

Estructuras de hormigón armado con barras de Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio (PRFV). Estado del arte.

Concrete structures reinforced with Glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars. State of the art.



Ing. Faria Joaquim Luís.

Maestrante en Ingeniería Civil en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae), Facultad de Ingeniería Civil. Cuba
Instituto Superior Politécnico de Songo, Mozambique.

E-mail: fariajqluis@gmail.com



MSc. Ing. Isel del Carmen Díaz Pérez.

Profesora Auxiliar.

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae),
Facultad de Ingeniería Civil. Cuba

E-mail: iselmarmen@civil.cujae.edu.cu.



Dr. Ing. Hugo Wainshtok Rivas

Profesor Emérito

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae),
Facultad de Ingeniería Civil. Cuba

Email: hugow@tesla.cujae.edu.cu

Recibido: 09-10-17

Aceptado: 16-11-17

Resumen:

El uso de barras de polímeros reforzados con fibras no metálicas (PRF) como armado de estructuras de hormigón, en sustitución del acero, viene siendo empleado con buenos resultados, principalmente debido a su probada estabilidad anticorrosiva. Además, presenta alta resistencia a tracción, bajo peso y transparencia magnética (caso del PRFV). En este artículo se presenta el estado actual del conocimiento en torno al comportamiento de estructuras de hormigón armadas con Polímeros Reforzados con Fibras de Vidrio (PRFV) sometido a distintas solicitaciones de carga y ambientes. Se pudo observar en la literatura que la durabilidad y alta resistencia que aportan las barras de PRFV son confrontadas con el modo de fallo de las mismas y el pequeño módulo de elasticidad influyendo en los diseños de modo que el estado límite servicio es quien gobierna el dimensionamiento de los elementos.

Este constituye el primero de una zaga de artículos sobre el diseño de elementos estructurales de hormigón armado con barras de polímeros reforzados con fibras en sustitución del acero.

Palabras clave: Barras de PRFV, Estructuras de hormigón, Diseño estructural.

Abstract:

The use of non-metallic fibers reinforced polymer (FRP) bars as reinforcement of concrete structures, in substitution of the steel, is bringing good results, mainly due to its anticorrosive proven stability. Also, it presents high tensile strength, low weight and magnetic transparency (PRFV case). This paper, presents the current state of the knowledge around the behavior of concrete structures reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars subjected to different load conditions and environments. In the literature was observed that the durability and high resistance of GFRP bars are confronted with their failure mode and small modulus of elasticity influencing in the reinforced concrete members designs so that the service limit state (control of cracks and deflections) is the most determinant.

This is the first of a series of articles on the design of reinforced concrete structural elements with fiber reinforced polymer bars (FRP) replacing the steel.

Keywords: GFRP bars, Concrete structures, Structural design.

Introducción:

Una de las causas principales del deterioro de las estructuras de hormigón armado es la corrosión de las barras metálicas (acero) que se han utilizado tradicionalmente como refuerzo de aquel material, fenómeno de particular importancia en países como Cuba con un clima tropical de una humedad relativa alta, agudizada por el carácter alargado y estrecho de una isla de superficie relativamente pequeña, afectada en casi toda su extensión por la presencia del aerosol marino, condiciones que conllevan a un escenario realmente crítico para el desempeño y durabilidad de las edificaciones que usan el acero como refuerzo.

Ante esta situación es realmente ventajoso procurar soluciones que permitan extender la vida útil de las estructuras, incluyendo de manera especial las construidas de hormigón reforzado con barras de acero. Recientes avances en el campo de los materiales poliméricos reforzados con fibras (PRF) han dado lugar al desarrollo de nuevos productos con excelentes potencialidades como armado para elementos de hormigón, en reemplazo del acero tradicional. Este nuevo refuerzo, prácticamente inerte ante la corrosión alcalina y de otros muchos orígenes, es ya una realidad en el mercado de la construcción, lo mismo en forma de barras, perfiles, telas de malla y bandas, garantizando un incremento de dos a tres veces en la vida útil de las construcciones.

En la actualidad, polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV), basalto (PRFB), carbón (PRFC), aramida (PRFA), o la combinación de ellas, se producen en varios países con un creciente empleo en obras de ingeniería civil, relacionándose esta investigación con la tipología, PRFV, como alternativa de refuerzo del hormigón.

Marco Conceptual

A continuación, algunas definiciones para esclarecer términos pertinentes a los PRF.

Fibra: cualquier objeto natural o sintético que se presenta en forma de hilo fino de origen mineral u orgánico. Este término se utiliza generalmente a materiales cuya longitud sea al menos 100 veces su diámetro, usualmente entre 0,10 y 0,13mm [1].

Fibra de vidrio: Material, obtenido de la fundición de un producto inorgánico que se ha enfriado sin cristalizar. Incluye fibras de vidrio álcali resistentes (vidrio tipo AR), de propósito general (vidrio tipo E), de alta resistencia (vidrios tipo S), para incrementar la resistencia a los ácidos(vidrio tipo C), Chulia [2]. Se utiliza como un agente de refuerzo con muchos productos poliméricos. Aunque no sea tan fuerte o rígida como la fibra de carbono, es mucho más económica y posee favorables propiedades de resistencia específica. El diámetro de las fibras de vidrio utilizadas como refuerzo para los PRF, usualmente fluctúa entre 9 y 23 micrones.

Polímero: Compuesto natural o sintético de alto peso molecular formado por una cantidad finita de moléculas [1].

Resina y matrices : Generalmente, el polímero se llama resina durante el procesamiento y se llama matriz después del curado [1, 3]. En dependencia de la fluidez o no del material al ser calentados se diferencian dos grandes grupos dentro de las mismas (termoplásticos y termoestables):

- **Termoplásticos:** pasan al estado líquido al calentarlos y se vuelven a endurecer al enfriarlos. Su estructura molecular presenta pocos (o ningún) entrecruzamientos. Ejemplos: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC).
- **Termoestables:** No fluyen. Al calentarlos se descomponen químicamente. Este comportamiento se debe a una estructura con muchos entrecruzamientos, que impiden los desplazamientos relativos de las moléculas. Ejemplos: los epóxidos, los poliésteres no saturados, los fenoles y la vinílicas [4].

La resina actúa solamente como agente de unión ya que su función principal es configurar geoméricamente el material compuesto. Normalmente, la matriz es flexible y poco resistente, pues su misión es transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras y a la superficie adyacente, además de proteger a las fibras de posibles daños mecánicos y ambientales.

Fibras de refuerzo: La función de las fibras de refuerzo en la dirección del eje de la fibra y de la carga es aportar una elevada resistencia a la tracción y rigideces muy altas, así como también un comportamiento excepcional a la fatiga y a la fluencia. Es posible que el refuerzo sea natural o artificial, siendo por lo general la mayoría de ellos refuerzos comerciales sintéticos. Entre los tipos de fibras de uso comercial aplicadas en la Ingeniería Civil se encuentran: el vidrio, el basalto, el carbón y la aramida. Teniendo en cuenta que la disposición unidireccional de las fibras da como resultado la máxima resistencia y módulo en la dirección del eje de la fibra, la disposición de las fibras en un plano es bidimensional y tiene diferentes resistencias en cada ángulo de orientación de las fibras (ortotrópico). Las propiedades mecánicas en cualquier dirección son proporcionales a la cantidad de fibras por volumen orientadas en esa dirección.

El **Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV)**, también denominado con las siglas GFRP (*Glass-Fiber Reinforced Plastic*), es un material compuesto, constituido por una estructura resistente de fibra de vidrio, con una relación largo/espesor que provea una clara función de refuerzo en una dirección y la resina que actúa como aglomerante de las mismas. El refuerzo de fibra de vidrio, provee al compuesto: resistencia mecánica, estabilidad dimensional y resistencia al calor. La resina plástica aporta resistencia química dieléctrica y comportamiento a la intemperie [1]. El PRFV es un material ligero, resistente, rígido, con buen comportamiento frente a la corrosión y al desgaste, y buen aislante térmico, acústico y eléctrico [5].

Propiedades de las barras PRF

El uso de barras de refuerzo de PRF en estructuras de hormigón está fuertemente influenciado por sus propiedades físicas y mecánicas. Las barras de PRF se pueden diseñar y fabricar para satisfacer requisitos específicos de una aplicación particular. Las variables de diseño disponibles incluyen la elección de los constituyentes (fibra y matriz polimérica), las fracciones de volumen de la fibra y la matriz, la orientación de las fibras y el proceso de fabricación. Otros factores tales como los efectos dimensionales y el control de calidad durante la fabricación desempeñan un papel importante en la determinación de las características de las barras PRF. Las propiedades de los PRF también están influenciadas por el historial de cargas, duración de la carga, temperatura y humedad [3, 6].

Propiedades físicas de las barras PRFV [1, 3, 5, 6]

Densidad: La masa específica de la barra de PRFV varía de 1.5 a 2 g/cm³, y para las barras de acero este valor es de 7.9 g/cm³, así que se estima que las barras de PRFV con respecto a las barras de acero tienen un peso de aproximadamente 4 veces menor. Esto va a contribuir a una reducción de costes de transporte, manipulación del material y puesta en obra.

Dilatación térmica: Los valores de la dilatación térmica variarán en función de la proporción de resinas y fibras del compuesto. El coeficiente de dilatación térmica longitudinal es dominado por las propiedades de las fibras mientras que el coeficiente transversal es dominado por la resina. A continuación, se presenta en la Tabla 1 los valores de dilatación térmica de las barras de PRFV e se compara con otros refuerzos.

Tabla 1 – Coeficientes de dilatación térmica típicas de barras de refuerzo [6].

Coeficiente de dilatación térmica para barras de refuerzo				
Dirección	CTE X10 ⁻⁶ /°C			
	Acero	PRFV	PRFC	PRFA
Longitudinal	11,7	6,0 a 10,0	*-9,0 a 0,0	*-6 a 2
Transversal	11,7	21,0 a 23,0	74,0 a 104,0	33,3 a 44,4

*Los valores negativos de CTE indican que el material se contrae con el aumento de la temperatura y expande con la disminución de la misma.

Propiedades Mecánicas

Resistencia a tracción longitudinal: Cuando son sometidas a tracción, las barras de PRF no presentan ningún comportamiento plástico (fluencia) antes de la rotura. El comportamiento a tracción de las barras de PRF constituidas por un único tipo de material de fibra se caracteriza por una relación tensión-deformación lineal hasta el fallo Ver Figura 1.

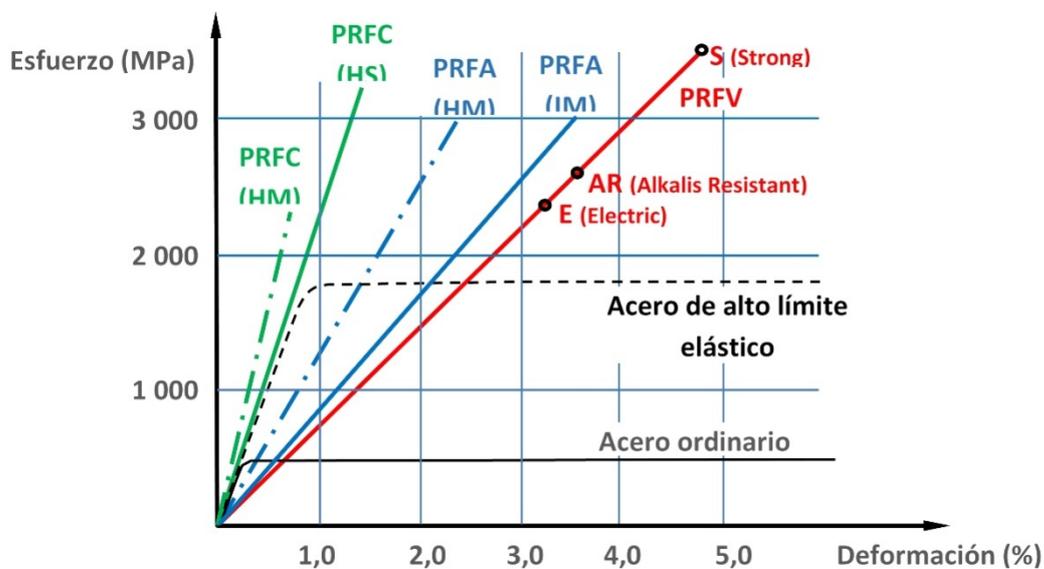


Figura 1 – Curvas de comportamientos a tracción de las barras de acero y PRF.

La resistencia a tracción y la rigidez de una barra de PRF dependen de varios factores. Debido a que las fibras en una barra de PRF son el componente que soporta la carga principal, la relación entre el volumen de fibra y el volumen global del PRF (relación fibra-volumen) afecta significativamente las propiedades de tracción de una barra PRF. La velocidad de curado, el proceso de fabricación y el control de calidad de fabricación también afectan a las características mecánicas de la barra [6]. La resistencia a la tracción típica de una barra de PRFV oscila entre 450 y 1600 MPa con un alargamiento del 1,3% al 2,3% en la rotura. Las propiedades de tracción de algunas barras de PRF de uso común se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2 – Valores de resistencia a tracción usuales de los PRF [7].

	Resistencia a tracción			
	ACERO	PRFV	PRFC	PRFA
f_y (MPa)	276 ÷ 517	-	-	-
f_{su} (MPa)	483 ÷ 690	450 ÷ 1 600	600 ÷ 3 690	1 720 ÷ 2 540

Generalmente, los refuerzos de PRFV tienen una mayor resistencia a tracción que el acero. Estudios han demostrado que la resistencia a tracción disminuye conforme aumenta el diámetro [8], ya que las fibras situadas cerca del centro de la sección transversal no son sometidas a tanta tensión como las fibras que están cerca de la superficie externa.

Resistencia a compresión, (longitudinal): La resistencia a compresión de las barras de PRFV, por lo general, es mucho menor que su resistencia a tracción, siendo aproximadamente del 45% de ésta última [9]. Al ser mucho más débil ante este esfuerzo, la resistencia a compresión de las barras de PRFV en la mayoría de las aplicaciones, se descarta su aporte al elemento estructural, restringiendo su uso como refuerzo a compresión, aunque, en la actualidad se desarrollan investigaciones con el fin de optimizar y ampliar el empleo de las mismas. El módulo de elasticidad a compresión de las barras PRFV es aproximadamente un 80% del módulo de elasticidad a tracción de las mismas [6].

Resistencia al cizallamiento: Esta resistencia es determinada por las propiedades de la matriz y por la distribución local de las tensiones que en general es baja. Las barras de PRFV pueden ser fácilmente cortadas con una sierra común en la dirección perpendicular a las fibras. El comportamiento de las barras de PRF bajo carga de corte transversal está influenciado principalmente por las propiedades de la matriz. Estas son generalmente débiles en corte transversal. La resistencia al cizallamiento se puede aumentar trenzando o enrollando fibras adicionales en la dirección transversal a la longitudinal [9].

Fluencia: Las fibras de vidrio tienen una excelente resistencia a la fluencia, sin embargo, esto no es cierto para las resinas, por ello, el volumen y la orientación de las fibras tienen una gran influencia en el comportamiento a fluencia de las barras de PRFV. Según datos experimentales, Ehsani [8], para un determinado tipo de barra de PRFV, se obtuvo que la deformación adicional causada por la fluencia era aproximadamente el 3% de la deformación elástica inicial, debido al empleo de fibras cortadas y no continuas. En la actualidad, adoptando como proceso de fabricación la pultrusión y como refuerzo mechas de fibra continua, la fluencia no existe prácticamente.

Fatiga: Las barras de PRFV poseen una alta resistencia a la fatiga. Según ACI 440 1R, 2015 [7], pueden soportar más de cuatro millones de ciclos de carga antes de iniciar la rotura en la zona del anclaje

Durabilidad: Las propiedades mecánicas de las barras PRF están influenciadas por el medio ambiente. La presencia de agua, soluciones alcalinas o ácidas, soluciones salinas, exposición ultravioleta y altas temperaturas pueden afectar, en mayor o menor medida la durabilidad de las barras de PRF [9].

Ventajas y desventajas de los PRFV

Ventajas de los PRFV [2, 4]

- Presenta una alta resistencia a la tracción longitudinal.
- Resistentes a la corrosión (no se corroen en presencia de un gran número de sustancias agresivas).
- Resistentes desde el punto de vista químico.
- Excelente resistencia a la fatiga (cuenta con óptimas prestaciones en condiciones de carga cíclica, esta resistencia varía con el tipo de refuerzo de fibra).
- Presenta transparencia magnética.

- Presenta poco peso (de 7-10 veces menor que el acero).
- Aislantes desde el punto de vista térmico y eléctrico.
- Competitividad en precio.
- Dimensionalmente estables en situaciones de sollicitación térmica (dilatación y contracción en un hormigón que se encuentra sometido a variaciones de temperatura, son muy reducidas).
- Alta durabilidad.

Desventajas de los PRFV [2, 4]

- No presenta fluencia antes de la rotura (colapso frágil).
- Bajo módulo de elasticidad (varía con el tipo de refuerzo de fibra).
- Posible daño de las resinas poliméricas y las fibras bajo la exposición directa y continuada a la radiación ultravioleta (debe evitarse el almacenaje en contacto directo con el medio ambiente).
- Baja resistencia al corte transversal.
- Es un material susceptible al fuego, dependiendo del tipo de matriz y del espesor del recubrimiento del hormigón.
- No puede doblarse en obra.

Campo de aplicación de los PRFV

El uso de los polímeros reforzados con fibra de vidrio ha constituido todo un desarrollo y avance para la Ingeniería Civil, por sus disímiles ventajas y propiedades que incrementan considerablemente la vida útil de las estructuras de hormigón reforzado con este tipo de material. Los refuerzos de PRFV se emplean de manera ventajosa en las construcciones civiles, industriales y otras de diferentes destinos, ya sea para hormigones ligeros o pesados, como refuerzo del hormigón armado en edificios bajos y viviendas, mampostería reforzada, obras marítimas y portuarias, tableros de puentes, túneles, mejoramiento de terreno y drenaje, canalizaciones, piscinas, depósitos y cisternas de hormigón elementos de infraestructura en industria química, en soporte de torres de iluminación y de líneas transmisión eléctrica y travesaños aislantes para las mismas, en losas para viales incluyendo autopistas, aeropuertos y aceras y traviesas de ferrocarril, entre otras. El empleo de armaduras de PRFV incrementa el tiempo de servicio de las edificaciones en dos o tres veces en comparación con aquellas que emplean armaduras metálicas, especialmente cuando actúan en un ambiente agresivo, en particular los que contienen sales, álcalis y ácidos. Su mayor resistencia, combinada con propiedades tales como una mayor ligereza, durabilidad, posibilidad de explotación en condiciones complejas, así como sus ventajas económicas, amplifican el espectro del uso para los modernos materiales compuestos. Algunas de las aplicaciones de los PRFV se presentan ilustradas a continuación (ver Figuras 2 - 6).



Figura 2 - Hormigonado de pisos con las barras PRFV.



Figura 3 - Refuerzo del hormigón armado en edificios bajos.



Figura 4 - Rejilla para armado de túneles



Figura 5 - Campo de aviación



Figura 6 - Tableros de puentes armados con barras PRFV [3]



Marco Teórico – Investigaciones

Siendo un área con potencial crecimiento, varios investigadores han desarrollado estudios sobre esta temática. Se han presentado varios trabajos científicos, muchos de ellos con experimentos en laboratorios, abordando los varios aspectos a tomar en consideración en el diseño de hormigón armado con PRFV.

Adherencia

La adherencia entre el hormigón y el PRFV constituye una de las propiedades más importantes a estudiar para el empleo de este material, pues el comportamiento resistente de estructuras de hormigón armado se fundamenta en una adecuada transferencia de tensiones entre el hormigón y el acero.

El comportamiento de adherencia y anclajes del PRFV es un área crítica de discusión y potencialmente uno de los más disputados dentro de la comunidad de investigación. Las barras dobladas pueden ser fabricadas directamente por el fabricante sin embargo la fuerza en el lugar de la curva ha sido objeto de mucha discusión y generalmente aceptada por la comunidad de investigación como un punto de debilidad para el material. Los productos anclados también son un desarrollo reciente con PRFV, sin embargo, los datos de investigación sobre su desempeño son limitados (Johnson) [10]. Algunos aspectos del comportamiento de anclaje del PRFV se encuentran comprobados en la comunidad de investigación y otros no. Las investigaciones experimentales han demostrado que, en comparación con el acero convencional, el PRFV en general no puede desarrollar el mismo nivel de tensiones de adherencia. Esta reducción en la fuerza de adhesión se ha observado entre 33 y 50% en muchos programas de investigación (Katz et al [11], Muñoz et al [12], Mosley et al. [13]).

Muchos investigadores creen que el perfil superficial de la barra es uno de los determinantes primarios en el comportamiento general de la adherencia del refuerzo. Con respecto a los diversos tipos de tratamientos superficiales, una discusión de los mecanismos subyacentes sugeriría que el mecanismo de desarrollo de la unión difiere por el tipo de recubrimiento superficial. La barra revestida con arena se basa en un mecanismo de unión por fricción en el que se mejora la cohesión entre el revestimiento de arena y el hormigón, la barra corrugada además de la fricción, se basa en el acunamiento del hormigón en cada una de los resaltos. Al determinar qué mecanismo es superior, existen resultados contradictorios que sugieren la presencia e influencia de otros parámetros [13].

Mosley et al. [13], ensayaron la adherencia de barras de PRF en vigas, cuyos resultados indicaron una ligación directa entre la resistencia de adherencia observada y el módulo de elasticidad del refuerzo. Mediante el ensayo de barras con tres perfiles de superficie diferentes, encontraron que el tipo de perfil de superficie no tenía un efecto significativo sobre la resistencia en la adherencia o los anchos de fisura en sus especímenes de vigas. Se teorizó que el módulo de elasticidad del PRFV era lo suficientemente bajo como para que el perfil de la superficie no tuviera influencia sobre los resultados observados.

Por el contrario, otras investigaciones han demostrado que el módulo de elasticidad no tiene efecto sobre la fuerza de adhesión observada. Achillides y Pilakoutas [14], observaron que en sus pruebas comparativas de las barras de PRFV y PRFC, que no se evidenció ninguna diferencia significativa en la resistencia al arrancamiento, siendo la diferencia en el módulo de elasticidad entre los dos materiales más del doble. Se observó que la fuerza de adhesión está relacionada con los efectos de Poisson, el diámetro de la barra y el efecto *shear lag* (pérdida de eficiencia en la transmisión de esfuerzos por cortante). *Shear lag* en este contexto se refiere a una falla a cortante inter-laminar en la superficie exterior de la barra que incluye el acabado superficial, se cizalla completamente de la parte interna durante el ensayo de arrancamiento [10].

Muñoz et al [15] presentaron los resultados del estudio del comportamiento adherente de PRFV y PRFC, como armadura de hormigón. Se realizaron un total de 91 ensayos de arrancamiento (*pull-out*) según las normas ACI 440.3R-04 [16] y CSA S806-02. Los parámetros considerados

en los ensayos son la resistencia del hormigón, el acabado superficial, el tipo de fibra y el diámetro de la barra. Se observó similitud en las resistencias de adherencia obtenidas en el caso de barras PRFC y PRFV, que se muestran a la vez inferiores a las obtenidas con barras de acero. Para el caso de barras PRFV, diferentes acabados superficiales activaron diferentes mecanismos de transferencia de esfuerzos, sin destacarse ninguno de ellos sobre los otros. Con independencia de la tipología de barra utilizada, el incremento en la resistencia a compresión del hormigón provoca un incremento en la resistencia de adherencia. Finalmente, se confirmó la tendencia que indica valores de resistencia de adherencia superiores para diámetros de barras inferiores, y viceversa.

Yan et al. [17], colectaron, en la literatura, una base de datos de 682 especímenes en ensayos de *Pull-out* para observar los factores que afectan al comportamiento de la adherencia de las barras de PRFV al hormigón y la durabilidad asociada. De los resultados se pudo concluir que la resistencia de adherencia tiene una relación lineal con los siguientes factores: resistencia a la compresión del hormigón, recubrimiento de hormigón, y diámetro de la barra y una relación no lineal con la longitud de empotramiento. Además, se acepta refuerzo transversal como una solución eficaz para aumentar la resistencia de adherencia de la barra de PRFV al hormigón.

Por último, en la discusión de adherencia-deslizamiento es importante discutir el método de ensayo. La mayoría de las conclusiones anteriores, con la excepción de Mosley et al. [13], se determinaron utilizando ensayos estándar de arrancamiento (*Pull-out*). Esos ensayos inducen presiones de compresión significativas sobre la barra, un confinamiento que puede no existir para el refuerzo de tensión por flexión donde la barra está típicamente incrustada en hormigón no confinado y a menudo agrietado. Se sabe que los ensayos de arrancamiento se realizan en gran medida como una prueba comparativa, ya que esas resistencias no representan las verdaderas fuerzas de adhesión en las secciones a flexión ACI440.3R-12 [18].

Comportamiento de elementos de hormigón reforzado con barras de PRFV sometidas a flexión.

Nanni et al [19] presentaron una investigación del comportamiento a flexión de losas de hormigón armado con PRFV en una dirección, las respuestas analizadas fueron el agrietamiento y el desplazamiento (flecha), en términos experimentales y teóricos. Teóricamente, se adoptó el procedimiento general del análisis no lineal basado en *slip and bond stresses* (tensiones de adherencia y deslizamiento) para el cálculo de fisuras y desplazamiento, mientras que el trabajo experimental fue ejecutado en cuatro losas armadas en una dirección, tres de ellas armadas con barras de PRFV y una armada con barras de acero, que fueron sometidas a ensayos de pruebas de carga hasta la rotura variando la cuantía de refuerzo, el diámetro de las barras y el espaciamiento. Los resultados obtenidos mostraron buena concordancia entre el modelo teórico y los valores experimentales, principalmente en condiciones de servicio correspondientes a cargas menores que 50% de la carga de rotura. Con esos resultados han podido concluir que la rigidez de las losas armadas con PRFV es significativamente inferior al de las losas reforzadas con acero después de fisurarse, resultando en fisuras más anchas y mayores desplazamientos (deflexión). La resistencia a la rotura de las losas aumenta con el incremento de la cuantía de las barras de PRFV, en esos casos se controla el fallo por aplastamiento del hormigón.

Tavares y Giongo [20] estudiaron las armaduras de PRFV centrándose en su comportamiento cuando son sometidas a tensiones normales, para ello han procedido al análisis teórico y experimental de vigas de hormigón armado con barras de PRFV para la determinación del diagrama carga-deformación y de la capacidad resistente. En los experimentos, han sometido a flexión 6 vigas simplemente apoyadas con las mismas propiedades geométricas, una de ellas armada con barras de acero y las restantes cinco armadas con barras PRFV. En el análisis de los resultados consideraron que el factor limitante en las barras de PRFV es el reducido módulo de elasticidad, por lo cual se obtiene mayores desplazamientos que en las barras de acero aplicándoles la misma fuerza, y sugieren que el mismo factor aumenta el porcentaje de armadura de PRFV necesaria para que una viga simplemente apoyada obedezca a los estados límites último y de servicio. Con ello, concluyeron que en el diseño de elementos de vigas armadas con PRFV se debe utilizar la totalidad de la capacidad resistente del hormigón y el

máximo de la capacidad resistente de las barras de PRFV sin que este sea el tipo de fallo predominante en la estructura.

Camacho [21], realiza una exposición de los modelos de diseño por los estados límites último y de servicio de los elementos de hormigón armado con PRFV sugeridos por el ACI 440.1R-06 (2006), por el Fib-Bulletin 40 (2007) y por el ISIS Manual nº.3 (2001). En su trabajo diseña, en tres casos de estudio, elementos estructurales de hormigón armado con PRFV y acero por separado, particularmente, una losa apoyada sobre viga, una losa apoyada directamente sobre columnas y una viga continua para destacar las principales diferencias entre las armaduras de acero y de PRFV. Los casos de estudios ejecutados han permitido al autor confirmar que de hecho el estado límite de servicio es mayoritariamente condicionante en estructuras de PRFV debido al reducido módulo de elasticidad que afecta significativamente la deformación igual que los dos estudios anteriores. Esta situación unida al hecho de los factores de reducción de la resistencia condujo a una mayor cuantía de armadura de PRFV.

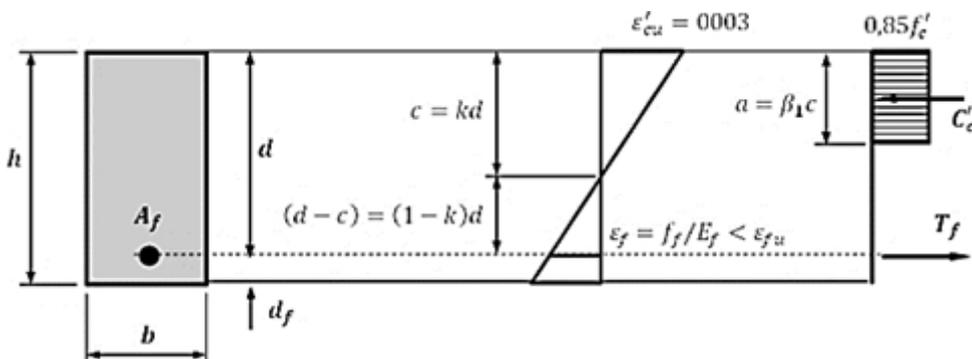


Figura 2 – Estado deformacional y de tensión-fuerza asociado a una falla por aplastamiento de hormigón de una viga rectangular en flexión [1].

Chulia et al (2012) [22], elaboran directrices de diseño para elementos de hormigón armado bajo estados límites, cumpliendo con los preceptos marcados por la EHE-08 (Norma española) con respecto a la compatibilidad de tensiones y deformaciones, modificándolos en función de las características intrínsecas de las barras de PRFV, desarrollando especialmente las correspondientes al comportamiento a flexión, cortante y compresión, en cuanto a estados límites últimos, y las de fisuración y deformaciones, en los estados límites de servicio. En este estudio se corroboran las conclusiones de un trabajo anterior, Chulia [2] en el que se plantea que la capacidad de los elementos de hormigón armado con barras de PRFV puede ser estimada usando la teoría de los estados límites, al igual que con los elementos armados tradicionalmente con acero, aunque, las barras de PRFV tienen un bajo módulo de elasticidad ($E_{PRFV}/E_{acero} \approx 1/5$), por ello los estados límites de servicio son determinantes en el diseño de los elementos de hormigón armado con este material.

Adam et al [23], presentan un estudio experimental, numérico, y analítico del comportamiento a flexión de hormigón armado con PRFV producidos localmente (Egipto), donde se ha investigado la influencia de la resistencia a compresión del hormigón a tres niveles (25MPa, 45MPa y 70MPa) y cuantía de refuerzo a tres niveles (μ_b , $1,7\mu_b$, $2,7\mu_b$, donde μ_b es la cuantía de refuerzo balanceada). Los resultados de esa investigación revelaron que el aumento de la cuantía de refuerzo reduce significativamente el ancho de la fisura y la deflexión a medio vano. Los autores consideran en sus conclusiones que los modelos de cálculo del ECP208 (Norma egipcia) y el ACI.1R-06 subestiman las deformaciones de vigas de hormigón armado con barras de PRFV, particularmente, las hiperreforzadas.

Abd-Elwahab y Elamary [24], presentaron un estudio paramétrico que se realizó para evaluar el rango de la cuantía de refuerzo que controla el mecanismo de fallo de vigas de hormigón reforzadas con PRFV y se ha llegado a concluir que para cuantías de refuerzo entre 1% y 2,5% se produce un fallo menos frágil en las vigas.

Comportamiento de elementos de hormigón reforzado con barras de PRFV sometidas a fuerza cortante.

Tureyen y Frosch [25] realizaron una investigación experimental detallada sobre la influencia de la rigidez del refuerzo longitudinal sobre la resistencia al corte de los elementos sin refuerzo transversal. Las series de ensayos consistieron de un conjunto de 9 vigas rectangulares en sección transversal. Una variedad de tipos de refuerzo, incluyendo: acero convencional, acero de alta resistencia, 2 tipos de PRFV y PRFA. En el trabajo experimental se verificó que la rigidez del refuerzo longitudinal influye en la resistencia al corte de los elementos sin refuerzo transversal. Asimismo, al examinar el fallo del esfuerzo cortante de los diferentes experimentos, se pudo observar la baja resistencia al corte de los elementos de hormigón armados con PRFV y correlacionarla con el bajo módulo de elasticidad y la reducción de la cuantía de refuerzo.

La influencia de la altura de la viga fue el parámetro central de estudio en un programa experimental conducido por Matta et al [26]. Un total de 9 especímenes con 3 alturas específicas diferentes fueron probados a cortante. No se utilizó refuerzo transversal en ninguna de las vigas. Los resultados mostraron una clara reducción de la resistencia a cortante de los especímenes con mayores alturas en relación a las de menor.

Alkhrdaji et al [27], investigaron el comportamiento a cortante de siete vigas (4 con refuerzo longitudinal y transversal y 3 solamente armadas longitudinalmente) y seis losas armadas con diferentes cuantías de refuerzo longitudinal y transversal de barras de PRFV con el objetivo de contrastar el enfoque de diseño a cortante del ACI 440. Los resultados de las pruebas indicaron que la resistencia a cortante en vigas sin cercos era directamente proporcional a la cuantía de refuerzo longitudinal, además el modo de fallo en las vigas con refuerzo transversal seguía el orden flexión – cortante que ha permitido concluir que la contribución de hormigón a la resistencia interna a cortante es influenciada por la cuantía de refuerzo longitudinal. Las fórmulas propuestas por el ACI 440 para calcular la resistencia a cortante proporcionada por los cercos de PRFV y por el hormigón fueron considerados demasiado conservadoras debido a que se basan en el dominio de compresión controlada (fallo por aplastamiento de hormigón).

Comportamiento de columnas de hormigón reforzado con barras de PRFV sometidas a flexo compresión.

Columnas de hormigón armado con PRFV a escala real con una sección transversal de 610 x 610 mm y altura de 3 m fueron ensayadas bajo carga axial (De Luca et al.) [28]. En este trabajo se concluyó que las barras de PRFV se pueden usar para reforzar las columnas, con cuantías de refuerzo longitudinal baja; la respuesta de las columnas reforzadas con PRFV es muy similar a la de las columnas reforzadas con acero, pudiendo despreciarse la contribución de las barras de PRFV al calcular la capacidad resistente de una columna cargada axialmente. Además, se verificó que la presencia de cercos no aumenta la capacidad resistente de las columnas, pero retrasan el pandeo.

Tobbi et al [29], investigaron columnas cuadradas con una sección transversal de 350 x 350 mm y una altura de 1400 mm bajo carga centrada. Una probeta de control sin refuerzo, dos columnas reforzadas con acero y cinco columnas reforzadas con PRFV formaban los ocho especímenes ensayados. Fueron estudiados los efectos de las variables: configuración y espaciado de cercos y el desprendimiento del recubrimiento. El estudio de la configuración y espaciado de los cercos evidenciaron que el empleo de los PRFV como refuerzo transversal contribuía a aumentar la resistencia, rigidez y ductilidad en el núcleo del hormigón. Habiendo llegado a la conclusión general que las barras de PRFV se pueden utilizar como refuerzo principal en columnas siempre que se utilice un refuerzo transversal estrechamente confinado para eliminar el pandeo.

Hadi et al [30], en su estudio investigan el uso de barras de PRFV y hélices PRFV (espirales) como refuerzo longitudinal y transversal, respectivamente, en columnas de hormigón. Un total de 12 especímenes de hormigón con 205 mm de diámetro y 800 mm de altura fueron moldeados y probados bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados experimentales

muestran que la carga axial y la capacidad de momento flector de las columnas de hormigón armadas con PRFV son menores que las de las columnas convencionales con armadura de acero. Sin embargo, la ductilidad de las columnas PRFV estaba muy próxima a la ductilidad de las columnas reforzadas con acero. Se concluye que ignorar la contribución de las barras de PRFV en compresión conduce a una diferencia considerable entre los resultados analíticos y experimentales.

Issa et al [31], exploran el comportamiento de las columnas reforzadas con PRFV y acero cuando se someten a cargas axiales excéntricas. Se ensayaron seis columnas de 150 x 150 mm de sección transversal. Cuatro de ellas tenían refuerzo de PRFV y dos tenían refuerzo de acero. Los parámetros analizados fueron la resistencia de hormigón, la excentricidad y el espaciamiento de los cercos. Se registraron grandes deformaciones longitudinales para columnas con refuerzo de PRFV y para columnas con espaciamientos de cercos mayores. Sin embargo, el espaciamiento no tuvo efecto notable sobre la máxima deflexión lateral y ductilidad de las columnas armadas con PRFV. Las barras de PRFV registraron mayores deformaciones que las barras de acero y dichas deformaciones fueron mayores cuando el espaciamiento de los cercos era grande. El aumento de la resistencia del hormigón se asoció con la reducción en la deformación de barra de PRFV.

Uniones

Saravanan y Kumaran [32], realizaron una evaluación de la resistencia al corte de uniones viga-columna exteriores de hormigón reforzado internamente con PRFV bajo carga *cuasi* sostenida (con un incremento de 1kN hasta la rotura) sobre vigas y manteniendo carga constante sobre columnas. A partir de los resultados obtenidos se concluyó que el comportamiento de las uniones viga-columna es influenciado por la geometría (de la viga y de la columna), cuantía de refuerzo (en la viga y en la columna), resistencia del hormigón. Además, constataron que la capacidad de carga y la resistencia a cortante de la unión reforzada con PRFV es 10% inferior con respecto a los reforzados con acero.

Said [33], En este estudio, dos ejemplares de uniones de columnas viga-columna a escala real reforzados con barras de acero y PRFV fueron probados bajo carga cuasi-estática. Se caracteriza el daño en los dos especímenes para comparar su rendimiento bajo carga sísmica simulada. El espécimen PRFV mostró una plasticidad muy baja, resultando en una menor disipación de energía comparada con la del espécimen reforzado con acero. La naturaleza elástica y el bajo módulo de elasticidad del refuerzo de PRFV definieron claramente su comportamiento con respecto al espécimen reforzado con acero en términos de deformación y daño.

Hasaballa et al [34], presentaron un estudio experimental sobre unión entre vigas en sección T y columnas exteriores a escala real ensayados bajo condiciones simuladas de carga sísmica teniendo como armado a las barras de PRFV. Los resultados experimentales mostraron que la capacidad de transferencia de las uniones puede alcanzar más del 3,0% sin ningún daño considerable, lo que indica la validez del uso de barras de PRFV y cercos como refuerzo en las uniones viga-columna sometidas a carga sísmica.

Gouda et al [35], presentaron un modelo de elementos finitos (MEF) utilizando un software tridimensional (3D) especializado para investigar el comportamiento a punzonamiento de las uniones losa-columna interiores a escala real. Se utilizó el modelo, validado, para realizar un estudio paramétrico para investigar los efectos de la cuantía de refuerzo, relación entre perímetro crítico de punzonamiento y altura efectiva y rectangularidades de la sección transversal de la columna sobre el comportamiento de punzonamiento de tales uniones. Los resultados mostraron que el aumento de los parámetros analizados mejoró el comportamiento de las uniones en términos de reducción de flechas y la deformación del refuerzo e incrementando la capacidad última.

Ductilidad

La baja ductilidad de los PRF es un reto clave a superar si se reconoce que este comportamiento puede no solo hacer que un fallo de sobrecarga inminente sea más difícil de detectar, sino que también puede limitar la posibilidad de redistribución de momentos en estructuras estáticamente indeterminadas. Esto ha conllevado a que la mayoría de los códigos y reglamentos que abordan el tema recomienden diseños hiperreforzados (cuantía de refuerzo superior a la cuantía balanceada), para los elementos de hormigón reforzados con PRF. Debido a eso, varios investigadores han desarrollado trabajos con el objetivo de revertir esa cuestión proponiendo soluciones prácticas y tecnológicas para incrementar la ductilidad de los elementos armados con PRF y posiblemente concebir diseños hiporeforzados (cuantía de refuerzo inferior a la cuantía balanceada).

Entre los métodos estudiados se destacan dos, la solución del refuerzo híbrido, ya sea por empleo de barras con diferentes capas en la sección transversal (acero y PRF), (Figura 8) [36], o por diseño de secciones reforzadas con barras de diferentes materiales en simultáneo, (Figura 9) (acero y PRFV o PRFC y acero) [37], y la solución por adicción de fibras a la mezcla del hormigón [38, 39].

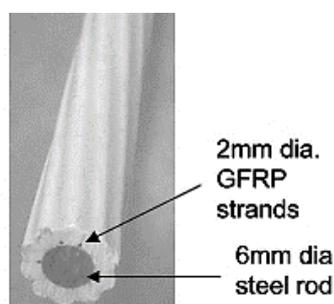


Figura 3 – Barra híbrida con capa helicoidal de PRF sobre un núcleo de acero [36].

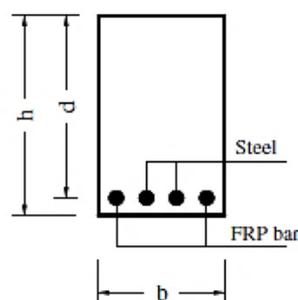


Figura 4 – Detalles de sección transversal con refuerzo híbrido utilizando en simultáneo barras de acero y barras de PRF [37].

Durabilidad

Muchos aspectos influyen en la durabilidad de los elementos de hormigón armado con PRF dependiendo de las características de refuerzo y su interacción con el hormigón. La complejidad se debe a la variedad de productos disponibles en el mercado en términos de componentes (resinas y fibras) y el tratamiento superficial. Los problemas que pueden llegar a presentar los PRF ante la acción de agentes ambientales (agua, álcali, solución salina) o cambio de temperatura, están relacionados con la penetración o degradación de la resina, que protege las fibras y permite su interacción de adherencia con el hormigón [40].

Dejke [41] condujo una investigación con el objetivo de determinar la influencia del ambiente a largo plazo del hormigón armado con PRFV. Según los resultados preliminares, 18 meses en hormigón saturado de humedad a 60°C corresponde a 100 años en la misma condición ambiental, pero a temperatura exterior (en el sur de Suecia). Las soluciones alcalinas representan un ambiente más agresivo que el del hormigón saturado (ambos con el mismo valor de pH).

Por otro lado Park et al [42], investigaron el impacto de las condiciones de envejecimiento acelerado en el comportamiento a largo plazo de flexión y ductilidad de elementos de hormigón armado con barras de PRFV y barras de acero. Se diseñaron un total de 36 especímenes. De estos 18 se sometieron a cargas sostenidas y condiciones de envejecimiento aceleradas (es decir, 47°C y 80% de humedad relativa) en una cámara. El comportamiento en flexión bajo una exposición de 300 días fue comparado con el de los ejemplares acompañantes sin experimentar condiciones de envejecimiento acelerado. Los resultados indican que las

condiciones de envejecimiento acelerado redujeron la capacidad de flexión no sólo en los elementos reforzados con acero, sino también en aquellos reforzados con PRFV, con diferentes tasas de reducción.

Con el objetivo de proporcionar a la comunidad de ingenieros los resultados del comportamiento de los materiales PRFV que han sido expuestos al entorno en estructuras construidas, Mufti et al. [43], colectaron testigos de hormigón reforzado con PRFV de cinco estructuras de campo. Para determinar la composición del PRFV se utilizaron métodos analíticos, concretamente microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y radiografía dispersiva de energía, calorimetría de barrido diferencial y espectroscopia infrarroja, después de haber sido sometidos a un entorno alcalino de hormigón durante cinco a ocho años. Tres equipos de investigación de cuatro universidades canadienses realizaron microanálisis del PRFV y el hormigón circundante independientemente. Los resultados indican que no se produjo ningún deterioro del PRFV en ninguna de las estructuras de campo y no se produjeron procesos de degradación química dentro del PRFV debido a la alcalinidad del hormigón. La conclusión general del estudio es que el PRFV es duradero en el hormigón.

Marco Legal

De manera general la metodología para el diseño del hormigón reforzado con barras de PRF es sensiblemente similar a la que se sigue para el hormigón convencional reforzado con barras de acero. Sin embargo, las diferentes propiedades físicas y mecánicas de los PRF, justifican la elaboración de guías de diseño propias, que contengan los procedimientos y expresiones que faciliten el cálculo estructural con este tipo de refuerzo. Avalados por trabajos científicos con ensayos en laboratorios, se han implementado documentos de referencia a nivel internacional en el área de la aplicación de PRFV que constituyen las guías, códigos y especificaciones de cálculo y diseño publicadas. Entre los principales se encuentran:

CANADÁ

- CAN/CSA-S6-14 (2014) "Canadian Highway Bridge Design Code" Section 16: Fiber Reinforced Structures.

EUA

- ACI 440.1R-15 (2015) "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars.
- ACI 440.3R-12 (2012) "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures".
- ACI 440R-07 (2007) "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.
- ACI 440.5-08 (2008) "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bar".
- ACI 440.6-08 (2008) "Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement".
- AASHTO GFRP-1 (2009) "AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete Bridge Decks and Traffic Railings".

JAPÓN

- Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997 "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials," Concrete Engineering Series 23.

ITALIA

- CNR-DT 203/2006 - "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars."

EUROPA

- Fib:CEP-FIP, *Bulletin n.º. 40 "FRP reinforcement in RC structures"* (2007).

Conclusiones:

Las barras de PRFV tienen por sus características innegables ventajas sobre las de acero, como mayor resistencia a la tracción, mayor durabilidad al no oxidarse, menor peso de la armadura lo que se traduce en menor gasto de transporte y mayor facilidad en el montaje, sus propiedades antimagnéticas, dieléctricas y sin conductividad térmica y su relación costo beneficio. Tiene un amplio campo de aplicación, pudiendo sustituir al acero en muchas de las obras de construcción, de ahí la importancia del estudio de sus propiedades.

Para el diseño de estructuras de hormigón utilizando barras de PRFV, se deben considerar varias diferencias importantes entre ellas y las barras de acero pues se pudo observar en la literatura que la sustitución directa de las barras de acero por PRFV puede no ser posible en algunos casos debido a su menor módulo de elasticidad y baja resistencia al corte.

El tema de la adherencia y el anclaje es un campo en el que una gran cantidad de investigaciones está en curso y todavía se necesita. Aunque generalmente se acepta que las barras de PRFV no alcanzan los mismos niveles de resistencia de adherencia que el refuerzo de acero, las razones exactas de por qué se observa que son inferiores son actualmente numerosas e inconclusas con pruebas experimentales contradictorias. Se puede concluir que en la discusión sobre la adherencia de las barras de PRFV, existen muchos factores que pueden influir en el comportamiento de adherencia-deslizamiento local, incluyendo, pero sin limitarse al perfil de superficie, el módulo de elasticidad de la barra, el diámetro de la barra y los efectos de Poisson.

Muchos trabajos fundamentan la necesidad de profundizar el conocimiento del comportamiento de las barras de PRFV como refuerzo interno de elementos de hormigón armado.

En la literatura son varios los autores que afirman el carácter conservador por parte de las normas técnicas de diseño estructural de hormigón con respecto a las barras de PRFV debido a la poca experiencia que hay con esa novedosa tipología. La durabilidad y alta resistencia que aportan las barras de PRFV son confrontadas con el modo de fallo de las mismas y el bajo módulo de elasticidad influyendo en los diseños de modo que el estado límite servicio es quien gobierna el dimensionamiento de los elementos.

Referencias bibliográficas:

1. Caneiro, J.A.H., H.W. Rivas, and I.d.C.D. Pérez, *Empleo de Barras y Telas de Mallas de PRF como Refuerzo del Hormigón y el Ferrocemento. Diseño Estructural*. 2017.
2. Chulia, A.I.A., *Diseño, Según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP* in *Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructura*. 2010, Universidad Politécnica de Valencia p. 1-261.
3. Fib:CEP-FIP, *FRP reinforcement in RC structures*, in *Bulletin 40*, Fib:CEP-FIP, Editor. 2007.

4. Rivas, H.W. and J.A.H. Caneiro, *Empleo de las barras y telas de mallas de PRFV como refuerzo del hormigón. Guía para el diseño estructural de secciones rectangulares reforzadas con barras PRFV*, Inédito, Editor. 2015. p. 1-84.
5. Chulia, A.I.A., *Diseño, Según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP*. 2010, Universidad Politécnica de Valencia Valencia.
6. ACI440-1R-06, *Guide for the design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. 2006: Reported by ACI committee 440.
7. 440-1R-15, A., *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) bars*. 2015, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.
8. Ehsani, M.R., *Glass-fiber reinforcing bars*, in *Alternative materials for the reinforcement and prestressing of concrete*, J.L. Clarke, Editor. 1993, Blackie Academic and Professional: London. p. 34-54.
9. Nanni, A., A.D. Luca, and H.J. Zadeh, *Reinforced Concrete with FRP Bars. Mechanics and Design*. 2014.
10. Johnson, D.T.C., *Investigation of Glass fibre Reinforced Polymer (GFRP) Bars as internal Reinforcement for Concrete Structures*, in *Department of Civil Engineering*. 2014, University of Toronto: Toronto. p. 453.
11. Katz, A., N. Berman, and L.C. Bank, *Effect of High Temperature on Bond Strength of FRP Rebars*. *Journal of Composites for Construction*, 1999. **3**: p. 9.
12. Muñoz, M.B., et al., *Estudio de la adherencia entre armaduras de materiales compuestos de matriz polimérica (FRP) y hormigón*. *Hormigón y Acero*, 2008. **59**: p. 9.
13. Mosley, C.P., A.K. Tureyen, and R.J. Frosch, *Bond Strength of Nonmetallic Reinforcing Bars*. *Structural Journal*, 2008. **105**(5).
14. Achillides, Z. and K. Pilakoutas, *Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions*. *Journal of Composites for Construction*, 2004. **8**: p. 9.
15. Muñoz, M.B., et al., *Estudio de la adherencia entre armaduras de materiales compuestos de matriz polimérica (FRP) y hormigón*. *Hormigón y Acero*, 2008. **59**.
16. 440-3R-04, A., *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. 2004, American Concrete Institute.
17. Yan, F., Z. Lin, and M. Yang, *Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review*. *Composites (Elsevier)*, 2016: p. 14.
18. 440-3R-12, A., *Guide Test Method for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures*. 2012, American Concrete Institute (ACI): Farmington Hills, MI.
19. Ombres, L., T. Alkhrdaji, and A. Nanni, *Flexural Analysis of One-way Concrete Slabs Reinforced with GFRP Rebars*. international Meeting on Composites Materials, PLAST2000, Proceedings, Advancing with Composites, 2000: p. 8.
20. Tavares, D.H. and J.S. Giongo, *Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP*. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, 2009. **11**: p. 14.
21. Camacho, L.d.F.C., *Utilização de Varões de GFRP nas Estruturas de Betão Armado*. 2011, Universidade da Madeira: Madeira, Portugal. p. 104.
22. Chulia, A.I.A., et al., *New GFRP bars as internal reinforcement in concrete structures*, in *ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials*. 2012: Venice, Italy. p. 8.
23. Adam, M.A., et al., *Analytical and Experimental Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymers Bars*. *Construction and Building Materials*, 2015: p. 13.
24. Rafik k. Abd-ELwahab, A.S.E., *Ductile Failure of Concrete Beam Reinforced with GFRP*. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2015. **5**(5): p. 11.
25. Tureyen, A.K. and R.J. Frosch, *Shear Tests of FRP-Reinforced Concrete Beam without Stirrups*. *ACI Structural Journal*, 2002. **99**: p. 8.
26. Matta, F., et al., *Scaling of strength of FRP reinforced concrete beams without shear reinforcement*, in *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*. 2008: Zurich, Switzerland. p. 1-7.
27. Alkhrdaji, T., et al. *Shear Strength of GFRP RC Beams and Slabs*. in *Composites in Construction*. 2001. Porto, Portugal.

28. Luca, A.D., F. Matta, and A. Nanni, *Behavior of Full-Scale Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Columns under Axial load*. ACI Structural Journal, 2010. **107**: p. 8.
29. Tobbi, H., A.S. Farghaly, and B. Benmokrane, *Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with glass Fiber-Reinforced Polymer Bars*. ACI Structural Journal, 2012. **109**: p. 8.
30. Hadi, M.N.S., H. Karim, and M. Sheikh, *Experimental investigation on circular columns reinforced with GFRP bars and helices under different loading conditions*. Journal of Composites for Construction, 2016.
31. Issa, M.S., I.M. Metwally, and S.M. Elzeiny, *Performance of eccentrically loaded GFRP reinforced concrete columns*. World Journal of Engineering, 2012: p. 8.
32. Saravanan, J. and G. Kumaran, *Joint shear strength of FRP reinforced concrete beam-column joints*. Central European Journal of Engineering, 2011.
33. Said, A.M., *Damage characterization of beam-column joints reinforced with GFRP under cyclic loading*. Smart Structures and Systems, 2009. **5**: p. 14.
34. Hasaballa, M., et al., *GFRP-REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN JOINTS*, in *The Second Official International Conference of International Institute for FRP in Construction for Asia-Pacific Region*. 2009, Asia-Pacific conference on FRP in Structures: Seoul, Korea. p. 6.
35. Gouda, A. and E. El-Salakawy, *Finite Element Modeling of GFRP-Reinforced Concrete Interior Slab-Column Connections Subjected to Moment Transfer*. Fibers, 2015: p. 21.
36. Saika, B., et al., *Performance of hybrid rebars as longitudinal reinforcement in normal strength concrete*. RILEM, 2005: p. 8.
37. Pang, L., et al., *Design Propositions for Hybrid FRP-steel Reinforced Concrete Beams*. Journal of Composites for Construction 2015.
38. Issa, M.S., I.M. Metwally, and S.M. Elzeiny, *Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars*. Engineering Structures, 2011: p. 11.
39. Belarbi, A. and H. Wang, *Bond Durability of FRP Bars Embedded in Fiber-Reinforced Concrete*. Journal of Composites for Construction (ASCE), 2012.
40. Ceroni, F., et al., *Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members*. Cement & Concrete Composites (Elsevier), 2006.
41. Dejke, V., *Durability and Service Life Prediction of GFRP for Concrete Reinforcement*, C.U.o.T.-D.o.B. Materials, Editor. 2001: Göteborg, Sweden.
42. Park, Y., Y.H. Kim, and S.-H. Lee, *Long-Term Flexural Behaviors of GFRP Reinforced Concrete Beams Exposed to Accelerated Aging Exposure Conditions*. Polymers, 2014: p. 21.
43. Mufti, A., et al. *Durability of GFRP Reinforced Concrete in Field Structures*. in *Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber-reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*. 2005. Kansas City, Mo.