

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

P. J. Poot Cauch¹ , R. Martínez-Molina¹ , J. L. Gamboa Marrufo¹ , P. J. Herrera Franco^{2*} 

*Autor de Contacto: pherrera@cicy.mx

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

Recepción: 30/03/2019 | Aceptación: 22/04/2019 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Paulo Helene

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: materiales compuestos de fibras de carbón; interfase resina-concreto; interfase fibra-matriz; reacondicionamiento; adhesión.

Citar como: Poot Cauch, P. J., Martínez-Molina, R., Gamboa Marrufo, J. L., Herrera Franco, P. J. (2019), "Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (PRFC) - Una revisión", 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.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 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.

Adesão, fortalecimento e problemas de durabilidade na restauração de varredura Concreto Reforçado (CR) usando o Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão

RESUMO

Este artigo aborda a mecânica de aderência, o efeito de fortalecimento e a durabilidade de aplicações compostas de composto de CFRP em vigas. A aplicação de materiais CFRP foi descrita extensivamente, mas o foco principal tem sido nos parâmetros gerais de falha. O primeiro problema é fortalecer a capacidade de reforço do CFRP para vigas de concreto. O segundo é o relacionamento local tensão-escorregamento do link de interface, isto é, o escorregamento local deslizamento local τ . O último problema é a durabilidade da chapa / chapa CFRP, quando exposta a um ambiente hidrotermal. O papel da adesão e a mecânica da aderência do concreto CFRP e uma boa compreensão da interface entre o CFRP e o comportamento do concreto é o fator chave no controle de falhas de desunião em feixes CR reforçados com CFRP.

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

NOMENCLATURE

a – longitud de cortante	β_1 – Coeficiente que determina la aproximación de la curva de compresión resultante del concreto a un rectángulo de acuerdo con las recomendaciones de ACI 440-2R (2008)
b_f – ancho de capa de PRFC	ϵ_{bi} – Deformación encontrada en el recubrimiento del refuerzo de tensión en la viga antes del refuerzo.
b_w – ancho de la viga	ϵ_c – Deformación del concreto
b_p – ancho de la placa de PRFC adherida	ϵ_{cu} – Deformación última del concreto
b_c – ancho de concreto en experimento de extensión	ϵ_f – Deformación de la fibra de carbono
L_b – Longitud de PRFC adherida	
L_e – Longitud efectiva de PRFC	
T_p – Espesor de la placa de PRFC adherida	
c – Altura del bloque de compresión rectangular equivalente del concreto.	

c_1 – Factor obtenido por calibración de resultados (igual a 0.64 para PRFC)
 d – Altura efectiva de la viga
 d' – Posición del centroide del refuerzo comprimido.
 f_c – Resistencia a la compresión del concreto
 f_{ctm} – Resistencia media a la tensión del concreto.
 f_{fe} – Fuerza efectiva del PRFC
 f_s – Fuerza del acero
 A_f – Área de refuerzo aplicada al
 A_s – Área de acero del refuerzo de tensión.
 A_s' – Área de acero de refuerzo comprimido.
 E_f – Módulo de elasticidad del PRFC
 E_s – Módulo de elasticidad del acero
 F_{cc} – Compresión resultante
 L – Longitud total de la viga
 P – Carga aplicada en la prueba experimental
 T_s – Componente de tensión debido al refuerzo de tensión.
 α – Coeficiente de reducción debido a la propagación de grietas inclinadas.

ε_{fd} – Valor límite de la de deformación de la fibra que se adoptará en el dimensionamiento y verificación del refuerzo.
 ε_{fe} – Deformación efectiva en el FRP
 ε_{fu} – Deformación máxima observada en el polímero en el momento del fallo.
 ε_s – Deformación en el refuerzo a tensión.
 ε_s' – Deformación en el refuerzo comprimido.
 ε_{ys} – Deformación de rendimiento del refuerzo flexural.
 G_f – Energía de fractura interfacial
 s – Deslizamiento local;
 s_e – Componente elástico del deslizamiento local.;
 s_f – Deslizamiento local cuando el esfuerzo de la adherencia τ se reduce a cero
 s_0 – Deslizamiento local a τ_{max} ;
 B_l – factor de longitud de enlace;
 B_w – factor de relación de ancho;
 τ – Esfuerzo de adherencia local;
 τ_{max} – Esfuerzo máximo de la adhesión local;
 τ_u – Esfuerzo de adhesión promedio.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas cuatro décadas, el desarrollo de materiales desde el punto de vista teórico y tecnológico de los materiales compuestos avanzados ha resultado en un uso más amplio de los mismos. Sus propiedades de ingeniería sobresalientes, como alta resistencia y rigidez específicas, menor densidad, alta resistencia a la fatiga, alto amortiguamiento y bajo coeficiente térmico (en la dirección de la fibra), etc., han resultado en un uso constante en las industrias aeroespacial, marina y automotriz.

Las estructuras de concreto reforzado pueden dañarse después de algunos años de servicio o exposición a ambientes agresivos, como los marinos y/o industriales, y por lo tanto necesitan reparación. Luego, para permitir una capacidad de carga más alta que el valor de diseño original, los miembros estructurales deben ser adaptados. La corrosión es una de las principales causas del deterioro de la infraestructura civil, especialmente de los puentes de acero, con consecuencias que van desde el debilitamiento progresivo de los elementos estructurales debido al agrietamiento y la pérdida de la sección transversal, hasta el colapso repentino. Los altos índices de resistencia a peso y rigidez a peso de los materiales compuestos los hacen atractivos para su uso en rehabilitación de infraestructura. Una técnica de reparación / remodelación común para vigas de concreto, es unir una placa al sofito de la viga. Inicialmente, se emplearon planchas de acero y, más recientemente, se ha prestado atención al uso de planchas de plástico reforzado con fibra de carbono (PRFC), que ofrecen mayor resistencia / peso, y varios atributos atractivos mencionados anteriormente y una mayor durabilidad sobre sus contrapartes de acero. Además, estos materiales compuestos avanzados se están considerando como un reemplazo del acero convencional en estructuras de concreto reforzado debido a una disminución continua del costo de los materiales de PRFC y al

desarrollo de adhesivos sintéticos basados en resinas epoxi, (CKY Leung, (2001), Swamy RN et al, (1987), Hamoush SA (1990), Norris, (1997), Karbhari, et al, (1995), Saadatmanesh, (1995)). Se ha estudiado el rendimiento del PRFC como agente de refuerzo para elementos de concreto, a partir del método estructural, de materiales y de aplicación. El reforzamiento a la flexión de las vigas CR que utilizan materiales compuestos se puede proporcionar mediante la unión con epoxi de la placa PRFC a la porción de los elementos sometidos a esfuerzos de tensión, con fibras paralelas a la dirección del esfuerzo principal. Si las fibras de material compuesto se colocan perpendiculares a las grietas, se logra un gran aumento de resistencia y rigidez en comparación con la situación en la que las fibras se colocan oblicuas a las grietas. Además, la mejora de la refuerzo de vigas de CR de aproximadamente 200% se logra con materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC). El rendimiento de flexión de las vigas CR reforzadas se ve afectado por varios factores, como el módulo de elasticidad de PRFC y su ubicación del centro de gravedad con respecto al eje neutro, el ancho del laminado, la longitud del laminado, la cantidad de refuerzo principal y de cizallamiento, el número de capas de PRFC, nivel de carga, configuración de laminación, resistencia y cobertura del concreto, daños y condiciones de carga, etc. (Sandeep S. et al, 2008).

La adhesión del PRFC externo al sustrato de concreto es de importancia crítica para la eficacia del mecanismo de refuerzo, ya que significa la transferencia de esfuerzos entre el concreto y la PRFC con el fin de desarrollar una acción compuesta. Varios informes se pueden encontrar en la literatura técnica de diferentes estudios de aspectos que afectan a la eficiencia del refuerzo del PRFC.

El principal objetivo de este trabajo es revisar la literatura (analítica/experimental) de los diferentes parámetros que afectan a los mecanismos de transferencia de carga desde el elemento de CR al PRFC y para analizar los efectos de diversos parámetros que afectan a la durabilidad, sobre todo, parámetros relacionada con la interfaz adhesivo-concreto, así como el desempeño del laminado de material compuesto cuando se expone a ambientes higo-térmicos. La discusión se mantiene en un nivel descriptivo y se aconseja al lector que consulte las referencias citadas para los detalles de los parámetros y modelos matemáticos.

Chajes, M.J. et al, (1996) estudiaron parámetros tales como la resistencia en la resistencia media de la unión y la transferencia de fuerza de las placas de material compuesto al concreto. Observaron que dos mecanismos de falla rigen el corte del concreto debajo de la superficie del concreto y la falla de tipo cohesivo, dependiendo del tipo de adhesivo y concreto. También mostraron que la preparación de la superficie del concreto puede influir en la resistencia de la unión. Yoshizawa et al. (1996) realizaron estudios similares, que informaron que la rugosidad de la cara del concreto tenía un efecto en la capacidad de carga de la muestra. Además, cuando el modo de falla de la junta se regía por el corte del concreto, la resistencia final de la unión era proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia del concreto f'_c . También encontraron que existe una longitud de unión efectiva para una junta más allá de la cual no se puede lograr un aumento adicional en la carga de falla.

2. LA MECÁNICA DE LA ADHESIÓN CONCRETO-PRFC

2.1 Análisis lineal de la junta de concreto-PRFC adherida.

La separación entre el concreto y las láminas/tiras de PRFC unidas externamente en los casos de refuerzo de flexión y corte reduce la eficiencia de refuerzo de los materiales de PRFC o causa una deficiencia en la ductilidad de los miembros (Dai, et al, 2005). Se ha demostrado que la resistencia de unión de la interfaz o la propiedad de esfuerzo-deslizamiento local influyen en la resistencia máxima a la flexión o al corte de los miembros de CR restituidos utilizando PRFC por medio de modelos analíticos (Buyukozturk y Hearing 1998, fib 2001) dando nacimiento a varios modelos de resistencias de unión, longitud de anclaje y de esfuerzo-deslizamiento local (Chen y Teng, 2001). Según lo declarado por Lu, et al (2005), un modelo preciso de deslizamiento de enlace es de fundamental importancia en el modelado de la estructura de CR reforzada con FRP. Una buena

comprensión del comportamiento de la interfaz entre el PRFC y el concreto es el factor clave que controla las fallas de desunión en las estructuras de CR reforzadas con PRFC. Por lo tanto, para el diseño seguro y económico de los sistemas PRFC adheridos externamente, en este documento hacemos referencia al análisis presentado por De Lorenzis, L. 2001, y mencionamos otros modelos disponibles en la literatura técnica (ver Figura 1), (Taljsten B. 1997, Bizindavyi L. 1999, Mander JB 1998, Jeffries, JM 2001).

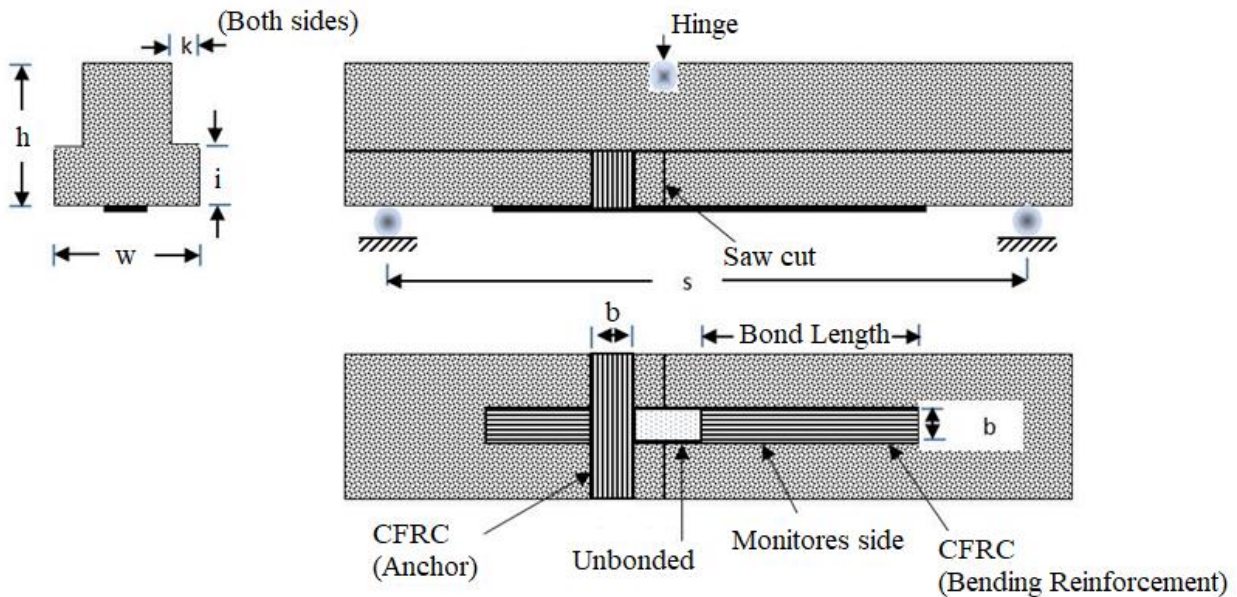


Figura 1. Especimen de prueba mostrando las dimensiones de la viga de concreto y la posición y las dimensiones del refuerzo de flexión de CFRC, así como el anclaje de PRFC. (Según De Lorenzis, L. 2001)

Considerando el equilibrio estático y las relaciones de compatibilidad de un elemento diferencial de hoja de longitud dx , y asumiendo un comportamiento elástico lineal de la hoja PRFC y que la rigidez del concreto es mucho mayor que la rigidez del compuesto, es decir, una deformación despreciable en el Concreto y que el adhesivo esté sujeto a fuerzas de corte solamente, se obtiene la siguiente ecuación diferencial. A niveles de carga moderados, se puede adoptar un comportamiento del esfuerzo de adherencia-deslizamiento local lineal:

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

Donde s es el deslizamiento, τ es esfuerzo de unión, x la coordenada a lo largo de la longitud unida del laminado, t el espesor y E el módulo elástico del PRFC. A niveles de carga moderados, se puede adoptar un comportamiento de deslizamiento de tensión de unión lineal. Una solución de la ecuación 1 es

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

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

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

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

Las constantes C_1 y C_2 se pueden determinar a partir de las condiciones de frontera. Si el origen de la coordenada x corresponde al extremo libre de la hoja ($x = 0$), donde no existe deformación, y $x = l$ (siendo l la longitud unida) corresponde al final de la hoja PRFC donde está la carga externa aplicadas directamente, las condiciones de frontera son:

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

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

Y las ecuaciones 2a-c quedan como

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

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

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

El módulo de deslizamiento K puede estimarse utilizando un modelo de corte simple como la relación del módulo de corte del adhesivo y el espesor de la capa adhesiva. Además, cuando se utiliza PRFC basado en hojas en lugar de placas, el módulo de deslizamiento $K = G_{int}/t_{int}$ es decir, la relación del módulo de corte de FRPC, G_{int} y el grosor de la interfaz t_{int} donde G_{int} es el módulo de corte de la interfaz de lámina de concreto FRPC. y t_{int} es el grosor de la interfaz, se puede evaluar de la siguiente manera: cuando el material compuesto se forma in situ, utilizando la técnica de colocación en húmedo, el sistema de resina sirve intrínsecamente como matriz para el compuesto y la capa intermedia entre el concreto y el compuesto, es decir, como la capa adhesiva. Esta capa es el medio principal para la transferencia de esfuerzos cortantes entre el material compuesto y el concreto. Para la estimación de G_{int} , la capa de imprimación también debe ser considerada. Por lo tanto, G_{int} , y t_{int} se pueden calcular a partir de los espesores obtenidos de microscopía electrónica de barrido y de las propiedades elásticas de la resina y del primer, la regla de la mezcla para el módulo de corte:

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

Donde:

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

La ecuación 7 también se puede usar para estimar el módulo de corte del acoplador. Las curvas de deslizamiento τ -locales se pueden obtener a partir de datos experimentales de la siguiente manera. El esfuerzo de adherencia, τ , se puede encontrar por el equilibrio de fuerzas, considerando también la elasticidad lineal del FRPC.

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

Donde ε_r es la deformación del PRFC hasta el fallo, por lo tanto, el diagrama $\tau(x)$ se puede obtener a partir de la primera derivada del diagrama de deformación contra posición multiplicado por el módulo de elasticidad E y el espesor.

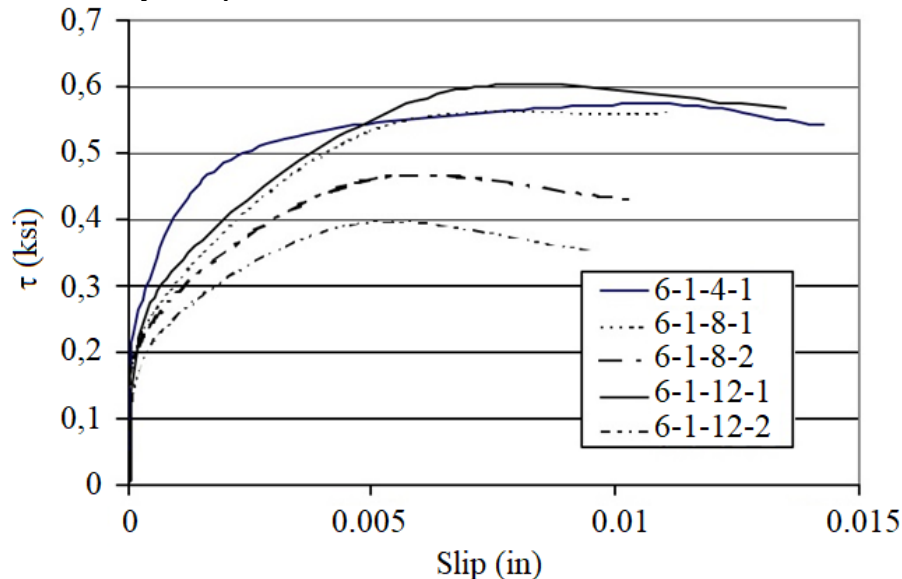


Figura 2. Relaciones locales de τ -deslizamiento para muestras con diferentes longitudes de unión PRFC (4, 8 y 12 in) unidas en el lado de tensión de una viga de concreto. Nota: 1 in = 25.4 mm; 1 psi = 7,03 kPa (De Lorenzis et al (2001)).

La Figura 2 ilustra algunas curvas de esfuerzo de adherencia τ -deslizamiento obtenidas de muestras probadas a un nivel de carga correspondiente a un desprendimiento inminente. Esto se identificó como el nivel de carga en el que la distribución de la deformación se vuelve lineal. Las curvas de τ -deslizamiento típicas deben consistir en una rama ascendente con degradación continua de la rigidez a un esfuerzo de unión máxima y una rama descendente curvada que alcanza un esfuerzo de unión cero en un valor finito de deslizamiento. Mientras que un modelo preciso de adherencia-deslizamiento debe consistir en una rama ascendente curvada y una rama descendente curvada, otras formas, como un modelo bilineal, pueden usarse como una buena aproximación. Un modelo preciso de enlace-deslizamiento debe proporcionar predicciones cercanas tanto de la forma como de la energía de fractura (área bajo la curva de esfuerzo de adherencia-deslizamiento) de la curva de esfuerzo de adherencia-deslizamiento. Ninguno de los modelos existentes de adherencia-deslizamiento proporciona predicciones precisas tanto de la forma como de la energía de fractura interfacial como se encontró en las pruebas. El área debajo de la curva de τ -deslizamiento, indicada como G_f , es la energía de fractura por unidad de área de la unión de adherencia (Lu X.Z. 2005). En un artículo reciente, Hamze-Ziabari y Yasalovi, (2017), hicieron un resumen de las ecuaciones existentes para la predicción de la transferencia de carga entre el concreto y la longitud efectiva de transferencia de carga del PRFC. Estas ecuaciones se derivaron de consideraciones teóricas de la mecánica de fractura o de ecuaciones empíricas calibradas con conjuntos de datos experimentales

o combinaciones de las dos. Sin embargo, la precisión de estos modelos parecía ser limitada. En aras de la exhaustividad, algunas de estas ecuaciones también se reproducen en esta revisión (ver tabla 1):

Tabla 1. Ecuaciones para estimar la carga máxima transferible P_{max} , así como la longitud efectiva del FRPC.

Reference	Equation maximum transferable load P_{max}	Effective length and considerations
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 <i>et al</i> (2001)	$P_{max} = b_p \sqrt{2E_f t_p G_f}$	G_f es la energía de fractura por unidad de área de la unión, que se supone que es igual a 1.06 N-mm/mm ²
Teck-Yong <i>et al</i> (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 <i>et al</i> (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 <i>et al</i> (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 <i>et al</i> (2006)	$P_{max} = (b_p + 7.4) \sqrt{2G_f E_p t_p}$	$G_f = 0.514 f_c^{0.236}$

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

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

2.2 Refuerzo de vigas con PRFC

Los modos de falla observados de las vigas de concreto reforzadas con láminas de PRFC han sido reportados por Teng et al (2003) y analizados posteriormente por Ferreira *et al* (2018). Informaron tres modos de falla típicos: (1) falla de tensión del PRFC cuando su resistencia a la tensión es menor que la carga aplicada; (2) separación del refuerzo en la interfase laminado-concreto; y (3) una falla cohesiva del concreto y hay una separación del refuerzo junto con una capa de concreto.

El primer modo de falla se atribuye a un modo de falla frágil, pero es evidente que la resistencia de la unión de PRFC-concreto es mayor. El segundo modo de falla se atribuye a la falta de anclaje del refuerzo, al agrietamiento excesivo de la viga o fallas en la unión. Nuevamente aquí, la falla de la resistencia de la unión adhesiva puede ser causada por esfuerzos normales al final de la tira de PRFC, donde se sabe que existe una singularidad de esfuerzos [Leung, 2001, A.R. Khan et al 2014 y R.A. Hawileh et al 2015].

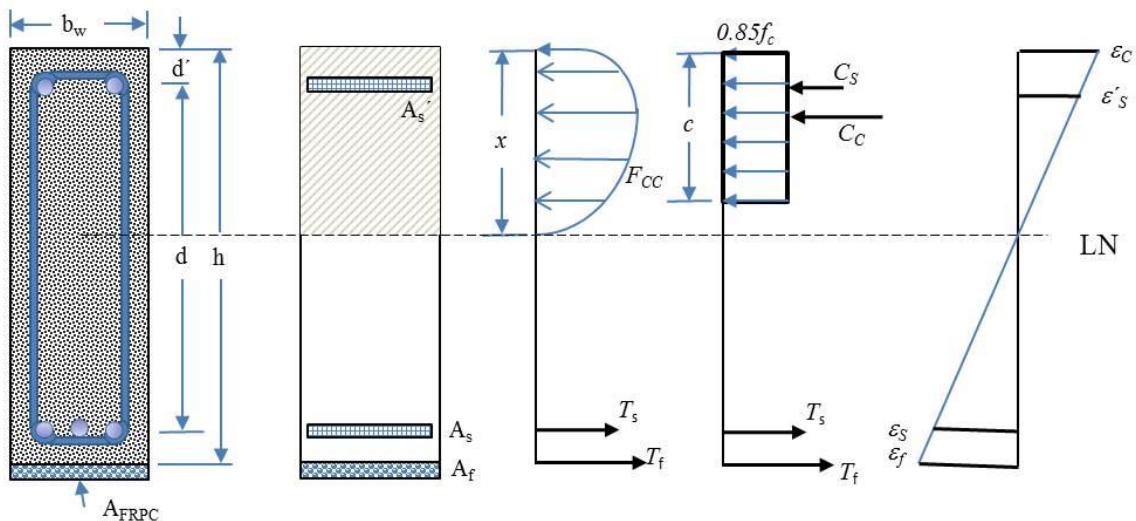


Figura 3. Diagrama de tensión de una viga de concreto reforzado con acero reforzado con PRFC (After Ferreira et al 2018)

El análisis del fortalecimiento de una viga de concreto con una capa de PRFC cargada en flexión presentada por Ferreira *et al* (2018) consideró que la relación del marco de la viga reforzada es

equivalente a la adición a la relación de refuerzo inicial con la contribución del refuerzo (ver figura 3).

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

Donde ρ es la relación del refuerzo de la viga antes del refuerzo, A_f es el área de refuerzo aplicada a la viga, E_f es el módulo de elasticidad del PRFC, E_s es el módulo de elasticidad del acero, b_w y h son la anchura y la altura de la viga respectivamente. Las recomendaciones para el dimensionamiento del refuerzo de PRFC según el código estadounidense ACI 440-2R son las siguientes: El valor límite de la deformación de la fibra que se adoptará en el dimensionamiento y la verificación del refuerzo se expresa en términos del módulo de elasticidad del PRFC, y ε_{fu} , la deformación última observada en el polímero en el momento del fallo y n , el número de capas de PRFC.

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

La deformación efectiva en el material compuesto PRFC, ε_{fe} , se expresa en función de la deformación última del concreto ε_{cu} y la deformación en el recubrimiento del refuerzo de tensión en la viga antes del reforzamiento, ε_{bi} y x , la posición del eje neutro.

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

f_{fe} es la resistencia efectiva del PRFC;

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

ε_s' es la deformación en el refuerzo comprimido y, d' es la posición centroidal del refuerzo comprimido.

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

La deformación en el refuerzo de tensión., ε_s , se expresa por:

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

f_s' , la resistencia en el acero del refuerzo comprimido se da en función de la deformación en el refuerzo comprimido ε_s' y el módulo elástico en el acero;

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

La resistencia en el acero del refuerzo de tensión. f_s se da por

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

La posición del eje neutro se calcula de la siguiente manera:

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

A_s es el área del acero del refuerzo de tensión.; A_s' es el área de acero del refuerzo comprimido; β_1 es un coeficiente que determina la aproximación de la curva de compresión resultante del concreto a un rectángulo, siendo 0.85 para el concreto con valores de f_c inferiores a 28 MPa, que disminuyen linealmente en 0.05 por cada 7 MPa por encima de ese límite de resistencia a la tensión. El valor mínimo para dicho coeficiente, según ACI 318 (2014), es de 0,65. Las condiciones en la interfaz entre el compuesto y el concreto requieren una compresión completa desde el punto de vista mecánico. Las diferentes formulaciones de resina epoxi o cualquier otro adhesivo utilizado darán como resultado un comportamiento completamente diferente de la adhesión entre el concreto y el material compuesto. Además, el diseño geométrico del laminado y los anclajes también influirán en el comportamiento mecánico y, en consecuencia, en la efectividad del refuerzo. Luego, como primer paso, siempre que sea posible, y dependiendo de la disponibilidad del equipo de prueba, se requieren estudios preliminares de los parámetros de adhesión entre el material compuesto y el concreto para determinar las longitudes de las uniones para la transferencia de tensión efectiva necesaria para lograr la capacidad de resistencia del compuesto.

2. EFECTOS AMBIENTALES EN LA RESISTENCIA DE LA ADHERENCIA EN LA INTERFAZ PRFC-CONCRETO

La interfaz en el concreto - PRFC ha sido reconocida como la región donde se lleva a cabo la eficiencia de la transferencia de carga desde el elemento estructural al laminado PRFC. Según lo declarado por Swamy RN et al (1987), las propiedades del adhesivo epoxi son de suma importancia ya que varían considerablemente con el grosor de la muestra de prueba y la velocidad de carga. De manera similar, la interfase entre la matriz y la fibra se considera una región importante del rendimiento del laminado compuesto.

Este comportamiento de la matriz en el concreto-PRFC es de particular interés en los materiales compuestos avanzados, ya que su uso en aplicaciones estructurales con exposición al medio ambiente requiere que el material cumpla con estándares de rendimiento, durabilidad y seguridad muy estrictos. El transporte de humedad en los sistemas poliméricos está relacionado con la disponibilidad de "espacio libre" o "volumen libre" de tamaño molecular en la estructura del polímero, así como su afinidad con el agua. [M.R. Vanlandingham, et al (1999)]. Dicha disponibilidad de "espacios libres" depende de la microestructura, morfología y densidad de reticulación, que son funciones del grado de curado, estequiometría, rigidez de las cadenas moleculares y la densidad de energía cohesiva del polímero. La afinidad entre el polímero y el agua está relacionada con la presencia de sitios de enlace de hidrógeno a lo largo de las cadenas del polímero que crean sitios de fuerzas atractivas entre las moléculas de agua y las del polímero. Las moléculas de agua que son libres de moverse a través de orificios o volumen libre se conocen como moléculas adsorbidas. En el caso de los epoxis, también se sabe que tienen un volumen libre significativo, particularmente a temperaturas de 50-150 ° C por debajo de la Tg. La afinidad epoxi-agua es relativamente fuerte porque los grupos hidroxilo polares (-OH) se crean por la apertura del grupo epoxi por reacción con aminas primarias y secundarias. [M. J. Adamson, 1736]. Luego, en el caso de estos materiales compuestos basados en fibras de carbono y matriz epoxi, las propiedades que están dominadas por la matriz o la interfaz fibra-matriz se degradan por la absorción de humedad, mientras que las dominadas por las fibras no se ven afectadas esencialmente. En Adhesión, reforzamiento y problemas de durabilidad en la restitución de vigas de Concreto Reforzado (CR) usando Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (PRFC) - Una revisión

particular, la resistencia al corte interfacial, la resistencia al corte interlaminar y, dependiendo de la secuencia de apilamiento de láminas de resina epoxi-fibra de carbono en el laminado, los efectos de borde también se convierten en puntos de posible inicio de falla así como la tenacidad a la fractura en modo II y la resistencia interlaminar. Esta degradación se atribuye al debilitamiento de la interfase fibra-matriz y al hinchamiento de la matriz y la plastificación de la 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)]. La absorción de humedad también puede causar una disminución de los esfuerzos residuales producidos a partir de los gradientes térmicos de curado y, por lo tanto, dar como resultado una disminución de las propiedades de fractura. Los efectos de la humedad se ven agravados considerablemente por la temperatura y se complican aún más por la acción de los esfuerzos mecánicos impuestos sobre el material. [J. B. Aguiar, et al (2008)].

Además, estos materiales compuestos están expuestos a diferentes condiciones ambientales durante su vida útil, como la humedad, la temperatura y la radiación ultravioleta y, por lo tanto, a la posibilidad de efectos sinérgicos sobre los mecanismos de degradación. Por lo tanto, siempre existe la preocupación de que la durabilidad a largo plazo de estos materiales esté expuesta a condiciones ambientales combinadas de humedad, temperatura y radiación ultravioleta. [Springer, G.S. (ed.) (1984), Ranby, B. y Rabek J. F., (1975)]. Tanto la radiación ultravioleta como la humedad tienen efectos negativos principalmente en las propiedades mecánicas de la resina epoxi y la interfaz fibra-matriz y, por lo tanto, afectan la integridad del compuesto [W. B. Liao, et al, 1998].

El tema de la durabilidad de los sistemas de refuerzo de FRPC, en general, ha sido una preocupación importante en las aplicaciones de rehabilitación estructural. El comportamiento de las vigas reforzadas con FRPC sometidas a ciclos de congelación-descongelación, seco-húmedad y temperatura o varias soluciones acuosas antes de la carga ha sido estudiado por un número limitado de investigadores (Bank, et al, 1995, Gheorghiu C. et al, 2004, Grace NF et al 2005, Wang C. Y, et al, 2004, Xie M., 1995, Katz A., 1999). Ha habido un cambio fundamental en el enfoque del tema. A diferencia de someter un material compuesto específico a una exposición ambiental durante un período de tiempo específico y luego realizar pruebas mecánicas para obtener "datos" para uso de diseño, el enfoque más reciente ha sido tratar de desarrollar un conjunto integrado de pruebas químicas y mecánicas que proporcionar una comprensión de los mecanismos de degradación dentro del material compuesto. Estos documentos combinan métodos de prueba macromecánicos con investigaciones de cambios en la composición del material junto con microscopía electrónica de barrido para desarrollar modelos que intentan explicar el cambio de las propiedades mecánicas en términos de los cambios cuantitativos en la naturaleza química de los materiales y la observación cualitativa del fenómeno de degradación. (Banco y Gentry, 1995).

Buyukozturk O, 1998 y Grace y Singh, 2005, y concluyeron que la exposición a largo plazo a la humedad es el factor más perjudicial para la resistencia de la unión entre las placas y tejidos PRFC y las vigas de CR. Las vigas reforzadas con placas de PRFC y expuestas a 10,000 horas de humedad del 100% (a 38 ± 2 ° C) experimentaron un promedio de reducción del 33% en su resistencia. El inicio de la delaminación fue el modo primario de falla para todos los haces de prueba.

La durabilidad de los pilotes pretensados de polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC) conducidos en aguas con mareas y un estudio experimental para evaluar el posible efecto del cambio de temperatura diurno/estacional en doce vigas pretensadas y preagrietadas de PRFC diseñados para fallar por ruptura de las varillas de pretensado se mantuvieron al aire libre en dos tanques de agua salada y simultáneamente, sometidos a ciclos húmedos/secos (simulando mareas) y ciclos de frío/calor (simulando la variación de la temperatura), (Aiello, et al, 2001). La durabilidad se evaluó a partir de pruebas de flexión realizadas periódicamente durante el período de exposición de casi 3 años. Los resultados de las pruebas indicaron que la durabilidad no se vio afectada en gran medida, aunque en algunas de las muestras expuestas se observaron degradación de los enlaces y reducciones en la capacidad final. La degradación parecía estar relacionada con la

magnitud del daño de pre-agrietado sufrido antes de la exposición. Esto sugiere que cuando se utilizan pilotes pretensados de PRFC, los esfuerzos de conducción deben controlarse cuidadosamente para minimizar el daño.

Debido al cambio en el comportamiento en diferentes condiciones ambientales, se puede decir que no se ha logrado una comprensión completa de los efectos que estos materiales tienen en el rendimiento de los sistemas de reacondicionamiento. En particular, no se conocen bien varios mecanismos de falla que puede manifestar la viga de concreto reconstruida, incluidos los mecanismos de desprendimiento y deslaminación de PRF de la viga de concreto. Se necesitan más estudios para desarrollar una mejor comprensión de la capacidad de corte de las secciones de modificación, los efectos en las regiones de anclaje del laminado de FRP y los mecanismos de falla de desprendimiento y delaminación. Los temas de estudios futuros también deben incluir los efectos de las compatibilidades del material y sus resistencias a la degradación a través de los ciclos ambientales y de carga, y la evaluación de la integridad del sistema modernizada mediante el uso de la evaluación no destructiva [Nakaba 2001].

En sentido estricto, la aplicación de una capa laminada de material compuesto reforzado con fibra en el lado de tensión de la viga, ya sea mediante la unión de un laminado o mediante la formación de un material compuesto in situ, utilizando la resina epoxi y las fibras orientadas de manera unidireccional en un tejido (una colocación manual) resultará en dos interfases, la interfase concreto-resina y la interfase matriz-fibra, como se muestra en la figura 4. Ambas interfases son susceptibles de verse afectadas por la exposición al medio ambiente. Sin embargo, en la literatura técnica sobre el tema de la modernización de vigas con RFPC, solo se hace referencia a la interfase concreto-laminado.

Karbhari e Engineer, 1996, investigaron la degradación de la interfaz compuesto-concreto después de la exposición a condiciones ambientales que incluyen humedad, agua de mar, congelación y descongelación. En esta investigación, el rendimiento de las vigas enchapadas se consideró a partir de aspectos relacionados con los materiales y la durabilidad. Se estudió el efecto de cinco condiciones ambientales diferentes y mostraron que la selección del sistema de resina apropiado es fundamental para el éxito y señalaron los peligros de seleccionar sistemas con bajas temperaturas de transición vítrea y caídas drásticas en el módulo instantáneo en función de la temperatura. Los resultados indicaron que la degradación se produce principalmente al nivel de la resina en contacto con el concreto, y que se debe tener cuidado de los cambios en la rigidez del material compuesto debido a la exposición a la humedad y la consiguiente plastificación de la resina, así como a los aumentos de rigidez en condiciones de frío. (Aiello, et al, 2001, Plevris N, 1999, Soudki KA 2000, Wang CY 2004).

Ji Cauich-Cupul et al, (2011) estudiaron el efecto de la absorción de humedad en la interfase en materiales compuestos de fibra de carbono IM7 epoxi-simple y mostraron un efecto perjudicial sobre las propiedades mecánicas de la matriz, y este deterioro se atribuyó a una disminución de su temperatura de transición vítrea. Se estudiaron tres niveles de la interfaz de fibra de carbono-epoxi IM7. La primera fue la fibra de carbono IM7 con el tamaño eliminado, luego, el nivel de adhesión de la matriz de fibra se incrementó usando un agente de acoplamiento de silano para tratar la superficie de la fibra IM7 y la tercera, las fibras IM7 se trataron con ácido nítrico para producir más sitios de reacción química con el agente de acoplamiento de silano.

La calidad de la interfaz fibra-matriz se evaluó utilizando la prueba de fragmentación de una fibra única y la longitud del fragmento de fibra, considerada como un indicador de la calidad interfacial que mostraba un efecto de deterioro continuo de la absorción de humedad. Es decir, una longitud de fragmento de fibra corta indicaba que una interfase de matriz de fibra fuerte y una interfase de matriz de fibra débil (o deteriorada) estaban indicadas por una longitud de fragmento de fibra larga (ver figura 5). Además, el papel del hinchamiento de la matriz debido a la absorción de humedad en las tensiones residuales se considera importante cuando se considera el deterioro de las propiedades de corte interfacial. Se observó que la contribución de los esfuerzos radiales disminuía

rápidamente y el componente mecánico de la adhesión de la fibra a la matriz también disminuía rápidamente para mayores contenidos de humedad en la matriz y / o la interfaz.

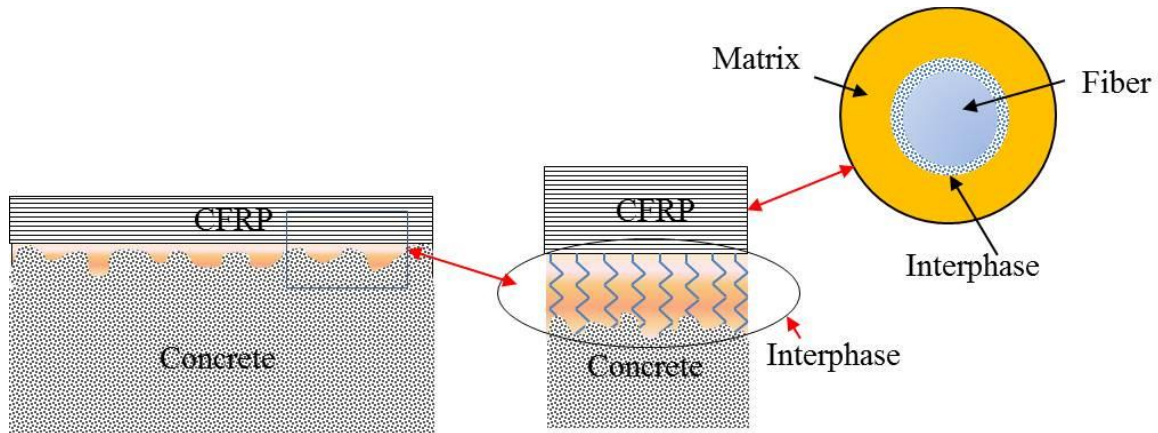


Figura 4. Representación esquemática de la formación de interfases duales formadas por el uso de laminados o telas para re-equipar vigas de concreto reforzado con acero. Una interfase concreto-resina y una interfase fibra-matriz.

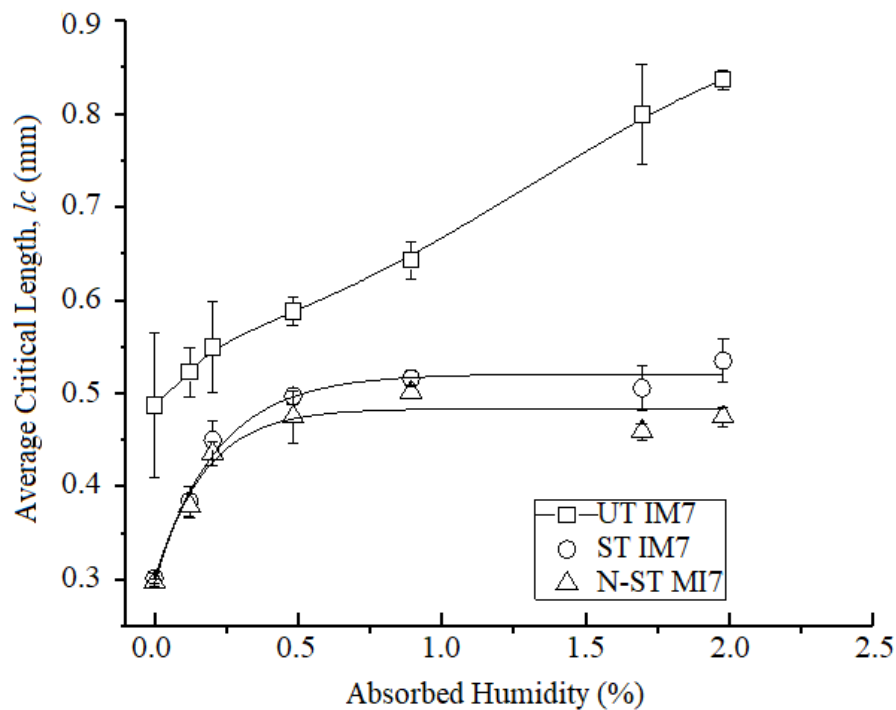


Figura 5. Longitud del fragmento de fibra en función de la humedad absorbida en la interfase matriz en el compuesto, para fibras de carbono de superficie no tratadas (UT IM7); fibras de carbono IM7 de superficie tratada con agente de acoplamiento de silano (ST IM7) y fibras de carbono IM7 de superficie tratada con agente de acoplamiento de silano (N-ST IM7), (J. I. Cauch-Cupul et al, (2011))

Perez-Pacheco, et al (2013) concluyeron que la microestructura de la interfase jugó un papel importante en el proceso de difusión de humedad en un laminado epoxi de fibra de carbono. La Figura 6 muestra las isotermas de absorción de humedad para un laminado compuesto sometido a varios ambientes de humedad relativa. También concluyeron que los efectos de la humedad absorbida en la región interfacial eran perjudiciales para la resistencia interfacial entre la fibra y la matriz epoxi y, por lo tanto, para el rendimiento del compuesto. El uso de 3-

glicidoxipropiltrimetoxisilano como agente de acoplamiento de fibra-matriz mejoró la adhesión de fibra-matriz. La plastificación, los esfuerzos de hinchamiento y la degradación de cualquier epoxi debido a la hidrólisis pueden haber contribuido a los mecanismos de falla de la matriz. La plastificación de la matriz epóxica por la humedad condujo al cambio en su temperatura de transición vítrea (Tg), afectando así la respuesta mecánica del compuesto. Se observó que la resistencia a la tensión de los laminados hechos con el agente de acoplamiento de silano mostró una disminución, pero después de una absorción de humedad de aproximadamente el 0,45%, la resistencia a la tensión se mantuvo constante. Luego, el uso de un agente de acoplamiento de silano adecuado para mejorar la adherencia resultó en mejores propiedades mecánicas y redujo la dependencia de las propiedades de la humedad bajo la carga de tensión (ver figuras 7 y 8).

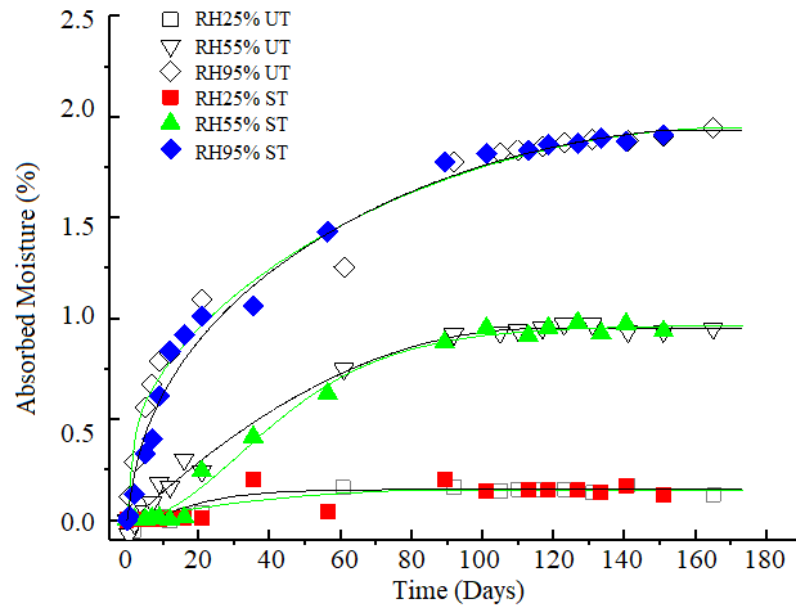


Figura 6. Absorción de humedad en el material laminado compuesto para diferentes ambientes de humedad relativa. Sin tratamiento: (UT) tratamiento de superficie de silano (ST). RH25% UT, RH55% UT y RH95% UT, y con fibras tratadas en la superficie de silano RH25% ST, RH55% ST y RH95% ST. (Pérez-Pacheco, et al (2013))

Figura 7. Comportamiento del módulo elástico con respecto a la humedad absorbida para el material compuesto con la fibra tratada y sin tratar, respectivamente. (Pérez-Pacheco, et al (2013))

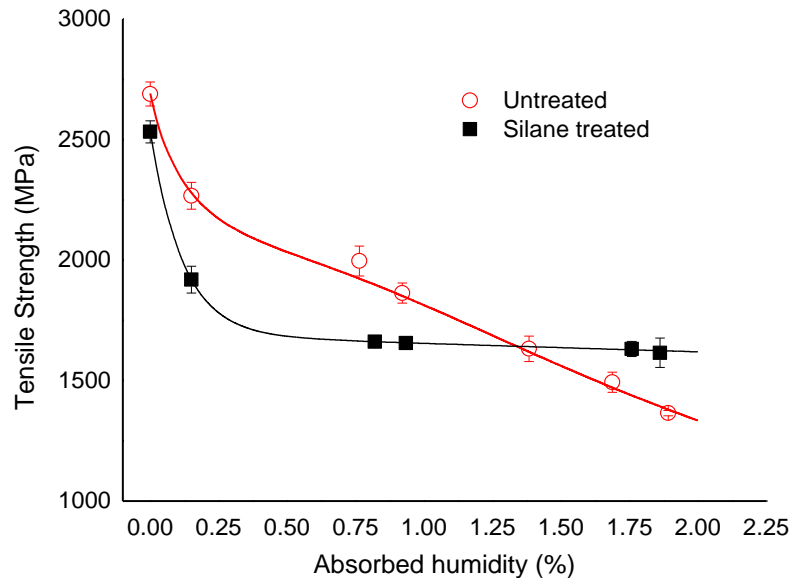


Figura 8. Resistencia a la tensión de un material PRFC fabricado en el material compuesto después de sufrir una degradación higroscópica, para dos condiciones de interfaz de fibra-matriz diferentes, es decir, para fibras tratadas y no tratadas, respectivamente (Perez-Pacheco, et al (2013))

Swamy RN et al, 1999 y Sebastian WM, 2001, demostraron que el comportamiento y el potencial de combinar la protección contra la corrosión y las técnicas de reparación con parches de FRP para modernizar las vigas de CR pre-agrietadas y dañadas por la corrosión y proporciona el espacio para recubrir los materiales de protección contra la corrosión. También propusieron que las tiras de anclaje en U equidistantes, junto con las tiras longitudinales, formen un sistema de refuerzo externo para que viga de CR corroído restrinja la extensión de grietas en el área de intersección con la fibra en la dirección longitudinal. Dado que el valor de la deformación es mayor en este sitio, permite el uso total de la resistencia del material compuesto fibroso. Por lo tanto, cualquier diseño que pueda reducir el efecto de la concentración de esfuerzos en el área de intersección de las tiras de anclaje longitudinales y en forma de U puede ayudar a que la viga escape del modo de falla prematura de rotura de la fibra y alcance su capacidad de carga diseñada.

Como puede verse, los problemas medioambientales son extremadamente importantes al diseñar una junta de laminado de concreto compuesto para la restitución de vigas. Todos los modelos descritos en el numeral 2.1 de este documento consideran las propiedades mecánicas del laminado compuesto, que, como se ve en las figuras 7 y 8, disminuyen en función de la humedad absorbida. Por lo tanto, el laminado compuesto debe diseñarse con dimensiones tales como grosor y ancho, adecuadas a los valores de rigidez y resistencia, ya sea las propiedades estimadas después de degradarse por la absorción de humedad o al incluir un factor de seguridad apropiado para las propiedades mecánicas del compuesto antes de la exposición al medio ambiente. Otro enfoque sería proporcionar un recubrimiento protector para evitar la absorción de humedad, especialmente en los bordes del laminado.

4. CONCLUSIONES

Un método eficaz para reforzar las vigas de concreto existentes en la flexión consiste en adherir laminados de material compuesto reforzados con fibra en las caras de tensión de las vigas. Sin embargo, a menudo es difícil desarrollar la capacidad de resistencia total del compuesto debido a un fallo prematuro por delaminación y desprendimiento del laminado. Las condiciones en la interfaz entre el compuesto y el concreto requieren una comprensión completa, y se requieren estudios preliminares de los parámetros de adhesión entre el compuesto y el concreto para

determinar las longitudes de transferencia de tensión efectiva necesarias para lograr la capacidad de resistencia del compuesto. También se ha incluido en esta revisión un análisis teórico del comportamiento de dichas uniones de material compuesto a concreto. La durabilidad de la interfase de material compuesto-concreto también es muy importante, especialmente cuando la estructura está expuesta al calor y la humedad juntos. En la literatura técnica, no se hace referencia a los dos problemas interfaciales, es decir, la interfase de resina polimérica-concreto y la interfase entre matriz y fibra en el material compuesto mismo. La durabilidad del laminado de material compuesto se ve afectada por la absorción de humedad, lo que resulta en una reducción de la resistencia y la rigidez superior al 30%.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Marista de Mérida por el amable apoyo brindado, al Sr. Poot Cauich y por proporcionar materiales para el trabajo experimental.

6. REFERENCIAS

- 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/BF005550593>
- 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 Shamsoon, 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., Kankubo, 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