

Diseño de materiales compuestos y aplicación en estructuras y geotecnia

Technological platform for the natural hazard monitoring in the Ocesa Pipeline System

M. Antonio Ramírez V.*

Resumen

Los materiales sintéticos han venido siendo utilizados con un alto desarrollo en las obras de ingeniería en los últimos años. De manera especial los denominados Polímeros Reforzados con Fibras (FRP, por sus siglas en inglés), han sido probados en muchísimos centros de investigación, y normalizada su aplicación por el ACI (Comité ACI 440), y hoy en día se usan con éxito en el reforzamiento de estructuras y en aplicaciones geotécnicas, con metodologías sencillas y fácil aplicación, brindando buenos rendimientos y costos asequibles que no se logran con otros métodos tradicionales

Palabras clave: Materiales sintéticos, FRP, fibras de carbono, fibras de vidrio

Abstract

Synthetic materials have been in use with a high development in engineering in recent years. Especially, called Fiber Reinforced Polymer (FRP, for its acronym in English), have been tested in many research centers and standardized application by ACI (ACI Committee 440), and today successfully used reinforcing structures and geotechnical applications with easy application simple methodologies and providing good yields and affordable costs are not achieved with other traditional

Keywords: Plastics, FRP, carbon fibers, glass fibers

* Universidad de Piura. Profesor visitante.PTE.mantre@yahoo.com

I. INTRODUCCIÓN

Aproximadamente desde los años 80s del siglo anterior, en Japón, Estados Unidos, China y otros países, se lograron buenos resultados prácticos al conseguir –con ayuda de nanotecnología- la producción de nuevos materiales a partir de las tradicionales fuentes de materiales de la naturaleza. Aunque han tenido una amplísima aplicación los materiales compuestos en la industria del transporte –aviones, buques, vehículos, artículos deportivos), una especial atención ocupa, dentro de éstos, los denominados FRP, por sus siglas en inglés (Fiber Reinforced Polimers), debido a sus grandes ventajas en la aplicación a las obras de infraestructura.

Entre las principales ventajas de las FRP podemos resaltar su bajo peso, alta resistencia a la corrosión, elevadas resistencias a la tensión, facilidad para producirse en diferentes formas (tejidos, platinas, barras, mallas, perfiles, tubos, etc.) con bajos espesores, y consecuentemente con facilidades para su manipulación y la aplicación como refuerzo sobre un gran número de estructuras existentes, o para implementar en nuevas obras, especialmente en el área de obras marinas, o en la geotecnia, como por ejemplo en la estabilidad de taludes y en túneles.

Muchísimas son las instituciones americanas –que cuentan con especial reconocimiento en nuestro medio- que han publicado una amplia documentación, recogiendo resultados de investigaciones sobre sus aplicaciones en la Ingeniería Civil. Entre otras se pueden mencionar ACI, NSF, ANSI, ASTM, AASHTO, ASCE, CALTRANS, ICRI, PCI.

Desde 1991 el ACI ha liderado la elaboración de normativas para uso en refuerzo edificaciones, para elementos de concreto y mampostería, con pautas sobre los controles que se requieren a los materiales y a sus diversas aplicaciones. (ACI-440.1 a ACI-440.7). AASHTO cuenta igualmente con regulación para reforzamiento de puentes (AASHTO FRPS-1 y otros). La ASCE y FHWA cuentan con guías para diseño y construcción de intervenciones en obras de geotecnia.

Entidades similares en Europa y Asia igualmente cuentan con regulaciones propias.

La ayuda que han prestado las investigaciones en todo el mundo, con el creciente número de eventos internacionales y evaluaciones, han servido de apoyo para el refuerzo de estructuras de

edificaciones muy antiguas en diferentes materiales, y muy especialmente en zonas de alta amenaza sísmica.

II. PROPIEDADES DE LAS FRP

Los materiales compuestos, en términos generales, resultan de una combinación de unos filamentos de un material principal extraído de la naturaleza (vidrio, carbono, aramida, kevlar, grafito) y que se embeben en una matriz (normalmente resina polimérica), formando una unidad que tiene propiedades especiales que se han definido en su producción. Los polímeros reforzados con fibras (FRP), son materiales compuestos que tienen propiedades anisotrópicas, es decir se pueden orientar en la dirección que se requiere, siendo especialmente útiles en las obras de Arquitectura e Ingeniería Civil.

Las FRP más utilizadas actualmente están basadas en fibras de vidrio (GFRP), fibras de carbono (CFRP) y de aramida (AFRP).

Densidad típica de materiales FRP (g/cm³)

Acero	GFRP	CFRP	AFRP
7.9	1.2 a 2.1	1.5 a 1.6	1.2 a 1.5

Coefficientes típicos de expansión térmica para materiales FRP*

Dirección	Coeficiente de expansión térmica, × 10 ⁻⁶ /°C			
	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal	11	6 a 10	-1 a 0	-6 a -2
Transversal	11	10 a 23	22 a 50	60 a 80

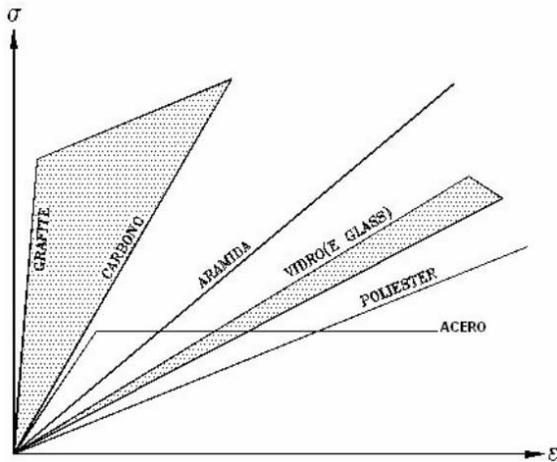
Resistencias promedio a la tensión de las FRP (MPa)

Acero	GFRP	CFRP	AFRP
420	1500 a 2000	3000 a 5400	2500 a 3000

Los módulos elásticos varían bastante, como se ve en gráfico siguiente, y se pueden ubicar entre 70 y 80 GPa para fibras de vidrio, y entre 220 a 690 GPa para fibras de carbono.

En el comportamiento ante las cargas sostenidas (creep), son muy favorables los resultados para las fibras de carbono, mientras que para las fibras de vidrio la carga a la tensión tiende a sufrir un relajamiento, similar a lo que sucede en el acero. En pruebas realizadas a estos materiales, se ha observado que para varillas de 6 mm de diámetro, sometidas a diferentes fuerzas de tensión en el tiempo, se encuentra en promedio que las resistencias extrapoladas a 500000 horas dieron como resultados que la carga se mantiene en 30%

de la inicial para la fibra de vidrio, en 50% para la aramida y en 90% para la de carbono.



Ante las altas temperaturas, aunque en general se ha visto que lo más desfavorable es el desprendimiento de los materiales adherentes, o sea el efecto del calor en las resinas o epóxicos. Para temperaturas de 250°C, se podría disminuir la resistencia de las fibras de carbono o de vidrio hasta en un 20% de su resistencia inicial.

Se requiere adicionalmente, elegir los elementos de apoyo al sistema, como resinas, primers, saturantes, adhesivos, etc., que deben ser compatibles con las propiedades de las FRP que se usan. Existen normas que definen las pruebas que ese necesario aplicar para que sean aceptables los materiales, métodos y todos los demás elementos complementarios, como el ACI-440.3R-04. Se deben tener en cuenta especialmente en estos elementos complementarios los posibles efectos de rayos ultravioleta, protección al fuego, al vandalismo, impactos, resistencia a químicos y estética. Existen igualmente normas para su almacenaje, manipulación, instalación y aceptación.

III. FILOSOFIA DE DISEÑO PARA REFUERZO CON FRP EN ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO

Los sistemas de FRP deben ser diseñados para resistir las fuerzas de tracción, mientras que se mantiene la compatibilidad entre el elemento FRP y el soporte (de concreto, metal o mampostería, por ejemplo). El refuerzo de FRP no ser considerado para resistir las fuerzas de compresión. Es aceptable, sin embargo, para el refuerzo de FRP diseñado a tensión, poder experimentar compresión debido a retrocesos en las deformaciones por

momentos o cambios en el patrón de cargas. La resistencia a la compresión de la armadura de FRP, sin embargo, debe no ser considerada.

Como filosofía de diseño, las recomendaciones se basan en los principios de diseño para estados límites. Este enfoque establece niveles aceptables de seguridad para la ocurrencia de ambos estados límite de servicio (deformaciones y grietas excesivas) y los estados límite últimos (fallo, ruptura estrés y fatiga). En la evaluación de la fuerza nominal de un miembro, los modos de falla posibles y posteriores deformaciones y tensiones en cada material deben ser evaluados.

Los sistemas FRP pueden diseñarse de conformidad con ACI 318, utilizando los factores para la resistencia y las cargas que indica esta norma. Factores de reducción adicionales se deben aplicar para los refuerzos de FRP, con el ánimo de reflejar las incertidumbres inherentes estos sistemas FRP, y comparables con los que se aplican al concreto reforzado y pretensado. Estos factores de reducción se determinaron sobre la evaluación de bases estadísticas de la variabilidad de las propiedades mecánicas. Los factores de reducción fueron calibrados para producir índices de confiabilidad. En general, menor fiabilidad se estima para las estructuras que deben ser reparadas, que para las nuevas estructuras.

Límites de reforzamiento. Una consideración cuidadosa se debe dar para determinar los límites razonables. Estos límites se imponen a protección contra el colapso de la estructura debe nivel de confianza u otras consideraciones. Según el 440.2R-22, la falla del sistema de FRP se produce debido a los diversos daños, vandalismo, u otras causas. El miembro estructural no reforzado, sin refuerzo de FRP, debe tener suficiente resistencia para resistir un cierto nivel de carga. En el caso de que el FRP sistema está dañado, la estructura sigue siendo capaz deresistir un nivel razonable de carga sin colapso. La fuerza existente de la estructura debe ser suficiente para resistir un nivel de carga como se describe por la ecuación

$$(\phi R_n)_{\text{existente}} \geq (1.1SD_L + 0.75SLL)_{\text{nueva}}$$

La resistencia nominal a altas temperaturas debe ser mayor que la carga de servicio en el miembro reforzado (ACI 216R se debe utilizar para cumplir ASTM E119 sobre fuego en escenarios)

$$R_{n\theta} \geq SD_L + SLL$$

La resistencia nominal del miembro en una elevada temperatura $R_{n\theta}$ puede determinarse utilizando las directrices esbozadas en el ACI 216R o a través de

pruebas. La resistencia nominal R_n debe calcularse sobre la base de la reducción de propiedades del miembro existente.

En la selección del sistema de reforzamiento FRP, adicionalmente se deben tener en cuenta consideraciones de tipo ambiental como la alcalinidad o acidez, la expansión térmica, o la conductividad eléctrica.

Factores de reducción para varios sistemas FRP y condiciones de		
Condiciones exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción
Exposición interna	Carbón	0.95
	Vidrio	0.75
	Aramida	0.85
Exposición exterior (puentes, pilas, garages)	Carbón	0.85
	Vidrio	0.65
	Aramida	0.75
Ambiente agresivo (plantas químicas, o de tratamiento de	Carbón	0.85
	Vidrio	0.5
	Aramida	0.7

Las ecuaciones siguientes dan las limitaciones que deben ser utilizadas en todas las ecuaciones de diseño. El diseño final de resistencia a la tracción debe ser determinado usando el factor de reducción ambiental indicado en la tabla anterior para el tipo de fibra adecuada y condición de exposición

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

Del mismo modo, en el diseño la deformación de ruptura también debe reducirse para las condiciones de exposición ambiental

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

Dado que los materiales de FRP tienen un comportamiento elástico lineal hasta la falla, el módulo de elasticidad de diseño unidireccional del FRP puede ser determinado a partir de la ley de Hooke. La expresión para el módulo de elasticidad, dada en la ecuación siguiente, reconoce que el módulo es típicamente no afectado por las condiciones ambientales. El módulo dado en esta ecuación será el mismo que el valor inicial reportado por el fabricante

$$E_f = f_{fu} / \epsilon_{fu}$$

El enfoque de diseño por resistencia requiere que para la flexión de diseño, la resistencia reducida de un miembro supera el momento que requiere, es decir

$$\phi M_n \geq M_u$$

El nivel de la deformación efectiva en el reforzamiento de FRP en el estado límite último puede encontrarse con la siguiente expresión:

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} (d_f - c) / c - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$$

Donde ϵ_{bi} es la deformación inicial del sustrato, y d_f es la profundidad efectiva del FRP.

El nivel de esfuerzos efectivo en el FRP es el máximo nivel que puede ser desarrollado antes de la falla a flexión de la sección. Este esfuerzo efectivo se puede asumir considerando un comportamiento perfectamente elástico.

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Para el refuerzo al cortante, se siguen los mismos criterios conocidos para diseños en concreto.

$$\phi V_n \geq V_u$$

Se aplica un factor de reducción adicional ψ_f a la capacidad al corte del FRP

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f)$$

Con los siguientes valores

$\psi_f = 0.95$ miembros envueltos completamente

$\psi_f = 0.85$ En esquemas con tres, o dos caras opuestas reforzadas

Los diagramas de interacción se pueden obtener para conocer los límites para la capacidad de las combinaciones de carga axial y flexión.

Los diagramas resultados de diversas pruebas experimentales, muestran ductilidades algo menores que las de los elementos de concreto reforzado, pero aceptables para los requerimientos mínimos en zonas de amenaza sísmica alta, como se ha utilizado en EEUU, Italia, España para estas zonas.

IV. REFORZAMIENTO DE MUROS DE ALBAÑILERIA

Se siguen en general los mismos principios definidos anteriormente para los elementos de concreto reforzado, pero se contemplan algunas condiciones siguientes.

Hay dos casos, en que los límites del reforzamiento deben ser considerados. Estos casos incluyen las paredes de albañilería que deben resistir cargas fuera de su plano, como los empujes de tierras o vientos, y paredes que forman parte del sistema que soporta cargas en la dirección de su plano. Para paredes que resisten cargas fuera de su plano, la

fuerza del muro existente debe ser suficiente para cumplir con la limitación dada en

$$(\phi R_n)_{\text{existing, out-of-plane}} \geq (0.9D + 1.0H)_{\text{new}}$$

Para el caso de muros que soportan cargas en su plano, la resistencia del muro debe ser suficiente para cumplir con

$$(\phi R_n)_{\text{existing, in-plane}} \geq (0.9D + 1.0W)_{\text{new}}$$

Para la revisión de deformaciones efectivas, por modos de falla controlados por flexión

$$\epsilon_{fe} = \kappa_m \epsilon_{fu}^* \leq C_E \epsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Donde κ_m es un coeficiente de reducción de capacidad que tiene en cuenta el mecanismo de colocación de la FRP:

$\kappa_m = 0.45$ para sistemas montados en la superficie

$\kappa_m = 0.35$ para sistemas NSM FRP (Barras empotradas cerca a la superficie)

Los valores de ductilidad del sistema de reforzamiento en los muros son bajos, pero adecuados para las exigencias normales en estructuras de mampostería.

V. APLICACIONES EN LA GEOTECNIA

Son diversas las aplicaciones que se han desarrollado, y especialmente en esta área aparecen frecuentemente nuevos productos que se adecúan para muy diferentes usos, como son la densificación de suelos, avance de perforaciones y estabilidad en túneles, tensores para contención o estabilización de los terrenos, estabilización de rellenos, densificación de pavimentos, drenajes, refuerzo principal de pilotes, y de obras portuarias, etc.

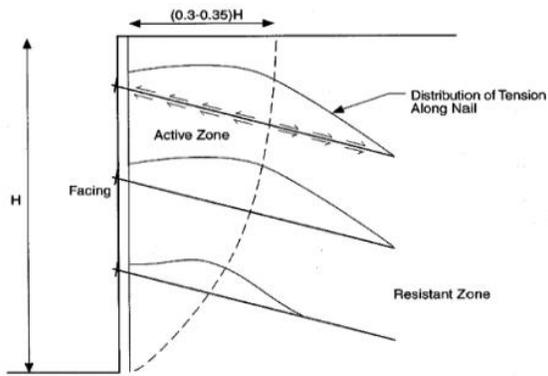
Hacemos referencia en este artículo principalmente a cuatro aplicaciones que tienen especial interés para la infraestructura vial: los reforzamientos en los sistemas de avance de los túneles, los anclajes en los taludes de los terrenos, las inyecciones de densificación y los sistemas drenajes.

Ordinariamente, los mayores costos que se presentan en los túneles son debidos a inestabilidades en los terrenos internos de las montañas que se perforan, y esto además suele ocasionar retrasos muy importantes en las programaciones de ellos, no siendo fácil predecir bien sus costos y su duración. Un sistema que ha resultado especialmente eficaz para controlar los

costos, y lograr rapidez en los avances de las tareas, es la perforación del terreno de avance con varillas de FRP de pequeñas dimensiones, que ofrecen una doble ventaja: facilitan su demolición con la máquina tuneladora y estabilizan el frente de terreno tras las exploraciones. Con algunas gráficas anexas se puede explicar mejor la metodología de estos trabajos.



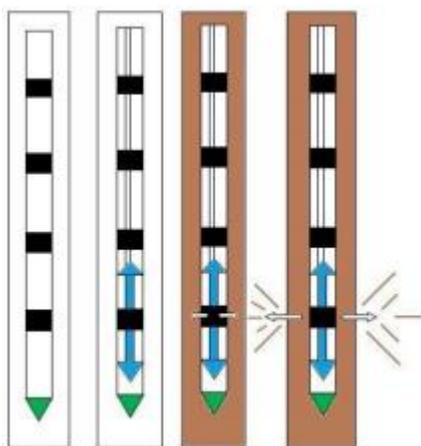
El sistema de anclajes en el terreno se facilita por su bajo peso, alta resistencia y sobre todo por su alta resistencia a la corrosión, que da garantías para su durabilidad. Las metodologías de diseño son muy consecuentes con las formulaciones usadas en la mecánica de suelos para la estabilidad de los taludes o sostenimiento de muros pantallas. Los criterios sobre los coeficientes de reducción de su capacidad son iguales a los descritos anteriormente para otros reforzamientos.



Finalmente, y teniendo en cuenta las ventajas que no se encuentran en otros materiales, se ha visto bastante adecuado por su facilidad de ejecución, rapidez, y durabilidad, hacer inyecciones de tuberías en FRP en los taludes, para que funcionen como filtros horizontales. Aplicación efectiva y duradera, que por esto ofrece resultados de buen rendimiento económico en el tiempo.



Especial interés presenta el sistema de FRP que permite, mediante el anclaje de tubos tipo "manguito" la densificación de los suelos. Se presenta como metodología muy útil para hacer inyecciones alrededor de edificaciones existentes, cuando se requiere hacer perforaciones cercanas, por ejemplo para desarrollo de sistemas de metro, redes hidráulicas, pozos, etc.



VI. COMENTARIOS FINALES

Los materiales compuestos FRP pueden mejorar en buen porcentaje el comportamiento estructural de elementos de concreto armado y albañilería existentes, y que fueron diseñados o construidos sin tener en cuenta algunas cargas esporádicas de su vida útil, como es el caso de las fuerzas del movimiento sísmico.

Numerosos proyectos que se han desarrollado, ilustran el gran potencial de los materiales compuestos para el reforzamiento y rehabilitación de la infraestructura civil en tan diversos campos como la infraestructura urbana o rural, en las vías, pavimentos, túneles, o geotecnia. El uso de adecuados criterios de ingeniería en el diseño, así como también la instalación de los materiales por personal calificado son claves para el éxito de las estrategias de reforzamiento con FRP, que puede cubrir campos que otros materiales anteriormente no conseguían.

Se anexan ejemplos de diseño para reforzamientos de elementos de concreto a flexión y a corte, diseño de pilotes, refuerzo de mampostería en su plano y fuera del plano. Igualmente adjuntos resultados de ensayos a materiales y aplicaciones.

REFERENCIAS

[1] American Concrete Institute – Committee 318 (2002), “Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary,” American Concrete Institute, ACI, Farmington Hills, MI, USA.

[2] American Concrete Institute – Committee 440 (2001), “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Rebars, ACI 440.1R-01, ACI, Farmington Hills, MI, USA.

[3] American Concrete Institute - Committee 440 (2002), “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,”

ACI 440.2R-02, (en prensa).

[4] Fukuyama, H. and S. Sugano (2000), “Japanese Seismic Rehabilitation of Concrete Buildings After the Hyogoken-Nanbu Earthquake, Elsevier Journal Cement and Concrete Composites, Vol 22, No.1, February 2000, UK.

[5] Gold, W.J., G.J. Blaszak, M. Mettemeyer, A. Nanni, and M.D. Wuerthele (2000), “Strengthening Dapped Ends of Precast Double Tees with Externally Bonded FRP Reinforcement,” ASCE Structures Congress 2000, Philadelphia, PA, USA, CD 40492-045-003.

[6] Hamilton, H.R. III, and C.W. Dolan (2001), “Flexural Capacity of Glass FRP Strengthened Concrete Masonry Walls,” ASCE Journal of Composites for Construction, Vol.5, No.3, August 2001, pp. 170-178.

[7] Nanni, A. (2001), “Relevant Field Applications of FRP Composites in Concrete Structures,” CCC 2001 – Porto, Portugal, October 10-12, 2001, 10 pp. CD-ROM.

[8] Oswald, C., and K. Chang (2001), “Shock Tube Testing on Masonry Walls Strengthened with Kevlar,” 10th International Symposium on Interaction of Effects of Munitions with Structures, San Diego, California, May 2001.

[9] Schwegler, G., and P. Kelterborn (1996), “Earthquake Resistance of Masonry Structures strengthened with Fiber Composites,” Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996, 6 pp. CD-ROM.

[10] Tumialan J.G. (2001), “Strengthening of Masonry Structures with FRP Composites,” Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering, University of MissouriRolla, Rolla, MO, USA.

[11] Tumialan, J.G., A. Morbin, A. Nanni, and C. Modena (2001), “Shear Strengthening of Masonry Walls with FRP Composites,” COMPOSITES 2001 Convention and Trade Show, Composites Fabricators Association, Tampa, FL, October 3-6, 2001, 6 pp. CDROM.

[12] Tumialan, J.G., A. San Bartolome, and A. Nanni (2003), “Strengthening of URM Infill Walls by FRP Structural Repointing,” 9th North American Masonry Conference, Clemson, South Carolina, June 1-4, 2003, 2003, 12 pp