

Adesão, reforço e durabilidade na reabilitação de vigas de Concreto Armado (RC) usando Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão bibliográfica

P. J. Poot Cauich¹ , R. Martínez-Molina¹ , J. L. Gamboa Marrufo¹ , P. J. Herrera Franco^{2*} 

* Autor de Contato: pherrera@cicy.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.401>

Recepção: 30/03/2019 | Aceitação: 22/04/2019 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

Este artigo aborda a mecânica de aderência, o efeito de fortalecimento e a durabilidade de aplicações de CFRP em vigas de concreto armado. A aplicação de materiais CFRP tem sido descrita extensivamente na bibliografia, mas sempre com foco principal nas falhas do sistema. O primeiro problema é fortalecer as vigas de concreto armado com o CFRP. O segundo é evitar a perda de aderência local na interface CFRP com RC, ou seja, o escorregamento local τ . O último problema é a durabilidade do reforço de CFRP, quando exposto a um ambiente úmido e quente. O papel da adesão e a mecânica da aderência do concreto ao CFRP e uma boa compreensão da interface entre o CFRP e o comportamento do concreto é o fator chave no controle de falhas de aderência em vigas de concreto armado (RC) reforçadas com CFRP.

Palavras-chave: compósitos de fibra de carbono; interface resina-concreto; interface de matriz de fibra; adesão.

Citar como: Poot Cauich, P. J., Martínez-Molina, R., Gamboa Marrufo, J. L., Herrera Franco, P. J. (2019), "Adesão, reforço e durabilidade na reabilitação de vigas de Concreto Armado (RC) usando Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão bibliográfica", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 130 – 150, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.401>

¹ Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Marista de Mérida, Periférico Norte tablaje catastral 13941, Carretera Mérida - Progreso. C.P. 97300, Mérida Yucatán, México.

² Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 # 130, Col. Chuburná, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Adhesion, strengthening and durability issues in the retrofitting of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) – A Review

ABSTRACT

This paper addresses the mechanics of adhesion, strengthening effect and durability issues of applications of CFRP composite materials in beams. The application of CFRP materials has been widely described, but the main focus has been on overall failure parameters. The first issue is strengthening capability of CFRP reinforcement for concrete beams. The second is the local interface bond stress-slip relationship, that is, the local τ -slip. The last issue is the durability of the CFRP sheet/plate, when exposed to a hydro-thermal environment. The role of adhesion and the mechanics of concrete-CFRP adhesion and a sound understanding of the interface between the CFRP and concrete behavior is the key factor for controlling debonding failures in CFRP-strengthened RC beams.

Keywords: carbon fiber composites; resin-concrete interphase; fiber-matrix interphase; retrofitting; adhesion.

Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) - Una revisión

RESUMEN

Este documento aborda la mecánica de la adhesión, el efecto de reforzamiento y la durabilidad de las aplicaciones de materiales compuestos de CFRP en vigas. La aplicación de los materiales de CFRP se ha descrito ampliamente, pero el enfoque principal se ha centrado en los parámetros generales de falla. El primer problema es el fortalecimiento de la capacidad del refuerzo de CFRP para vigas de concreto. El segundo es la relación local tensión-deslizamiento del enlace de la interfaz, es decir, el deslizamiento τ local. El último problema es la durabilidad de la hoja/placa de CFRP, cuando se expone a un ambiente hidro-térmico. El papel de la adhesión y la mecánica de la adhesión de concreto-CFRP y una buena comprensión de la interfaz entre el CFRP y el comportamiento del concreto es el factor clave para controlar las fallas de desunión en vigas de CR reforzadas con CFRP.

Palabras clave: compuestos de fibra de carbono; interfase resina-hormigón; interfase de matriz de fibra; reequipamiento, adhesión.

NOMENCLATURA

a – Extensão de cisalhamento	β_1 – Coeficiente que determina a compatibilidade da curva representativa de compressão do concreto a um retângulo de acordo com as recomendações da ACI 440-2R (2008)
b_f – Largura da camada de CFRP	ϵ_{bi} – Deformação encontrada no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço
b_w – Largura da viga	ϵ_c – Deformação do concreto
b_p – Largura da placa CFRP colada	ϵ_{cu} – Deformação última do concreto
b_c – Largura do concreto no ensaio pull-out	
L_b – Comprimento de CFRP aderido	
L_e – Comprimento efetivo do CFRP	
T_p – Espessura da placa CFRP colada	
c – Altura do bloco de compressão retangular equivalente do concreto	

c_1 – Fator obtido pela calibração dos resultados (igual a 0,64 para o CFRP)	ε_f – Deformação da fibra de carbono
d – Altura efetiva da viga	ε_{fd} – t Valor limite da deformação da fibra a ser adotado no dimensionamento e verificação da armadura
d' – Posição do centro de gravidade da armadura comprimida	ε_{fe} – Deformação efetiva no FRP
f_c – Resistência à compressão de concreto	ε_{fu} – Deformação última observada no polímero no momento da falha
f_{ctm} – Resistência à tração média do concreto	ε_s – Deformação na armadura de tração
f_{fe} – Resistência efetiva do CFRP	ε_s' – Deformação na armadura comprimida
f_s – Resistência do aço	ε_{ys} – Deformação de escoamento da armadura de flexão
A_f – Área de aço aplicada à viga	G_f – Energia de fratura interfacial
A_s – Área de aço da armadura de tração	s – Deslizamento local;
A_s' – Área de aço da armadura comprimida	s_e – Componente elástico do deslizamento local;
E_f – Módulo de elasticidade do CFRP	s_f – Deslizamento local quando a tensão de aderência τ reduz para zero;
E_s – Módulo de elasticidade do aço	s_0 – Deslizamento local em τ_{max} ;
F_{cc} – Compressão resultante	B_l – Fator de comprimento de aderência;
L – Comprimento total da viga	B_w – Fator de relação de largura;
P – Carga aplicada no ensaio experimental	τ – Tensão de aderência local;
T_s – Componente de tração devido à armadura de tração	τ_{max} – Tensão de aderência local máxima;
α – Coeficiente de redução devido à propagação de fissuras inclinadas	τ_u – Tensão de aderência média.

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas quatro décadas, o desenvolvimento de materiais do ponto de vista teórico e tecnológico de materiais compósitos avançados resultou em seu uso generalizado. Suas excelentes propriedades de engenharia, como alta resistência específica e rigidez, baixa densidade, alta resistência à fadiga, alto amortecimento e baixo coeficiente térmico (na direção da fibra), etc., resultaram em um uso constante nas indústrias aeroespacial, marítima e automotiva.

Estruturas de concreto armado podem ser danificadas após alguns anos de serviço ou exposição a ambientes agressivos, como ambientes marítimos e/ou industriais e, portanto, precisam de reparos. Então, para permitir uma capacidade de carga maior do que o valor de projeto original, os elementos estruturais precisam ser adaptados. A corrosão é uma das principais causas de deterioração da infraestrutura civil, especialmente pontes, com consequências que vão desde o enfraquecimento progressivo dos elementos estruturais devido a fissuras e perda de seção transversal, até o colapso repentino. Os altos índices de resistência/peso e rigidez/peso dos compósitos os tornam atraentes para uso em reabilitação de infraestrutura. Uma técnica comum de reparo / adaptação para vigas de concreto é unir uma placa ao fundo da viga. Inicialmente, chapas de aço foram empregadas e, mais recentemente, a atenção tem sido direcionada ao uso de placas de compósitos reforçados com fibras de carbono (CFRP), que oferecem maior resistência/peso e vários atributos atrativos já mencionados além de uma durabilidade melhorada. Além disso, estes compósitos avançados estão sendo considerados como um substituto para o aço convencional em estruturas de concreto armado devido à contínua diminuição do custo dos materiais CFRP e ao desenvolvimento de adesivos sintéticos baseados em resinas epóxi, (CKY Leung, (2001), Swamy RN et al., (1987), Hamoush S.A. (1990), Norris, (1997), Karbhari et al., (1995), Saadatmanesh, (1995)).

O desempenho do CFRP como agente de reforço para elementos de concreto tem sido estudado, desde a sua estrutura, material e método de aplicação. A resistência à flexão de vigas RC usando compósitos pode ser fornecida por colagem de epóxi da placa CFRP à porção dos elementos submetidos a tensões de tração, com fibras paralelas à direção de tensão principal. Se as fibras do material compósito forem colocadas perpendicularmente às fissuras, um grande aumento na resistência e rigidez é alcançado em comparação com a situação em que as fibras são colocadas obliquamente às fissuras. Além disso, o aumento de resistência para vigas RC de aproximadamente 200% é obtido com compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRP). O desempenho de flexão de vigas RC reforçados é afetado por vários fatores como módulo de elasticidade do CFRP e sua localização no centro de gravidade em relação à linha neutra, largura do laminado, comprimento do laminado, quantidade de armadura principal e cisalhamento, número de camadas de CFRP, nível de carregamento, configuração da laminação, resistência e cobertura do concreto, danos e condições de carregamento, etc. (Sandeep S. et al, 2008).

A aderência do CFRP ao substrato de concreto é de fundamental importância para a eficácia do mecanismo de reforço, pois significa a transferência de tensões entre o concreto e o CFRP, a fim de desenvolver uma ação composta. Vários relatos podem ser encontrados na literatura técnica estudando diferentes aspectos que afetam a eficiência do reforço de CFRP.

O principal objetivo deste trabalho é revisar a literatura (analítica / experimental) dos diferentes parâmetros que afetam os mecanismos de transferência de carga do elemento RC para o CFRP e discutir os efeitos de vários parâmetros que afetam a durabilidade, especialmente parâmetros relacionados com a interface adesivo-concreto, bem como o desempenho do laminado de material compósito quando expostos a ambientes úmidos e temperaturas altas. A discussão é mantida em um nível descritivo e o leitor é aconselhado a se referir às referências citadas para detalhes de parâmetros e modelos matemáticos.

Parâmetros como resistência à compressão do concreto na resistência de aderência e transferência de resistência das placas compostas para o concreto foram estudados por Chajes, M.J. et al, (1996). Eles observaram dois mecanismos de falha que direcionam a cortante do concreto e ocasionam falhas de aderência, dependendo do tipo de adesivo e do concreto. Eles também mostraram que a preparação da superfície do concreto pode influenciar muito a resistência de aderência. Estudos similares foram conduzidos por Yoshizawa et al, (1996) que relataram que a rugosidade da face do concreto teve um efeito determinante na capacidade de carga da amostra. Além disso, quando o modo de falha da junta era governado pelo cisalhamento do concreto, a resistência de aderência final era proporcional à raiz quadrada da resistência do concreto f'_c . Eles também descobriram que existe um comprimento efetivo de aderência para uma junta, além do qual nenhum aumento adicional na carga de falha pode ser alcançado.

2. A MECÂNICA DA ADESÃO CONCRETO-CFRP

2.1 Análise linear da adesão de concreto-CFRP colada

A desconexão entre o concreto e as lâminas / chapas de CFRP em casos de reforço de flexão e cisalhamento diminui a eficiência de resistência dos materiais de CFRP ou causa uma deficiência na ductilidade do elemento (Dai, et al, 2005). A resistência de aderência à interface ou propriedade de deslizamento de tensão local tem mostrado influenciar o pico de flexão ou resistência ao cisalhamento de elementos RC adaptados usando CFRP por meio de modelos analíticos (Buyukozturk e Hearing 1998, fib 2001) dando origem a várias resistências de adesão, comprimento de ancoragem e modelos locais de deslizamento de aderência (Chen e Teng, 2001). Como afirmado por Lu et al. (2005), um modelo de deslizamento de aderência preciso é de fundamental importância na modelagem da estrutura RC fortalecida por CFRP. Uma boa compreensão do comportamento da interface entre o CFRP e o concreto é o principal fator que

controla as falhas de descolagem em estruturas RC reforçadas por CFRP. Portanto, para o projeto seguro e econômico de sistemas CFRP aderidos externamente, neste artigo é feita referência à análise apresentada por De Lorenzis, L. 2001, e mencionados outros modelos disponíveis na literatura técnica (ver Fig. 1), (Taljsten B. 1997, Bizindavvi L. 1999, Mander JB 1998, Jeffries, JM 2001).

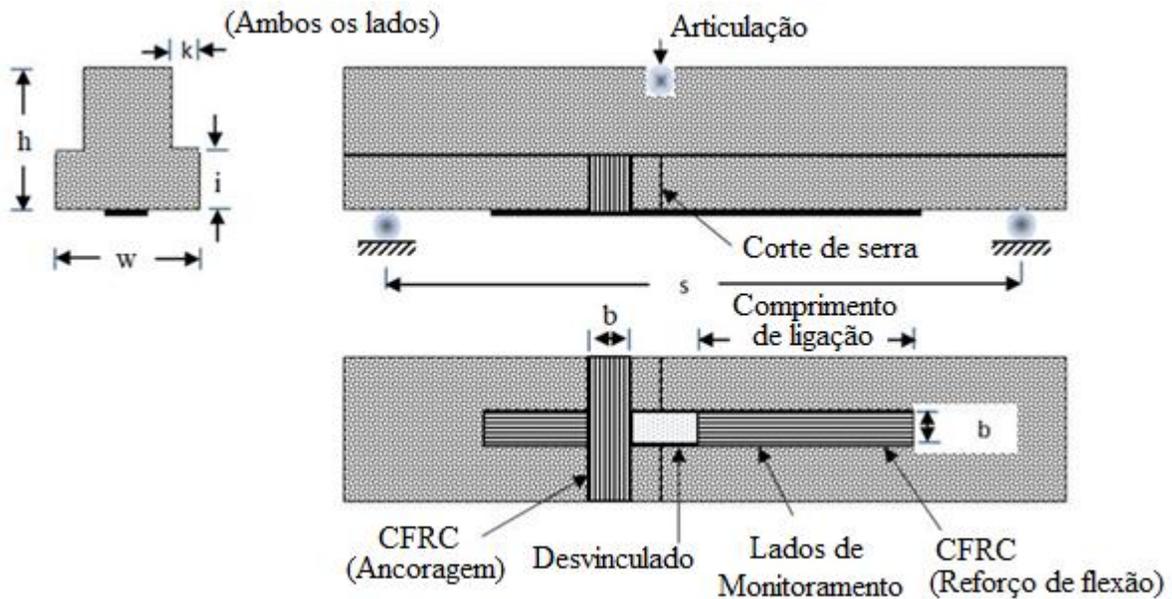


Figura 1. Amostra de ensaio mostrando as dimensões da viga de concreto e a posição e dimensões do reforço de CFRP, bem como a ancoragem do CFRP. (De Lorenzis, L. 2001)

Considerando o equilíbrio estático e relações de compatibilidade de um elemento diferencial da lâmina de comprimento dx , e assumindo um comportamento elástico linear da lâmina de CFRP e que a rigidez do concreto é muito maior que a rigidez do compósito, isto é, tensão desprezível no concreto e que o adesivo é submetido apenas a resistências de cisalhamento, a seguinte equação diferencial resulta. Em níveis de carga moderados, um comportamento de escorregamento de aderência linear pode ser adotado:

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{1}{tE} \tau[s(x)] = 0 \quad (1)$$

Onde s é o escorregamento, τ é a tensão de aderência, x a coordenada ao longo do comprimento aderido do laminado, t a espessura e E o módulo de elasticidade do CFRP. Em níveis de carga moderados, pode ser adotado um comportamento linear de escorregamento de aderência. Uma solução da equação 1, neste caso, seria:

$$s(x) = C_1 \text{Sinh } \alpha x + C_2 \text{Cosh } \alpha x \quad (2a)$$

$$\varepsilon(x) = \alpha C_1 \text{Cosh } \alpha x + \alpha C_2 \text{Sinh } \alpha x \quad (2b)$$

$$\tau(x) = Ks(x) \quad (2c)$$

Onde:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K}{tE}} \quad (3)$$

As constantes C_1 e C_2 podem ser determinadas a partir das condições de contorno. Se a origem da coordenada x corresponde à extremidade livre da lâmina ($x = 0$), onde não existe deformação, e $x = l$ (sendo o comprimento aderido) corresponde ao final da lâmina CFRP onde a carga externa é aplicada diretamente, as condições de contorno são:

$$\varepsilon(0) = 0 \quad (4a)$$

$$\varepsilon(l) = \frac{\sigma_0}{E} \quad (4b)$$

E as equações 2a-c se tornam

$$s(x) = \left(\frac{\sigma_0}{\alpha E} \right) \frac{\text{Cosh } \alpha x}{\text{Sinh } \alpha l} \quad (5a)$$

$$\varepsilon(x) = \left(\frac{\sigma_0}{E} \right) \frac{\text{Sinh } \alpha x}{\text{Sinh } \alpha l} \quad (5b)$$

$$\tau(x) = Ks(x) \quad (5c)$$

O módulo de deslizamento K pode ser estimado usando um modelo de cisalhamento simples como a razão entre o módulo de cisalhamento do adesivo e a espessura da camada adesiva. Além disso, quando CFRP baseado em lâminas em vez de placas é usado, o módulo de deslizamento $K = G_{\text{int}}/t_{\text{int}}$ ou seja, a relação entre o módulo de cisalhamento do CFRP, G_{int} e a espessura da interface t_{int} onde G_{int} é o módulo de cisalhamento da interface lâmina-concreto CFRP e t_{int} é espessura da interface, pode ser avaliada da seguinte forma: quando o material compósito é formado in loco, utilizando a técnica adequada, o sistema de resina serve intrinsecamente tanto como matriz para o compósito como interface entre o concreto e o compósito, ou seja, como a camada adesiva. Esta camada é então o meio principal para a transferência de tensões de cisalhamento entre o compósito e o concreto. Para a estimativa de G_{int} , a camada de primer também deve ser considerada. Portanto, G_{int} e t_{int} podem ser calculados a partir das espessuras obtidas a partir da microscopia eletrônica de varredura e as propriedades elásticas da resina e do primer, utilizado para o cálculo do módulo de cisalhamento:

$$G_{\text{int}} = \frac{G_{\text{resin}} G_{\text{primer}}}{t_{\text{resin}} G_{\text{primer}} + t_{\text{primer}} G_{\text{resin}}} \quad (6)$$

Onde:

$$G_{\text{resin}} = \frac{E_{\text{resin}}}{2(1+\nu_{\text{resin}})} \quad (7)$$

A equação 7 também pode ser usada para estimar o módulo de cisalhamento do primer. As curvas τ -slip locais podem ser obtidas a partir de dados experimentais como segue. A tensão de aderência, τ , pode ser encontrada pelo equilíbrio de resistências, considerando também a elasticidade linear do CFRP.

$$\tau(x) = tE \frac{d\varepsilon_r(x)}{dx} \quad (8)$$

Onde ε_r é a tensão CFRP até a falha, portanto, o diagrama $\tau(x)$ pode ser obtido a partir da primeira derivada do diagrama de tensão vs. localização multiplicado pelo módulo elástico E e a espessura.

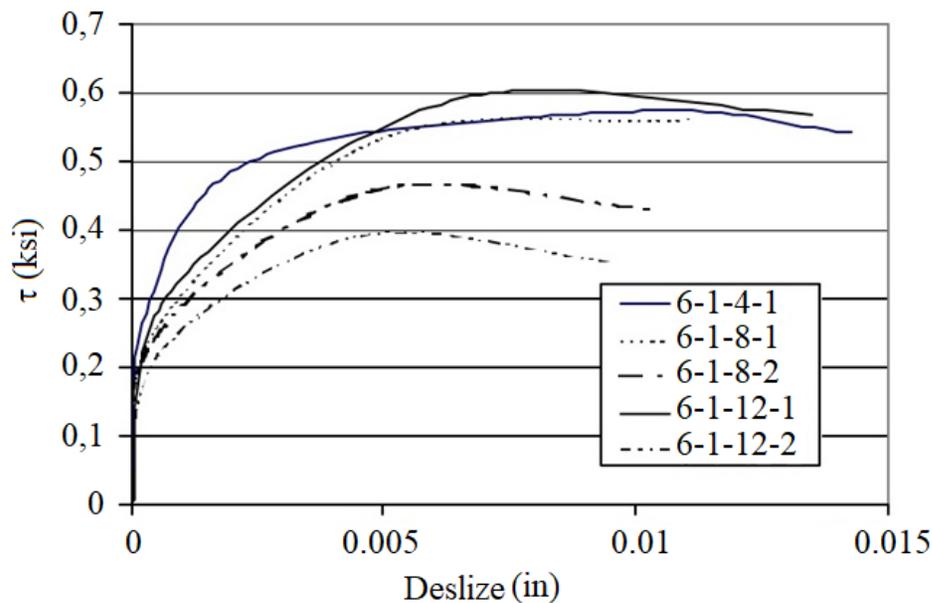


Figura 2. Relações τ -slip locais para amostras com diferentes comprimentos de aderência CFRP (4, 8 e 12 in) coladas no lado de tração de uma viga de concreto. Nota: 1 em = 25,4 mm; 1 psi = 7,03 kPa (De Lorenzis et al, 2001).

A Figura 2 ilustra algumas curvas de tensão τ -slip obtidas de amostras ensaiadas em um nível de carga correspondente a um descolamento iminente. Isso foi identificado como o nível de carga no qual a distribuição de deformação se torna linear. As curvas típicas τ -slip devem consistir em um ramo ascendente com degradação contínua da rigidez até a tensão máxima de adesão e um ramo descendente curvo atingindo uma tensão de aderência zero em um valor finito de deslizamento. Embora um modelo preciso de adesão e deslizamento deva consistir em um ramo ascendente curvo e um ramo descendente curvo, outras formas, como um modelo bilinear, podem ser usadas como uma boa aproximação. Um modelo preciso de adesão e deslizamento deve fornecer previsões aproximadas tanto da forma quanto da energia da fratura (área sob a curva de adesão e deslizamento) da curva de adesão e deslizamento. Nenhum dos modelos de deslizamento de ligações existentes fornece previsões precisas tanto da forma quanto da energia da fratura interfacial como encontradas nos ensaios. A área abaixo da curva de deslizamento, indicada como G_f , é a energia de fratura por unidade de área da junta colada (Lu X.Z. 2005).

Em um artigo recente, Hamze-Ziabari e Yasalovi, (2017), fizeram um resumo das equações existentes para a previsão da transferência de carga entre o concreto e o comprimento efetivo de transferência de carga do CFRP. Essas equações foram derivadas de considerações teóricas da mecânica da fratura ou de equações empíricas calibradas com conjuntos de dados experimentais

ou combinações dos dois. No entanto, a precisão desses modelos parecia ser limitada. Por uma questão de perfeccionismo, algumas dessas equações também são reproduzidas nesta revisão (ver tabela 1):

Table 1. Tabela 1. Equações para estimar a carga máxima transferível P_{max} , bem como o comprimento efetivo do CFRP.

Referência	Equação de carga máxima transferível P_{max}	Comprimento efetivo e considerações
Chen, F.J., Teng, G.J. (2001)	$P_{max} = 0.315\beta_p\beta_L b_p L_e \sqrt{f_c}$	$L_e \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c^{1/2}}}$ $\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b}}{1 + \frac{b_p}{b}}}$ $\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{if } L_b \geq L_e \\ \text{Sin } \frac{\pi L_b}{2L_e} & \text{if } L_b \leq L_e \end{cases}$
De Lorenzis et al (2001)	$P_{max} = b_p \sqrt{2E_f t_p G_f}$	G_f é a energia de fratura por unidade de área da junta, assumida como sendo igual a 1,06 N-mm / mm ²
Teck-Yong et al (1987)	$P_{max} = \left(0.5 + 0.08\sqrt{\frac{E_f t_p}{1000}}\right) \frac{b L_e f_c}{2}$	
Van Gemert (1980)	$P_{max} = \frac{b_p L f_c}{2}$	
Tanaka (1996)	$P_{max} = (6.13 - \ln(L_b)) b_p L_b$	
Maeda et al (1997)	$P_{max} = 110.2(10^{-6}) E_f t_p b_p L_e$	$L_e = e^{6.15 - 0.58 \ln(E_f t_p)}$
Yuan, Wu and Yoshizawa, (2001)	$P_{max} = b_p \sqrt{\frac{2G_f}{\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c}}}$	
Neubauer and Rostasy (1997)	$P_{max} = 0.64 K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \text{ if } L_b \geq L_e$ $P_{max} = 0.64 K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e}\right) \text{ if } L_b \leq L_e$	$K_p = \sqrt{1.125 \frac{2 - \frac{b_p}{b_e}}{1 + \frac{b_p}{400}}}$
Khalifa et al (1998)	$P_{max} = 110.2(10^{-6}) E_p t_p b_p L_e \left(\frac{f_c}{42}\right)^{2/3}$	$L_e = e^{6.13 - 0.58 \ln E_p t_p}$
Adhikary and Mutsuyoshi (2001)	$P_{max} = b_p L_b (0.25 f_c)$	
Dai et al (2006)	$P_{max} = (b_p + 7.4) \sqrt{2G_f E_p t_p}$	$G_f = 0.514 f_c^{0.236}$

Lu et al 2005	$P_{\max} = b_p B_1 \sqrt{2G_f E_p t_p}$	$L_e = a + \frac{1}{2\lambda_1} \operatorname{Ln} \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)} \right)$ $\lambda_1 = \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{s_0 E_p t_p}} \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{(s_f - s_0) E_p t_p}}$ $a = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin \left[0.99 \sqrt{\frac{s_f - s_0}{s_f}} \right]$ $\tau_{\max} = \alpha_1 B_w f_t \quad \alpha_1 = 0.15$ $G_f = 0.308 B_w^2 \sqrt{f_t}$ $s_0 = 0.0195 B_w f_t$ $B_w = \sqrt{\frac{2.25 - \frac{b_p}{b}}{1.25 + \frac{b_p}{b}}}$ $B_1 = \sin \left[\frac{\pi L_b}{2L_e} \right]$
Camli e Binici (2007)	$P_{\max} = \sqrt{\tau_f \sigma_f} \sqrt{E_f t_p b_p} \tanh \left(\frac{\theta L_b}{L_e} \right)$	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c^{1/2}}} \quad \theta = \sqrt{\frac{\tau_f}{\sigma_u f_c^{1/2}}}$ $\tau_f = 3.5 f_c^{0.19}$ $\sigma_u = f_c^\alpha \left(\frac{L_b}{L_e} \right)^\beta \left(\frac{b_b}{b} \right)^\gamma$ $\alpha = -0.4 \quad \beta = 0.8 \quad \gamma = 0.4$
fib model code (2001)	$P_{\max} = 0.64 k_c K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \quad \text{if } L_b \geq L_e$ $P_{\max} = 0.64 \alpha k_c K_p b_p \sqrt{f_c E_p t_p} \left(\frac{L_b}{L_e} \right) \left(2 - \frac{L_b}{L_e} \right) \quad \text{if } L_b \leq L_e$	$K_p = \sqrt{\frac{1.125 \left(2 - \frac{b_p}{b_e} \right)}{1 + \frac{b_p}{400}}}$ $\alpha = 1 \quad k_c = 1$
CNR-DT200/2004 2004	$P_{\max} = b_p \sqrt{2E_p t_p K_G K_p K_1 (f_i f_c)^{1/2}}$	$K_G = 0.03$

		$K_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } L \geq L_e \\ \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e} \right) & \text{if } L < L_e \end{cases}$ $L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{2 f_t}}$ $K_b = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 - 0.33}{1 + \frac{b_p}{400}}} & \text{if } \frac{b_p}{b_c} \leq 0.33 \\ \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{400}}} & \text{if } \frac{b_p}{b_c} \geq 0.33 \end{cases}$
--	--	---

2.2 Reforço de vigas com CFRP

Os modos de falha observados das vigas de concreto reforçadas com placas CFRP foram relatados por Teng et al (2003) e posteriormente analisados por Ferreira et al (2018). Eles relataram três modos típicos de falha: (1) falha de tração do CFRP quando sua resistência à tração é menor que a carga aplicada; (2) descolagem do reforço na interface laminado-concreto; e (3) falha coesiva do concreto e separação do reforço em conjunto com uma camada de concreto.

O primeiro modo de falha é atribuído a um modo frágil de falha, mas é evidente que a resistência de aderência de CFRP-concreto é maior. O segundo modo de falha é atribuído à falta de ancoragem do reforço, fissura excessiva da viga ou falhas na colagem. Novamente aqui, a falha da resistência adesiva pode ser causada por tensões normais no final da tira de CFRP, onde se sabe que existe uma singularidade de tensão [Leung, 2001, A.R. Khan et al 2014 e R.A. Hawileh et al 2015].

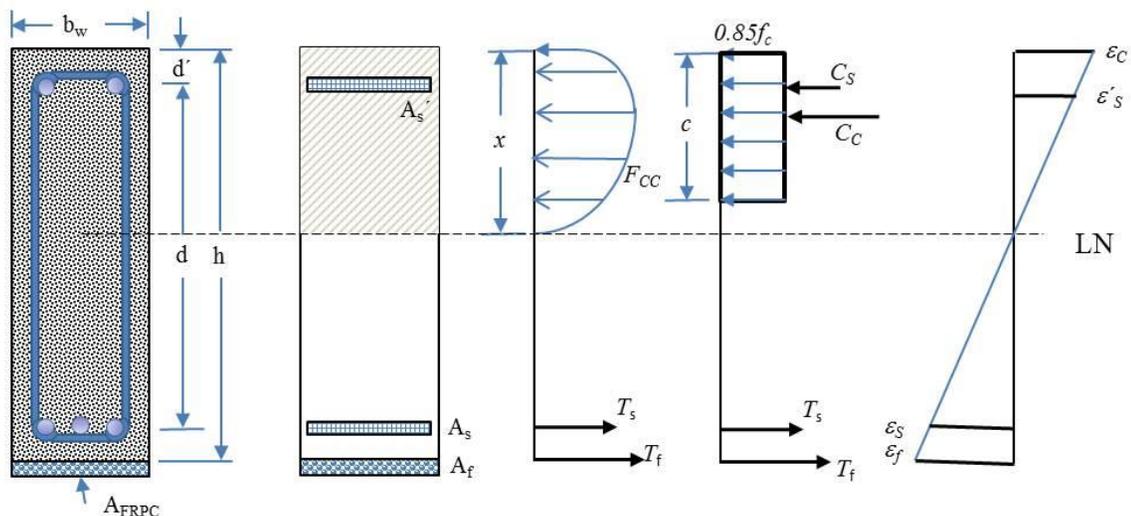


Figura 3. Diagrama de tensão-deformação de uma viga de concreto armado reforçada com CFRP (Ferreira et al, 2018)

A análise do reforço de uma viga de concreto com uma camada de CFRP carregada em flexão apresentada por Ferreira et al (2018) considerou que a relação da estrutura de viga reforçada é equivalente à adição na relação de armadura inicial com a contribuição da armadura (veja a figura 3).

$$\rho_r = \rho + \frac{A_f E_f}{b_w h E_s} \quad (10)$$

Onde ρ é a relação entre a armadura da viga antes do reforço, A_f é a área de reforço aplicada na viga, E_f é o módulo de elasticidade do CFRP, E_s é o módulo de elasticidade do aço, b_w e h são a largura e altura da viga, respectivamente. As recomendações para o dimensionamento do reforço com CFRP de acordo com o código americano ACI 440-2R são as seguintes: O valor limite da deformação da fibra a ser adotada no dimensionamento e verificação da armadura é expresso em termos do módulo de elasticidade do CFRP, e ε_{fu} a tensão final observada no polímero no momento da falha e n , o número de camadas de CFRP.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{n E_f t_f}} < 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (11)$$

A deformação efetiva no elemento composto CFRP é expressa em função da deformação final do concreto ε_{cu} e da deformação no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço, ε_{bi} e x , a posição da linha neutra.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (12)$$

f_{fe} é a resistência efetiva do CFRP;

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (13)$$

ε_s' é a deformação na armadura comprimida e d' é a posição do centróide da armadura comprimida.

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \left(\frac{x-d'}{x} \right) \quad (14)$$

A deformação na armadura de tração, ε_s , é expressa por:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} \left(\frac{d-x}{h-x} \right) \quad (15)$$

f_s' , a resistência no aço da armadura comprimida é dada em função da deformação na armadura comprimida ε_s' e do módulo de elasticidade no aço;

$$f_s' = E_s \varepsilon_s' \leq f_{ys}' \quad (16)$$

A resistência no aço da armadura de tração é dada por

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{ys} \quad (17)$$

A posição da linha neutra é calculada da seguinte forma:

$$x = \frac{(A_s f_s) + (A_f f_{fe}) - (A_s' f_s')}{\beta_1 (0.85 f_c) b_w} \quad (18)$$

A_s é a área de aço da armadura de tração; A_s' é a área de aço da armadura comprimida; β_1 é um coeficiente que determina a aproximação da curva de compressão resultante do concreto a um retângulo, sendo 0,85 para concreto com valores de f_c menores que 28 MPa, que diminui linearmente em 0,05 para cada 7 MPa acima desse limite de resistência à tração. O valor mínimo para esse coeficiente, segundo a ACI 318 (2014), é de 0,65.

As condições na interface entre o compósito e o concreto requerem um entendimento completo do ponto de vista da mecânica. Diferentes formulações de resina epóxi ou qualquer outro adesivo usado resultará em um comportamento completamente diferente da junta do composto de concreto. Além disso, o desenho geométrico do laminado e das ancoragens também influenciarão o comportamento mecânico e, conseqüentemente, a eficácia do reforço. Então, como primeiro passo, sempre que possível, e dependendo da disponibilidade do equipamento de ensaio, estudos preliminares dos parâmetros de adesão entre o compósito e o concreto são necessários para determinar os comprimentos das juntas para uma transferência efetiva de tensão necessária para atingir a capacidade de resistência do compósito.

3. EFEITOS AMBIENTAIS NA INTERFACE CFRP-CONCRETO

A interface concreto-CFRP foi reconhecida como a região onde ocorre a eficiência da transferência de carga do elemento estrutural para o laminado CFRP. Como afirmam Swamy RN et al., (1987), as propriedades do adesivo epóxi são de suma importância, pois variaram consideravelmente com a espessura do corpo de prova e a taxa de carga. Da mesma forma, a interface de matriz de fibra é considerada como uma região importante do desempenho do laminado composto.

Este comportamento matricial no concreto-CFRP é de particular interesse em materiais compósitos avançados, uma vez que seu uso em aplicações estruturais com exposição ao meio ambiente requer que o material atenda a padrões muito rigorosos de desempenho, durabilidade e segurança. O transporte de umidade em sistemas poliméricos está relacionado com a disponibilidade de "espaço livre" ou "volume livre" de tamanho molecular na estrutura do polímero, bem como sua afinidade com a água. [M. R. Vanlandingham, et al (1999)]. Essa disponibilidade de "espaços livres" depende da microestrutura, morfologia e densidade de reticulações, que são funções do grau de cura, estequiometria, rigidez das cadeias moleculares e densidade de energia coesiva do polímero. A afinidade polímero-água está relacionada à presença de campos de aderência de hidrogênio ao longo das cadeias poliméricas que criam locais de resistências atrativas entre as moléculas de água e as do polímero. Moléculas de água que estão livres para se mover através de vazios ou volume livre são conhecidas como moléculas adsorvidas. No caso dos epóxios, sabe-se também que eles têm um volume livre significativo, particularmente a temperaturas entre 50 e 150 ° C abaixo da Tg. A afinidade epoxi-água é relativamente forte porque os grupos hidroxilares (-OH) são criados pela abertura do grupo epóxi por reação com aminas primárias e secundárias. [M. J. Adamson, 1736]. Então, no caso destes compósitos baseados em fibras de carbono e matriz epóxi, aquelas propriedades que são dominadas pela matriz ou interface fibra-matriz são degradadas pela absorção de umidade enquanto aquelas dominadas por fibras não são essencialmente afetadas. Em particular, a resistência ao cisalhamento interfacial, a resistência ao cisalhamento interlaminar, e dependendo da sequência de empilhamento das lâminas de resina de fibra de carbono-epóxi no laminado, os efeitos de borda também se tornam pontos de possível iniciação de falha, bem como a tenacidade à fratura do modo II e interlaminar dureza. Esta degradação é atribuída ao enfraquecimento da

interfase fibra-matriz e ao inchamento da matriz e plastificação da matriz [J. I. Cauich-Cupul, et al (2011), E. Pérez-Pacheco, et al (2011), S. Wang et al, (2002), L.E. Asp, (1998), M. Todo, et al, (2000), R. Selzer et al (1995), MJ Adamson, (1980), DA Bond, (2005), MR Vanlandingham, et al (1999)]. . A absorção de umidade também pode causar uma diminuição das tensões residuais produzidas a partir dos gradientes térmicos de cura e, portanto, resultando em uma diminuição das propriedades da fratura. Os efeitos da umidade são consideravelmente agravados pela temperatura e mais complicados pela ação de tensões mecânicas impostas ao material [J. B. Aguiar, et al (2008)].

Além disso, esses materiais compósitos são expostos a diferentes condições ambientais durante sua vida útil, como umidade, temperatura e radiação ultravioleta e, portanto, à possibilidade de efeitos sinérgicos nos mecanismos de degradação. Portanto, há sempre uma preocupação com a durabilidade a longo prazo desses materiais a serem expostos a condições ambientais combinadas de umidade, temperatura e radiação ultravioleta. [Springer, G.S. (ed.) (1984), Ranby, B. e Rabek J. F., (1975)]. Tanto a radiação ultravioleta como a umidade têm efeitos negativos principalmente nas propriedades mecânicas da resina epóxi e da interface fibra-matriz, afetando a integridade do composto [W. B. Liau, et al, 1998].

O tema da durabilidade dos sistemas de reforço de CFRP como um todo tem sido uma grande preocupação em aplicações de reabilitação estrutural. Comportamento de vigas reforçadas com CFRP submetidas a ciclos de congelamento-descongelamento, úmido-seco e temperatura ou várias soluções aquosas antes do carregamento foram estudadas por um número limitado de pesquisadores (Bank, et al, 1995, Gheorghiu C. et al, 2004, Grace NF e outros 2005, Wang C. Y, e outros, 2004, Xie M., 1995, Katz A., 1999). Houve uma mudança fundamental na abordagem do assunto. Ao contrário de submeter um material compósito específico a uma exposição ambiental por um período de tempo específico e depois realizar ensaios mecânicos para obter “dados” para uso do projeto, a abordagem mais recente tem sido tentar desenvolver um conjunto químico e mecânico integrado de ensaios que fornecem uma compreensão dos mecanismos de degradação dentro do material compósito. Estes trabalhos combinam métodos de ensaios macromecânicos com investigações de mudanças na composição do material, juntamente com uma microscopia eletrônica de varredura para desenvolver modelos que tentam explicar a mudança de propriedades mecânicas em termos de mudanças quantitativas na natureza química dos materiais e observação qualitativa da degradação. fenômeno (Bank and Gentry, 1995).

Buyukozturk O, 1998 e Grace e Singh, 2005, e concluíram que a exposição a longo prazo à umidade é o fator mais prejudicial para a resistência de adesão entre chapas e tecidos CFRP e vigas RC. Vigas reforçadas com placas CFRP e expostas a 10.000 h de umidade de 100% (a 38 ± 2 °C) apresentaram uma redução média de 33% em sua resistência. O início da delaminação foi o principal modo de falha para todas as vigas de ensaio.

A durabilidade de fibras de carbono reforçada com polímeros (CFRP) em estacas pré-tracionadas conduzidas em águas de maré e um estudo experimental para avaliar o provável efeito da mudança de temperatura diurna / sazonal em doze vigas pré-fissuradas CFRP projetadas para falhar por ruptura das hastes de protensão foram mantidas ao ar livre em dois tanques de água salgada e submetidas simultaneamente a ciclos úmidos/secos (simulação de marés) e ciclos quentes/frios (simulando variação de temperatura), (Aiello, et al, 2001). A durabilidade foi avaliada a partir de ensaios de flexão realizados periodicamente ao longo do período de exposição de quase 3 anos. Os resultados dos ensaios indicaram que a durabilidade não foi afetada, embora tanto a degradação da aderência quanto as reduções na capacidade final tenham sido observadas em algumas das amostras expostas. A degradação parecia estar ligada à extensão do dano de pré-fissuração sofrido antes da exposição. Isso sugere que quando se utiliza CFRP em estacas pré-tracionadas, as tensões devem ser cuidadosamente monitoradas para minimizar os danos.

Devido à mudança de comportamento sob condições ambientais variáveis, pode-se dizer que uma compreensão completa dos efeitos desses materiais sobre o desempenho dos sistemas de retrofit

não foi alcançada. Em particular, vários mecanismos de falha que a viga de concreto reformado pode manifestar, incluindo os mecanismos de descolagem e delaminação do CFRP da viga de concreto, não são bem conhecidos. Mais estudos são necessários para desenvolver uma melhor compreensão da capacidade de cisalhamento das seções de retrofit, os efeitos nas regiões de ancoragem do laminado CFRP, e os mecanismos de falha de descolamento e delaminação. Os tópicos do estudo futuro também devem incluir os efeitos das compatibilidades materiais e suas resistências à degradação através de ciclos ambientais e de carga, e a avaliação da integridade do sistema adotado através do uso de avaliação não destrutiva [Nakaba 2001].

Estritamente falando, a aplicação de uma camada de laminado compósito reforçado com fibra no lado de tração da viga, seja colando um laminado ou formando um material compósito in situ, usando a resina epóxi e fibras orientadas unidirecionalmente em um têxtil, um procedimento usual e manual, resultará em duas interfaces, a interface concreto-resina e a interface fibra-matriz, como mostrado na figura 4. Ambas as fases são suscetíveis de serem afetadas pela exposição ao meio ambiente. No entanto, na literatura técnica sobre o assunto do reforço de vigas com CRFP, há apenas referência à interface concreto-laminado.

Karbhari e Engineer, 1996, investigaram a degradação da interface composto-concreto após a exposição a condições ambientais que incluem umidade, água do mar, congelamento e descongelamento. Nesta investigação, o desempenho das vigas laminadas foi considerado a partir de aspectos relacionados a materiais e durabilidade. O efeito de cinco condições ambientais diferentes foi estudado e eles mostraram que a seleção do sistema de resina apropriado é crítica para o sucesso e apontou os perigos da seleção de sistemas com baixas temperaturas de transição vítrea e quedas drásticas no módulo instantâneo em função da temperatura. Os resultados indicaram que a degradação ocorre principalmente ao nível da resina em contato com o concreto, e que o devido cuidado deve ser tomado pelas mudanças na rigidez do compósito devido à exposição à umidade e à consequente plastificação da resina, assim como pela rigidez aumentar sob condições frias. (Aiello, et al., 2001, Plevris N, 1999, Soudki KA 2000, Wang CY 2004).

J.I. Cauich-Cupul et al, (2011) estudaram o efeito da absorção de umidade na interface em compósitos epóxi-simples IM7-fibra de carbono e mostraram um efeito prejudicial sobre as propriedades mecânicas da matriz, e essa deterioração foi atribuída a uma diminuição de sua temperatura de transição vítrea. Três níveis da interface fibra-epóxi de carbono IM7 foram estudados. O primeiro foi a fibra de carbono IM7 com o dimensionamento removido, então, o nível de adesão da matriz-fibra foi aumentado usando um agente de adesão de silano para tratar a superfície da fibra IM7 e terceiro, as fibras IM7 foram tratadas com ácido nítrico para produzir mais locais de reação química com o agente de adesão de silano.

A qualidade da interface fibra-matriz foi avaliada usando o ensaio de fragmentação de fibra única e o comprimento do fragmento de fibra, considerado como um indicador de qualidade interfacial que indicou um efeito contínuo de deterioração da absorção de umidade. Isto é, um comprimento curto de fragmento de fibra indicou uma forte interface de matriz de fibra e uma interface de matriz de fibra fraca (ou deteriorada) foi indicada por um longo comprimento de fragmento de fibra (ver figura 5). Além disso, o papel do inchamento da matriz por causa da absorção de umidade nas tensões residuais é considerado importante quando se considera a deterioração das propriedades de cisalhamento interfacial. A contribuição das tensões radiais diminuiu rapidamente e o componente mecânico da adesão fibra-matriz também diminuiu rapidamente para maiores teores de umidade na matriz e / ou interface.

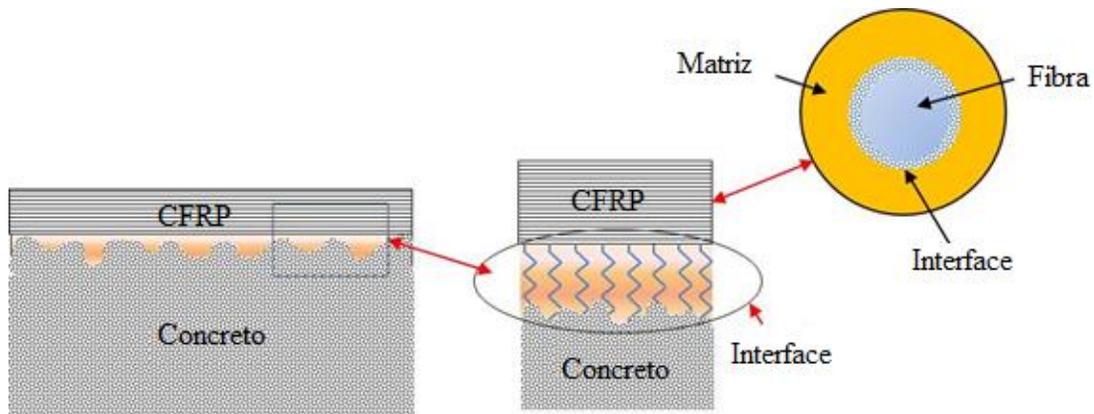


Figura 4. Representação esquemática da formação de interfaces duplas formadas pelo uso de laminados ou tecidos para reforçar vigas de concreto armado. Uma interface concreto-resina e uma interface fibra-matriz.

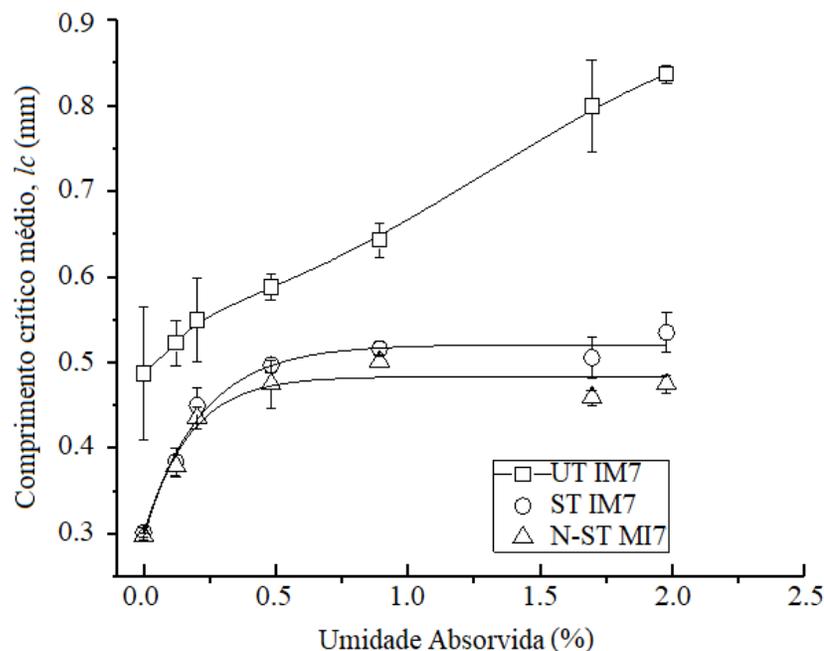


Figura 5. Comprimento do fragmento de fibra em função da umidade absorvida na interface da matriz no compósito, para fibras de carbono superficiais não tratadas (UT IM7); superfície tratada com agente de adesão de silano Fibras de carbono IM7 (ST IM7) e fibras de carbono de superfície IM7 tratadas com ácido nítrico e agente de adesão de silano (N-ST IM7), (J. I. Cauch-Cupul et al., 2011)

Perez-Pacheco, et al (2013) concluíram que a microestrutura da interface desempenhou um papel significativo no processo de difusão de umidade em um laminado de fibra de carbono-epóxi. A Figura 6 mostra as isotermas de absorção de umidade para um laminado composto submetido a vários ambientes de umidade relativa. Eles também concluíram que os efeitos da umidade absorvida na região interfacial prejudicavam a resistência interfacial entre a fibra e a matriz epóxi e, portanto, o desempenho do compósito. O uso de 3-glicidoxipropiltrimetoxissilano como agente de adesão de matriz de fibras aumentou a adesão da matriz de fibras. As tensões de plastificação, intumescimento e qualquer degradação epoxídica devido à hidrólise podem ter contribuído para os mecanismos de falha da matriz. Plastificação da matriz epóxi pela umidade leva à mudança na temperatura de transição vítrea (T_g), afetando a resposta mecânica do compósito. Foi observado que a resistência à tração dos laminados feitos com o agente de adesão de silano mostrou uma

diminuição, mas após uma absorção de umidade de aproximadamente 0,45%, a resistência à tração permaneceu constante. Então, o uso de um agente de adesão de silano adequado para melhorar a adesão resultou em propriedades mecânicas melhoradas e reduziu a dependência das propriedades da umidade sob carga de tração (ver figuras 7 e 8).

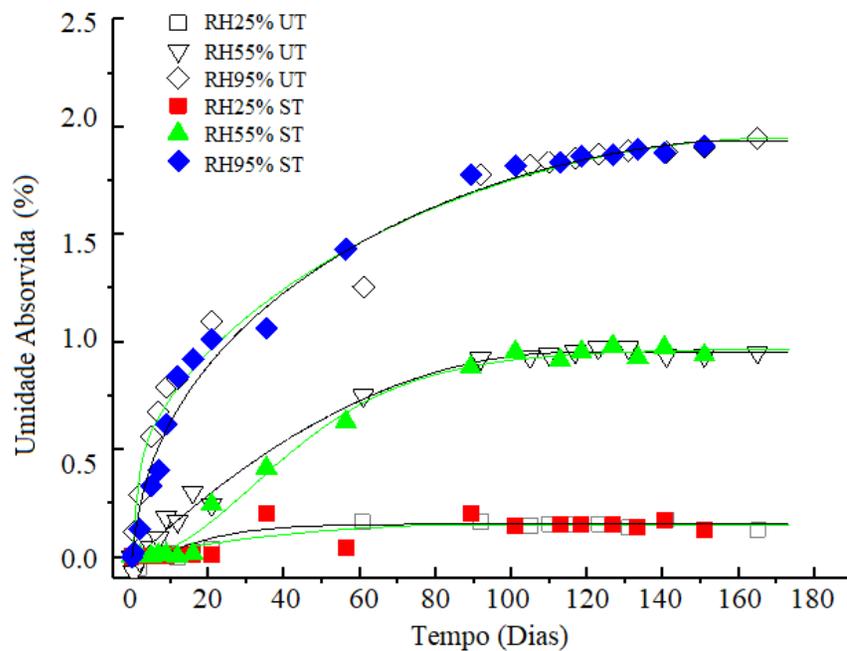


Figura 6. Absorção de umidade no laminado de material compósito para diferentes ambientes de umidade relativa. Sem tratamento: (UT) tratamento de superfície com silano (ST). RH25% UT, RH55% UT e RH95% UT, e com fibras tratadas superficialmente com silano RH25% ST, RH55% ST e RH95% ST. (Perez-Pacheco, et al (2013))

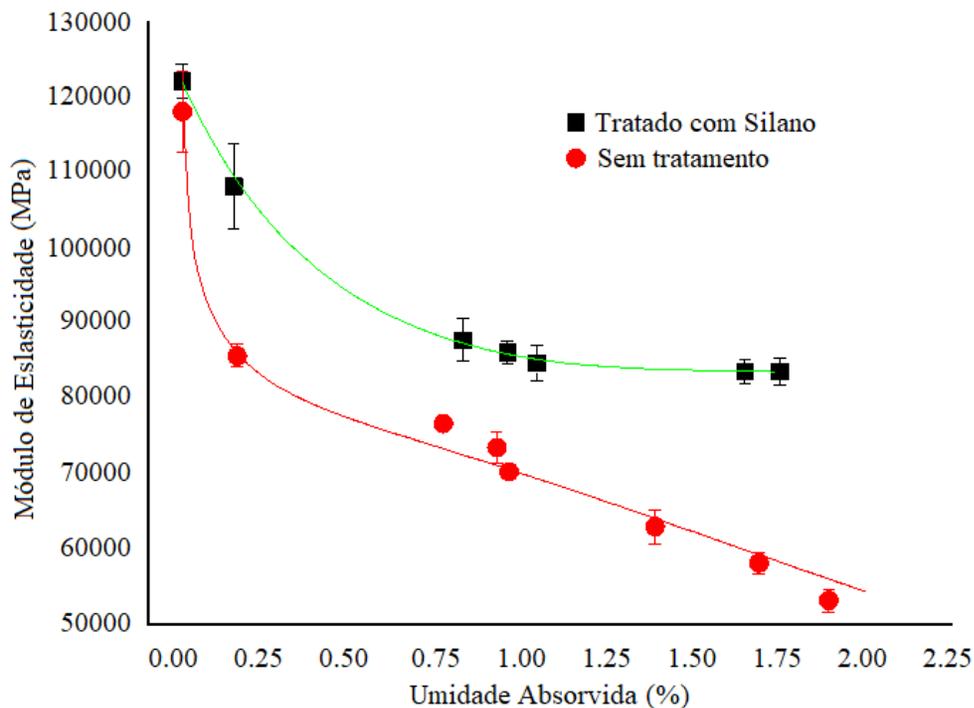


Figura 7. Comportamento do módulo elástico em relação à umidade absorvida pelo material compósito com a fibra tratada e não tratada, respectivamente. (Perez-Pacheco, et al, 2013)

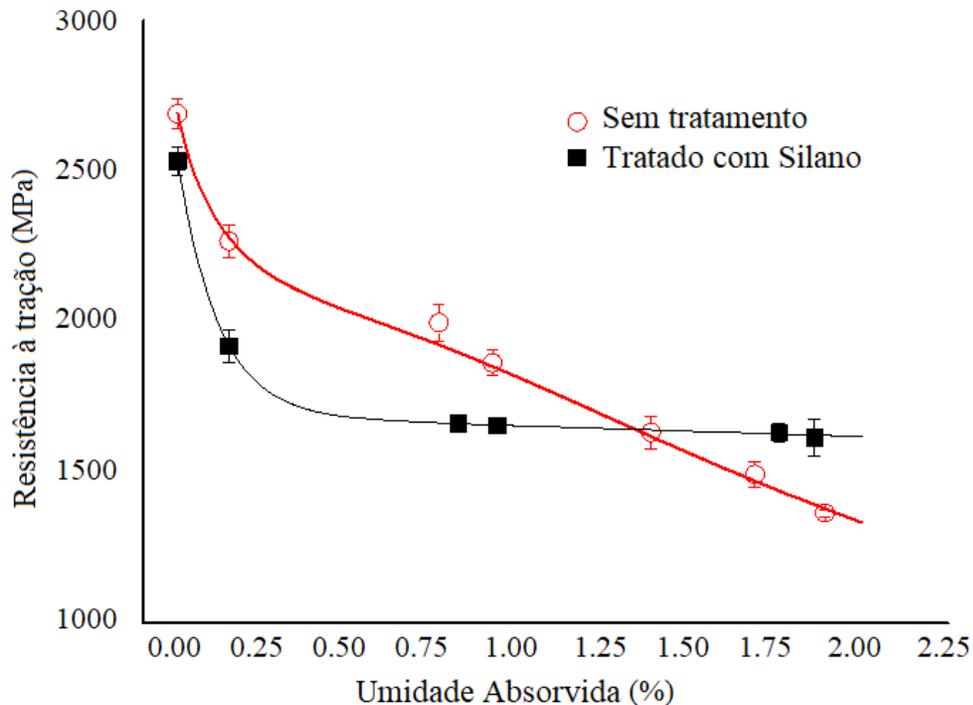


Figura 8. Resistência à tração de um material CFRP fabricado de material compósito após sofrer degradação higroscópica, para duas condições diferentes de interface fibra-matriz, ou seja, para fibras tratadas e não tratadas, respectivamente (Perez-Pacheco, et al, 2013)

O comportamento e o potencial da combinação de proteção contra corrosão e técnicas de reparo com CFRP para a reabilitação de vigas RC danificadas pela corrosão foi demonstrado por Swamy RN et al, 1999 e Sebastian WM, 2001. Eles descobriram que este tipo de arranjo pode melhorar a capacidade de carga de vigas RC corroídas e fornece o espaço para o revestimento dos materiais de proteção contra corrosão. Eles também propuseram que as tiras de ancoragem em U igualmente espaçadas, juntamente com as tiras longitudinais, formem um sistema de reforço externo para a viga RC corroída, que restringe a extensão da fibra na direção longitudinal na área de interseção. Como o valor da deformação é maior neste local, permite o uso total da resistência do material compósito fibroso. Portanto, qualquer projeto que possa reduzir o efeito da concentração de tensão na área de interseção das tiras de ancoragem longitudinais e em U pode ajudar a viga a escapar do modo de falha prematura da ruptura da fibra e atingir sua capacidade de carga projetada.

Como pode ser visto, as questões ambientais são extremamente importantes ao projetar uma junta laminada de compósito de concreto para a reabilitação de vigas. Todos os modelos descritos no item 2.1 deste trabalho consideram as propriedades mecânicas do laminado compósito, que, como visto nas figuras 7 e 8, diminuem em função da umidade absorvida. Portanto, o laminado compósito deve ser projetado com dimensões como espessura e largura, apropriadas aos valores de rigidez e resistência, sejam aquelas propriedades estimadas após serem degradadas pela absorção de umidade ou pela inclusão de um fator de segurança apropriado às propriedades mecânicas compostas antes da exposição ao ambiente. Outra abordagem seria fornecer um revestimento protetor para evitar a absorção de umidade, especialmente nas bordas do laminado.

4. CONCLUSÃO

Um método eficaz para reforçar as vigas de concreto existentes na flexão consiste na colagem de laminados compósitos reforçados com fibras nas faces de tração das vigas. No entanto, muitas vezes é difícil desenvolver a capacidade total de resistência composta devido a falha prematura devido a delaminação e descolamento do laminado. As condições na interface entre o compósito e o concreto requerem um entendimento completo, e estudos preliminares dos parâmetros de adesão entre o compósito e o concreto são necessários para determinar os comprimentos efetivos de transferência de tensão necessários para atingir a capacidade de resistência do compósito. Uma análise teórica para o comportamento de juntas aderidas de material composto-concreto também foi incluída nesta revisão. A durabilidade da interface material composto-concreto também é muito importante, especialmente quando a estrutura é exposta tanto à temperatura quanto à umidade. Na literatura técnica, nenhuma referência é feita às duas questões interfaciais, ou seja, a interface resina polimérica-concreto e a interface fibra-matriz no próprio compósito. A durabilidade do laminado compósito mostra-se afetada pela absorção de umidade, resultando assim em uma redução de resistência e rigidez superior a 30%.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola de Engenharia Civil da Universidad Marista de Mérida pelo gentil apoio dado ao Sr. Poot Cauich e pelo fornecimento de materiais para o trabalho experimental.

6. REFERÊNCIAS

- Adamson, M. J. (1980), *Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials*, Journal of Materials Science, Volume 15, I (7): 1736–1745, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00550593>
- Adhikary, B. B. and Mutsuyoshi, H., (2001). *Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet*, Proceedings of the 5th international symposium on fiber reinforced Concrete structures (FRPCRS-5), Thomas Telford Publishing, 371-378.
- Aguiar, J. B., Camoes, A. and Vaz, N. F. (2008), *Effect of temperature on RC elements strengthened with CFRP*. Materials and Structures 41:1133–1142, DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9311-4>
- Aiello, M. A., Focacci, F., Nanni, A. (2001), *Effects of thermal loads on concrete cover of fiber-reinforced polymer reinforced elements: theoretical and experimental analysis*. ACI Materials Journal, 98(4):332–339.
- Bank, L. C., Gentry, T. R., Barkatt, A. (1995), *Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14(6), 559–587, DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449501400602>
- Bizindavyi, L., Neale, K. W. (1999), *Transfer lengths and bond strength for composites bonded to concrete*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 3(4):153–160. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:4\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:4(153))
- Bond, D. A. (2005), *Moisture Diffusion in a Fiber-reinforced Composite: Part I – Non-Fickian Transport and the Effect of Fiber Spatial Distribution*, Journal of Composite Materials, Vol. 39(23): 2113-2141, <https://doi.org/10.1177/0021998305052030>
- Buyukozturk, O., Hearing, B. (1998), *Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP*. ASCE, Journal of Composites for Construction; 2(3):138–144, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:3\(138\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:3(138))

- Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2004), *Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites*. Construction and Building Materials, 18:9-19, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00094-1)
- Camli, U. S. and Binici, B. (2007), *Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry*. Construction and Building Materials, 21:1431-1446, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.003>
- Cauich-Cupul, J. I, Pérez-Pacheco, E., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P. J., (2011), *Effect of moisture absorption on the micromechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites*, Journal of Materials Science, 46:6664–6672, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5619-0>
- Chajes, M. J., Finch, W. W., Januszka, T. F., Thomson, T. A. (1996), *Bond and force transfer of composite materials plates bonded to concrete*. ACI Structural Journal, 93(2): 208–217.
- Chen, F. J., Teng, G, J. (2001), *Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete*, Journal of Structural Engineering, 127(7): 784-791, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(784\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784))
- Cho, J.-R., Park, S. Y., Cho, K., Kim, S. T., Kim, B.-S. (2012) *Pull-out test and discrete spring model of fibre-reinforced polymer perfobond rib shear connector*, Canadian Journal of Civil Engineering, 39(12): 1311-1320, DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0573>
- CNR—Italian Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (2004), “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC Structures, Masonry Structures (CNR-DT 200/2004)*” Rome, Italy, 144 pp
- Dai, J. G., Ueda, T. and Sato, Y. (2006), *Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pull-out tests*. Journal of Advanced Concrete Technology, 4:133-145, DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.4.133>
- De Lorenzis, L., Miller, B., Nanni A. (2001), *Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete*. ACI Materials Journal, 98(3): 256-264.
- Ferreira, M. P., Oliveira, M. H., Lima Neto, A. F., Tapajós, L. S., Nascimento, A., Freire, M. C. (2018), “*Influence of anchorage on flexural strength of beams strengthened with CFRP sheets*”, Revista ALCONPAT, 9 (1): 30 – 47, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>
- FIB (2001), *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, FIB bulletin 14 Technical Report.
- Gheorghiu, C., Labossiere, P., Raiche, A. (2004), *Environmental fatigue and static behavior of RC beams strengthened with carbon-fiber reinforced polymer*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 8(3):211–218, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:3\(211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(211))
- Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., Saleh, K. R. (1999), *Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminate*. ACI Structural Journal, 96(5):865–874.
- Grace N. F., Singh S. B. (2005), *Durability evaluation of carbon fiber-reinforced polymer strengthened concrete beams: experimental study and design*. ACI Structural Journal, 102(1):40–53.
- Hamoush, S. A., Ahmad, S. H. (1990), *Static strength tests of steel plate strengthened concrete beams*. Materials and Structures; 23:116–125, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472571>
- Hamze-Ziabari, S. M. and Yasalovi, A. (2017), *Predicting bond strength between FRP plates and concrete substrate: Applications of GMDH and MNL approaches*, Journal of Advanced Concrete Technology 15: 644-661, DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.15.644>
- Hawileh, R. A., Nawaz, W., Abdalla, J. A., Saqan, E. I. (2015), *Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams*, Composite Structures 122: 468–476, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.010>

- Japan Concrete Institute JCI. 2003. "Technical report of technical committee on retrofit technology." Proc., Int. Symp. on the Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures, Sapporo, Japan
- Jeffries, J. M., (2004), *Bond behavior of fiber reinforced polymer laminates to concrete subjected to varied surface preparation*". Masters Theses. 2498.
- Karbhari, V. M., Engineer, M. (1996), *Effect of environmental exposure on the external strengthening of concrete with composite–short term bond durability*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 15:1194–1216., DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449601501202>
- Karbhari, V. M., Shulley, S. B. (1995), *Use of composites for rehabilitation of steel structures – determination of bond durability*. ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, 7(4):239–245, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1995\)7:4\(239\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(239))
- Karbhari, V. M., Zhao, L. (1998), *Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening*. Composite Structures, 40(3-4):293–304, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00031-2)
- Katz, A., Berman, N., Bank, L. C. (1999), *Effect of high temperatures on bond strength of FRP rebars*. ASCE Journal of Composites for Construction, 3(2):73–81, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73))
- Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A. and Aziz, A. (1998). *Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC members*, Journal of Composites and Construction, ASCE, 2(4):195-203, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(195))
- Khan, A. R. and Shamsoun, F. (2014), *Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Wraps with and without End Anchorages*, Procedia Engineering 77: 123 – 130, <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.011>
- Asp, L. E. (1998), *The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite*. Composites Science and Technology, Vol. 58, (6): 967-977, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00222-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00222-4)
- Leung, C. K. Y. (2001), *Delamination failure in concrete beams retrofitted with a bonded plate, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 13, Issue 2, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:2\(106\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:2(106))
- Liau, W. B., Tseng, F. P. (1998), *The effect of long-term ultraviolet light irradiation on polymer matrix composites*, Polymer Composites, 19:440-445, DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.10118>
- Lorenzis, L. D., Miller, B., Nanni, A. (2001), *Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete*. ACI Materials Journal, 98(3):256–264.
- Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., Jiang, J. J. (2005), *Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete*, Engineering Structures, 27: 920-937, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.01.014>
- Lu, X. Z., Ye, L. P., Teng, J. G. and Jiang, J. J. (2005), *Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete*. Engineering Structures, 27(4): 564-575, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.015>
- Vanlandingham, M. R., Eduljee, R. F., Gillespie Jr., J. W. (1999), *Moisture Diffusion in Epoxy Systems*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 71, 787-798, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990131\)71:5<787::AID-APP12>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990131)71:5<787::AID-APP12>3.0.CO;2-A)
- Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y. Ueda, T. and Kakuta, Y. (1997). *A study on bond mechanism of carbon fiber sheet*, in Proceedings of 3rd international symposium on nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Sapporo, Japan Concrete Institute, 1:279-285
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1998), *Theoretical stress–strain model for confined concrete*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 114(8):1804–1826, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))

- Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., Yoshizawa, H. (2001), *Bond behavior between fiber reinforced polymer laminates and concrete*. ACI Structural Journal, 98(3):359–367.
- Neubauer, U. and Rostasy, F. S. (1997), *Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates*. Proceedings of seventh international conference on structural faults and repairs, Edinburgh, ECS Publications, 1:109-118.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. (1997), *Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 23(7):903–911, 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))
- Pendhari, S. S., Kant, T., Desai, Y. M. (2008), *Application of polymer composites in civil construction: A general review*. Composite Structures 84:114–124, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.06.007>
- Pérez-Pacheco, E., Cauich-Cupul, J. I., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P. J. (2013), *Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites*, Journal of Materials Science, 48:1873–1882, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6947-4>
- Pérez-Pacheco, E., Moreno-Chulim, M. V., Valadez-González, A., Rios-Soberanis, C. R. and Herrera-Franco, P. J., (2011), *Effect of the interphase microstructure on the behavior of carbon fiber/epoxy resin model composite in a thermal environment*, Journal of Materials Science, 46:4026–4033, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5331-0>
- Plevris, N., Triantafillou, T. C., (1994), *Time-dependent behavior of RC members strengthened with FRP laminates*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 120(3):1016–1042, 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))
- Selzer, R. and Friedrich, K. (1995), *Influence of water up-take on interlaminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites*. Journal of Materials Science, Vol. 30, No. 2, 334, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00354392>
- Saadatmanesh, H., Tannous, F. E. (1999). *Long term behavior of aramid fiber reinforced plastic (AFRP) tendons*. ACI Materials Journal, 96(3):297–305.
- Sebastian, W. M. (2001), *Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams*. ASCE, Journal of Structural Engineering, 127(7):792–798, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(792\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(792))
- Springer, G. S. (1984), *Environmental Effects on Composite Materials*, Vol. 1, Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc.
- Swamy, R. N., Jones, R., Bloxham, J. W. (1987), *Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates*. Structural Engineer, 65(2):59–68.
- Swamy, R. N., Mukhopadhyaya, P. (1999), *Debonding of carbon-fibre-reinforced polymer plate from concrete beams*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 134:301–317, DOI: <https://doi.org/10.1680/istbu.1999.31897>
- Täljsten, B. (1997), *Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 17(4):319–327, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(97\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(97)00018-3)
- Tanaka, T., (1996), *Shear resisting mechanism of reinforced concrete beams with CFS as shear reinforcement*, Thesis (PhD). Hokkaido University.
- Lim, T.-Y., Paramasivam, P. and Lee, S.-L. (1987), *Behavior of Reinforced Steel-Fiber-Concrete Beams in Flexure*. Journal of Structural Engineering; 113-12:2439. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:12\(2439\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:12(2439))
- Todo, M., Nakamura, T. and Takahashi, K. (2000), *Effects of moisture absorption on the dynamic interlaminar fracture toughness of carbon/epoxy composites*. Journal of Composite Materials, 34(8): 630–648, DOI: <https://doi.org/10.1177/002199830003400801>

- Van Gemert, D. (1980), *Force transfer in epoxy-bonded steel-concrete joints*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 1, 67-72(1. 996), DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(80\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(80)90060-3)
- Vanlandingham, M. R., Eduljee, R. F., Gillespie, J. W. Jr., (1999), *Relationships between Stoichiometry, Microstructure, and Properties for Amine-Cured Epoxies*, Journal of Applied Polymer Science; 71: 699–712, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990131\)71:5<699::AID-APP4>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990131)71:5<699::AID-APP4>3.0.CO;2-D)
- Wang, C. Y., Shih, C. C., Hong, S. C., Hwang, W. C. (2004), *Rehabilitation of cracked and corroded reinforced concrete beams with fiber-reinforced plastic patches*. ASCE, Journal of Composites for Construction, 8(3):219–28, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:3\(219\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:3(219))
- Wang, S. and Chung, D. D. L. (2002), *Effect of moisture on the interlaminar interface of a carbon fiber polymer-matrix composites, studied by contact electrical resistivity measurement*, Composite Interfaces, Vol. 9, No. 5: 453-458, DOI: <https://doi.org/10.1163/15685540260256546>
- Xie, M., Hoa, S. V., Xiao, X. R. (1995), *Bonding steel reinforced concrete with composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14:949–63, DOI: <https://doi.org/10.1177/073168449501400903>
- Yuan, H., Wu, Z. and Yoshizawa, H. (2001), *Theoretical Solutions on Interfacial Stress Transfer of Externally Bonded Steel/Composite Laminates*. Doboku Gakkai Ronbunshu, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, 18 (675): 1-55, DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.2001.675_27