

Bases para el diseño del reforzamiento de elementos de hormigón armado por medio de telas de mallas de fibras embebidas en matriz cementicia

Karen Mercedes González Mañalich

karenmanalich@gmail.com

Omar Zamora Díaz-Comas

omar@civil.cujae.edu.cu

Hugo Wainshtok Rivas

hugow@tesla.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE) (Cuba)

Resumen: Cada vez son más frecuentes en las edificaciones de hormigón armado los casos en que es necesario incrementar la capacidad resistente de una estructura, bien por causas patológicas debidas a fallos o defectos o por un cambio de uso que se puede presentar a lo largo de la vida útil de la edificación. En este sentido, el reforzamiento de estructuras de hormigón armado, aplicando telas de mallas de fibras minerales embebidas en matriz cementicia, o sistema FRCM por sus siglas en inglés, ha ido convirtiéndose en los últimos años en una realidad como técnica de reforzamiento, fundamentalmente por las excelentes propiedades que posee y la gran compatibilidad que manifiestan con el hormigón armado. En el siguiente trabajo se constituyen las bases metodológicas para el diseño de reforzamiento estructural con sistemas FRCM en elementos de hormigón armado, con el objetivo de incrementar su capacidad resistente, según el código norteamericano ACI-549.4R del 2013. Se desarrollaron los procedimientos de diseño de reforzamiento a flexión, cortante y carga axial de compresión y finalmente se establecen los puntos fundamentales a tener en consideración en aras de obtener un diseño de reforzamiento adecuado.

Palabras clave: Telas de mallas embebidas en matriz cementicia (FRCM); estructuras de hormigón armado; diseño del reforzamiento.

Bases for the design of the reinforcement of elements of reinforced concrete by means of mesh fabrics of fibers embedded in cementitious matrix

Abstract: Reinforced concrete buildings are becoming more frequent in cases where it is necessary to increase the resistant capacity of a structure, either due to pathological causes due to failures or defects or due to a change in use that may occur along The lifespan of the building. In this sense, the reinforcement of reinforced concrete structures, applying mesh fabrics of mineral fibers embedded in cementitious matrix, or FRCM system for its acronym in English, has become in recent years a reality as a reinforcement technique, mainly by the excellent properties it possesses and the great compatibility they manifest with reinforced concrete. The following work establishes the methodological bases for the design of structural reinforcement with FRCM systems in reinforced concrete elements, with the aim of increasing its resistant capacity, according to the American code ACI-549.4R of 2013. Design procedures were developed of flexural reinforcement, shear and axial compression load and finally the fundamental points to be taken into account are established in order to obtain an adequate reinforcement design.

Keywords: Mesh fabrics embedded in cementitious matrix (FRCM); reinforced concrete structures; reinforcement design.

Introducción

Una edificación de hormigón armado se analiza y diseña para que complete su vida útil dentro de condiciones aceptables de servicio y resistencia. No obstante, en una obra pueden surgir situaciones que generen cambios durante la concepción, ejecución o durante su vida útil, que pueden afectar negativamente la capacidad resistente que se espera de esta y eventualmente la pueden llevar al colapso. De acuerdo con esto, en ocasiones es necesario realizar una rehabilitación en una estructura de hormigón armado mediante la aplicación de sistemas de reforzamiento para aumentar la capacidad portante y así recuperar su funcionalidad. En la actualidad el desarrollo de diferentes tipos de refuerzos estructurales se debe principalmente a la necesidad de realizar una compatibilización con las normas de diseño o una rehabilitación estructural frente a deterioros específicos (Martínez, 2016).

Debido a lo anterior cabe señalar el contexto en el que se mueve la construcción hoy en día. Cada vez se hace más importante rehabilitar, siendo en la actualidad las cifras de inversión destinadas a este fin análogas a las empleadas en una nueva construcción. En nuestra sociedad el concepto de rehabilitación ha ido ganando terreno debido a una mayor concienciación, ya que se considera muchas veces preferible el mantenimiento de las estructuras existentes que su demolición o sustitución por otras nuevas. A la par de la rehabilitación y el reforzamiento de las estructuras de hormigón armado se han ido desarrollando numerosos estudios e investigaciones que conducen a la mejora de los sistemas técnicos de rehabilitación de edificaciones (Picazo, 2010).

Para abordar esta problemática se han estudiado distintas tecnologías y tipos de refuerzo, basados fundamentalmente en la aplicación de materiales compuestos, entre los cuales se puede mencionar el sistema de refuerzo mediante materiales poliméricos reforzados con láminas continuas de fibra (laminados de polímeros reforzados con fibras), que ha ganado popularidad debido a la favorable relación resistencia/peso que posee y a la casi nula intervención arquitectónica que conlleva. Sin embargo, dadas las posibles inconvenientes que presentan las matrices a base de resinas en este sistema de refuerzo, se desarrolla una solución que utiliza un mortero de cemento como matriz, nombrado material compuesto por mallas de fibras minerales embebidas en matriz cementicia, o sistema FRCM del inglés *Fabric Reinforced Cementitious Matrix* (Hidalgo, 2018).

Según investigaciones realizadas por diversos autores (Triantafillou, 2007; Papanicolaou *et al.*, 2009; Gencoglu y Mobasher, 2007; Mobasher, 2012; Al-Salloum *et al.*, 2012; Triantafillou y Papanicolaou, 2006; Peled, 2007; Di Ludovico, Prota and Manfredi, 2010; Abegaz *et al.*, 2012), el sistema FRCM proporciona una alternativa liviana y efectiva a los métodos tradicionales de reforzamiento y permite mejorar el comportamiento de las estructuras de hormigón armado ante las diferentes sollicitaciones predominantes.

En Cuba no existe una normativa específica referente a la rehabilitación y el reforzamiento de estructuras de hormigón armado y, por lo tanto, tampoco en lo concerniente a la incorporación de los sistemas de FRCM como solución de reforzamiento. A esto hay que sumarle que el dominio de los modelos analíticos para diseñar con esta "novedosa" tipología de refuerzo es realmente muy limitado en el contexto nacional actual, por lo que conocer las bases metodológicas para el diseño de reforzamiento estructural, cuando se utiliza el sistema de FRCM en elementos de hormigón armado, basado en lo que plantea el código norteamericano ACI 549.4R-13 (2013), constituye el principal objetivo de este trabajo.

El sistema FRCM y sus principales propiedades

Los sistemas de refuerzo FRCM consisten, en esencia, en el pegado externo sobre la superficie de hormigón, de varias capas de telas de mallas de fibras embebidas en un mortero cementíceo, las cuales presentan propiedades mecánicas sobresalientes, principalmente su resistencia a la tracción. De esta forma, estos materiales compuestos actúan como una armadura externa, que hace funciones muy similares a las que realiza la armadura interna de acero en los elementos de hormigón armado.

Los materiales compuestos a base de telas de mallas de fibras minerales embebidas en matriz cementicia (FRCM) son materiales formados por una malla de fibra que aporta rigidez y resistencia y por una matriz flexible y poco resistente que impregna y protege la tela de malla de fibra adhiriéndola al elemento a reforzar. Las fibras empleadas en la tela de malla pueden ser de vidrio, basalto, carbono y PBO (poliparafenileno benzobisoxazol) y la matriz, en este caso a base de cemento, debe cumplir ciertos requerimientos como son: capacidad de saturar las fibras, la adherencia entre la matriz y la fibra y la adherencia entre la matriz y el sustrato donde se aplica el sistema (Tapia, 2016).

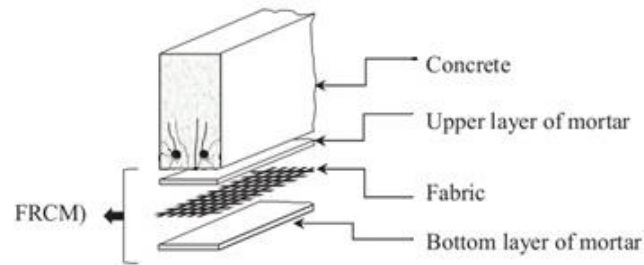


Figura 1. Representación esquemática del sistema FRCM externamente adherido a un elemento de hormigón armado (Hidalgo, 2018).

La fase matriz del FRCM ejerce varias funciones. En primer lugar, une a las fibras y actúa como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos extremos aplicados; solo una pequeña fracción del esfuerzo aplicado es resistida por la matriz. En segundo lugar, la matriz protege a las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente. Esta matriz es normalmente un aglomerante (mortero) a base de cemento Portland y arena sílice, amasado con una proporción controlada de agua y aditivos.

Con relación a las telas de mallas, estas cumplen la función de refuerzo y confieren unas propiedades mecánicas al sistema, de forma tal que mejoran la rigidez del elemento. La malla está compuesta por un tipo de tejido de fibras fabricado a partir de mechas de roving directo, de igual o diferentes títulos en trama y urdimbre, tejidos de manera simple o tejidos y tratados con ensimajes de diferentes características, según se quieran conseguir unos tipos u otros de protecciones en la transformación de la malla o para la mejora de su laborabilidad.



Figura 2. Materiales constituyentes del sistema de FRCM: Tela de malla de PBO y matriz cementicia (Martínez, 2016).

Las propiedades físico-mecánicas de los sistemas de reforzamiento FRCM varían en gran medida dependiendo de que el mortero de cemento tenga la consistencia adecuada para garantizar una buena penetración en las fibras, la matriz posea compatibilidad química y térmica tanto con la malla como con el sustrato, que posea

resistencia térmica y a altas temperaturas y que el mortero tenga la laborabilidad necesaria.

Los sistemas FRCM poseen varias propiedades físicas que hacen de este un material efectivo para ser usado como técnica de refuerzo en una estructura de hormigón armado. Ofrecen un mejor rendimiento a temperaturas elevadas, humedad y radiación ultravioleta. En contraste con los tejidos de PRF, el FRCM es inherentemente no combustible, con características no inflamables y no tóxico, por lo que se puede utilizar sin protección. Combinado con su incombustibilidad y características no tóxicas, los sistemas FRCM son una buena opción para el reforzamiento cuando se requiere resistencia a altas temperaturas (Arboleda et al., 2012).

Desde el punto de vista mecánico, el rendimiento de los sistemas FRCM es altamente dependiente de su resistencia a la tracción y de la resistencia de la unión. El comportamiento a la tracción del FRCM se puede diferenciar en tres fases. En la primera fase, la carga se realiza principalmente por la matriz cementosa hasta su agrietamiento. En la segunda fase, la matriz se somete a un proceso de multifisuración que resulta en la transferencia de tensiones de la tela de refuerzo a la matriz, con alguna pérdida de adherencia en la interface tejido-matriz. Y en la tercera fase, el sistema compuesto se comporta casi linealmente hasta el fallo, que se produce debido a la ruptura progresiva de los filamentos de fibras itinerantes y la desunión de la tela de malla de la matriz. En esta fase, la carga se realiza casi exclusivamente por la tela de malla (Tumialan y De Luca, 2014).

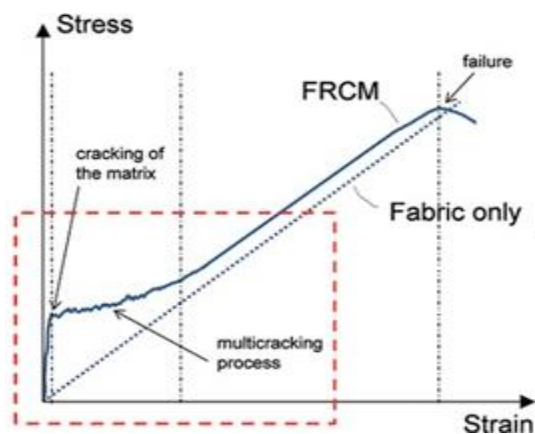


Figura 3. Curva de comportamiento tensión-deformación de los sistemas de FRCM (Tumialan y De Luca, 2014).

Desde el punto de vista del diseño, solo se toma la última fase del comportamiento del sistema FRCCM, en la cual solo actúa en el mecanismo resistente la tela de malla de refuerzo. Debido a esto las principales propiedades mecánicas de la tela de malla que ofrece el fabricante como son: la tensión última a la tracción (f_{fu}), la deformación última a la tracción (ϵ_{fu}) y su módulo de elasticidad (E_f), son las propiedades que serán utilizadas en el diseño del reforzamiento siempre que se empleen sistemas FRCCM.

El diseño del reforzamiento a flexión por medio de sistemas FRCCM

El reforzamiento a flexión por medio de sistemas FRCCM en elementos de hormigón armado se logra mediante la adherencia del material compuesto al elemento existente por la cara traccionada. Es decir que los sistemas FRCCM en un refuerzo a flexión se colocan bajo los mismos principios que el acero de refuerzo, en las zonas donde existen esfuerzos de tracción.

A continuación, todos los aspectos relacionados con las bases para el diseño del reforzamiento a flexión por medio de sistemas de FRCCM que se muestran se basan en vigas existentes de sección rectangular reforzada en su cara traccionada. Los conceptos que se explican pueden extenderse también a secciones no rectangulares (secciones I o T).

Resistencia nominal y modos de fallo

En el momento de determinar la resistencia a flexión de la sección reforzada con sistemas FRCCM debe verificarse que el momento a flexión de diseño (ΦM_n) sea mayor que el momento a flexión requerido (M_u). La resistencia flexión de diseño hace referencia a la resistencia nominal del elemento estructural multiplicado por un factor de reducción (Φ), mientras que la resistencia a flexión requerida está vinculada a los efectos de cargas mayoradas, para la combinación pésima.

$$\Phi M_n \geq M_u$$

El factor reductor de capacidad nominal para el Estado Límite Último a Flexión (Φ) de acuerdo con el documento norteamericano ACI-318-14 (2014) está definido según el nivel de deformación del acero traccionado de la siguiente manera:

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{para } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_y < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

La capacidad que tiene un elemento estructural reforzado con bandas de PRF a flexión puede precisarse con la compatibilidad de deformaciones, el equilibrio interno de fuerzas y el modo de fallo que controla el diseño (ACI-549.5R, 2013).

La resistencia a flexión de una sección reforzada con el sistema FRM depende del modo de fallo que controla al diseño. El análisis considera los siguientes modos de falla posibles en una viga de hormigón armado reforzada mediante sistema FRM:

1. Aplastamiento del hormigón en compresión antes de la fluencia del acero de refuerzo.
2. Fluencia del acero en tracción seguido del aplastamiento del hormigón comprimido.
3. Delaminación por cortante o flexión del recubrimiento del hormigón.
4. Delaminación del refuerzo FRM del sustrato (Desvinculación del FRM).
5. Delaminación de las fibras del refuerzo (Desplazamiento interlaminar).
6. Deslizamiento de la tela de malla dentro de la matriz cementicia.

Se asume que el aplastamiento del hormigón ocurre si la deformación a compresión en este alcanza su máxima deformación unitaria ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0.003$) y que la rotura de la tela de malla de FRM ocurre si su nivel de deformación es igual a su deformación de rotura por tracción ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$) antes de que el hormigón alcance su máxima deformación a compresión.

Los modos de fallo 3 y 4 mencionados anteriormente ocurrirán si la fuerza aplicada en el FRM no se puede sostener por el sustrato. Para prevenir estos tipos de fallos, se limita el nivel de deformación desarrollado en la tela de malla del FRM. La siguiente expresión extraída de ACI-549.5R (2013) plantea dicho valor límite de deformación:

$$\varepsilon_{fd} = \varepsilon_{fu} - STD \leq 0,012$$

Donde:

STD: Desviación estándar de la deformación obtenida en los ensayos.

ε_{fu} : Deformación unitaria a la rotura por tracción.

ε_{fd} : Deformación límite de diseño del sistema FRM.

Hipótesis para el diseño del reforzamiento a flexión

Para el cálculo de la resistencia a flexión en condiciones de agotamiento de una sección reforzada por medio del sistema FRCCM, se aplican las siguientes hipótesis:

- 1- Las secciones planas permanecen planas una vez cargadas.
- 2- Existe una adherencia perfecta entre el sistema FRCCM y el sustrato de hormigón armado en el que se encuentra colocado.
- 3- La máxima deformación unitaria a compresión en el hormigón es $\varepsilon_c = 0.003$.
- 4- La contribución del hormigón a tracción se desprecia.
- 5- Se establece que las deformaciones en el acero de refuerzo, en la tela de malla y en el hormigón son directamente proporcionales a la distancia desde el eje neutro.
- 6- El FRCCM posee un comportamiento bilineal hasta la falla donde solo la segunda parte lineal de la curva se utiliza en el diseño.

Niveles de deformación en los elementos resistentes de la sección

El máximo nivel de deformación que se puede lograr en el refuerzo FRCCM se regirá por el nivel de deformación desarrollado en la tela de malla en el punto donde el hormigón se aplasta a compresión, o en el punto donde el FRCCM se despegó del sustrato. La deformación máxima o el nivel de deformación eficaz del refuerzo de FRCCM para el Estado Límite Último precisado a partir de la compatibilidad de deformaciones a nivel de sección se determina:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

Donde:

ε_{cu} : Máxima deformación a compresión del hormigón e igual a 0,003.

d_f : Peralto efectivo del refuerzo de FRCCM. Se puede suponer igual al peralto de la sección.

c : Profundidad de la línea neutra.

ε_{bi} : Deformación inicial en el sustrato antes de colocar el sistema FRCCM.

Inicialmente se puede empezar a asumir un valor de profundidad de la línea neutra $c = 0.2d$, donde d es el peralto efectivo de la sección a reforzar, mientras que la deformación inicial en el sustrato antes de colocar el refuerzo de FRCCM (ε_{bi}), se puede determinar a partir de un análisis elástico del elemento existente, considerando todas las cargas que actúan sobre el elemento durante la instalación del sistema FRCCM. Se

recomienda que el análisis elástico del elemento esté basado en las propiedades de la sección fisurada.

Para precisar las deformaciones unitarias en el resto de los elementos involucrados en la capacidad resistente de la sección reforzada se procede a aplicar nuevamente la ley de compatibilidad de deformaciones a nivel de sección (Figura 4), en efecto:

- Para el hormigón a compresión si:

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd} \text{ entonces } \varepsilon_c = 0,003$$

$$\varepsilon_{fe} \geq \varepsilon_{fd} \text{ entonces } \varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) < 0,003$$

- Para el acero a tracción:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

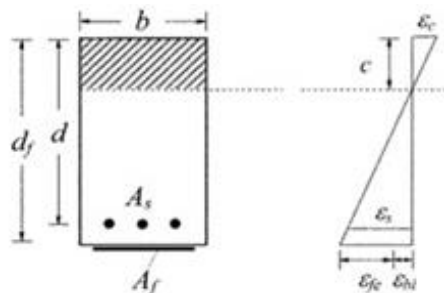


Figura 4. Esquema de deformaciones a nivel de sección (ACI-549.5R, 2013).

Niveles de esfuerzos en los elementos resistentes de la sección

Para establecer los niveles de tensión y de fuerzas resultantes que aporta cada material involucrado en la resistencia de la sección reforzada, según las leyes constitutivas de estos se tiene:

Para el acero de refuerzo a tracción:

Si la deformación unitaria en el acero a tracción es mayor que la deformación de fluencia, el esfuerzo en condiciones últimas es directamente igual al valor del esfuerzo de fluencia del acero (f_y).

$$f_s = f_y, \text{ si } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y$$

Sin embargo, si la deformación unitaria del acero a tracción es menor que la deformación de fluencia el esfuerzo generado es:

$$f_s = E_s \varepsilon_s, \text{ Si } \varepsilon_s < \varepsilon_y$$

Para el sistema FRCM:

La tela de malla de FRCM, por tener un comportamiento lineal elástico hasta la rotura, su nivel de esfuerzo en cualquier instante se define como:

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

Fuerzas resultantes en los elementos resistentes de la sección

Los valores de fuerza resultante en cada uno de los materiales involucrados en la capacidad resistente de la sección reforzada se determinan como sigue (Figura 5):

Para el acero de refuerzo a tracción: $F_s = f_s A_s$

donde A_s es el área del acero de refuerzo.

Para el sistema FRCM: $F_{fe} = n f_{fe} w_f A_f$

Donde:

n es el número de capas de refuerzo de FRCM.

w_f es el ancho del alma de la sección transversal del elemento a reforzar.

A_f es el área de la tela de malla del FRCM por unidad de ancho.

- Para el hormigón a compresión:

$$F_c = \alpha_1 f'_c \beta_1 c b$$

Donde α_1 y β_1 son los coeficientes de transformación de cualquier ley que modele el hormigón a compresión en un diagrama rectangular equivalente (Figura 5).

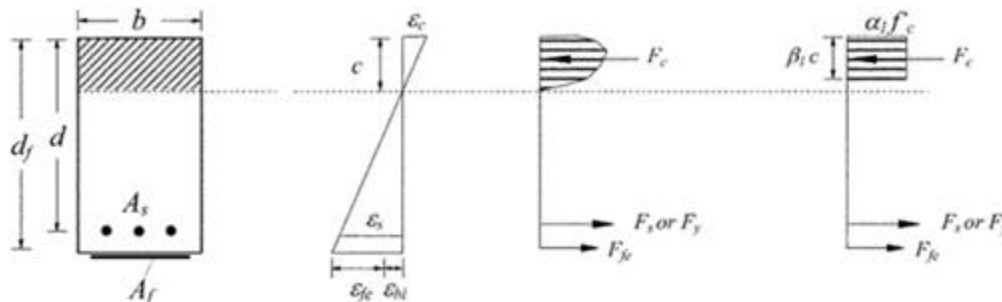


Figura 5. Esquema de deformaciones y de fuerzas a nivel de sección (ACI-549.4R, 2013).

Capacidad resistente a flexión de la sección reforzada

Una vez señaladas todas las fuerzas resultantes a nivel de sección, se procede a chequear el equilibrio de fuerzas a través de la siguiente expresión:

$$F_c - F_s - F_{fe} = 0$$

De no cumplirse esta última condición se vuelve a repetir el proceso con un nuevo valor de línea neutra (proceso iterativo), hasta obtener el valor definitivo de profundidad de línea neutra que asegure el verdadero equilibrio a nivel de sección.

Una vez alcanzado el equilibrio de fuerzas se procede a determinar el momento flector resistente de la sección reforzada con sistema FRCM (ϕM_n) a través de la siguiente expresión, tomando momento con respecto al hormigón en compresión:

$$\phi M_n = \phi [A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)]$$

En el caso del factor de reducción de la capacidad nominal a flexión (ϕ), al reforzar elementos de hormigón armado a flexión con FRCM, se reduce la ductilidad de las secciones, muchas veces de manera insignificante, pero cuando es muy baja se debe compensar con una alta reserva de resistencia lo que se logra a través de dicho factor.

El diseño del reforzamiento a cortante por medio del sistema FRCM

El sistema de refuerzo FRCM puede ser utilizado para aumentar la capacidad ante esfuerzos de cortante en elementos existentes de hormigón armado mediante un encamisado parcial o total de la sección transversal. El reforzamiento a cortante no solo incrementa la capacidad ante este tipo de sollicitación, sino que puede evitar la falla frágil por cortante, lo que permite el desarrollo de fallas a flexión que resultan ser más dúctiles.

La contribución del refuerzo FRCM a la resistencia a cortante va a depender fundamentalmente del nivel de deformación de la tela de malla, de su módulo de elasticidad y, por último, del acero de refuerzo transversal presente en el elemento existente, ya que el refuerzo FRCM es menos efectivo cuando el elemento se encuentra fuertemente armado con estribos.

Tipos de esquemas de envoltura

Existen, en general, dos tipos de esquemas de envoltura de sistemas FRCM utilizados para incrementar la resistencia a cortante de vigas o columnas rectangulares de hormigón armado (Figura 6). La envoltura completa del sistema FRCM alrededor de la sección sobre sus cuatro caras es el esquema más eficiente de envoltura y es el más comúnmente utilizado en aplicaciones de columnas donde el acceso a las cuatro caras de la sección está usualmente disponible. En las aplicaciones de vigas, en donde una losa integral hace muy difícil envolver completamente el elemento, la resistencia a cortante puede ser mejorada envolviendo el sistema FRCM alrededor de tres caras de la sección.

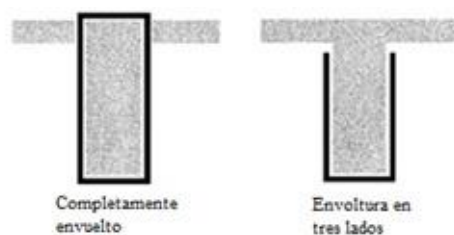


Figura 6. Esquemas de envoltura de refuerzo a cortante (ACI-549.4R, 2013).

Para ambos esquemas de envoltura, el sistema de FRCM puede ser instalado continuamente a lo largo de la luz libre del elemento o colocado de manera discreta, con un espaciamiento prefijado.

Resistencia nominal a cortante de la sección reforzada

La resistencia nominal a cortante de un elemento de hormigón armado (V_n) reforzada con un sistema FRCM, multiplicado por un factor de reducción de la resistencia (ϕ), debe exceder la resistencia a cortante requerida (V_u), mientras que la resistencia a cortante requerida debe ser calculada con los factores de carga para la combinación pésima de las cargas. La resistencia a cortante de diseño se precisa utilizando el factor de reducción de resistencia $\phi = 0.75$, según establece el documento norteamericano ACI 318-14 (2014).

$$\Phi V_n \geq V_u$$

La capacidad nominal a cortante de un elemento de hormigón armado reforzado con FRCM puede ser determinada adicionando la contribución del refuerzo de FRCM (V_f) a

las contribuciones del acero de refuerzo (V_s) (estribos, ganchos o espirales) y del hormigón (V_c).

$$\Phi V_n = \Phi(V_c + V_s + V_f)$$

Contribución a cortante del sistema de FRCM

La Figura 7 ilustra variables involucradas en los cálculos de reforzamiento a cortante con sistemas FRCM para secciones rectangulares y en forma de T.

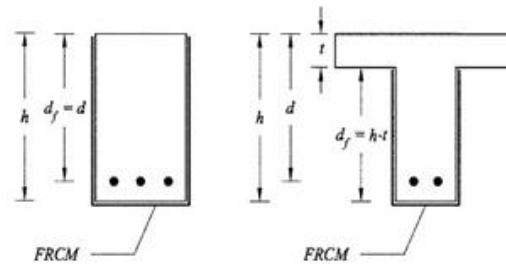


Figura 7. Variables involucradas en el cálculo de reforzamiento a cortante con FRCM para sección rectangular y sección T (ACI-549.4R, 2013).

La contribución a cortante del refuerzo de FRCM se comprueba a partir de la siguiente expresión:

$$V_f = 2nA_{fv}f_{fv}d_f$$

Donde A_{fv} es el área de refuerzo FRCM a cortante por unidad de ancho.

La tensión en el sistema de refuerzo de FRCM (f_{fv}) encargada de tomar las tracciones diagonales ocurridas se determina de la siguiente manera:

$$f_{fv} = \varepsilon_{fv}E_f$$

En donde ε_{fv} es la deformación unitaria a cortante de diseño alcanzada en el refuerzo FRCM, que debe estar limitada por la deformación unitaria a tracción última (ε_{fu}). Esta deformación (ε_{fv}) es la máxima que puede ser alcanzada por este material en el Estado Límite Último a Cortante. Para evitar pérdida de la traba de los agregados en el fallo por cortante de la sección reforzada, la deformación de diseño a cortante desarrollada en el FRCM se limita al 0,4%, o sea:

$$\varepsilon_{fv} = \varepsilon_{fu} - STD \leq 0.004$$

Para evitar que en el refuerzo FRCCM en la viga de hormigón armado se produzca un sobre refuerzo a cortante derivando en una falla por compresión diagonal, la resistencia a cortante proporcionada por el acero de refuerzo (V_s) y la proporcionada por el refuerzo FRCCM (V_f) se debe limitar a la siguiente condición:

$$V_s + V_f \leq 0.66\sqrt{f'_c}b_wd$$

También se recomienda que, para limitar la fuerza total por unidad de ancho transferido al hormigón, el incremento en la resistencia al cortante provisto por el refuerzo de FRCCM no exceda al 50 % de la capacidad a cortante del elemento existente sin refuerzo.

El diseño del reforzamiento a carga axial de compresión por medio del sistema FRCCM

El reforzamiento ante esfuerzos axiales de compresión en columnas de hormigón armado, debido al confinamiento del hormigón que se logra a través de la envoltura completa de dichos elementos con el sistema FRCCM, puede ser utilizado para aumentar la resistencia y la ductilidad de columnas ya construidas. El incremento de la capacidad resistente constituye un resultado asegurado, generalmente expresado en aumentos considerables de la carga máxima resistente de la columna. El incremento de la ductilidad requiere de un análisis más complejo para determinar la capacidad de un elemento de deformarse en el rango plástico de su comportamiento sin una pérdida considerable de resistencia; debido a esto, en este trabajo solo se expondrán los aumentos en la ductilidad de las columnas como resultado de incrementar la resistencia última a compresión del hormigón por el fenómeno del confinamiento que posibilita un fallo más gradual, fruto de la gran deformación que admite la tela de malla del sistema FRCCM. El sistema FRCCM puede ser aplicado, tanto a columnas de hormigón armado de sección circular como de sección rectangular para aumentar su capacidad ante cargas axiales de compresión.

Modelo tensión-deformación para el hormigón confinado mediante sistemas FRCCM

El modelo tensión-deformación propuesto por Lam y Teng en el 2003 ha sido adoptado por el código ACI-549.4R-13 (2013) para modelar el hormigón confinado con FRCCM, el cual se ilustra en la siguiente figura:

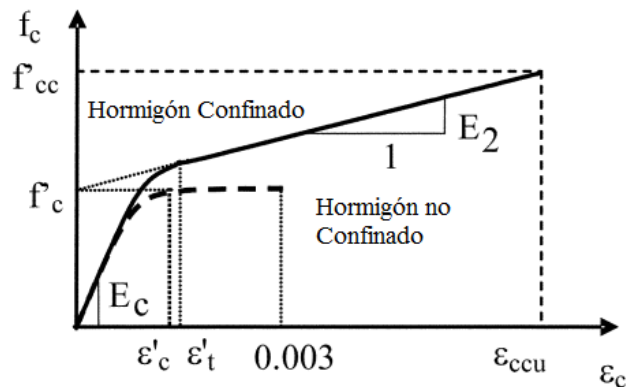


Figura 8. Modelo tensión-deformación del hormigón confinado mediante sistemas FRCC (Lam y Teng, 2003).

Este modelo a su vez responde a las siguientes expresiones analíticas:

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \varepsilon_c^2 & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_t \\ f'_c + E_2 \varepsilon_c & \varepsilon'_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \end{cases}$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}}$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2}$$

La máxima resistencia a compresión del hormigón confinado con FRCC (f'_{cc}) y la máxima presión de confinamiento (f_l) son calculadas usando las siguientes ecuaciones:

$$f'_{cc} = f'_c + 3.1k_a f_l$$

$$f_l = \frac{2nE_f A_f \varepsilon_{fe}}{D}, \text{ para columnas de sección circular}$$

$$f_l = \frac{2nE_f A_f \varepsilon_{fe}}{\sqrt{(b^2 + h^2)}}, \text{ para columnas de sección rectangular}$$

En las expresiones anteriores de la máxima presión de confinamiento (f_l), el nivel de deformación efectiva (ε_{fe}) desarrollado en el sistema de refuerzo de FRCC se determina por:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = \varepsilon_{fu} - STD \leq 0,012$$

El aporte de la matriz cementicia a la resistencia a compresión del elemento confinado con FRCC se despreciará.

La máxima deformación del elemento confinado con FRCC (ε_{ccu}) se puede establecer usando la ecuación (29). Esta deformación debería estar limitada de forma tal que no

supere el 1 % para prevenir la fisuración excesiva y la consiguiente pérdida de integridad del hormigón. Cuando este límite se aplica, el correspondiente valor de la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado con FRCM (f'_{cc}) debería ser recalculado desde la curva tensión-deformación.

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.5 + 12k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \leq 0.01$$

Factores de forma y área efectiva de confinamiento

Los factores de forma, k_a y k_b , van a depender del tipo de sección transversal del elemento de hormigón armado a confinar:

Secciones circulares: El confinamiento que brinda el sistema FRCM es más eficiente en columnas con secciones circulares. Para este tipo de secciones, los factores de forma k_a y k_b se pueden tomar como 1.

Secciones rectangulares: Para las secciones transversales rectangulares la máxima presión de confinamiento (f_l) se calcula con una sección transversal circular de diámetro equivalente (D) igual a la diagonal de la sección transversal rectangular (Figura 9). La relación entre el lado mayor y el lado menor de la sección no debe ser mayor que 2.

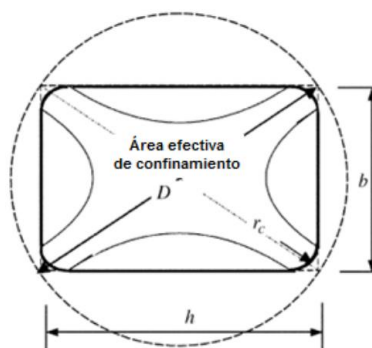


Figura 9. Sección transversal circular equivalente (ACI-549.4R, 2013).

Para las columnas de secciones rectangulares los factores de forma, k_a y k_b van a depender de tres parámetros fundamentales: del área efectiva de hormigón confinado (A_e), del área neta de hormigón en la sección transversal (A_c) y de la relación de los lados h/b y b/h respectivamente.

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^{0.5}$$

El modelo teórico empleado para definir el área efectiva de confinamiento en columnas rectangulares consta de cuatro parábolas; las zonas limitadas por las parábolas y los lados de la columna son aquellas donde el confinamiento es mínimo, mientras que en las esquinas y centro de la columna es más efectivo (Figura 8).

La forma de las parábolas y como resultado el área efectiva de confinamiento es una función de las dimensiones de la columna (b y h), del radio de curvatura (r_c) y de la cuantía de acero de refuerzo longitudinal (ρ_g).

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r_c)^2\right]}{3A_g} \rho_g}{1 - \rho_g}$$

Capacidad resistente a compresión del elemento confinado con FRCM

Una vez determinada la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado con FRCM (f'_{cc}) se puede calcular la nueva carga axial a compresión que soportará la columna de hormigón armado reforzada con FRCM a través de la siguiente expresión:

$$\text{Columnas con refuerzo transversal en espiral: } \phi P_n = 0.85\phi[0.85f'_{cc}(A_g - A_s) + f_y A_s]$$

$$\text{Columnas con refuerzo transversal de estribos: } \phi P_n = 0.80\phi[0.85f'_{cc}(A_g - A_s) + f_y A_s]$$

En las expresiones anteriores:

$\phi = 0.75$ o $\phi = 0.65$ para refuerzo transversal en espiral o estribos, respectivamente.

A_g : Área bruta de hormigón de la sección transversal.

A_s : Área total del acero de refuerzo longitudinal.

f_y : Tensión de fluencia del acero de refuerzo longitudinal.

La capacidad resistente a carga axial de compresión de una columna de hormigón armado confinada mediante el sistema FRCM (ϕP_n) tiene que sobrepasar el valor de la

carga axial de compresión requerida en dicho elemento (P_u), determinada con los factores de carga para la combinación pésima de las cargas, en efecto: $\Phi P_n \geq P_u$

Para aplicar el reforzamiento a carga axial de compresión mediante sistemas FRCM en columnas de hormigón armado, el documento ACI-549 4R-13 (2013) establece las siguientes limitaciones en el diseño:

- El aumento de capacidad resistente como resultado del confinamiento con el sistema FRCM no deberá exceder al 20 % de la capacidad portante actual del elemento sin reforzar.
- Cuando el propósito del diseño sea devolver al elemento su capacidad resistente de carga inicial (por ejemplo para elementos ligeramente confinados) el valor de ε_{ccu} debe limitarse al valor correspondiente a $0.85f'_{cc}$.
- A no ser que se demuestre lo contrario de manera experimental, el reforzamiento por confinamiento mediante FRCM está limitado a elementos cuya sección transversal no exceda los 610 mm de diámetro o de lado.

Conclusiones

Los sistemas de reforzamiento de FRCM en elementos de hormigón armado aparecen como una alternativa justificada ante los sistemas de reforzamiento mediante tejidos de PRF. El FRCM presentan un comportamiento a tracción tenso deformacional trilineal, pero a los efectos del cálculo solo se trabaja con la última fase del comportamiento, en la que solo actúa el refuerzo de la tela de malla del sistema FRCM.

En el reforzamiento a flexión con sistemas de FRCM en elementos de hormigón armado, el nivel de deformación desarrollado en la tela de malla (ε_{fd}) se limita para prevenir la delaminación del sistema FRCM del sustrato de hormigón. Existen dos modos de fallo que controlan el diseño del reforzamiento a flexión: si el fallo ocurre por aplastamiento del hormigón a compresión o si es por delaminación del sistema FRCM.

El sistema FRCM puede ser utilizado para aumentar la capacidad ante esfuerzos de cortante en elementos de hormigón armado mediante un encamisado total o en tres caras de la sección transversal. Este refuerzo no solo incrementa la capacidad a cortante, sino que puede evitar la falla frágil por corte, lo que permite el desarrollo de fallas a flexión que resultan ser más dúctiles.

El aumento de la capacidad resistente a carga axial de compresión de un elemento de hormigón armado envuelto con sistemas FRCC se logra a partir del confinamiento del hormigón que le brindan dicho sistema. El confinamiento retrasa la rotura por aplastamiento del hormigón e incrementa su deformación última a compresión, lo que se traduce en un aumento de la ductilidad del elemento reforzado.

Referencias bibliográficas

ABEGAZ, A.; SUARIS, W.; DE LUCA, A.; AND NANNI, A. 2012. Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) Composites as Confining Systems for Reinforced Concrete Columns. X International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites (FERRO 10). Havana, Cuba.

ACI-318-14. 2014. *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Reported by American Concrete Institute Committee 318. Farmington Hills. USA. 524 p.

ACI-549.4R-13. 2013. *Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) System for Repair and Strengthening Concrete*. Reported by American Concrete Institute Committee 549. Farmington Hills. USA. 73 p.

AL-SALLOUM, Y. A.; ELSANADEDY, H. M.; ALSAYED, S. H.; AND IQBAL, R. A. 2012. Experimental and Numerical Study for the Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Textile-Reinforced Mortar. *Journal of Composites for Construction* 16(1): 74-90.

ARBOLEDA, D.; LORETO, G.; DE LUCA, A.; AND NANNI, A. 2012. Material Characterization of Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) Composite Laminates. X International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites (FERRO 10). Havana, Cuba.

DI LUDOVICO, M.; PROTA, A.; AND MANFREDI, G. 2010. Structural Upgrade Using Basalt Fibers for Concrete Confinement. *Journal of Composites for Construction* 14(5): 541-552.

GENCOGLU, M. AND MOBASHER, B. 2007. Monotonic and Cyclic Flexural Behavior of Plain Concrete Beams Strengthened by Fabric-Cement Based Composites. Third

International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC 2007). p. 1961-1966.

HIDALGO, C. 2018. *Bond Behavior of Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites Effect of the Stress Redistribution*. Master's Thesis. Politecnico Di Milano. Italia.

LAM, L. AND TENG, J. 2003. Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP Confined Concrete. *Construction and Building Materials* 17: 471-489.

MARTÍNEZ, M. 2016. *Guía para el Diseño de Refuerzos de Elementos Estructurales de Hormigón Armado Mediante Material Compuesto por Mallas de Fibras Minerales Embebidas en Matriz Cementícea (FRCM)*. Tesis de diploma. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

MOBASHER, B. 2012. *Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites*. CRC Press. 473 p.

PAPANICOLAOU, C. G.; TRIANTAFILLOU, T. C.; PAPANTONIOU, I.; AND BALIOUKOS, C. 2009. Strengthening of Two-Way Slabs with Textile-Reinforced Mortars (TRM). 11th International FIB Symposium. London, UK.

PELED, A. 2007. *Pre-Tensioning of Fabrics in Cement Based Composites*. *Cement and Concrete Research Journal* 37(5): 805-813.

PICAZO, Á. 2010. *Estudio Experimental del Comportamiento a Esfuerzo Cortante de Vigas de Hormigón Reforzadas con Fibra de Carbono*. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Madrid. España.

TAPIA, D. 2016. *Estudio de la Adherencia de un Sistema Compuesto FRCM Sostenible para el Reforzamiento de Elementos de Hormigón Armado*. Tesis de diploma. Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

TRIANAFILLOU, T. C. AND PAPANICOLAOU, C. G. 2006. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar (TRM). *Materials and Structures* 39(1): 93-103.

TRIANAFILLOU, T. C. 2007. Textile-Reinforced Mortars (TRM) versus Fibre-Reinforced Polymers (FRP) as Strengthening and Seismic Retrofitting Materials for Reinforced Concrete and Masonry Structures. International Conference on Advanced Composites in Construction (ACIC07). University of Bath.

TUMIALAN, G. & DE LUCA, A. 2014. *FRCM Systems*. *STRUCTURE Magazine*. National Council of Structural Engineers Association, Chicago, USA.