

## Empleo de polímero reforzado con fibras de vidrio como refuerzo interno en estructuras hormigón

The use of glass fiber reinforced polymer as the internal reinforcement on concrete structures

**Ing. Faria Joaquim Luís\***  
<fariajqluis@gmail.com>

**M. Sc. Ing. Isel del Carmen Díaz Pérez\*\***  
<iselmarmen@civil.cujae.edu.cu>

**Dr.C. Ing. Hugo Wainshitok Rivas\*\*\***  
<hugow@tesla.cujae.edu.cu>

\*Instituto Superior Politécnico de Songo, Mozambique, \*\* y \*\*\* Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

---

### RESUMEN

El objetivo del artículo es exponer 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. El uso de barras de polímeros reforzados con fibras no metálicas (PRF) en el reforzamiento interno de estructuras de hormigón, en sustitución del acero, viene siendo empleado con buenos resultados, principalmente por contar con una probada estabilidad anticorrosiva. Además, su resistencia a la tracción es superior respecto del acero, posee hasta la décima parte de su peso y presenta transparencia magnética, tan necesaria en las edificaciones asociadas a los programas de salud.

**Palabras clave:** barras de PRF, estructuras de hormigón, fibras no metálicas.

### ABSTRACT

This paper shows up the current state of the knowledge around the behaviour of glass fibers reinforced polymers (GFRP) reinforced concrete structures subjected to different load conditions and atmospheres. The use of non-metallic bars of fiber reinforced polymers (FRP) as the internal reinforcement of concrete structures, in substitution of the steel, is being applied with good results, mainly due to FRP anticorrosive stability. In addition, its tensile strength is superior than steel, it possesses almost the tenth part of its weight and it presents magnetic transparency, so necessary in the constructions associated to the programs of health.

**Keywords:** FRP bars, concrete structures, non-metallic

---

## INTRODUCCIÓN

La corrosión de las armaduras de aceros representa un problema de gran importancia para las estructuras de hormigón armado porque la misma va asociada con una pérdida considerable de su sección transversal y la generación de tensiones de tracción en el hormigón, provocadoras de la fisuración o desprendimiento, causadas por los productos de la corrosión que ocupan un volumen mayor que el acero ordinario y en consecuencia pérdida de la unión estructural entre el refuerzo y el hormigón. Además, la alta conductividad eléctrica, térmica y magnética de este material complementa su debilidad en lo que concierne a la función estructural que se le confía en las obras civiles

Recientes avances en el campo de los materiales poliméricos reforzados con fibras (PRF) han dado como resultado el desarrollo de nuevos materiales con excelentes potenciales para el refuerzo de elementos de hormigón armado en áreas donde el acero ha fallado, entre ellos, polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC), aramida (PRFA) y vidrio (PRFV).

La aplicación de estos materiales en los elementos estructurales de diferentes tipos de construcciones civiles genera un cierto recelo por el desconocimiento del comportamiento de los mismos y por lo tanto es necesaria una modelación padrón respetando los reglamentos vigentes y las leyes constitutivas de dichos materiales tal como se hace corrientemente con el acero.

El objetivo del artículo es exponer 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 sollicitaciones de carga y ambientes.

## DESARROLLO

Siendo un área con potencial crecimiento, varios investigadores han desarrollado estudios envueltos a esa temática. Se han presentado varios trabajos científicos, mucho de ellos con experimentos en laboratorios y respectivos resultados, abordando los varios aspectos a tomar en consideración en el diseño de hormigón armado con PRFV.

### **Comportamiento de elementos de hormigón reforzado con barras de PRFV sujetas a flexión**

Nanni et al [1] 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 al 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 cargamentos 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[2] estudiaron las armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio 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, una de ellas armada con barras de acero, pero con las mismas propiedades geométricas que las restantes cinco armadas con barras en fibra de vidrio, de forma a tornar posible una posterior comparación de resultados.

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, concluyeran 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 [3], 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, a 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 (placa) y una viga continua para destacar las principales diferencias entre las armaduras de acero e 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 aliada al hecho de los factores de reducción de la resistencia condujo a una mayor tasa de armadura de PRFV.

Chulia et al (2012) [4], elaboran directrices de diseño para elementos de hormigón armado bajo estados límites, cumpliendo con los preceptos marcados por la EHE-08 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[5] 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, aún que, sin embargo 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.

Para evitar la posibilidad de una ruptura frágil de la barra de fibra de vidrio, en el modelo analítico se estimó la armadura mínima necesaria para los elementos de hormigón armado con PRFV. La exactitud del modelo ha sido comprobada comparando la deformación calculada teóricamente con la experimental, dando una correlación excelente entre los valores obtenidos.

[2], 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 la resistencia a compresión del hormigón a tres niveles (25Mpa, 45Mpa y

70Mpa) y cuantía de refuerzo a tres niveles ( $\mu_b$ ,  $1,7\mu_b$ ,  $2,7\mu_b$ , donde  $\mu_b$  es la cuantía de refuerzo balanceada). Los ensayos fueron ejecutados sobre vigas – probetas simplemente apoyadas con las dimensiones 120 mm de ancho x 300 mm de altura x 2800 mm de longitud analizadas hasta el fallo en cuatro puntos flexionados y las respuestas estudiadas fueron el desplazamiento (flecha) a medio vano, el ancho de fisura y la deformación en barras de PRFV. 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.

El análisis numérico no lineal de elementos finitos ha sido construido para simular el comportamiento a flexión de las vigas ensayadas en términos de fisuración y deflexión y se observó concordancia entre los resultados numéricos y experimentales. También propusieron una ecuación basada en la regresión de los resultados experimentales y numéricos para predecir el desplazamiento, donde fue necesario modificar la fórmula para estimar el momento de inercia efectivo del ACI.1R-06 por la introducción de factores empíricos. Los autores consideran en sus conclusiones que los modelos de cálculo del ECP208 y el ACI.1R-06 subestiman las deformaciones de vigas de hormigón armado con barras de PRFV, particularmente, las hiperreforzadas.

[6] presentan los resultados de un estudio experimental y analítico sobre el comportamiento de vigas simplemente apoyadas con carga en el centro y armadas con barras de PRFV o de acero. Ambos tipos de vigas reforzadas estaban provistos de estribos rectangulares hechos del mismo material utilizado en el refuerzo longitudinal. Las simulaciones de elementos finitos no lineales se ejecutaron utilizando el paquete de software ANSYS. De acuerdo con la comparación entre los resultados teóricos y experimentales en términos de desplazamientos verticales y fisuración, se observó buena concordancia para la aceptación del modelo. Así que fue seguido por un estudio paramétrico utilizando el modelo calibrado.

El estudio paramétrico se realizó para evaluar el rango de la cuantía de refuerzo que controla el mecanismo de fallo dúctil de vigas de hormigón reforzadas con PRFV y se ha llegado a siguientes conclusiones: el fallo dúctil de las vigas de hormigón reforzado con PRFV puede obtenerse cuando el porcentaje del refuerzo en relación a sección transversal de la viga oscila entre 1% y 2,5%. Además, se constató que al aumentar la cuantía de refuerzo  $\rho_{PRFV}$  sobre la cuantía balanceada  $\rho_b$  en la viga, el índice de ductilidad disminuyó mientras que la capacidad máxima de carga aumentó significativamente.

### **Comportamiento de elementos de hormigón reforzado con barras de PRFV sujetas a cortante**

Tureyen y Frosch[7] 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 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 [8]. Un total de 9 especímenes con 3 alturas específicas diferentes fueron probados a cortante. No se utilizó refuerzo de 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 [9], 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 estribos 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 estribos de PRFV y por el hormigón fueron considerados demasiado conservadores 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 sujetas a flexo compresión**

Columnas de hormigón armado con PRFV a escala real con una sección transversal de 610 × 610 mm y Altura de 3 m fueron ensayados bajo carga axial (De Luca et al.) [10]. Las principales variables investigadas fueron los tipos de barras de PRFV y la cuantía de refuerzo transversal. En este trabajo se concluyó que, las barras de PRFV se pueden usar para reforzar las columnas, con cuantías de refuerzo longitudinal bajas, la respuesta de las columnas reforzadas con PRFV es muy similar al de las columnas reforzadas con acero, pero la contribución de las barras de PRFV puede ser despreciada al calcular la capacidad resistente de una columna cargada axialmente. Además, se verificó que la presencia de estribos no aumenta la capacidad resistente de las columnas, pero retrasan el pandeo.

Tobbi et al [11], investigaron columnas cuadradas con una sección transversal de 350 × 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 de estribos, espaciamiento de estribos y el desprendimiento del recubrimiento. A través de los resultados se concluyó que, el PRFV puede utilizarse eficazmente como refuerzo transversal en columnas, pues el factor de reducción de la resistencia de 0,85 utilizado para las columnas reforzadas con acero puede adoptarse para las columnas reforzadas con PRFV. El desprendimiento temprano del recubrimiento provocó pérdida de capacidad resistente a carga axial. El estudio de la configuración e espaciamiento de los estribos evidenciaron la contribución de los PRFV como refuerzo transversal aumentando la resistencia, rigidez y ductilidad en núcleo del hormigón. Habiendo llegado a la conclusión general que las barras PRFV se pueden utilizar como refuerzo principal en columnas siempre que se utilice un refuerzo transversal estrechamente confinado para eliminar el pandeo.

En trabajo de Prachasaree et al [12] se utilizó PRFV para reforzar columnas de hormigón que fueron investigadas experimentalmente bajo carga de compresión para evaluar su comportamiento estructural. Se prepararon muestras con refuerzo longitudinal variado, sección transversal, recubrimiento y tipo de refuerzo lateral. Basándose en este estudio, las cuantías de refuerzo longitudinal y transversal de PRFV afectó ligeramente a la resistencia de las columnas. Mientras que los diferentes tipos de transversal aplicados tenían poca diferencia en la resistencia, el refuerzo en espiral fue el más eficaz en términos de la presión de confinamiento y la deformación inelástica. La contribución a la

resistencia a la compresión confinada aumentada con la cuantía de refuerzo. El recubrimiento afectó principalmente a los efectos de confinamiento temprano, no a la capacidad de carga máxima ni a la deformación última.

Hadi et al [13], en su estudio investigan el uso de barras 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. Se investigó el efecto de reemplazar el acero por refuerzo de PRFV y espaciamiento de las hélices de PRFV sobre el comportamiento de los especímenes. Los resultados experimentales muestran que la carga axial y la capacidad de momento de flexión 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 [14], exploran el comportamiento de las columnas reforzadas con PRFV y acero cuando se someten a cargas axiales excéntricas. Se ensayaron seis columnas de 150 \* 150 mm de sección transversal. Cuatro de ellos tenían refuerzo de PRFV y dos tenían refuerzo de acero. La resistencia de hormigón de las columnas reforzadas con PRFV fue de 24,73 Mpa o 38,35 Mpa mientras que para las columnas reforzadas con acero fue de 24,73 Mpa. La excentricidad era de 50 mm o 25 mm y el espaciado de los estribos era de 80 mm o 130 mm. Se registraron grandes deformaciones longitudinales para columnas con refuerzo de PRFV y para columnas de estribos con espaciamientos mayores. Sin embargo, el espaciamiento de estribos no tuvo efecto notable sobre la máxima deflexión lateral y ductilidad de las columnas armadas con PRFV. La tensión máxima media fue de aproximadamente el 60% de la resistencia a la compresión del hormigón para columnas con una excentricidad inicial de 50 mm. Las barras de PRFV registraron mayores deformaciones que las barras de acero y dichas deformaciones fueron mayores cuando el espaciamiento de los estribos 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[15], realizaron una evaluación de la resistencia al corte de uniones viga-columna exteriores de hormigón reforzado internamente con PRFV bajo carga

monótonamente creciente sobre vigas y manteniendo carga constante sobre columnas. En esa investigación se ensayaron dieciocho probetas para analizar la influencia de parámetros como la cuantía de refuerzo longitudinal en las vigas, la cuantía de refuerzo longitudinal en las columnas, resistencia del hormigón, aspecto de la unión y la unión de los estribos en la unión. También se realiza el análisis de elementos finitos para simular el comportamiento de las uniones viga-columna en las diversas condiciones paramétricas.

A partir de los resultados obtenidos se concluyó que el comportamiento de las uniones viga-columna es influenciado por la geometría (de la viga e de la columna), cuantía de refuerzo (en la viga e 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 del acero.

Said [16], 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 [17], 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. La viga mide 2100 mm de largo, 350 mm de ancho y 450 mm de profundidad, mientras que la columna mide 3650 mm de largo con una sección cuadrada de 350 mm lado. Las cargas cíclicas laterales cuasiestáticas se aplican directamente en el extremo de la viga simulando la carga sísmica los resultados de las pruebas y el análisis de dos prototipos de prueba. Los resultados experimentales mostraron que la capacidad de derivar 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 estribos como refuerzo en las uniones viga-columna sometidas a carga sísmica.

Gouda et al [18], presentaron un modelo de elementos finitos (FEM) utilizando un software tridimensional (3D) especializado para investigar el comportamiento a

punzonamiento de las uniones losa-columna interiores a escala real sometidas a una relación de momento-cortante de 0,15 m. El modelo FEM se verificó entonces frente a los resultados experimentales de las uniones de la losa-columna interiores a escala real reforzadas con PRFV. Posteriormente, se utilizó el modelo verificado para realizar un estudio paramétrico para investigar los efectos de la cuantía de refuerzo, relación perímetro - profundidad y aspecto de la columna sobre el comportamiento de a punzonamiento de tales uniones. Los resultados de la prueba mostraron que el aumento de los parámetros ensayados mejoró el comportamiento general de las uniones en términos de reducción de flechas y tensión de refuerzo e incrementando la capacidad última.

### **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) [19].

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 [20], Muñoz et al [21], Mosley et al. [22]).

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 método 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 se basa en una cantidad potencialmente reducida de cohesión, pero también se roza en cada una de las deformaciones. Al determinar qué mecanismo es superior, existen resultados contradictorios que sugieren la presencia e influencia de otros parámetros [22].

Mosley et al. [22], ensayaron la adherencia de barras de FRP en especímenes de viga, 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[23], 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, la disparidad en el módulo de elasticidad entre los dos materiales es más del doble. Se observó que la fuerza de adhesión está relacionada con los efectos de Poisson, el diámetro de la barra y el desfase de cortante (*shear lag*). *Shear lag* en este contexto se refiere a una falla a cortante inter-laminar en la superficie exterior de la barra que incluye el perfil de superficie, se cizalla completamente del núcleo durante el ensayo de arrancamiento [19].

Muñoz et al [24] 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 [25] 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. De los resultados obtenidos se constató que las barras de acero experimentaron elevados valores de tensión en el tramo inicial sin registrar deslizamiento alguno, mientras que las barras de PRF presentaron deslizamiento desde el principio de aplicación de la carga. Se observó similitud en las

resistencias de adherencia obtenidas en el caso de barras CFRP 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. [26], 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 prueba. La mayoría de las conclusiones anteriores, con la excepción de Mosley et al. [22], se determinaron utilizando la prueba estándar de arrancamiento (*Pull-out*). Esas pruebas inducen presiones de compresión significativas sobre la barra, un confinamiento que puede no existir para el refuerzo de tensión de flexión donde la barra está típicamente incrustada en hormigón no confinado ya 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 [27].

En conclusión, el tema de la adherencia y el anclaje es un campo en el que una gran cantidad de investigación está en curso y todavía se necesita. Aunque generalmente se acepta que las barras de PRFV no alcanzan los mismos niveles de resistencia de unión 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.

### **Ductilidad**

Los FRP presentan evidentemente diversas ventajas, por lo que siguen siendo el mejor reemplazo para las barras de acero. Sin embargo, su bajo módulo de elasticidad y el carácter frágil que presentan al colapsar reduce la ductilidad de los elementos de hormigón armados con PRF [28]. 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 sección transversal (acero y PRF), (Figura 1), [29-32] o por diseño de secciones reforzadas con barras de diferentes materiales en simultáneo, (Figura 2) (acero y PRFV o PRFC y acero) [33-35], y la solución por adición de fibras a la mezcla del hormigón [36, 37].

Issa et al. [36], investigaron la influencia de las fibras comerciales (polipropileno, vidrio y acero) en el comportamiento a flexión y ductilidad de vigas de hormigón reforzadas con barras de PRFV. Los resultados teóricos calculados usando el código ACI440-1R-06 [38], mostraron una buena concordancia con los resultados experimentales. Además, a través de los resultados obtenidos en el análisis teórico y experimental indicaron que todos los tipos de fibras utilizadas mejoraban la ductilidad de vigas de hormigón armadas con PRF, evidenciado por el cálculo del índice de deformabilidad, especialmente las fibras de acero que aumentaron la ductilidad en 277,8%.

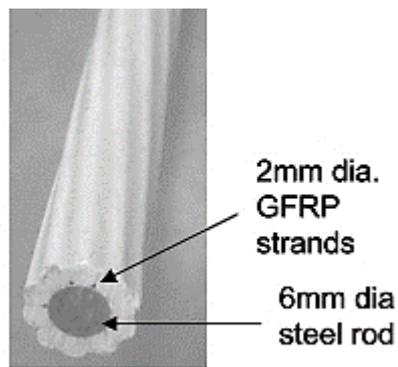


Figura 1 – Barra híbrida con capa helicoidal de PRF sobre un núcleo de acero [29].

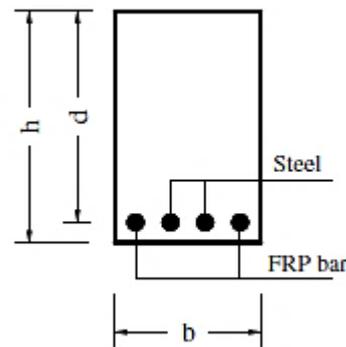


Figura 2 – Detalles de sección transversal con refuerzo híbrido utilizando en simultáneo barras de acero y barras de PRF [33].

En su trabajo Wang y Belarbi[37] presentaron un estudio con el objetivo de desarrollar un sistema de refuerzo híbrido no ferroso para placas de puentes de hormigón mediante el uso de refuerzos de polímero reforzado con fibra (FRP) y fibras de polipropileno distribuidas aleatoriamente. Este sistema híbrido tiene el potencial de eliminar los problemas relacionados con la corrosión del refuerzo de acero, al mismo tiempo que proporciona la resistencia, la rigidez y la ductilidad deseadas, que son deficiencias del sistema de refuerzo de FRP en estructuras de hormigón armado. Los resultados de la prueba indicaron que, con la adición de fibras, el comportamiento de flexión se mejoró con un aumento del índice de ductilidad en aproximadamente 40% en comparación con las vigas de hormigón sin fibras.

Mustafa y Hassan [34], presentaron un modelo de elementos finitos no lineales para investigar el comportamiento del refuerzo híbrido con barras de PRF y barras de acero. Polímeros reforzados con diferentes tipos de fibra; PRFC (polímeros reforzados con fibras de carbono) y PRFV; se utilizaron junto con barras de acero en las vigas de hormigón analizadas. El estudio se realizó utilizando el programa de elementos finitos no lineales " ANSYS ". Los resultados obtenidos por el análisis de elementos finitos se contrastaron con los resultados experimentales. Un amplio estudio paramétrico se llevó a cabo para explorar el efecto de la sustitución de acero por diferentes tipos de barras de PRF. El estudio mostró que la contribución de los refuerzos de acero a los refuerzos de PRF en vigas de hormigón mejoró la ductilidad de las vigas y eliminó el indeseable fallo frágil de la viga de hormigón.

En su trabajo Lau y Pam[35], incluyen un estudio experimental sobre el comportamiento de ductilidad de vigas de hormigón armado con PRF. En este estudio, se añade el refuerzo longitudinal de acero para formar una viga con refuerzo híbrido con el fin de mejorar su ductilidad a flexión y en la misma aprovechar las características de alta resistencia a tracción de las barras de PRF. El estudio también incluye la eficacia del uso de estribos con ganchos de 90 y 135 grados en la mejora de la ductilidad.

Pang et al. [33] realizaron un trabajo interesante sobre la ductilidad en las vigas de hormigón reforzadas con la combinación de barras de acero y de polímero reforzado con fibras (PRF), reconociendo que las mismas pueden proporcionar mayor resistencia, facilidad de servicio y durabilidad. Debido al comportamiento elástico lineal de las barras PRF antes del fallo, las características de deformación de las vigas de hormigón armado híbrido difieren de las vigas convencionales de hormigón armado solamente con acero y vigas de hormigón armado solamente con acero PRF. Por tanto, los índices convencionales de ductilidad no son adecuados para vigas de hormigón armado con refuerzo híbrido. Para mejorar la precisión se definió un nuevo índice de ductilidad en términos de deformabilidad y capacidad de absorción de energía. Varias comparaciones entre los resultados experimentales y las predicciones teóricas mostraron que los modelos desarrollados pueden predecir con precisión la capacidad de carga y la ductilidad. Basándose en diversos requisitos de ductilidad, se encontró cuantías óptimas de PRF y barras de acero. La resistencia del hormigón, la resistencia del acero, el tipo de PRF, la rigidez de refuerzo longitudinal efectiva y la deformación de compresión última tienen efecto en la ductilidad. Sin embargo, el incremento en la resistencia del acero y la rigidez efectiva del refuerzo híbrido tienen efectos perjudiciales sobre la ductilidad. Además, constataron que las vigas híbridas que utilizan PRFV y barras de acero proporcionan un mejor rendimiento de ductilidad que otros tipos de barras de PRF.

Algunos autores (Behnam y Eamon[30], Lam et al. [31]; Mirmiran[32], Saika et al. [29]) también han desarrollado el concepto de refuerzo híbrido desde otro punto de vista, a partir de la concepción de barras híbridas. Aquí se combinan varios materiales dispuestos en capas en la misma barra con el propósito de obtener diseños de elementos de hormigón con comportamiento dúctil, alcanzando resultados satisfactorios en ese sentido, pero que resultan ser de elevado costo y no se encuentran en niveles de comercialización internacionalmente accesibles para su aplicación en comparación con los otros métodos presentados anteriormente.

## 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.

Antes de diseñar sus 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.

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 al hecho de la baja 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 pequeño módulo de elasticidad influyendo en los diseños de modo que el estado límite servicio es que gobierna el dimensionamiento de los elementos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ombres L, Alkhrdaji T, and Nanni A. Flexural Analysis of One-way Concrete Slabs Reinforced with GFRP Rebars. international Meeting on Composites Materials, PLAST2000, Proceedings, Advancing with Composites; 2000.
2. Tavares DH and Giongo JS. Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFR. Cadernos de Engenharia de Estruturas. 2009; 11:14.
3. Camacho FC. Utilização de Varões de GFRP nas Estruturas de Betão Armado. 2011, Universidade da Madeira: Madeira, Portugal.
4. Chulia A. New GFRP bars as internal reinforcement in concrete structures, in ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials. 2012: Venice, Italy.

5. Chulia 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.
6. Rafik K, Abd-ELwahab A. Ductile Failure of Concrete Beam Reinforced with GFR International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2015. 5(5):11.
7. Tureyen AK and Frosch RJ, Shear Tests of FRP-Reinforced Concrete Beam without Stirrups. ACI Structural Journal. 2002; 99:8.
8. Matta F. Scaling of strength of FRP reinforced concrete beams without shear reinforcement, in Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008). 2008: 1-7.
9. Alkhrdaji T. Shear Strength of GFRP RC Beams and Slabs. in Composites in Construction. 2001. Porto, Portugal.
10. Luca A, Matta F and Nanni A. Behavior of Full-Scale Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Columns under Axial load. ACI Structural Journal, 2010. 107: 8.
11. Tobbi H, Farghaly AS and Benmokrane B. Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. ACI Structural Journal. 2012; 109: 8.
12. Prachasaree W. Behavior and Performance of GFRP Reinforced Concrete Columns with Varius Types of Stirrups. International Journal of Polymers Science. 2015; 20:9.
13. Hadi M, Karim H and Sheikh M. Experimental investigation on circular columns reinforced with GFRP bars and helices under different loading conditions. Journal of Composites for Construction. 2016.
14. Issa MS, Metwally S and Elzeiny SM. Performance of eccentrically loaded GFRP reinforced concrete columns. World Journal of Engineering. 2012: 8.
15. Saravanan, J. and G. Kumaran, Joint shear strength of FRP reinforced concrete beam-column joints. Central European Journal of Engineering, 2011.
16. Said AM. Damage characterization of beam-column joints reinforced with GFRP under cyclic loading. Smart Structures and Systems. 2009; 5:14.
17. Hasaballa M. 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 confrence on FRP in Structures: Seoul, Korea. 6.
18. Gouda A and El-Salakawy E. Finite Element Modeling of GFRP-Reinforced Concrete Interior Slab-Column Cnnections Subjected to Moment Transfer. Fibers. 2015: 21.
19. Johnson DTC. Investigation of Glass ibre Reinforced Polymer (GFRP) Bars as internal Reinforcement for Concrete Structures, in Department of Civil Engineering 2014, University of Toronto: Toronto 453

- 
- 20 Katz AN, Berman and Bank LC. Effect of High Temperature on Bond Strength of FRP Rebars Journal of Composites for Construction. 1999; 3: 9
- 21 Muñoz MB. Estudio de la adherencia entre armaduras de materiales compuestos de matriz polimérica (FRP) y hormigón Hormigón y Acero. 2008; 59: 9
- 22 Mosley C, Tureyen AK and Frosch RJ. Bond Strength of Nonmetallic Reinforcing Bars Structural Journal, 2008 105(5)
- 23 Achillides Z and K Pilakoutas, Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions Journal of Composites for Construction, 2004 8: 9
- 24 Muñoz MB. Estudio de la adherencia entre armaduras de materiales compuestos de matriz polimérica (FRP) y hormigón Hormigón y Acero. 2008; 59
- 25 440-3R-04. A Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures 2004, American Concrete Institute
- 26 Yan F, Lin H, Yang M. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review Composites (Elsevier). 2016; 14
- 27 440-3R-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
- 28 Caneiro JAH, Rivas HW and Pérez CD. Empleo de Barras y Telas de Mallas de PRF como Refuerzo del Hormigón y el Ferrocemento Diseño Estructural; 2017
- 29 Saika B. Performance of hybrid rebars as longitudinal reinforcement in normal strength concrete RILEM, 2005: 8
- 30 Behnam B and Eamon C. Reliability-based Design Optimization of Concrete Flexural Members Reinforced with Ductile FRP Bars Construction and Building Materials, 2013
- 31 Lam H. Design Methodology of a Ductile Hybrid Kevlar-carbon Reinforced Plastic for Concrete Structures by the Braidtrusion Process
- 32 Mirmiran AM, Shahawy D and Samaan M. Strength and Ductility of Hybrid FRP-Concrete Beam-Columns Journal of Structure Engineering; 2000
- 33 Pang L. Design Propositions for Hybrid FRP-steel Reinforced Concrete Beams Journal of Composites for Construction; 2015
- 34 Mustafa SAA and Hassan HA. Behavior of concrete reinforced with hybrid steel and FRP composites House and Building National Reseach Center; 2017
- 35 Lau D and Pam HJ. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams Engeneering Structures; 2010
- 36 Issa MS, Metwally IM and Elzeiny SM. Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars Engeneering Structures, 2011: 11
- 37 Belarbi A and Wang H. Bond Durability of FRP Bars Embedded in Fiber-Reinforced Concrete Journal of Composites for Construction (ASCE), 2012

38 ACI440-1R-06. Guide for the design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars 2006: Reported by ACI committee 440

## **BIBLIOGRAFÍA**

Ayer AJ. El positivismo lógico. La Habana: Instituto del Libro; 1967.

Barnes B. Interests and the growth of knowledge. Londres: Routledge and Kegan Paul; 1977.

Barnes B. Thomas Kuhn y las ciencias sociales. México: Fondo de Cultura Económica, 1986

Basalla G. The spread of western science. Science. 1967;156.

Bijker W. Problems of society, technology and science in Europe The european master programme in STS The European Interuniversity Association on Society-Science and Technology ESST.

Bijker W, Hughes T, Pinch T. The social construction of technological systems The MIT Press; 1989.

Recibido: 13 de marzo de 2017

Aceptado con recomendaciones: 4 de mayo de 2017

Aceptado: 30 de mayo de 2017