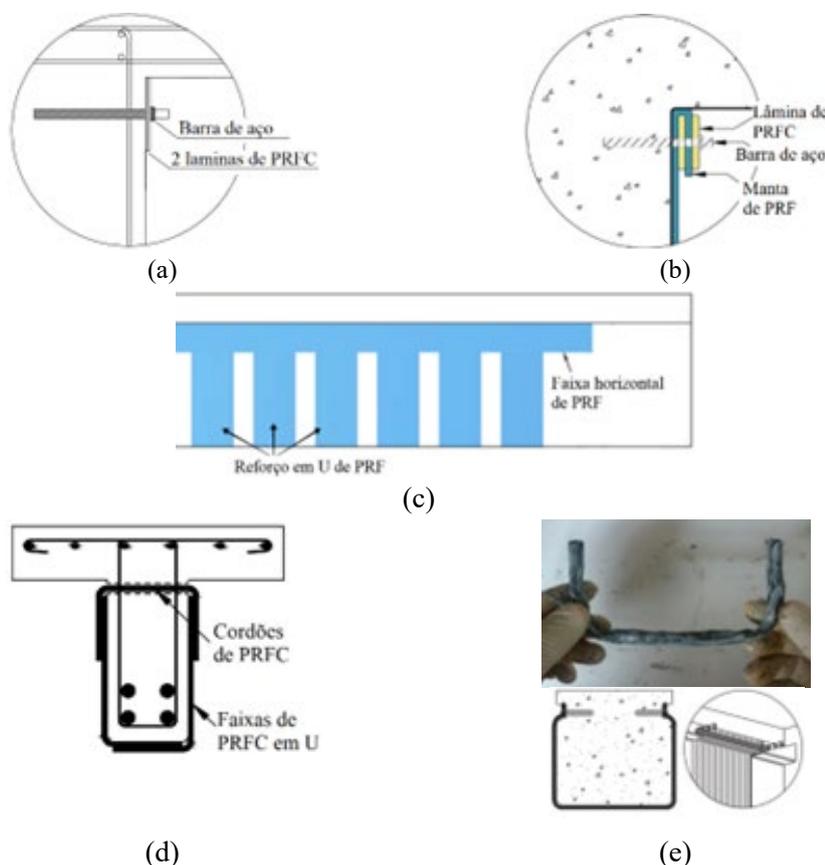
Manos, Katakalos e Kourtides (2011) patentearam um novo sistema de ancoragem. Essa técnica se baseia em enrolar o material compósito em uma barra de aço, sendo esta então fixada na parte superior do reforço por uma placa de aço aparafusada por dois chumbadores (Figura 14b). Em 2014, Manos, Theofanous e Katakalos (2014) simularam tal sistema de ancoragem. A simulação foi muito satisfatória e conseguiu prever com precisão a resposta estrutural, em termos de capacidade de carga e modos de falha. O sistema de ancoragem foi eficiente.

Belarbi, Bae e Brancaccio (2012) testaram três métodos de ancoragem: um sistema mecânico (Figura 15a), outro com painéis sanduíche (Figura 15b) e por último com adição de faixas horizontais em PRF na extremidade do reforço (Figura 15c). O uso dos sistemas mecânicos de ancoragem aumentou a resistência ao cisalhamento de 7% – 48% e atrasou o descolamento. As faixas horizontais também causaram o mesmo efeito, mas não foi tão eficaz quanto às ancoragens mecânicas. O sistema sanduíche foi mais eficiente que a ancoragem mecânica comum, impedindo quase que completamente o descolamento do reforço até quase a sua ruptura.

El-Saikaly e Chaallal (2015) avaliaram a eficiência de um novo sistema de ancoragem, usando cordões de PRFC. Nessa técnica, os fios do compósito são inseridos em um furo que atravessa a seção transversal da viga em concreto. As extremidades dos cordões e do reforço em U se encontram, o que transforma o sistema em um reforço total da seção de concreto (Figura 15d). O método eliminou a descolagem do reforço e proporcionou a ruptura dos estribos de aço. Eslami *et al.* (2020) propuseram um novo sistema de ancoragem (Figura 15e) em vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento em U com mantas de PRF. Com a aplicação dessa nova técnica, o modo de falha mudou de cisalhamento frágil para flexão dúctil em todos os testes. Ademais, houve melhoria de 221% da capacidade de deslocamento em comparação com o teste sem a aplicação da ancoragem.

Figura 15 ►

Ancoragem mecânica (a), painel sanduíche (b), com faixa horizontal em PRF (c), por cordões de PRFC (d) e sistema proposto por Eslami *et al.* (2020) (e).
Fonte: dados da pesquisa



5 Considerações finais

Neste trabalho foram vistos diversos estudos experimentais e alguns analíticos sobre reforço ao cisalhamento com PRF de vigas em concreto armado. De forma geral, as observações mais comuns foram: i) o reforço proporciona ductilidade e aumento da resistência ao cisalhamento; ii) boa parte dos pesquisadores utilizaram o PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono); iii) o reforço depende do valor do vão de cisalhamento (a/d); iv) o reforço horizontal auxilia na prevenção da fissura crítica de cisalhamento; v) uma grande maioria dos pesquisadores usaram tecidos ou mantas, devido a facilidade de trabalho; vi) a quantidade de camadas de reforço não aumenta proporcionalmente a resistência ao cisalhamento do sistema; vii) o reforço externo é fortemente influenciado pelos estribos internos; viii) boa parte dos estudos analíticos focaram em desenvolver um modelo de cálculo que considere a presença dos estribos na estimativa da contribuição do reforço; ix) o predominante modo de ruptura do sistema está ligado ao descolamento do reforço, tanto externo quanto interno (técnica NSM); x) muitos autores têm focado em métodos de ancoragem capazes de aumentar a contribuição do compósito no reforço ao cisalhamento e evitar a falha por descolamento. Logicamente, essas não são as únicas observações. As demais, não menos importantes, se encontram no corpo deste trabalho.

Diante da extensa aplicabilidade do compósito, muitos estudos ainda devem ser realizados, principalmente quando se trata da sua contribuição na resistência global da estrutura.

Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Conflito de Interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-08 - Guide for the design and construction of externally bonded FRP Systems for strengthening concrete structures**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3435659/mod_resource/content/1/4402r_08.pdf. Acesso em: 15 jan. 2021.

BAGGIO, D.; SOUDKI, K.; NOËL, M. Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 634-644, Sept, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.097>.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2974>. Acesso em: 10 jan. 2021.

BELARBI, A.; ACUN, B. FRP systems in shear strengthening of reinforced concrete structures. **Procedia Engineering**, v. 57, n. 57, p. 2-8, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.004>.

BELARBI, A.; BAE, S.; AYOUB, A.; KUCHMA, D.; MIRMIRAN, A.; OKEIL, A. **NCHRP Report 678**: Design of FRP systems for strengthening concrete girders in shear. Washington, DC: The National Academies Press, 2011. 129 p. DOI: <https://dx.doi.org/10.17226/14465>.

BELARBI, A.; BAE, S. W.; BRANCACCIO, A. Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. **Construction and Building Materials**, v. 32, p. 27-40, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.102>.

BENZEGUIR, Z. E. A.; EL-SAIKALY, G.; CHAALLAL, O. Size effect of RC T-beams strengthened in shear with externally bonded CFRP L-shaped laminates. **Journal of Composites for Construction**, v. 24, n. 4, p. 1-10, Aug. 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001045](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001045).

BSISU, K. A. D.; HUSSEIN, H. H.; SARGAND, S. M. The use of hashin damage criteria, CFRP–concrete interface and concrete damage plasticity models in 3D finite element modeling of retrofitted reinforced concrete beams with CFRP sheets. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, n. 3, p. 1171-1184, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2356-3>.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 7. ed. York, PA, USA: John Wiley & Sons, 2007.

CAROLIN, A. **Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements**. 2003. 194 p. Doctoral Thesis, Department of Civil and Mining Engineering – Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Switzerland, 2003. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:989866/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2020.

CAROLIN, A. **Strengthening of concrete structures with CFRP: shear strengthening and full scale applications**. 2001. 137 p. Licentiate Thesis, Department of Civil and Mining Engineering – Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Switzerland, 2001. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990943/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2020.

COLALILLO, M. A.; SHEIKH, S. A. Behavior of shear-critical reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer-experimentation. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 6, p. 1373-1384, Nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.14359/51687035>.

DE LORENZIS, L.; NANNI, A. Shear strengthening of reinforced concrete beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 1, p. 60-68, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14359/10147>.

EL-SAIKALY, G.; CHAALLAL, O. Fatigue behavior of RC T-beams strengthened in shear with EB CFRP L-shaped laminates. **Composites Part B**, v. 68, p. 100-112, Jan. 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.014>.

EL MAADDAWY, T.; SHERIF, S. FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings. **Composite Structures**, v. 89, n. 1, p. 60-69, June 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.06.022>.

ESLAMI, A.; MOGHAVEM, A.; SHAYEGH, H. R.; RONAGH, H. R. Effect of FRP stitching anchors on ductile performance of shear-deficient RC beams retrofitted using FRP U-wraps. **Structures**, v. 23, p. 407-414, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.11.007>.

FIB – FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Fib Bulletin 14**: Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Technical report by Task Group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures, Lausanne, Switzerland, 2001. Disponível em: <https://afzir.com/wp-content/uploads/2017/11/Externally-bonded-FRP-Reinforcement-for-RC-structures.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020.

FOSTER, R. M.; BRINDLEY, M.; LEES, J.; IBELL, T.; MORLEY, C.; DARBY, A.; EVERNDEN, M. Experimental investigation of reinforced concrete T-Beams strengthened in shear with externally bonded CFRP sheets. **Journal of Composites for Construction**, v. 21, n. 2, p. 1-13, Apr. 2017. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000743](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000743).

GALAL, K.; MOFIDI, A. Shear strengthening of RC T-beams using mechanically Anchored Unbonded Dry Carbon Fiber Sheets. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 24, n. 1, p. 31-39, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000067).

GODAT, A.; HAMMAD, F.; CHAALLAL, O. State-of-the-art review of anchored FRP shear-strengthened RC beams: A study of influencing factors. **Composite Structures**, v. 254, p. 1-19, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112767>.

GRACE, N. F.; SAYED, G. A.; SOLIMAN, A. K.; SALEH, K. R. Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates. **ACI Structural Journal**, v. 96, n. 5, p. 865-875, Jan. 1999. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242550596_Strengthening_Reinforced_Concrete_Beams_Using_Fiber_Reinforced_Polymer_FRP_Laminates. Acesso em: 10 jan. 2021.

IBRAHIM, M.; WAKJIRA, T.; EBEAD, U. Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer strips. **Engineering Structures**, v. 210, p. 1-16, May. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110412>.

JALALI, M.; SHARBATDAR, M. K.; CHEN, J.-F.; ALAEE, F. J. Shear strengthening of RC beams using innovative manually made NSM FRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 990-1000, Nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.068>.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”**. 1999. 396 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1999. Disponível em: <https://docplayer.com.br/61317960-Reforco-e-reabilitacao-de-estruturas-de-betao-usando-materiais-compositos-de-cfrp.html>. Acesso em: 11 nov. 2020.

KARZAD, A. S.; AL TOUBAT, S.; MAALEJ, M.; ESTEPHANE, P. Repair of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer. **MATEC Web of Conferences**, v. 120, p. 1-10, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712001008>.

KARZAD, A. S.; LEBLOUBA, M.; AL TOUBAT, S.; MAALEJ, M. Repair and strengthening of shear-deficient reinforced concrete beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer. **Composite Structures**, v. 223, p. 1-10, Sept, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110963>.

KHALIFA, A.; ALKHRDAJI, T.; NANNI, A.; LANSBURG, S. Anchorage of surface mounted FRP reinforcement. **Concrete International: Design and Construction**, v. 21, n. 10, p. 49-54, 1999. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/c720/76e8e8047f6bfb541e1dd3aa65be9915c5eb.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2021.

KHALIFA, A.; BELARBI, A.; NANNI, A. Shear performance of RC members strengthened with externally bonded FRP wraps. *In*: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE, 12., 2000, Auckland, New Zealand, **Proceedings (...)**. Upper Hutt, NZ: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000. Disponível em: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0350.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2020.

KHALIFA, A.; NANNI, A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 3, p. 165-174, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00051-7).

KHALIFA, A.; NANNI, A. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using FRP composites. **Construction and Building Materials**, v. 16, n. 3, p. 135-146, Abr. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00002-8).

KIM, I. S. **Use of CFRP to provide continuity in existing reinforced concrete members subjected to extreme loads**. 2008. 478 p. Thesis (Doctorate) – Faculty of the Graduate School, University of Texas at Austin, Austin, 2008. Disponível em: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/17915>. Acesso em: 5 nov. 2020.

KIM, Y.; QUINN, K.; SATROM, N.; GARCIA, J.; SUN, W.; GHANNOUM, W. W.; JIRSA, J. O. Shear strengthening of reinforced and prestressed concrete beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets and anchors. **Technical Report n° FHWA/TX-1 2/0-6306-1**. Texas: Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration, 2011. Disponível em: https://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/0_6306_1.pdf. Acesso em: 25 nov. 2020.

KOUTAS, L.; TRIANTAFILLOU, T. Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP. **Journal of Composites for Construction**, v. 17, n. 1, p. 101-107, June 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000316](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000316).

LEE, H. K.; CHEONG, S. H.; HA, S. K.; LEE, C. G. Behavior and performance of RC T-section deep beams externally strengthened in shear with CFRP sheets. **Composite Structures**, v. 93, n. 2, p. 911-922, June 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.07.002>.

LI, W.; HUANG, Z.; HUANG, Z.; YANG, X. Shear behavior of RC beams with corroded stirrups strengthened using FRP laminates: effect of the shear span-to-depth ratio. **Journal**

of **Composites for Construction**, v. 24, n. 4, Aug. 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001042).

LI, W.; LEUNG, C. K. Y. Shear span-depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, n. 3, p. 1-14, June 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000627](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000627).

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: Teoria e Prática**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2015. 517 p.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 197 p.

MANOS, G. C.; KATAKALOS, K.; KOURTIDES, V. **Construction structure with strengthening device and method**. European Patent Office. WO2011073696 (A1). 23 June. 2011. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20120255251A1/en>. Acesso em: 5 jan. 2021.

MANOS, G. C.; THEOFANOUS, M.; KATAKALOS, K. Numerical simulation of the shear behaviour of reinforced concrete rectangular beam specimens with or without FRP-strip shear reinforcement. **Advances in Engineering Software**, v. 67, p. 47-56, Jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.08.001>.

MATTHYS, S. **Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement**. 2000. 367 p. Thesis (Doctorate in Applied Sciences) – Faculty of Engineering, Ghent University, Ghent, Belgium, 2000. Disponível em: <https://biblio.ugent.be/publication/471000/file/1873748>. Acesso em: 28 jan. 2021.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MEIER, U. Repair using advanced composites. **IABSE reports**. v. 999, p. 113-124, Sept. 1997. DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-955>.

MENON, V. A. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. 2008. 327 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91783>. Acesso em: 2 nov. 2020.

MICELLI, F.; ANNAIAH, R. H.; NANNI, A. Strengthening of short shear span reinforced concrete T joists with Fiber-Reinforced Plastic Composites. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 4, p. 264-271, Nov. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:4\(264\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:4(264)).

MOFIDI, A.; CHAALLAL, O.; CHENG, L.; SHAO, Y. Investigation of Near Surface-Mounted Method for shear rehabilitation of reinforced concrete beams using Fiber Reinforced-Polymer Composites. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, n. 2, p. 1-14, Apr. 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000612](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000612).

MOHAMED ALI, M. S.; OEHLERS, D. J.; SERACINO, R. Vertical shear interaction model between external FRP transverse plates and internal steel stirrups. **Engineering Structures**, v. 28, n. 3, p. 381-389, Feb. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.08.010>.

NORRIS, T.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. Shear and flexural strengthening of R/C beams with Carbon Fiber sheets. **Journal of Structural Engineering**, v. 123, n. 7, p. 903-911, July 1997. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:7\(903\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903)).

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. Fiber Reinforced Polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 2, p. 104-111, May 2002. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(104\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(104)).

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. Fiber-Reinforced Polymer shear strengthening of reinforced concrete beams: experimental study and analytical modeling. **ACI Structural Journal**, v. 103, n. 5, p. 720-728, Sept. 2006. DOI: <https://doi.org/10.14359/16924>.

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. An experimentally based analytical model for the shear capacity of FRP-strengthened reinforced concrete beams. **Mechanics of Composite Materials**, v. 44, n. 3, p. 231-245, May 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-008-9016-y>.

PLEVRIS, N.; TRIANTAFILLOU, T. C. Time-dependent behavior of RC members strengthened with FRP laminates. **Journal of Structural Engineering**, v. 120, n. 3, p. 1016-1042, Mar. 1994. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:3\(1016\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(1016)).

QUINN, K. T. **Shear strengthening of reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and improved anchor details**. 2009. 298 p. Thesis (Master of Science in Engineering) – Faculty of the Graduate School, The University of Texas at Austin, Austin, 2009. Disponível em: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/ETD-UT-2009-12-508>. Acesso em: 1 fev. 2021.

ROUSAKIS, T. Retrofitting and strengthening of contemporary structures: materials used. **Encyclopedia of Earthquake Engineering**, p. 1-15, July 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_303-1.

SARIBIYIK, A.; ABODAN, B.; BALCI, M. T. Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 24, n. 3, p. 192-204, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.06.003>.

TANARSLAN, H. M.; ERTUTAR, Y.; ALTIN, S. The effects of CFRP strips for improving shear capacity of RC beams. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27, n. 12, p. 1287-1308, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684407087370>.

TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. **FRP strengthened RC structures**. 1. ed. York, PA, USA: John Wiley & Sons, 2002. 266 p.

TRIANATFILLOU, T. C. Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. **ACI Structural Journal**, v. 95, n. 2, p. 107-115, Mar. 1998. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/247509718>

[Shear Strengthening Of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites](#). Acesso em: 20 nov. 2021.

YU, F.; GUO, S.; WANG, S.; FANG, Y. Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips. **Composite Structures**, v. 225, 111163, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111163>.