

Reforzamiento de columnas de hormigón armado a través del uso de tejidos de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF)

Strengthening of reinforced concrete columns through the use of Fiber Reinforced Polymer (FRP) fabrics



Ing. Omar Zamora Díaz-Comas.

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”,
CUJAE, Facultad de Ingeniería Civil.
Teléfono: 266-38-40.
Profesor Instructor.
Email: omar@civil.cujae.edu.cu



Dr. Ing. Carlos Llanes Burón.

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”,
CUJAE, Facultad de Ingeniería Civil.
Teléfono: 266-38-36.
Profesor Titular.
Email: llanes@civil.cujae.edu.cu



Dr. Ing. Hugo Wainshtok Rivas.

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”,
CUJAE, Facultad de Ingeniería Civil.
Teléfono: 266-38-40.
Profesor Emérito.
Email: hugow@tesla.cujae.edu.cu

Recibido: 29-10-18

Aceptado: 15-11-18

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar las bases para el diseño del reforzamiento de columnas de hormigón armado cuando se emplean tejidos de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) con el fin de incrementar su resistencia a carga axial de compresión. La metodología de diseño que se plantea está basada en el código norteamericano ACI 440.2R del 2017 y la misma se aplica en un caso de estudio real con vistas a analizar sus principales efectos. Los resultados revelan que los incrementos de capacidad resistente obtenidos en las columnas analizadas oscilan entre 14% y 37%, dejando de ser significativos cuando se supera el límite máximo de la deformación del hormigón confinado y que en la medida que se aumenta el número de capas de tejido de PRF, se logran incrementos en los niveles de deformación del hormigón confinado, lo que trae consigo un aumento de la ductilidad de las columnas.

Palabras claves: reforzamiento, columnas de hormigón armado, tejidos de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF).

Abstract

The present work has as objective to show the bases for the design of the strengthening of reinforced concrete columns when FRP fabrics are used in order to increase their resistance to compression axial load. The design methodology that is proposed is based on the American code ACI 440.2R-17 and it is applied in a case of real study in order to analyze its main effects. The results reveal that the increments of resistant capacity obtained in the columns analyzed oscillate between 14% and 37%, ceasing to be significant when the maximum limit of the deformation of confined concrete is exceeded and that as the number of layers increases of FRP fabric, increases in the levels of deformation of the confined concrete are achieved, which brings with it an increase in the ductility of the columns.

Key words: strengthening, reinforced concrete columns, fabrics of Fiber Reinforced Polymers (FRP)

Introducción

Las actuaciones de mantenimiento, reparación y reforzamiento de estructuras de hormigón armado son actividades cada vez más relevantes, bien por la degradación de las propias estructuras existentes, bien por la introducción de nuevas solicitaciones en las mismas, o incluso por reparaciones frente a acciones accidentales que se han producido.

Las columnas de hormigón armado son elementos estructurales muy importantes para una edificación. Las mismas sostienen principalmente cargas de compresión y al existir un problema patológico o un cambio de uso, la carga actuante sobre las mismas se incrementará y estas tenderán a expandirse lateralmente, es por esto que se deberá aplicar un refuerzo que mejore el confinamiento de la columna y controle su deformación transversal (Revollo y Delgadillo, 2017).

La evaluación estructural de una columna existente ha de conducir a un diagnóstico que permita establecer la necesidad o no de refuerzo, y en caso de que sea necesario, el siguiente paso debería ser determinar si el fin es mejorar las propias características de la sección que ya existe (confinamiento) o llegar a sustituir la capacidad resistente de la misma. En cualquiera de las actuaciones, confinamiento o sustitución de la capacidad (total o parcial), es imprescindible considerar la carga actuante sobre la columna original, el mecanismo de entrega de las cargas al refuerzo y las condiciones de rigidez de la estructura.

La mayor parte de los sistemas de refuerzo de columnas de hormigón armado conllevan a envolver completa y solidariamente la columna original, generando sobre la misma una acción de confinamiento que debidamente aprovechada puede resultar extremadamente beneficiosa. Tal es el caso de los refuerzos mediante recrecido perimetral del soporte original con hormigón armado o de los refuerzos mediante angulares empresillados (Del Rio Bueno, 2008). Si bien es cierto que estos tipos de reforzamientos tradicionales han demostrado ser muy efectivos, presentan los principales inconvenientes de que generan mucho peso propio a la estructura existente, traen problemas asociados a la corrosión del acero de refuerzo, sus labores de construcción y mantenimiento son complejas, así como que el incremento de la rigidez que se obtiene con los mismos pudiera generar una alteración en la distribución de esfuerzos de la estructura existente.

El material que más se está empleando en los últimos años en las soluciones de zunchado de columnas de hormigón armado sometidas a compresión centrada o con excentricidades de carga reducida son los tejidos de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) (Fernández y Díaz, 2017). Este tipo de material se ha ido convirtiendo en una alternativa a los sistemas de reforzamiento convencional, debido fundamentalmente a sus mejores prestaciones como son: total resistencia a la corrosión, reducción considerable de peso en la edificación, facilidad en su transporte, manejo y puesta en obra, gran compatibilidad con el hormigón armado, entre otros.

El empleo de los tejidos de PRF como material de reforzamiento en estructuras de hormigón armado no está regulado por ninguna normativa, en realidad lo que existen son guías de aplicación (ACI 440.2R, 2017; FIB Bulletin 14, 2001; CNR-DT 200 R1, 2013; CSA, 2002; FIB Bulletin 35, 2006) que recogen la posibilidad de emplear estos materiales para incrementar la ductilidad de las secciones de columnas de hormigón armado o bien incrementar su capacidad resistente mediante el confinamiento del hormigón. Aunque las mismas todavía presentan algunas lagunas, las investigaciones realizadas en los últimos años han permitido definir modelos de comportamiento del hormigón confinado con tejidos de PRF.

Si bien la formulación propuesta para evaluar el efecto del confinamiento en las distintas guías (ACI 440.2R, 2017; FIB Bulletin 14, 2001; CNR-DT 200 R1, 2013; CSA, 2002; FIB Bulletin 35, 2006) e investigaciones (Lam and Teng 2003a; Lam and Teng, 2003b) es distinta, todas coinciden en indicar que en estos refuerzos se requiere el contacto continuo entre el tejido de PRF y la columna en todo el perímetro, así como la necesidad de redondear las esquinas con el objetivo de mejorar la efectividad del refuerzo (De Diego et al. 2015 y Vincent and Ozbakkaloglu, 2013).

En Cuba no existe una norma que regule los principios del reforzamiento de elementos estructurales de hormigón armado y además el dominio de los modelos analíticos para diseñar con esta "novedosa" tipología de reforzamiento, es realmente muy limitado en el contexto nacional actual, por lo que crear las bases metodológicas para el cálculo de reforzamiento estructural cuando se utilizan los tejidos de PRF en columnas de hormigón armado, con el fin de incrementar su capacidad resistente y su ductilidad, constituye el principal objetivo de esta investigación, sobre todo si se reconoce que las edificaciones reforzadas con

este material pueden llegar a resultar competitivas con relación a los reforzamientos mediante las técnicas tradicionales.

Métodos y Materiales

Los tejidos de PRF y sus propiedades para el diseño

Los sistemas de refuerzo a base de tejidos de PRF consisten, en esencia, en el pegado externo sobre la superficie de hormigón, de unos materiales con unas prestaciones mecánicas sobresalientes, principalmente la resistencia a tracción (figura 1). De esta forma, los materiales compuestos actúan como una armadura externa, que hace unas funciones muy similares a las que hace la armadura interna de acero (López, 2012).

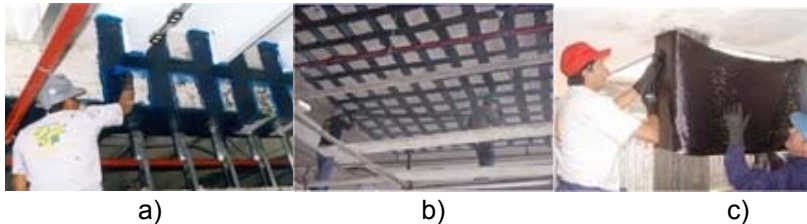


Figura 1. Reforzamientos de elementos de hormigón armado con tejidos de PRF.

a) Reforzamiento de viga. b) Reforzamiento de losa. c) Reforzamiento de columna. Fuente: Rosero (2013).

Los materiales de PRF consisten en un gran número de pequeñas, continuas, direccionadas y plásticas fibras con avanzadas características, atadas en una matriz de resina. En función del tipo de fibra, se habla de PRFC para fibras de carbono, PRFV para fibras de vidrio, PRFA para fibras de aramida y PRFB para fibras de basalto.

Las fibras en el material compuesto aportan la resistencia mecánica, rigidez, dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes corresponden a su elevada resistencia a la tracción, su deformación unitaria a la tracción y su módulo de elasticidad.

La matriz tiene por su parte la misión de transmitir los esfuerzos a las fibras, hace la función de aglomerante y protección de las mismas. A su vez, aporta mayor flexibilidad y proporciona la forma. Tiene menor resistencia que las fibras (López, 2012).

En la figura 2 están representadas cualitativamente las leyes constitutivas tensión – deformación a esfuerzo de tracción de materiales compuestos de PRF y su comparación con el diagrama bilineal del acero usado como refuerzo en elementos de hormigón estructural, en donde se observa claramente el comportamiento lineal-elástico de los materiales de PRF (comportamiento frágil desde el punto de vista del fallo) en comparación con el del acero, el cual refleja un comportamiento elasto-plástico en todo su rango de deformaciones (comportamiento dúctil desde el punto de vista del fallo).

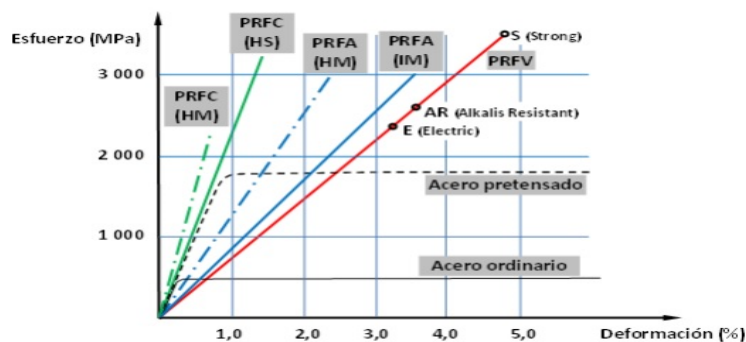


Figura 2. Leyes esfuerzo-deformación de algunos materiales compuestos de PRF. Fuente: Hernández et al. (2017).

La durabilidad de los sistemas de PRF ha sido objeto de considerables investigaciones en curso (Steckel et al. 1999 y Xian and Karbhari, 2007). Las resinas y las fibras de los sistemas de tejidos de PRF se pueden ver seriamente afectadas debido a las condiciones medioambientales existentes en el lugar del reforzamiento. Propiedades mecánicas importantes como: la resistencia a la tracción en la rotura, la deformación última a la tracción y el módulo de elasticidad se ven degradadas cuando estos materiales se exponen en ciertos ambientes agresivos como son: ambientes alcalinos, presencia de agua salada, rayos ultravioletas, temperaturas extremas, elevada humedad y ciclos de hielo y deshielo.

Debido a lo anterior, desde el punto de vista del diseño del reforzamiento, los factores mencionados se recogen en un coeficiente que se denomina factor de reducción medioambiental (C_E) y que incluye todas las posibles afectaciones de los sistemas de tejidos de PRF cuando estos se ven expuestos en diferentes condiciones ambientales. La tabla que se muestra a continuación (tabla 1) ilustra los valores a asignar al factor de reducción medioambiental (C_E) en función del tipo de fibra y de las condiciones de exposición medioambientales.

Tabla 1. Factores de reducción medioambientales (C_E) para varios sistemas de PRF y condiciones de exposición. Fuente: ACI 440.2R (2017).

Condiciones de exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción medioambiental C_E
Exposición interior	Carbono	0.95
	Vidrio	0.75
	Aramida	0.85
Exposición al exterior (puentes, áreas de parqueos descubiertos, etc)	Carbono	0.85
	Vidrio	0.65
	Aramida	0.75
Ambiente agresivo (plantas químicas, plantas de tratamiento de aguas, etc)	Carbono	0.85
	Vidrio	0.50
	Aramida	0.70

Siempre y cuando no se indique lo contrario por parte del fabricante de los sistemas de PRF, las principales propiedades mecánicas 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), se verán reducidas a través del factor de reducción medioambiental (C_E) mostrado en la tabla anterior.

Finalmente, las propiedades mecánicas de los tejidos de PRF que se utilizan en las ecuaciones de diseño, tanto para la tensión última a la tracción (f_{fu}), como para la deformación última a la tracción (ε_{fu}), se determinan de la siguiente manera:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2)$$

Debido a que los materiales a base de PRF presentan un comportamiento lineal elástico hasta la rotura, el módulo de elasticidad (E_f) de dichos sistemas, que también es utilizado en el diseño del reforzamiento, se puede determinar a través de la ley de Hooke:

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

Diseño del reforzamiento de columnas de hormigón armado con tejidos de PRF

Los sistemas de tejidos de PRF pueden ser usados para incrementar la resistencia a carga axial de compresión de elementos de hormigón armado producto del confinamiento del hormigón que se alcanza a través de dichos sistemas de refuerzos (Nanni and Bradford 1995; Toutanji 1999). Para confinar un elemento de hormigón armado por medio del uso de tejidos de PRF es necesario orientar las fibras de los tejidos perpendiculares al eje longitudinal del elemento. En esta orientación, las fibras transversales provocan un efecto similar al que produce el acero de refuerzo transversal.

Las envolturas de PRF proporcionan al elemento en compresión un confinamiento pasivo, es decir el esfuerzo o presión de confinamiento lateral es activado solo cuando la columna comienza a expandirse lateralmente por la compresión y agrietamiento vertical en la cara de tracción de la columna, lo cual extiende el dispositivo de confinamiento.

Modelo tensión-deformación para el hormigón confinado con tejidos de PRF

Varios han sido los modelos propuestos para hormigón confinado que tratan de tener en cuenta el comportamiento específico de confinamiento con tejidos de PRF (Spoelstra y Monti, 1999; Teng et al. 2002; De Lorenzis y Tepfers, 2003; Lam y Teng, 2003a). El modelo de esfuerzo – deformación de Lam y Teng en el 2003a para el hormigón confinado con PRF ha sido adoptado por el código ACI 440.2R-17 y se ilustra en la siguiente figura (figura 3).

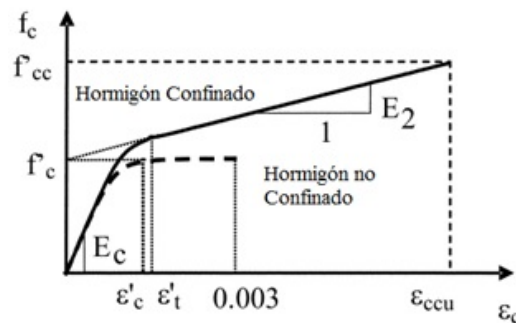


Figura 3. Modelo tensión-deformación del hormigón confinado con PRF propuesto por Lam y Teng (2003).
Fuente: Lam and Teng (2003a).

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

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

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (5)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (6)$$

La máxima resistencia a compresión del hormigón confinado con PRF (f'_{cc}) y la máxima presión de confinamiento (f_l) son calculadas usando la ecuación (7) y (8) respectivamente con la inclusión del factor reductor adicional $\psi_f = 0.95$.

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_f 3.3 k_a f_l \quad (7)$$

$$f_l = \frac{2E_f n t_f \varepsilon_{fe}}{D} \quad (8)$$

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

$$\varepsilon_{fe} = k_e \varepsilon_{fu} \quad (9)$$

El factor de eficiencia por deformación (k_e) tiene en cuenta la falla prematura del sistema de tejidos de PRF (Pessiki et al. 2001), posiblemente debido al estado de esfuerzo multiaxial a que se encuentra sometido el elemento de hormigón armado confinado. Este comportamiento también puede estar relacionado con regiones de concentración de tensiones causadas por la fisuración del hormigón cuando se dilata. Basados en resultados experimentales calibrados, usando fundamentalmente probetas de hormigón confinado con tejidos de PRFC, se toma como valor de factor de eficiencia por deformación $k_e = 0.55$.

La máxima deformación a compresión de hormigón confinado con tejidos de PRF (ε_{ccu}) se puede determinar usando la ecuación (10). 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 PRF (f'_{cc}) debería ser recalculado desde la curva tensión-deformación (Concrete Society, 2004).

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.5 + 12k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \quad (10)$$

Factores de forma y área efectiva de confinamiento

Los factores de forma, k_a y k_b , mostrados en las expresiones (7) y (10) respectivamente, van a depender del tipo de sección transversal del elemento de hormigón armado a confinar.

Secciones circulares: El encamisado de PRF es más eficiente en elementos con secciones circulares cuando las fibras están alineadas transversalmente al eje longitudinal del elemento. Para este tipo de secciones, los factores de forma k_a y k_b se pueden tomar como 1.

Secciones no circulares: Para las secciones transversales no circulares la máxima presión de confinamiento (f_l) (ecuación 8) se calcula con una sección transversal circular de diámetro equivalente (D) igual a la diagonal de la sección transversal rectangular de acuerdo al modelo de Lam y Teng en el 2003a (figura 4).

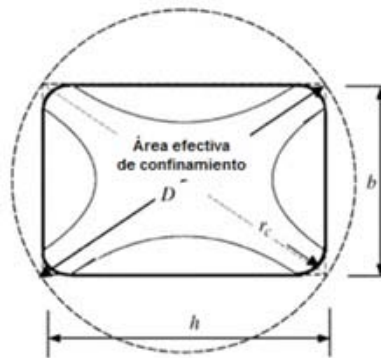


Figura 4. Sección transversal circular equivalente. Fuente: Lam and Teng (2003b).

Con lo mostrado en la figura 4 se tiene que el diámetro equivalente se calcula como:

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (11)$$

Para este tipo de secciones 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.

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \quad (12)$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.5} \quad (13)$$

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.

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).

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right]}{3Ag} \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (14)$$

Capacidad resistente a compresión de la columna reforzada con tejidos de PRF

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

$$\text{Columnas con refuerzo transversal en espiral: } \phi P_n = 0.85\phi[0.85f'_{cc}(A_g - A_s) + f_y A_s] \quad (15)$$

$$\text{Columnas con refuerzo transversal en estribos: } \phi P_n = 0.80\phi[0.85f'_{cc}(A_g - A_s) + f_y A_s] \quad (16)$$

En las expresiones anteriores:

$\phi = 0.7$ 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.

Caso de estudio

La edificación objeto de estudio corresponde al hotel Palacio Cueto que se encuentra ubicado en la esquina sur-este de la Plaza Vieja también conocida como Parque Habana, una de las cinco plazas principales del centro histórico de la Habana Vieja en la capital de Cuba.

A finales de la década del 90, una vez contemplado en los planes de restauración de la Oficina del Historiador de la Ciudad, el edificio fue desocupado e intervenido por los especialistas para la reconstrucción del hotel. Considerando el mal estado en general que presentaba la edificación se decidió demoler los elementos interiores y reconstruirlos respetando la forma original de los mismos y además ampliar la estructura a la parcela aledaña perteneciente a un edificio que se derrumbó en épocas anteriores.

Una vez comenzada la reconstrucción del hotel y avanzada la misma, se le solicitó a la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en el año 2015, la realización de un estudio de diagnóstico en toda la estructura existente con el objetivo de verificar el estado técnico actual del edificio y determinar la capacidad de reserva de los elementos estructurales principales para con ello establecer las acciones a realizar como pueden ser: reparación, reforzamiento y/o demolición.

En este sentido la ENIA primeramente realizó un levantamiento de las lesiones presentes en la edificación donde para ello fue necesario el levantamiento arquitectónico en planta y elevación de todos los elementos componentes del inmueble. Posteriormente procedió a la caracterización de los materiales de la estructura a través de la realización de ensayos destructivos y no destructivos entre los que destacaron: la extracción de perfiles de muestras de hormigón, velocidad de la onda ultrasónica, detección y caracterización de la distribución de acero de refuerzo, determinación de la profundidad de carbonatación, así como la realización de monitoreo y pruebas de carga estática a los elementos estructurales. Ya finalmente, con toda la información anterior recopilada, la misma ENIA procedió a la modelación en un programa computacional del edificio con el fin de determinar la capacidad de reserva de los elementos estructurales principales, a partir de la diferencia entre las solicitaciones actuantes mayoradas y la capacidad resistente que presentan dichos elementos, con la inclusión en esta última de las patologías encontradas en los mismos.

En el caso particular de las columnas de hormigón armado del hotel Palacio Cueto, se procedió al chequeo de la condición de resistencia de las mismas analizando los esfuerzos generados por las combinaciones pésimas como resultado de la modelación de la estructura del edificio, en cada una de las secciones transversales típicas identificadas en el levantamiento de estructuras llevado a cabo por la ENIA para cada una de las columnas ensayadas en los distintos niveles de la edificación. En el proceso de evaluación se analizaron el total de las tipologías de secciones transversales de columnas existentes, chequeando su condición de resistencia con respecto al correspondiente esfuerzo de cada elemento. Los resultados del análisis, demostraron que algunas columnas requerían ser reforzadas. Estos resultados se muestran de manera resumida en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis de la condición de resistencia de las columnas del hotel Palacio Cueto. Fuente: Ramírez y Alfonso (2016).

Columna	f'c (MPa)	Sección transversal	Área de acero (cm ²)	Solicitación axial actuante (kN)	Solicitación axial resistente (kN)
C1	14,11	40x40 cm	15,92	1705	1246
C2	14,21	40x40 cm	15,92	1306	1253
C5	14,11	40x30 cm	11,94	1085	935
C10	14,75	40x40 cm	20,4	1422	1361

La Figura 5 muestra la ubicación en planta (en colores) de las columnas que necesitan reforzamiento estructural en el hotel Palacio Cueto una vez realizada la investigación por parte de la ENIA.

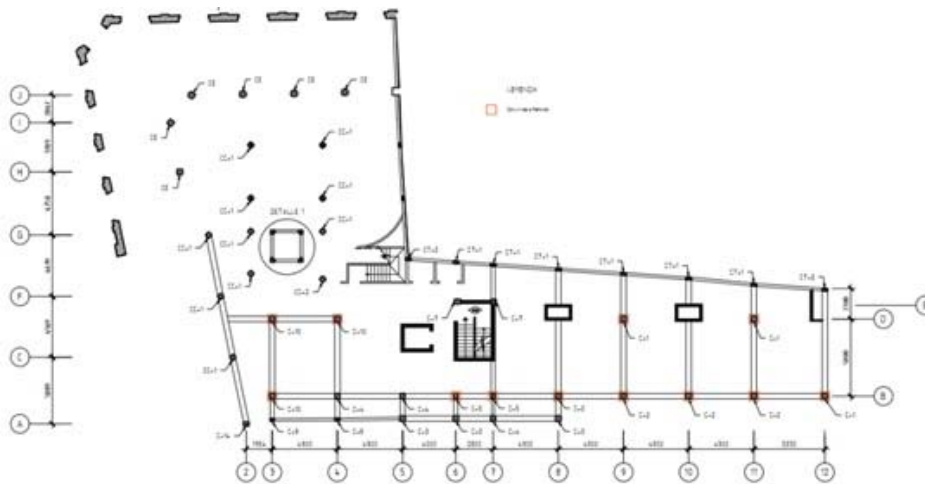


Figura 5. Ubicación de las columnas con necesidad de refuerzo. Fuente: Ramírez y Alfonso (2016).

Resultados

El diseño del reforzamiento a carga axial de compresión de las columnas de hormigón armado del hotel Palacio Cueto a través del uso de tejidos de PRF se realizará utilizando como esquema de reforzamiento, la envoltura completa de las columnas en dichos tejidos, para así lograr un mayor confinamiento y proporcionar un mejor incremento de la capacidad resistente.

En este caso se utilizará como sistema de reforzamiento al producto MapeWrap G UNI-AX de la firma italiana Mapei, que consiste en un tejido unidireccional de fibras de vidrio con las siguientes propiedades mecánicas y geométricas brindadas por el fabricante:

Resistencia a la tracción en la rotura: $f_{fu}^* = 2560 \text{ MPa}$
 Deformación unitaria a la rotura por tracción: $\varepsilon_{fu}^* = 0,0317$
 Módulo de elasticidad a tracción: $E_f = 80700 \text{ MPa}$
 Espesor por tejido de PRFV: $t_f = 0,48 \text{ mm}$

Estos valores de propiedades mecánicas brindadas por el fabricante se tienen que reducir por medio de un factor de reducción medioambiental (C_E) que tiene en cuenta el deterioro de los sistemas de tejidos de PRF ante la exposición de diferentes condiciones medioambientales. Dicho coeficiente según la (Tabla 1) del presente documento depende del tipo de fibra y de las condiciones de exposición que para este caso se trata de un tejido de PRFV sujeto a condiciones de exposición en interiores por lo que el valor de $C_E = 0,75$.

A partir de la filosofía de diseño para reforzar columnas de hormigón armado a través del uso de tejidos de PRF mostrada en el presente trabajo, se presenta en la siguiente tabla (tabla 3) los principales parámetros del diseño del reforzamiento por confinamiento con tejidos de PRFV de cada una de las columnas del hotel Palacio Cueto que así lo requerían.

Tabla 3. Parámetros del diseño del reforzamiento con tejidos de PRFV de las columnas objeto de estudio.

Columna	Número de capas de PRFV	$\frac{A_e}{A_c}$	k_a	k_b	ϵ_{fe}	$f_l(MPa)$	ϵ_{ccu}	$f'_{cc} (MPa)$
C1	5 capas	0,513	0,513	0,513	0,0131	8,95	0,0212	20,9
C2	1 capa	0,513	0,513	0,513	0,0131	1,791	0,0066	17,1
C5	1 capa	0,541	0,962	0,469	0,0131	2,026	0,0068	20,2
C10	1 capa	0,512	0,512	0,512	0,0131	1,791	0,0065	17,6

En la siguiente tabla (tabla 4) se muestra el resumen de diseño del reforzamiento de las cuatro columnas objeto de estudio con el porcentaje de incremento de capacidad resistente.

Tabla 4. Incrementos de capacidad resistente de las columnas reforzadas con tejidos de PRFV.

Columna	Solicitación axial actuante (kN)	Capacidad resistente sin reforzamiento (kN)	Diseño del reforzamiento	Capacidad resistente de la sección reforzada (kN)	% de incremento de capacidad resistente
C1	1705	1246	5 capas de PRFV	1712	37%
C2	1306	1253	1 capa de PRFV	1445	15%
C5	1085	935	1 capa de PRFV	1248	33%
C10	1422	1361	1 capa de PRFV	1549	14%

Una vez terminado el diseño del reforzamiento a carga axial de compresión con tejidos de PRFV en las columnas de hormigón armado del hotel Palacio Cueto, se está en condiciones de realizar los esquemas y detalles de la ubicación de dicho refuerzo con vistas a dar por culminado la tarea de proyecto y que la ejecución del reforzamiento se materialice correctamente a partir de lo diseñado. Con los resultados obtenidos anteriormente en el diseño, se muestra en la siguiente figura (figura 6) los esquemas a nivel de sección de los detalles del reforzamiento en las columnas de hormigón armado objeto de estudio.

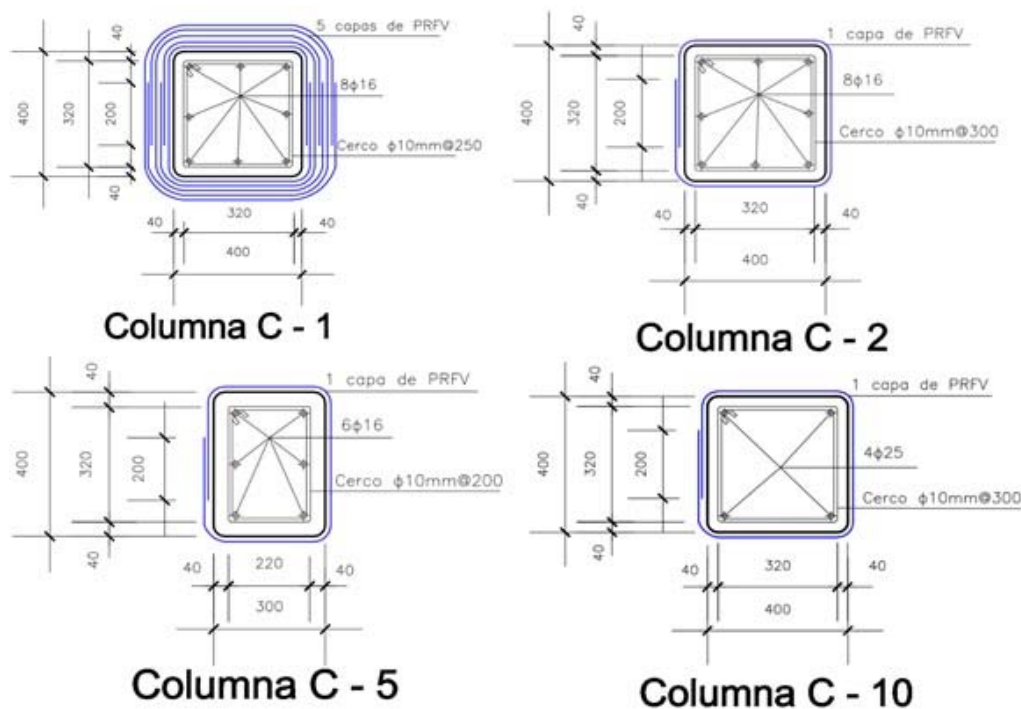


Figura 6. Esquemas y detalles de las columnas reforzadas con tejidos de PRFV.

Discusión de los resultados

Si se analiza como varía el aumento de la capacidad resistente de las columnas objeto de estudio con el incremento del número de capas de tejidos de PRFV se puede observar en la siguiente figura (figura 7), que el aumento de dicha capacidad es significativo siempre y cuando no se alcance el límite impuesto por el ACI 440.2R-17 para la máxima deformación a compresión del hormigón confinado, que en este caso es del 1 %. Por ejemplo, para las columnas C-2, C-5 y C-10, en donde no se cumple la condición anterior, el incremento de capacidad resistente de 2 a 6 capas de tejido de PRFV está en el rango de 6% a 9%, muy diferente del incremento obtenido de una a dos capas de tejido que es de 13% a 23% respectivamente.

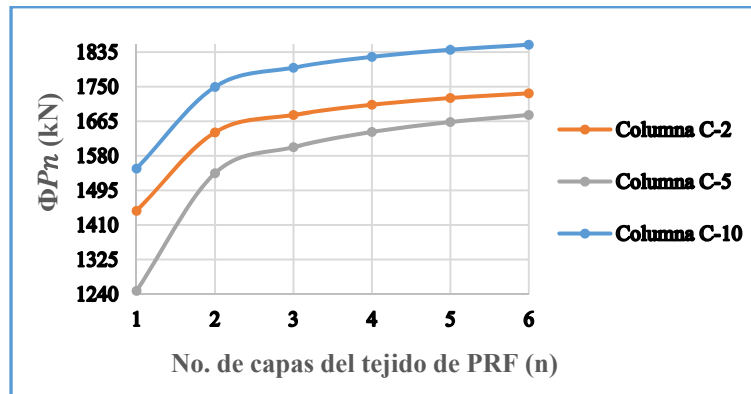


Figura 7. Influencia del número de capas de tejido de PRFV en la capacidad resistente a compresión de las columnas analizadas.

Si se analizara ahora cómo se comporta la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado en la medida que se aumenta el número de capas de tejidos de PRFV, se puede observar a través de la siguiente figura (figura 8), que mientras el número de capas se incrementa, aumenta la resistencia a compresión del hormigón confinado, sin embargo, debido a la misma causa mencionada en el párrafo anterior, a partir del número de capas donde se supera el límite de la máxima deformación del hormigón confinado (de 0,01 en este caso), los incrementos de resistencia a compresión de dicho hormigón son muy pequeños. Por ejemplo, para las columnas C-2, C-5 y C-10, en donde se cumple la condición anterior, el incremento de resistencia a compresión del hormigón confinado, en el rango de 2 a 6 capas de tejido de PRFV está en el intervalo de 7% al 11%, muy diferente del incremento obtenido de una a dos capas de tejido de PRFV que está en el intervalo 16% a 23% respectivamente.

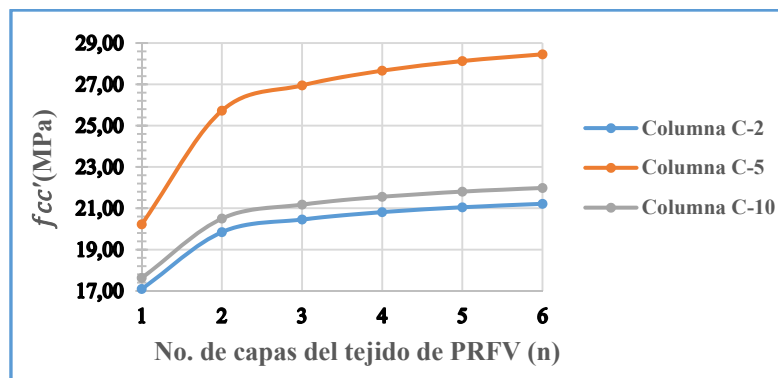


Figura 8. Influencia del número de capas de tejido de PRFV en la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado de las columnas analizadas.

Analizando ahora lo que sucede con el comportamiento de la máxima deformación a compresión del hormigón confinado, se puede observar en la siguiente figura (figura 9), como en la medida que se incrementa al número de capas de tejidos de PRFV, también se incrementa el nivel de deformación máxima del hormigón confinado. Lo anterior se debe a que cuando se incrementa el número de capas de tejido, la presión de confinamiento aumenta y de acuerdo al modelo tensión – deformación del hormigón confinado propuesto por Lam y Teng en el 2003a, el nivel de deformación máxima a compresión del hormigón

confinado incrementa también. Esto corrobora el hecho de que el reforzamiento de columnas a carga axial de compresión a través de la envoltura de tejidos de PRF incrementa la ductilidad de las mismas.

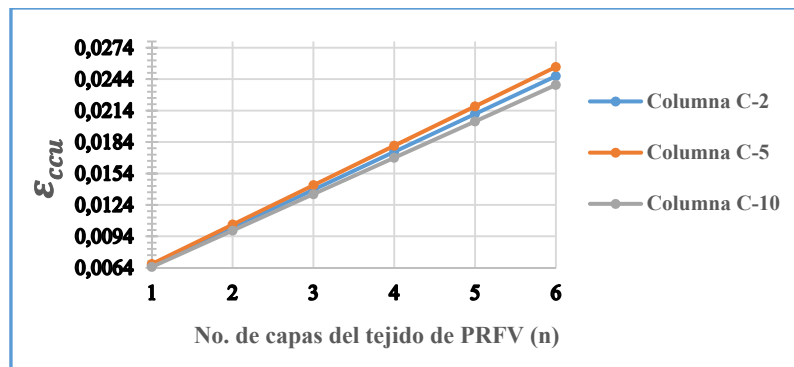


Figura 9. Influencia del número de capas de tejido de PRFV en la máxima deformación a compresión del hormigón confinado de las columnas analizadas.

Un análisis interesante se muestra cuando se plantea como varía la efectividad del refuerzo a base de tejidos de PRFV en función de la cuantía de acero de refuerzo de las columnas objeto de estudio. Como se observa en la siguiente figura (figura 10), en la medida que se aumenta la cuantía de acero de refuerzo original de las columnas, disminuye el incremento de capacidad resistente que aportan los tejidos de PRFV, esto trae consigo que la efectividad de dicho reforzamiento comience a decrecer en la medida que las columnas estén más reforzadas con acero. Lo anterior sucede fundamentalmente debido a que el incremento de capacidad resistente de las columnas reforzadas con tejidos de PRFV se basa en incrementar la resistencia a compresión del hormigón confinado, sin embargo, la capacidad resistente final de una columna de hormigón armado está dada por el aporte tanto del acero como del hormigón a compresión y en la medida que dicha columna se encuentre más reforzada con acero (grandes valores de cuantías), menos necesita del aporte del hormigón en su capacidad de resistir las solicitaciones actuantes, por lo que menos refuerzo de tejidos de PRFV necesitaría y por lo tanto el mismo comienza a perder efectividad.

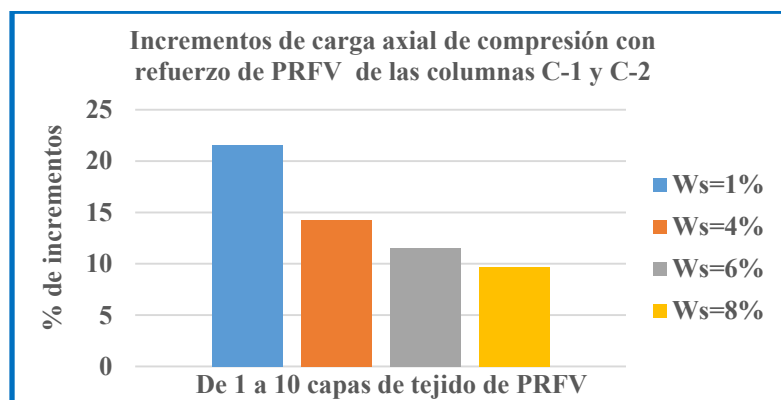


Figura 10. Efectividad del refuerzo de tejidos de PRFV en función de la cuantía de acero de refuerzo de las columnas objeto de estudio.

Conclusiones

- 1- El aumento de la capacidad resistente a compresión de una columna de hormigón armado envuelta con tejidos de PRF se logra a partir del confinamiento del hormigón que le brinda dicho refuerzo.
- 2- En el diseño del reforzamiento a carga axial de compresión de las columnas objeto de estudio se obtuvieron incrementos de capacidad resistente en el orden de los 14% a los 37%. Estos incrementos dejan de ser significativos cuando se supera el límite máximo de deformación a compresión del hormigón confinado.

- 3- Los resultados obtenidos evidencian que en la medida que se incrementa el número de capas de tejidos de PRFV, envolviendo a las columnas objeto de estudio, se logran incrementos en los niveles de deformación última a compresión del hormigón confinado, sin que exista pérdida de capacidad resistente a compresión, lo que se traduce en un aumento de la ductilidad de dichas columnas. Lo anterior se encuentra en plena concordancia con los resultados de los estudios internacionales.
- 4- En la medida que una columna de hormigón armado presente mayor cuantía de acero de refuerzo, menos efectivo será el aporte del confinamiento que le brinda el reforzamiento a base de tejidos de PRF.

Referencias bibliográficas

1. ACI 440.2R. (2017). *Guide for the Design, and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening of Concrete Structures*. Reported by American Concrete Institute Committee 440. Farmington Hills, USA.
2. CNR-DT 200 R1. (2013). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Italy.
3. Concrete Society. (2004). *Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials*. Technical Report No. 55 (TR55), second edition, Surrey, 128 pp.
4. CSA. (2002). *Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers*. CSA-S806-02, CSA Rexdale, Toronto, Canada.
5. De Diego, A.; Arteaga, A.; Fernández, J.; Perera, R.; Cisneros, D. (2015). *Behaviour of FRP confined concrete in square columns*. *Materiales de la Construcción*, vol. 65.
6. De Lorenzis, L., and Tepfers, R. (2003). *Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites*. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 7, No. 3, pp. 219-237.
7. Del Río Bueno, A. (2008) *Patología, Reparación y Refuerzo de Estructuras de Hormigón Armado de Edificación*. Departamento de Estructuras de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. España.
8. Fernández Montes, D., Díaz Heredia, E. (2017). *Aspectos particulares que condicionan la efectividad de los refuerzos de pilares*. *Hormigón y Acero*, Vol. 85.
9. FIB. (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Bulletin 14. Technical Report. Lausanne, Switzerland.
10. FIB. (2006). *Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs with emphasis on seismic applications*. Bulletin 35. Technical Report. Lausanne, Switzerland.
11. Hernández Caneiro, J., Wainshtok Rivas, H., Díaz Pérez, I. (2017). *Empleo de barras y telas de mallas de PRF como refuerzo del hormigón y el ferrocemento*. *Diseño estructural*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
12. Lam, L.; Teng, J. (2003a). *Design-Oriented Stress Strain Model for FRP-Confined Concrete*. *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 471-489.
13. Lam, L.; Teng, J. (2003b). *Design-Oriented Stress Strain Model for FRP-Confined Concrete in Rectangular Columns*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, No. 13, pp. 1149-1186.
14. López Molina, J. (2012). *Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono*. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, España.
15. Nanni, A., and Bradford, N. (1995). *FRP Jacketed Concrete under Uniaxial Compression*. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 2, pp. 115-124.
16. Pessiki, S.; Harries, K. A.; Kestner, J.; Sause, R.; and Ricles, J. M. (2001). *The Axial Behavior of Concrete Confined with Fiber Reinforced Composite Jackets*. *Journal of Composites in Construction*, ASCE, Vol. 5, No. 4, pp. 237-245.
17. Ramírez Díaz, R., Alfonso Morales, O. (2016). *Estudio de Diagnóstico y Evaluación Estructural del Hotel Cuelo*. Informe Técnico. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA).
18. Revollo Oporto, A., Delgadillo Zurita, M. (2017). *Análisis y diseño para el reforzamiento de columnas de hormigón armados con material FRP y perfiles metálicos*. *Journal Boliviano de Ciencias*, Vol. 13, No. 40, pp. 54-62.
19. Rosero Landeta, L. (2013). *Reforzamiento de Estructuras de Hormigón Armado con FRP (Fiber Reinforced Polymers)*. *Aplicación al caso de Refuerzo de una Losa y Columnas de un Salón de Audiovisuales y un Auditorio*. Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.
20. Spoelstra, M. R., and Monti, G. (1999). *FRP-Confined Concrete Model*. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 3, No. 3, pp. 143-150.
21. Steckel, G.; Hawkins, G.; and Bauer, J. (1999). *Durability Issues for Composites in Infrastructure*. 44th International SAMPE Symposium, Long Beach, CA, May, pp. 2194-2208.

22. Teng, J. G.; Chen, J. F.; Smith, S. T.; and Lam, L. (2002). *FRP Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 266 pp.
23. Toutanji, H. (1999). *Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets*. ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 3, May-June, pp. 397-404.
24. Vincent, T.; Ozbakkaloglu, T. (2013). *Influence of fiber orientation and specimen end condition on axial compressive behavior of FRP-confined concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 814–826.
25. Xian, G., and Karbhari, V. M. (2007). *Segmental Relaxation of Water-Aged Ambient Cured Epoxy*. Journal of Polymer Degradation and Stability, Vol. 92, No. 9, pp. 1650-1659.