Desde la normativa:

Reforzamiento estructural con fibra de carbono

Jorge Rendón. Ingeniero de Rehabilitación de Estructuras, Sika Colombia S.A.S.
Juan Gerardo Ramírez. RBS Proyect Manager LATAM, Sika Colombia S.A.S.

Foto 1. Colocación de platinas de fibra de carbono en losa maciza.
SIKA

La construcción de estructuras en concreto reforzado está regida por normativas especificadas internacionalmente que incluyen la filosofía de diseño, el proceso constructivo y su supervisión. Así mismo, algunos países han desarrollado normativas o guías enfocadas en la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado que presentan deterioro o para extender su vida útil.

La rehabilitación del concreto reforzado incluye tres aspectos fundamentales: reparación, reforzamiento y protección. El objetivo de la reparación es regresar la estructura a su condición original sin aumentar la cuantía de acero ni las secciones de los elementos estructurales, mientras que el reforzamiento estructural sí considera intervenciones de este tipo que pueden realizarse mediante el uso de alguno de los siguientes métodos:

1. Arriostramientos metálicos.
2. Pantallas en concreto reforzado.
3. Encamisado en concreto reforzado.
4. Encamisados en acero.
5. Platinas metálicas.
6. Adición de perfiles metálicos.
7. Contrafuertes.
8. Postensionamiento externo.
9. Disipadores de energía.
10. Aislamiento sísmico.
11. Materiales compuestos FRP (platinas/tejidos de fibra de carbono).

Materiales compuestos FRP

El sistema de reforzamiento estructural con materiales compuestos FRP *(Fiber Reinforced Polymer)* actualmente es uno de los métodos más importantes en el mundo. El sistema FRP está conformado por fibras de gran resistencia a la tensión unidas a través de resinas sintéticas (usualmente epóxicas) para conformar un elemento laminado que da como resultado un sistema de reforzamiento muy eficiente. El objetivo de los materiales compuestos es aumentar la capacidad de carga de los elementos estructurales como vigas, losas, columnas y muros.

Las características principales del sistema FRP son:

a. Gran resistencia a la tensión: aproximadamente 7 veces más que el acero convencional usado en construcción, para el caso de platinas de carbono.
b. Bajo peso: aproximadamente 5 veces más liviano que el acero.
c. No se corroe: el FRP es un material sintético que no se corroe e incluso, puede ser aplicado en estructuras costeras.

En la actualidad se comercializan diferentes materiales elaborados con FRP como: platinas de fibra de carbono, tejidos de fibra (de carbono, vidrio y aramida), cordones de fibra de carbono y barras de fibra de carbono.

Las razones más importantes por las cuales se usa FRP para el refuerzo de estructuras son:

1. **Aumento de cargas verticales.** Estructuras como puentes, muelles y edificios pueden aumentar las cargas muertas y vivas para las que fueron diseñados originalmente.
2. **Deterioro en el tiempo.** El medio ambiente deteriora poco a poco las estructuras. Las construcciones costeras sufren en mayor medida a causa del ataque de cloruros presentes en las sales marinas. También son comunes los deterioros por fuego, impacto o explosiones.
3. **Errores de diseño y construcción.** Son típicos los casos de estructuras construidas con concreto de baja resistencia a la compresión o con deficiencia en el acero de refuerzo.
4. **Actualización sísmica.** Colombia es un país sísmicamente activo y la mayor parte de su infraestructura está construida en zonas de riesgo sísmico alto e intermedio.

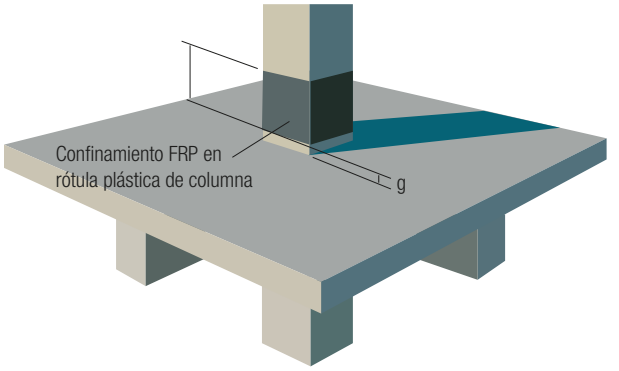
Normativa de diseño con FRP

Debido a las múltiples ventajas de los materiales compuestos FRP y al aumento que han tenido sus aplicaciones, en diferentes partes del Mundo se han desarrollado guías de diseño con el propósito de establecer criterios para el cálculo de las cuantías óptimas de FRP, considerando las condiciones reales de la estructura como sección, cuantía de acero, resistencia a compresión del concreto, cargas últimas de diseño y características o propiedades mecánicas del FRP.

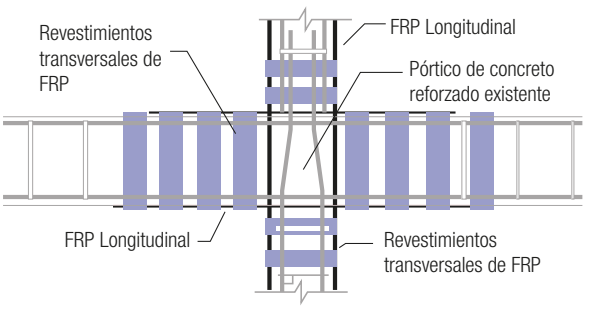
Las primeras guías de diseño fueron publicadas en Japón en la década de 1980, y a finales de los 90 fueron traducidas al inglés para implementarlas en otros países. Estas guías consideraron casos de reforzamiento por aumento de cargas verticales y por sismo, mostrando detalles especiales en el anclaje del FRP al concreto a través de elementos metálicos o del mismo FRP.

Estados Unidos publicó su primera guía en 2002 con el ACI 440.2R-02, que fue actualizado en 2008 y 2017. Mientras tanto, los países europeos han desarrollado sus propias guías de diseño como la CNR-DT 200 R1(2014) de Italia; el reporte técnico 55 del Reino Unido TR55 (2012); la guía suiza SIA 166 (2004), entre otras. En 2001 la Federación Internacional del Concreto publicó la guía FIB 14, que ha sido adoptada por los países de la Comunidad Europea. Sin embargo, la Euronorma EN 1992-1-1 ha adoptado el documento TR55 de la Sociedad del Concreto del Reino Unido para el diseño con FRP.

Figura 1. Ilustraciones del reforzamiento de un nudo de un edificio con materiales compuestos FRP.
ACI 440.2R-17.



Confinamiento en rótula plástica de columna



Detalle conceptual de reforzamiento con FRP (sección transversal en planta)

Foto 2. Muros de concreto reforzados con laminados de fibra de carbono, para aumentar su capacidad de soportar fuerzas cortantes durante un sismo.
SIKA

Foto 3. Reforzamiento de una pantalla de concreto reforzado con las platinas de fibra de carbono.
SIKA

Foto 4. Reforzamiento de los nudos de un edificio con un laminado de fibra de carbono.
SIKA

El uso del FRP en Colombia data de 1991, con el reforzamiento del puente Cocorná en la vía Medellín–Bogotá, desde entonces los ingenieros estructurales han seguido los lineamientos de diseño del Comité ACI 440. En la actual normativa colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10 no existe un capítulo –al menos no hay mención– sobre el uso particular de los materiales compuestos FRP. Esto obedece, principalmente, a que la NSR-10, se enfoca más al diseño y construcción de estructuras de concreto reforzado nuevas que a la rehabilitación o reforzamiento como tales. Sin embargo, es importante resaltar que el título 3, capítulo 2 de la Ley 400 de 1997, artículos 8, 9, 10 y, 11 y la Ley 1796 de 2016 que la modifica, consideran o permiten el uso de otros materiales y métodos alternos de diseño y construcción siempre y cuando el diseñador estructural demuestre con evidencia que la alternativa propuesta cumple los propósitos de durabilidad y resistencia, especialmente sísmica.

Ante la ausencia de una guía local (colombiana) o normativa vigente que avale el uso de los materiales compuestos FRP se han realizado numerosas investigaciones en universidades públicas y privadas que han verificado y demostrado la eficiencia de estos materiales para el reforzamiento de estructuras de concreto y mampostería. Estas investigaciones incluyen tesis de grado, posgrado y magíster en Ingeniería Civil.

Como se mencionó, el ACI 440.2R-17 es la guía preferida por los ingenieros estructurales en Colombia y demás países de Latinoamérica en el momento de calcular la cantidad de FRP para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado. En su versión más reciente (2017) se incluyó el capítulo 13 *(Seismic Strengthening)* para el reforzamiento sísmico de estructuras, que hace referencia al reforzamiento con FRP de los nudos de la estructura (unión viga–columna), punto donde se concentran los esfuerzos más grandes (flexiones y cortantes) durante un sismo.

El estándar ACI 440.2R-17 delimita muy bien lo que se conoce como *nudo* en una edificación de concreto reforzado del tipo pórtico resistente a momentos. Se definen las longitudes de rótula plástica en las columnas, vigas y el lugar donde se instala el FRP que reforzará el nudo (ver la figura 1). Otra novedad que se incluye en el capítulo 13 de la norma ACI 440.2R-17, es el reforzamiento sísmico de muros de concreto reforzado. Edificaciones concebidas con sistema estructural de muros de cortante pueden ser reforzadas con materiales compuestos FRP, para aumentarles su capacidad de absorber fuerzas de corte generadas durante un sismo (ver la foto 2.).

Foto 5. Reforzamiento de las columnas en un puente con un laminado de fibra de carbono.
SIKA

Los muros de concreto reforzado pueden verse sometidos a cargas fuera del plano o en su mismo plano. Para estos casos el FRP debe ser instalado en la dirección correcta de manera que tome las fuerzas de tensión, que es donde concentran su aporte. La foto 3 muestra un caso típico de platinas de fibra de carbono, instaladas en sentido vertical para el refuerzo de un muro de concreto reforzado donde absorbe las fuerzas de tensión generadas durante un evento sísmico.

Usos frecuentes del FRP

Como se ha mencionado, los materiales compuestos FRP se usan para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, su aporte también puede ser significativo en estructuras construidas con mampostería, madera, metal e incluso tuberías de conducción de petróleo y gas. Todas ellas absorben los esfuerzos de flexión, tensión, cortante o torsión en los elementos estructurales (vigas, columnas, muros).

Los ingenieros y arquitectos prefieren métodos de reforzamiento que no se vean, es decir, que en lo posible no modifiquen las dimensiones de vigas y columnas por ende, la estética de la estructura. Es ahí donde los materiales compuestos FRP (platinas y tejidos de fibra de carbono) surgen como una excelente opción. Algunos casos en que se puede considerar su aplicación son:

- **Reforzamiento de nudos.** El FRP se instala envolviendo la zona de las vigas y columna que llega al nudo mejorando su desempeño durante un sismo. No se presentan cambios de rigidez en las vigas y columna reforzadas con el FRP ni recrecimiento de las dimensiones del nudo. Adicionalmente, la instalación del FRP se hace en muy corto tiempo (foto 4).
- **Confinamiento de columnas.** El FRP se instala envolviendo la columna de arriba abajo con la fibra en el sentido de los estribos. De esta manera se logra un aumento en la capacidad de soportar cargas verticales, momentos por carga vertical y cortante por sismo. Este uso es muy común en puentes tanto vehiculares como peatonales debido a la actualización de la normativa vigente, o por paso eventual de cargas sobredimensionadas (foto 5). En edificaciones suele ser usado cuando el concreto no alcanza la resistencia a compresión definida en el diseño.

  En el caso de columnas rectangulares o cuadradas, existe una limitante en las dimensiones de sus lados que permita lograr un confinamiento apropiado. Uno de los lados no deber ser mayor a 90 cm y la relación del lado más largo dividido entre el lado más corto no debe ser mayor de dos.
- **Reforzamiento a flexión de vigas y losas.** Es uno de los usos más comunes gracias al aumento de las cargas verticales (peso propio o cargas vivas). Un caso típico es el cambio de uso: por ejemplo, una estructura originalmente concebida para funcionar con cargas habitacionales que será convertida en biblioteca presentará aumento de las cargas a las que va a estar sometida (foto 6).

Foto 6. Reforzamiento a flexión de una losa.
SIKA

- **Reforzamiento a cortante de vigas.** Al incrementar las cargas verticales en una losa de piso, se aumentan los esfuerzos de cortante en los extremos de las vigas. Es muy común absorber estos esfuerzos cortantes envolviendo las vigas con un laminado de fibra de carbono. En estos casos, el material compuesto FRP puede ser instalado en forma de U en tres caras de la viga, sólo en las laterales o envolviendo completamente la viga (foto 7).

Foto 7. Laminado de fibra de carbono para el reforzamiento a cortante de una viga.
SIKA

Foto 8. Reforzamiento de los muros de concreto en un edificio, para aumentar su capacidad de soportar cargas producidas por un sismo.
SIKA

- **Reforzamiento de muros de concreto reforzado.** Normalmente se hace para mejorar el desempeño de los muros durante un sismo. Sin embargo, puede considerarse usarlo en caso de empuje de terreno o de aumento de nivel freático, por ejemplo (foto 8).
- **Reforzamiento de estructuras de mampostería.** En el caso de los edificios, el FRP se instala en muros de mampostería para aumentar la capacidad de soportar cargas de sismo (ver foto 9).
- **Casos especiales.** Otras estructuras diferentes a edificios y puentes (chimeneas, silos, tanques, etc.) también pueden ser reforzadas con materiales compuestos FRP para mejorar su comportamiento ante eventos sísmicos o para corregir deficiencias del concreto como pérdida de área efectiva del acero de refuerzo o daños generados por la operación. (foto 10)

Foto 10. Reforzamiento de una chimenea de mampostería, de 1925, con un laminado de fibra de carbono para mejorar su desempeño durante un sismo.
SIKA

Foto 9. Muro de mampostería reforzado con tiras de un laminado de fibra de carbono en un edificio, para aumentar su capacidad a cargas de sismo.
SIKA

Conclusiones

Desde hace más de 30 años, a medida que avanza el conocimiento sobre los materiales compuestos FRP basado en el comportamiento de estructuras reforzadas con ellos y que crece el estudio permanente de sus propiedades en investigaciones de universidades e institutos de todo el mundo, también se amplían sus aplicaciones a nivel mundial.

La difusión y transferencia de conocimiento sobre estos materiales ha tenido un fuerte incremento en los últimos 10 años, a causa de lo cual varios países han incluido dentro de sus normativas las guías de diseño de FRP, lo que permite el uso más racional y acertado de los materiales compuestos.

Aunque en sus primeros años la aplicación de los materiales compuestos FRP estuvo concentrada en el reforzamiento de vigas y columnas de concreto y de estructuras convencionales, su aplicación se ha extendido a estructuras de madera, mampostería, metal y a elementos de concreto especiales como silos, chimeneas, tanques, vigas tipo I, concreto postensado, etc., para las que ya existen guías de diseño específicas.

A pesar de no estar incluidos en la normativa actual de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10), las aplicaciones de estos materiales son cada vez más aceptadas en Colombia como una solución de alto desempeño comprobado, versátil y con una relación costo/beneficio incomparable frente a las soluciones tradicionales.