

NUEVO TIPO DE REFUERZO PARA HORMIGÓN

J. Larralde¹ y R. Silva Rodríguez²

El hormigón armado es un material de construcción que se usa en todo el mundo debido a sus cualidades estructurales y facilidad de ejecución. Es un material compuesto en el que los dos componentes principales se diseñan para cumplir funciones estructurales y de protección específicas. En los elementos de una estructura de hormigón armado, el hormigón constituye el componente principal que provee resistencia a los esfuerzos de compresión, estabilidad al pandeo y protección contra el fuego y los cambios de temperatura y humedad. El otro componente, que generalmente es acero de refuerzo, provee principalmente resistencia a los esfuerzos de tracción a los que el hormigón por sí solo ofrece poca resistencia. A través de la historia del desarrollo del hormigón reforzado como se usa actualmente, diferentes materiales se han utilizado para proveer la resistencia a la tracción requerida en los elementos estructurales. Se han usado materiales naturales como fibras de diferentes orígenes y tipos, y materiales artificiales o procesados como el acero. El acero es el material que más comúnmente se usa como refuerzo por varias razones, incluyendo: alta resistencia a la tracción, alto módulo de elasticidad, trabajabilidad, resistencia al deterioro y poca variabilidad en sus propiedades. Sin embargo, en condiciones en las que la estructura está expuesta a ambientes especialmente corrosivos el acero de refuerzo es propenso a la oxidación y consecuentemente la durabilidad de la estructura es limitada.

Con más y más frecuencia se está observando que estructuras de hormigón reforzado que se construyeron en el pasado están deteriorándose; algunas de ellas en forma prematura. Una de las varias causas del deterioro prematuro es la corrosión del refuerzo. Las comunidades de ingenieros civiles y de estructuras de algunos países euro-

A través de la historia del desarrollo del hormigón reforzado como se usa actualmente, diferentes materiales se han utilizado para proveer la resistencia a la tracción requerida en los elementos estructurales.

peos así como del Japón y de los Estados Unidos han empezado a buscar alternativas de refuerzo para el hormigón con propiedades mecánicas iguales o similares a las del acero pero con mayor resistencia a la corrosión. De los materiales disponibles actualmente, algunos de ellos desarrollados para la industria aeronáutica y automovilística, los materiales plásticos reforzados con fibras están recibiendo más y más atención como posibles materiales de refuerzo para el hormigón.

Varias compañías de manufactura de materiales plásticos reforzados con fibras (denominados genéricamente como materiales compuestos) que producen componentes para aviones y automóviles, han empezado a producir en forma tentativa materiales compuestos para usar en estructuras de Ingeniería Civil. Algunos de estos materiales, que ya están disponibles para uso en la construcción, incluyen perfiles estructurales de diferentes dimensiones y formas, cables para pretensar hormigón o para uso en estructuras de puentes suspendidos, y barras para refuerzo de hormigón en diámetros similares a las de acero. En este artículo se presentan los resultados de ensayos exploratorios efectuados en la Universidad Drexel, Filadelfia, E.U.A., para estudiar el potencial de barras compuestas de plástico y fibra de vidrio como refuerzo para el hormigón.

Nuevos tipos de refuerzo

Tres tipos de materiales compuestos que están siendo probados en forma experimental principalmente en Alemania, Japón y los Estados Unidos como posibles formas de refuerzo para hormigón son: barras de plástico reforzado con fibras de vidrio, cables de plástico reforzado con fibras de carbono y mallas de plástico reforzado con fibras de vidrio. De estos tres tipos, las barras de fibra de vidrio son de coste relativo más bajo y su proceso de fabricación es más sencillo. Este artículo

¹ Assistant Professor y ² Graduate Student, Universidad Drexel, Filadelfia, Pensilvania 19104, U.S.A.

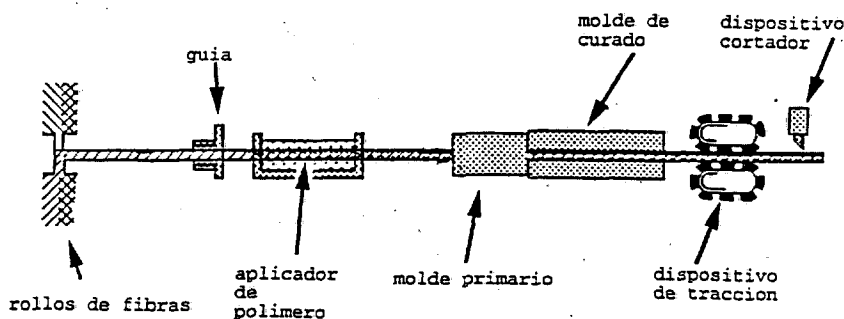


Figura 1. Diagrama esquemático de procedimiento de fabricación por pultrusión de las barras de fibra de vidrio.

se concentra principalmente en el uso de barras de fibra de vidrio como refuerzo para el hormigón.

Fabricación y propiedades

Las barras se fabrican en un proceso de pultrusión. El método consiste en hacer pasar un grupo de varios cientos o miles de fibras continuas a través de un molde que se mantiene a alta temperatura y que controla las dimensiones transversales de la barra. Las fibras se impregnan previamente con una resina de polímero en estado líquido. Al pasar por el molde, el polímero endurece cementando las fibras (Fig. 1). Como resultado, se obtienen barras de sección transversal constante (comúnmente circular) y de cualquier longitud dado que se producen en forma continua y se pueden cortar a la longitud deseada.

En el proceso de fabricación de pultrusión, la sección transversal de las barras es constante y

la superficie lisa. Por lo tanto, cuando se usan como refuerzo, la adherencia con el hormigón no es tan buena como la de las barras corrugadas de acero. Para solucionar este problema, la sección transversal se modifica parcialmente atando un grupo de fibras en la superficie y en forma espiral a todo lo largo de la barra. Este cordón de fibras se enreda alrededor de la barra cuando el polímero aún no ha endurecido produciendo deformaciones en la barra y consecuentemente aumentando la adherencia con el hormigón (Fig. 2).

Las propiedades mecánicas de las barras de plástico reforzado con fibra de vidrio dependen de las propiedades de los componentes, de las proporciones de cada uno de ellos y del proceso de fabricación.

Fibras de vidrio

El componente principal en las barras es el grupo de fibras de vidrio que provee alta resistencia y rigidez a tracción en la barra. Las fibras pueden ser de tres tipos: «E», «S», o «C». El diámetro de las fibras varía entre 5 y 15 μm y las propiedades mecánicas en tracción dependen del tipo de fibra y del modo de agrupación. La resistencia a tracción de las fibras individuales es de aproximadamente 4,600 MPa para las de tipo S y 3,400 MPa para las de tipos C y E. El módulo de elasticidad es de aproximadamente 85 GPa para las de tipo S y 70 GPa para las de tipos E y C. En contraste con las propiedades del acero para el que la resistencia a tracción es de 2,800 MPa y el módulo de elasticidad de 200 GPa. Las fibras más comúnmente usadas en la fabricación de barras son las de tipo E por ser las de más bajo costo.

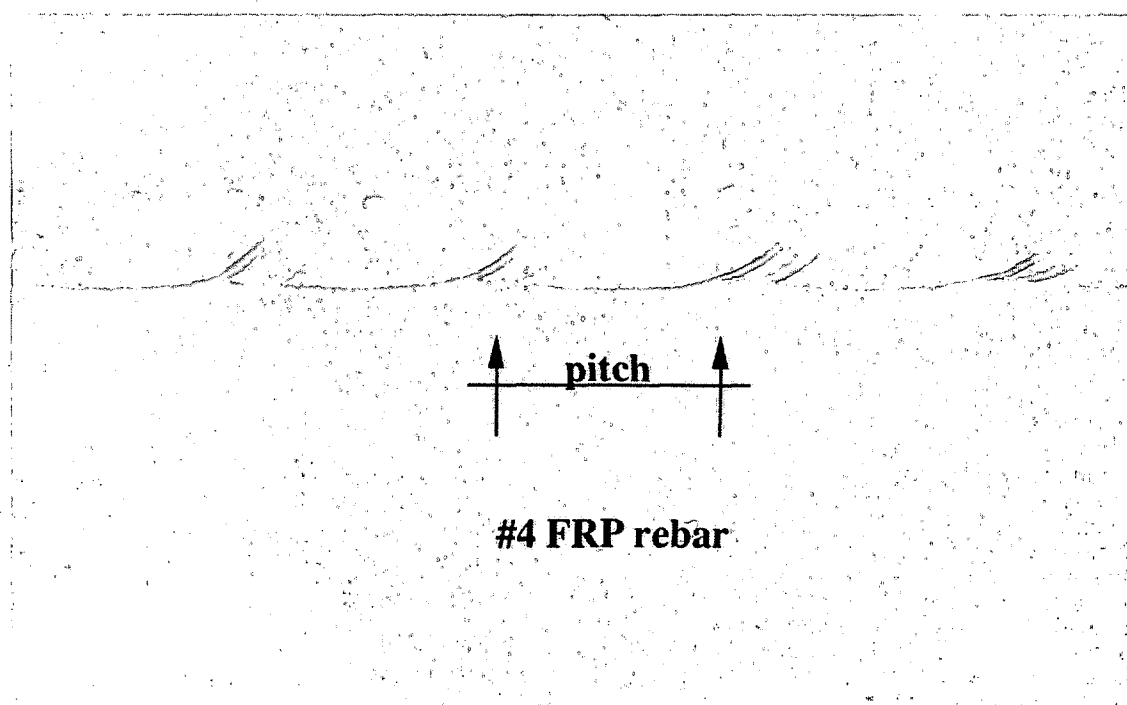


Figura 2. Fotografía de barras de fibra de vidrio de 12.7 mm de diámetro.

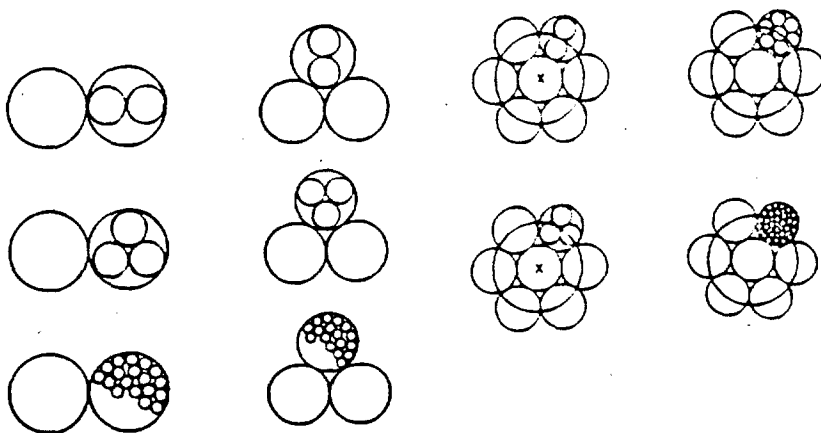
Polímeros

El polímero constituye el material continuo o matriz en los materiales compuestos. En las barras se usa para mantener las fibras adheridas entre sí, para proveer protección y estabilidad dimensional. Los polímeros son moléculas grandes en cadena en las que átomos de carbono forman la estructura principal de la molécula. Los polímeros pueden ser de tipo termoplástico, si su viscosidad se puede cambiar aplicando alta temperatura, o termoendurecido, si permanecen en estado sólido aún con la aplicación de temperatura. Poliéster y vinilester son usados comúnmente para formar la matriz en las barras.

Las propiedades mecánicas de los polímeros no son tan relevantes como las de las fibras dado que son éstas últimas las que proveen la resistencia y rigidez a la tracción. El polímero, sin embargo, protege a las fibras contra agentes químicos, ácidos, humedad, etc. Por lo tanto la resistencia al deterioro producido por el ataque de agentes químicos; o por los cambios de humedad y temperatura del medio ambiente, e inclusive producidos por fuego, del polímero son más importantes que las propiedades mecánicas. En general, el poliéster y vinilester son adecuados para las condiciones de trabajo del refuerzo.

Propiedades Mecánicas de las Barras

En la fabricación de las barras, las fibras se agrupan en forma de cordones multifilamento con diferentes configuraciones como se ilustra en la Fig. 3. Dado que la sección transversal del grupo de filamentos no es continua sino que tiene cavidades entre las fibras individuales, las propiedades mecánicas medidas considerando la sección transversal total de las barras son un poco diferentes de las de las fibras individuales. Esta diferencia depende de la densidad de agrupación de las fibras y del diámetro de estas con respecto al diámetro de la sección transversal de la barra. Los espacios entre fibras se llenan con el polímero cuya rigidez y resistencia a la tracción son mucho menores que el de las fibras (Fig. 4). El módulo de elasticidad de la barra es aproximadamente igual a la media aritmética de los módulos de las fibras y del polímero promediados de acuerdo a la proporción volumétrica relativa de cada uno de ellos. Es decir; $E_v = E_f V_f + E_p V_p$. En esta ecuación, E_f y E_p son los módulos de elasticidad de la fibra y del polímero; V_f y V_p son las fracciones en volumen de fibra y polímero con respecto al volumen total de la barra. La resistencia a la tracción de la barra es más difícil de determinar en base a las resistencias a la tracción de los componentes. Las fibras tienen un modo de rotura frágil. Al aplicarse tracción en la barra la tracción se distribuye en todas las fibras aunque no en forma uniforme. Cuando la tracción se aproxima a la resistencia última, algunas fibras fallan. La rotura de fibras individuales ocurre en forma aleatoria debido a que no todas las fibras están orientadas exactamente en forma paralela a la dirección axial de la barra. Actualmente las barras se fabrican con una proporción de entre 60 % y 90 % de fibras.



Las barras usadas en las pruebas que se describen en este artículo consistieron de barras con fibra de vidrio tipo E y resina de vinilo. En la Figura 5 se muestran los resultados de los ensayos de tracción en las barras. Como se ve en la Figura 5, la relación tensión-deformación de la barra es aproximadamente lineal a todos los niveles de carga. También se puede observar en la Figura 5 que este tipo de barra no tiene un comportamiento dúctil como las barras de acero. En contraste, las barras de plástico reforzado con fibras tienen un comportamiento elástico en un rango muy amplio de cargas; desde cero hasta 90 % ó 95 % de

Figura 3. Esquemas de diferentes configuraciones de fibras en las barras de fibra de vidrio.

Figura 4. Fotografía con microscopio electrónico de la sección transversal de la barra; ampliada 300X.



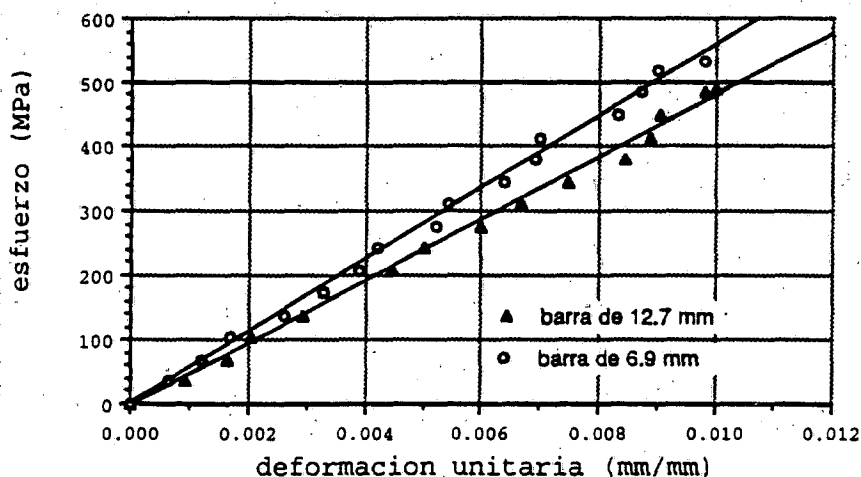
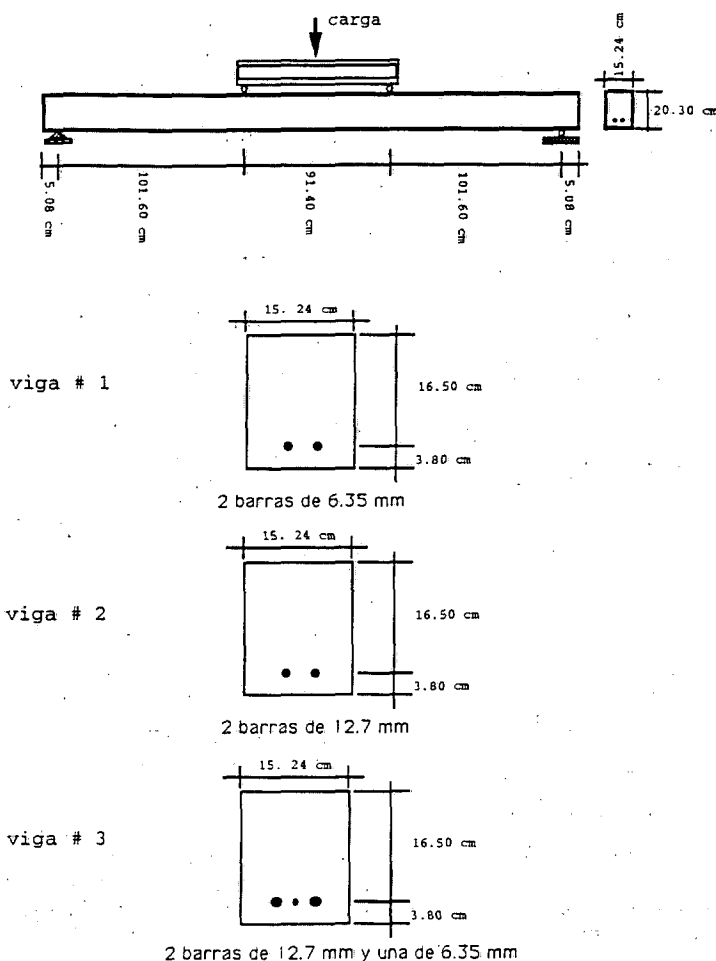


Figura 5. Resultados de los ensayos de tracción en las barras. Abajo. Figura 6. Procedimiento de ensayo y dimensiones de las vigas de hormigón reforzadas con barras de fibra de vidrio.

la resistencia a tracción. Las barras de acero sufren deformaciones plásticas permanentes cuando la tensión es cercana a la tensión de fluencia (que generalmente es de aproximadamente el 60 %-70 % de la resistencia a tracción).



Vigas de Hormigón Reforzadas con Barras de Plástico

Para estudiar el comportamiento del hormigón reforzado con barras plásticas, se fabricaron varias probetas en forma de vigas y se ensayaron a flexión. Se fabricaron tres vigas de 15.24 cm. de ancho, 20.3 cm. de alto y 305 cm. de longitud. Las vigas se reforzaron con armadura de tracción únicamente y con cantidades diferentes de refuerzo como se indica en la Figura 6.

Las vigas se fabricaron en el laboratorio usando hormigón en proporción por peso de 1:2:3:0.6 de cemento, arena, árido grueso (25.4 mm tamaño máximo) y agua, respectivamente. Después de coladas, las vigas se curaron a 20 °C y 100 % de humedad durante un período de 30 días.

Paralelamente, se prepararon probetas cilíndricas de hormigón para determinar la resistencia a compresión del hormigón usado en las vigas, y también se cortaron varias probetas de las barras para determinar la resistencia y módulo de elasticidad de estas.

Procedimiento de Ensayo y Resultados

Primero se ensayaron las probetas de hormigón y las barras. Los promedios de los resultados se muestran en la Tabla 1.

Las vigas se ensayaron en flexión como se muestra en la Figura 6. La carga se aplicó gradualmente con una prensa hidráulica incrementando la deformación vertical en el centro de la viga a razón de 2.5 mm. por minuto. La carga y la deformación se midieron automáticamente con un sistema automático de adquisición de datos (Daytronik 10) y una computadora IBM.

Los resultados de los ensayos se muestran en las gráficas de carga-deformación en la Figura 7. Las tres vigas mostraron agrietamiento por flexión, principalmente en la zona de momento flexionante máximo. Las grietas se iniciaron en la región en tracción de la viga propagándose aproximadamente en forma vertical hacia la zona en compresión a medida que la carga se incrementó. En la viga # 1 (la de menor refuerzo) se formaron solamente 3 grietas visibles a un espaciamiento de aproximadamente 45 cm; en la viga # 2, se formaron 6 grietas espaciadas a 25 cm. aproximadamente; y en la viga # 3 (con la mayor cantidad de refuerzo) se formaron 10 grietas con un espaciamiento de aproximadamente 15 cm.

En todas las vigas la rotura ocurrió por tracción de las barras. Las gráficas de carga-deformación muestran dos partes claramente definidas. La primera, desde que se inició la carga hasta el agrietamiento de la sección de la viga debido a que las tensiones de tracción excedieron la resistencia a tracción del hormigón. La segunda, desde el inicio del agrietamiento hasta que la viga falló cuando la tensión en las barras excedió su resistencia a tracción. La carga máxima en cada una de las vigas fue de 9,358 N para la viga # 1, 27,346 N para la viga # 2 y 37,250 N para la viga # 3. Las deformaciones verticales a la falla fueron de 37

mm, 64 mm. y 63 mm. para las vigas ± 1 , ± 2 y ± 3 , respectivamente.

En los resultados experimentales mostrados en la Figura 7, se puede observar que la gráfica no es continua sino que tiene la forma de sierra con pequeños picos que se pueden explicar como el resultado del agrietamiento del hormigón. En la viga ± 1 estos picos son más obvios debido a que la resistencia a flexión del hormigón por sí sólo es comparable con la del hormigón reforzado con las barras dado que las cantidades de refuerzo es pequeño. En las vigas ± 2 y ± 3 los picos producidos por el agrietamiento de la sección de hormigón no son tan obvios, debido a que la resistencia a flexión del hormigón reforzado con las barras es considerablemente mayor que la de la sección de hormigón por sí solo. Cuando ocurre el agrietamiento, las tensiones de tracción son transferidas del hormigón a las barras. El momento de inercia de la sección que resiste la flexión se reduce drásticamente produciendo un cambio súbito de la deflexión. Dado que las vigas se ensayaron aplicando la carga con una prensa hidráulica, cuando la deflexión aumenta súbitamente la carga registrada en la prensa decrece rápidamente produciendo los picos en la curva de carga-deflexión.

Se calcularon las deflexiones que teóricamente producen las cargas en el centro de la viga. Se usaron los métodos convencionales de flexión de vigas reforzadas con acero para verificar si el comportamiento de carga-deflexión de las vigas reforzadas con barras de fibra de vidrio se puede predecir analíticamente usando los métodos convencionales. Para esto, se asumieron dos mecanismos. En el primero, desde que la carga es cero hasta que llega a la magnitud necesaria para que el momento producido pueda agrietar la sección de la viga. En este primer mecanismo, se supuso que la sección compuesta de la viga sin agrietar resiste el momento flector producido por la carga. Se supone asimismo que la distribución de tensiones a lo largo del espesor de la viga es lineal y que la tensión máxima está limitada por la resistencia a flexión del hormigón. En el segundo mecanismo, que es activado cuando la sección de la viga se agrieta, se supone que el momento interno producido por la sección del hormigón en compresión y las barras en tracción, resiste el momento externo producido por la carga. Para simplificar el análisis, se supone que toda la longitud de la viga con momento máximo (comprendida entre los puntos de aplicación de la carga) se ha agrietado y que solamente el hormigón en compresión contribuye al momento resistente interno de la viga. Se supuso además que en la transición entre los dos mecanismos al instante del agrietamiento, la deformación vertical en el centro de la viga aumenta sin incremento de carga. En esta transición la viga se deforma en flexión lo suficiente para producir esfuerzos de tracción en las barras que equilibran los esfuerzos de compresión en el hormigón. Los resultados analíticos se comparan con los experimentales en la Figura 7.

TABLA 1

Resistencia a compresión del hormigón	diámetro	Resistencia a tracción de la barra	Módulo de elasticidad de la barra
viga ± 1 42.7 MPa	6.3 mm	530 MPa	55.1 GPa
viga ± 2 41.3 MPa	12.7 mm	455 MPa	48.3 GPa
viga ± 3 46.2 MPa			

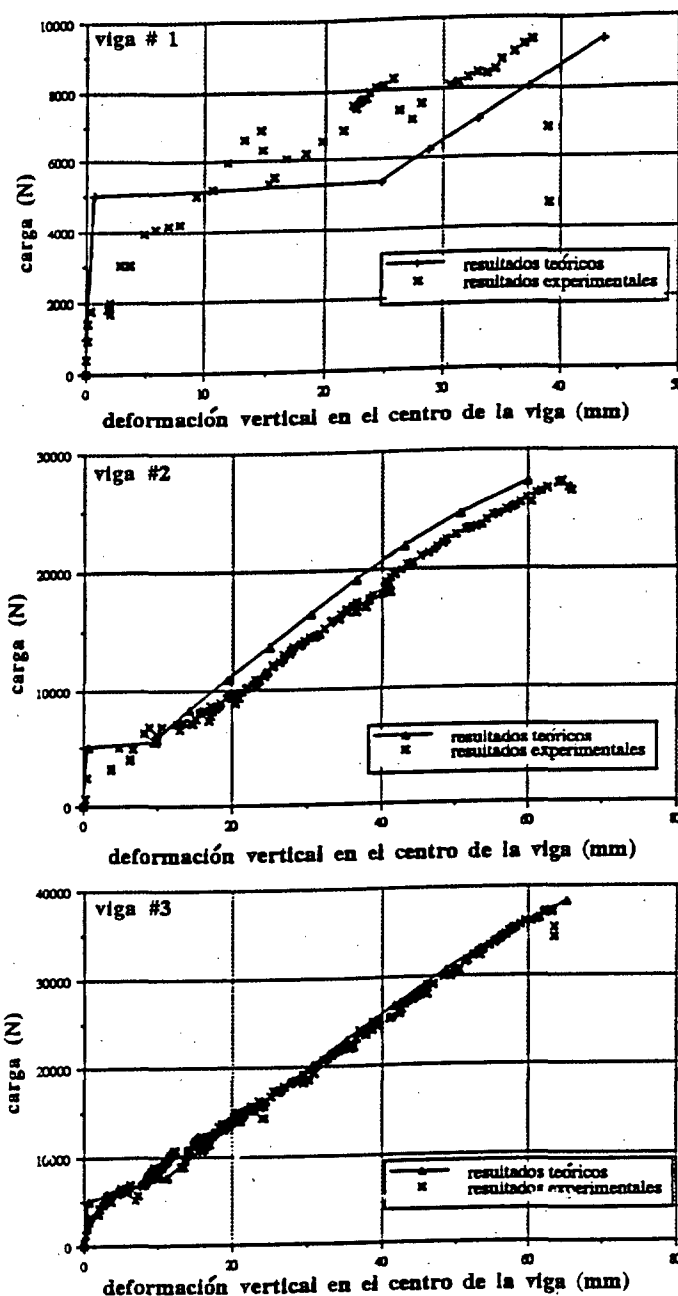


Figura 7. Resultados de los ensayos en las vigas de hormigón reforzadas con barras de fibra de vidrio.

El material compuesto de plástico reforzado con fibras comienza a considerarse como material alternativo al acero en el hormigón armado.

Conclusiones

El hormigón por sí solo tiene poca resistencia a los esfuerzos de tracción por lo que es necesario usar algún tipo de refuerzo en los elementos de las estructuras de hormigón armado. Al acero se ha usado tradicionalmente como refuerzo para el hormigón, sin embargo este tipo de refuerzo es susceptible a la corrosión especialmente en estructuras expuestas a condiciones corrosivas severas. Recientemente, en varios países se han empezado a considerar materiales alternativos para refuerzo del hormigón que son resistentes a la corrosión. Uno de estos materiales es el material compuesto de plástico reforzado con fibras. En los Estados Unidos de América hay varias compañías que ya están produciendo en cantidades limitadas barras de plástico reforzadas con fibra de vidrio para usarse exclusivamente como refuerzo en el hormigón armado. En este reporte se presentan los resultados de ensayos preliminares en vigas de hormigón reforzadas con barras de fibra de vidrio. Se probaron tres vigas de 305 cm. de longitud con varias cantidades de refuerzo. De los resultados experimentales se puede concluir que las vigas reforzadas con barras de vidrio mostraron un comportamiento de carga-deformación similar al que se obtendría en vigas reforzadas con refuerzo convencional de acero. Adicionalmente, se puede concluir que el comportamiento de las vigas reforzadas con barras de fibra de vidrio se puede predecir razonablemente bien con los mismos métodos analíticos que se usan para vigas de hormigón convencionales siempre y cuando se usen las propiedades mecánicas de los materiales correspondientes.■

Bibliografía

- BALLINGER, C. «Structural FRP Composites», Civil Engineering Magazine, July, 1990.
- BANK, L. C.; XI, Z.; MOSALLAM, A. S. «Experimental Study of FRP Grating Reinforced Concrete Slabs», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- BEDARD, C. «Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Construction», Concrete International Magazine, Jan, 1992.
- CHAWLA, K. «Composite Materials», Springer-Verlag Pub., New York, 1987.
- DANIALI, S. «Bond Strength of Fiber Reinforced Plastic Bars in Concrete», Proceedings of ASCE First Materials Engineering Congress Vol. 2, Edited by B.A. Suprenant, Denver, Col., 1990.
- GOODSPEED, C.; SCHEMKPEPER, E.; HENRY, R.; YOST, J.; GROSS, T. «Fiber Reinforced Plastic Grids for the Structural Reinforcement of Concrete», Proceedings of ASCE First Materials Engineering Congress Vol. 2, Edited by B.A. Suprenant, Denver, Col., 1990.
- GOODSPEED, C.; SCHEMKPEPER, E.; HENRY, R.; YOST, J.; ZHANG, M. «Cyclic Testing of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Plastic (FRP) Grids», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.

- IMCO Reinforced Plastics Catalog, IMCO Reinforced Plastics, Inc., Moorestown, NJ.
- IYER, S. L.; KHUBCHANDANI, A.; FENG, J. «Fiberglass and Graphite Cables for Bridge Decks», Proceedings ASCE Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, NV, Jan.-Feb., 1991.
- KO, F. «Textile Composites in Building Construction; Mechanical Behavior and Applications», Proceedings of the International Symposium: Composite Materials with Textile Reinforcement for Use in Building Construction and Related Applications, Edited by Hamelin and Verchery, Lyon, France, July, 1990.
- LARRALDE, J.; RENBAUM, L.; MORSI, A. «Fiberglass Reinforced Plastic Rebar in Lieu of Steel Rebar», Proceedings, ASCE Structures Congress, Structural Materials, Edited by J.E. Orofino, San Francisco, CA., 1989.
- LARRALDE, J.; ZERVA, A. «Load-Deflection Performance of FRP Grating-Concrete Composites», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- MAZZUCA, M. «Cathodic Protection of Deteriorated Parking Garages», Public Works, May, 1991.
- MEIER, U.; KAISER, H. «Strengthening of Structures with CFRP Laminates», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- NAKATSUJI, T.; SUGITA, M.; and FUJIMORI, T. «FRP Grid Reinforcement for Concrete and Soil», Preprint No. 89-CP057, 1990 TRB annual meeting, Washington, D.C., Jan., 1991.
- NAWY, E. Reinforced Concrete A Fundamental Approach, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632, 1985.
- PLEIMANN, L. G. «Strength, Modulus of Elasticity and Bond of Deformed FRP Rods», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- PLECNIK, J.; SANCHEZ, V.; MUNLEY, E.; PLECNICK, J. M.; AHMAD, S. H. «Development of High Strength Composite Cables», Proceedings of ASCE First Materials Engineering Congress Vol. 2, Edited by B.A. Suprenant, Denver, Col., 1990.
- PLECNIK, J.; HENRIQUES, O.; and DESHPANDE, R. «Plastic Highway Bridges», Civil Engineering Magazine, July, 1991.
- PORTER, M. L.; BARNES, B. A. «Tensile Testing of Glass Fiber Composite Rod», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- ROSTASY, F. S.; and BUDELMANN, H. «FRP-Tendons for The Post-Tensioning of Concrete Structures», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- SEN, R.; IYER, S.; ISSA, M.; and SHAHAWY, M. Fiberglass Pretensioned Piles for Marine Environment», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- TRIANTAFILLOU, T. C.; PLEVIRIS, N. «Post-Strengthening of R/C Beams with Epoxy-Bonded Fiber Composite Materials», Proceedings ASCE Specialty Conference Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Edited by S.L. Iyer and R. Sen, Las Vegas, Nevada, Jan.-Feb., 1991.
- SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. «Fiber Composite Plates can Strengthen Beams», Concrete International Magazine, March, 1990.