

REFORZAMIENTO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE TEJIDOS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (PRF)

Omar Zamora Díaz-Comas¹, Hugo Wainshtok Rivas²

¹Ingeniero Civil, Máster en Ciencias, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 #11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, omar@civil.cujae.edu.cu

²Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 #11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, hugow@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

La técnica de reforzamiento externo en columnas de hormigón armado a través del uso de tejidos de Polímeros Reforzados con Fibra (PRF), producto del confinamiento que las mismas le proporcionan al hormigón, se ha ido ganando un importante puesto en el área de la reparación y rehabilitación de estructuras de hormigón armado gracias a las excelentes propiedades mecánicas de estos materiales y sus enormes ventajas respecto a otras técnicas. Sin embargo, debido a que su uso es relativamente reciente en la ingeniería civil, existen pocas recomendaciones o guías que consideren esta técnica de reforzamiento. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar las bases para el diseño del reforzamiento de columnas de hormigón armado cuando se empleen tejidos de PRF con el fin de incrementar su resistencia a carga axial de compresión. Se plantea una metodología de diseño de reforzamiento, aplicándose 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 de 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: columnas de hormigón armado, reforzamiento, tejidos de polímeros reforzados con fibras (PRF).

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS THROUGH FIBER REINFORCED POLYMER (FRP) FABRICS

ABSTRACT

The technique of external strengthening in reinforced concrete columns through the use of fiber reinforced polymer (FRP) fabrics, product of the confinement that they provide to concrete, has been gaining an important position in the area of repair and rehabilitation of reinforced concrete structures thanks to the excellent mechanical properties of these materials and their enormous advantages over other techniques. However, because its use is relatively recent in civil engineering, there are few recommendations or guidelines that consider this strengthening technique. 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. Is posed a design methodology of the strengthening, apply 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: fabrics of fiber reinforced polymers (FRP), reinforced concrete columns, strengthening.

Nota Editorial: Recibido: mayo 2020; Aceptado: agosto 2020

1. INTRODUCCIÓN

Una estructura de hormigón armado debe satisfacer durante su vida útil, los requisitos para los que fue diseñada. Sin embargo, las condiciones de la misma pueden cambiar a lo largo de su vida útil por lo que, pasado cierto tiempo, la estructura puede precisar operaciones de acondicionamiento y refuerzo que le permitan hacer frente a la nueva situación de servicio [1].

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 [2].

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 [3].

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 [4]. 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) [5]. 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 y una gran compatibilidad con el hormigón armado.

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 [6-10]: 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 [11-13] 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 [6-10]: e investigaciones [13, 14] 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 [15].

Cabe mencionar que en la actualidad no existe en Cuba una normativa específica referente a la rehabilitación y el reforzamiento de estructuras de hormigón armado. A esto hay que sumarle que el dominio de los modelos analíticos para diseñar con materiales compuestos de PRF, es realmente muy limitado en el contexto nacional actual, por lo que conocer las bases metodológicas para el cálculo de reforzamiento estructural de columnas de hormigón armado mediante el empleo de tejidos de PRF y conjuntamente poder llegar a analizar con certeza el tipo de respuesta que experimentan sus secciones reforzadas ante la presencia de carga axial de compresión constituye el principal objetivo de esta investigación.

2. DESARROLLO

2.1 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. 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 [16].

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, 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 [17].

En la figura 1 se representan cualitativamente las leyes constitutivas tensión– deformación a esfuerzo de tracción de materiales compuestos de PRF junto 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).

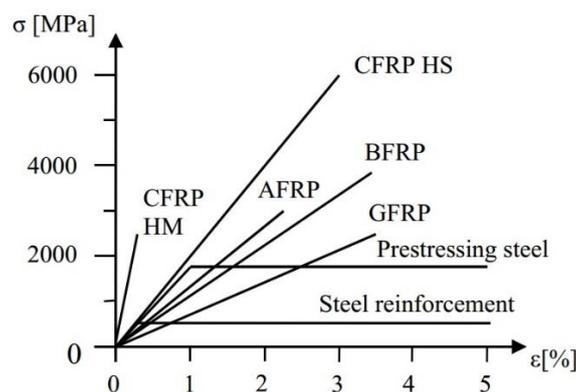


Figura 1: Leyes esfuerzo-deformación de algunos materiales compuestos de PRF [18]

La durabilidad de los sistemas de PRF ha sido objeto de considerables investigaciones en curso [19, 20] 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 [6]

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 parques 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:

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

2.2 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 [21, 22]. 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.

2.2.1 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 [11-13, 23]. El modelo de esfuerzo – deformación de Lam y Teng en el 2003a [13] para el hormigón confinado con PRF ha sido adoptado por el código ACI 440.2R-17 [6] y se ilustra en la figura 2.

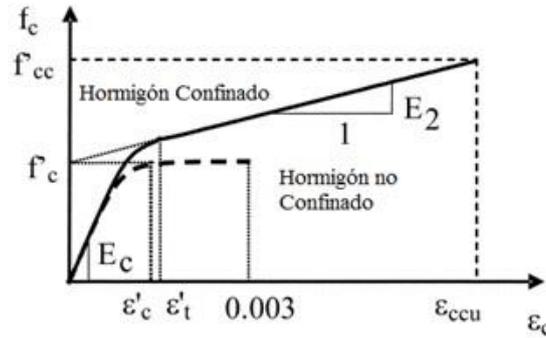


Figura 2: Modelo tensión-deformación del hormigón confinado con PRF propuesto por Lam y Teng [13]

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 las ecuaciones (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 [24] 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 [25].

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1,5 + 12 k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \quad (10)$$

2.2.2 Factores de forma y área efectiva de confinamiento

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

Para 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.

Para 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 [13], tal y como aparece en la figura 3.

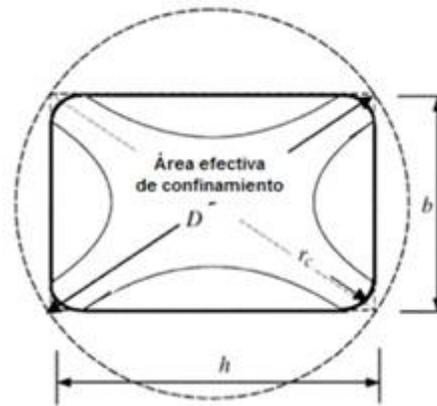


Figura 3: Sección transversal circular equivalente [14]

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).

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

2.2.3 Capacidad resistente a compresión de la columna reforzada

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.

2.3 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 aldeaña 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 sollicitaciones 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 [26]

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

3. 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}	$f_l(\text{MPa})$	ε_{ccu}	$f'_{cc}(\text{MPa})$
C1	5 capas	0,513	0,513	0,513	0,0131	8,95	0,01	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	P_u (kN)	$\emptyset P_n$ sin PRFV (kN)	No. de capas de PRFV	$\emptyset P_n$ con PRFV (kN)	% de incremento de $\emptyset P_n$
C1	1705	1246	5 capas	1712	37%
C2	1306	1253	1 capa	1445	15%
C5	1085	935	1 capa	1248	33%
C10	1422	1361	1 capa	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 figura 4 los esquemas a nivel de sección de los detalles del reforzamiento de la columna más cargada.

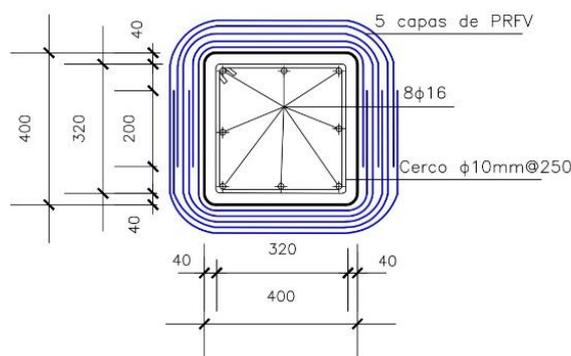


Figura 4: Esquemas y detalles de la columna C-1 reforzada con tejidos de PRFV

3.1 Discusión de los resultados

Si se analiza como varía el aumento de la capacidad resistente de las columnas objeto de estudio en la medida que se incrementa el número de capas de tejidos de PRFV, se puede observar en la figura 5, que el aumento de la resistencia es significativo siempre y cuando no se alcance el límite de la máxima deformación a compresión del hormigón confinado 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.

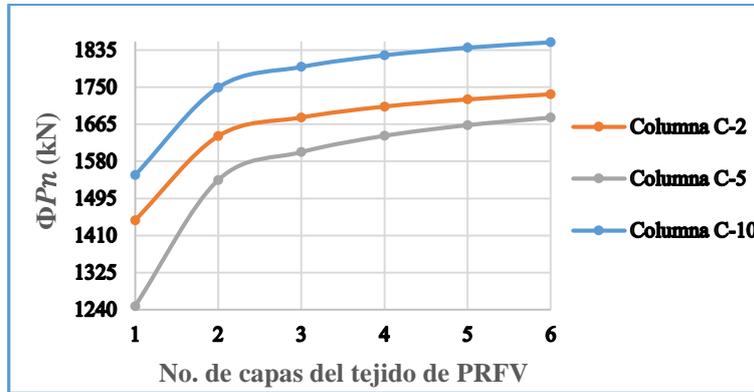


Figura 5: Comportamiento de la capacidad resistente de las columnas: C-2, C-5 y C-10 en función del número de capas de PRFV

El comportamiento mostrado anteriormente tiene su explicación en la variación que experimenta la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado en la medida que se incrementa la cantidad de refuerzo de PRFV. Precisamente se puede observar a través de la siguiente figura (figura 6), que mientras el número de capas de PRFV se incrementa, aumenta la resistencia a compresión del hormigón confinado, sin embargo, debido al mismo fenómeno mencionado en el comportamiento anterior, a partir del número de capas donde se supera el límite de la máxima deformación del hormigón confinado, los incrementos de máxima resistencia a compresión de dicho hormigón son muy pequeños. Por ejemplo, en la propia figura 6, se observa que para las columnas C-2, C-5 y C-10, en donde se cumple la condición anterior, el incremento de la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado, en el intervalo de 2 a 6 capas de tejido de PRFV se encuentra en el rango 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.

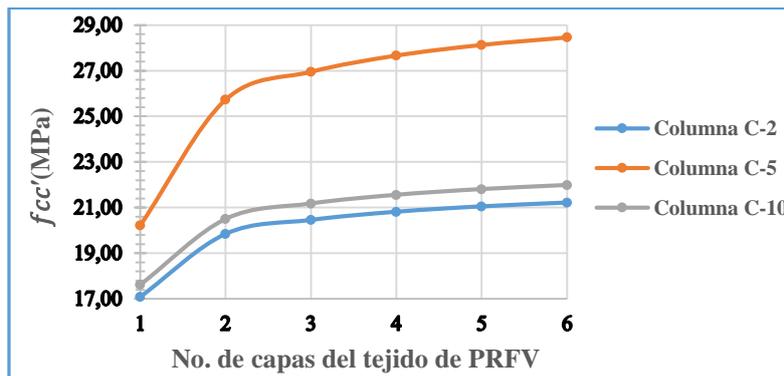


Figura 6: Comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón confinado de las columnas: C-2, C-5 y C-10 en función del número de capas de PRFV

Analizando ahora lo que sucede con el comportamiento de la máxima deformación a compresión del hormigón confinado, se puede observar en la figura 7, como en la medida que se incrementa el 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 aumenta el número de capas de tejido, la presión de confinamiento incrementa y de acuerdo al modelo tensión – deformación del hormigón confinado propuesto por Lam y Teng en el 2003a [13], 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.

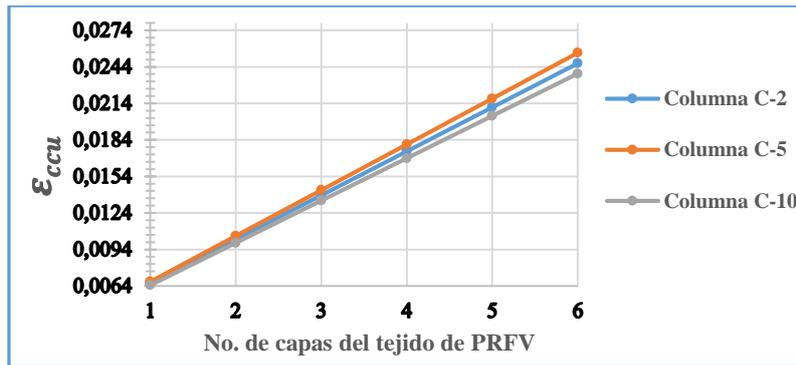


Figura 7: Comportamiento de la deformación a compresión del hormigón confinado de las columnas: C-2, C-5 y C-10 en función del número de capas de PRFV

Un último análisis interesante se muestra cuando se plantea como varía la efectividad del reforzamiento a base de tejidos de PRFV en función de la cuantía de acero de refuerzo presente en las columnas objeto de estudio. Como se observa en la figura 8, en la medida que se aumenta la cuantía de acero de refuerzo longitudinal de las columnas C-1 y C-2 (en la figura se refiere a cuatro valores de cuantías: 1%, 4%, 6% y 8%), disminuye el porcentaje de incremento de capacidad resistente de las columnas reforzadas, esto trae consigo que la efectividad de dicho reforzamiento comience a decrecer en la medida que las columnas estén más fuertemente armadas 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 armada 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.

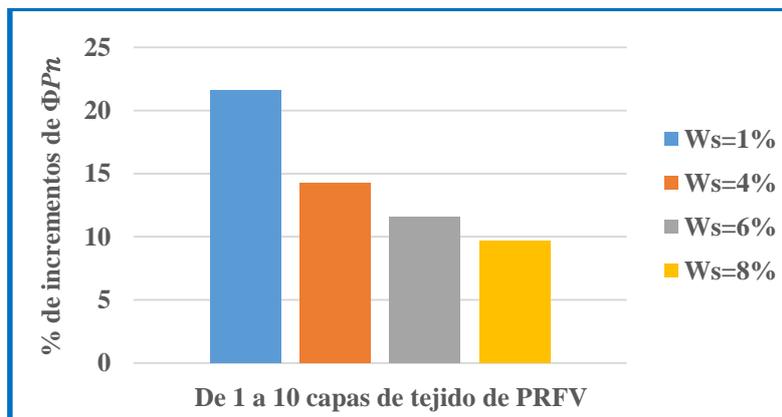


Figura 8: Efectividad del reforzamiento a base de tejidos de PRFV en función de la cuantía de acero de las columnas C-1 y C-2

4. CONCLUSIONES

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. 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%, los que dejan de ser significativos cuando se supera el límite máximo de deformación a compresión del hormigón confinado. Los resultados obtenidos evidencian que en la medida que se incrementa el número de capas de tejidos de PRFV, 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. Por último, se demostró que en la medida que una columna de hormigón armado presente mayor cuantía de acero de refuerzo longitudinal, menos efectivo será el aporte del confinamiento que le brinda el reforzamiento a base de tejidos de PRF.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] González V,F , Barrios, A, P. and Molina, M, H "Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto ". *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2017.
- [2] Revollo O, A., Delgadillo Z, M, "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. 2017
- [3] De Diego, A ., Arteaga, A. Fernández, J. Perera R. and Cisneros D., "Behaviour of FRP confined concrete in square columns". *Materiales de Construcción*,. vol 65, No.320. 2015
- [4] Fernández, M, C., González, M,N., Piñero, J, Á. and, Cobo, A. "Compressive strength behaviour of low- and medium-strength concrete specimens confined with carbon fibres in defective implementation conditions: an experimental study". *Materiales de Construcción*,. vol. 66, No.324. 2016
- [5] Fernández, D, M. and Díaz, E, H. "Aspectos particulares que condicionan la efectividad de los refuerzos de pilares". *Hormigón y Acero*, vol. 85, 2017.
- [6]. ACI-440.2R-17, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures".*Reported by American Concrete Institute Committee 440*. Farmington Hills., pp. 117, 2017
- [7] FIB. "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures". *Bulletin 14. Technical Report*. Lausanne, Suiza. 138 pp. 2002.
- [8] CNR-DT200R1. "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati". *Consiglio Nazionale delle Ricerche*. Roma, Italia. pp. 176. 2013.
- [9] CSA-S806-02. "Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers". *CSA Rexdale*. Toronto, Canadá. 2002.
- [10] JSCE. "Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials". *Concrete Engineering Series 23*. Tokyo, Japan. 1997.
- [11] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. "FRP Strengthened RC Structures". *John Wiley & Sons, West Sussex*, UK. 266 pp. 2002.
- [12] De Lorenzis, L., and Tepfers, R. "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, 2003.
- [13] Lam, L., and Teng, J. "Design-Oriented StressStrain Model for FRP Confined Concrete". *Construction and Building Materials*, vol. 17, pp. 471-489, 2003a.
- [14] Lam, L., and Teng, J. "Design-Oriented Stress Strain Model for FRPConfined Concrete in Rectangular Columns". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 22. No. 13, pp. 1149-1186, 2003b
- [15] Vincent, T.; Ozbakkaloglu, T. "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, 2013.
- [16] Derkowski, W. "Opportunities and risks arising from the properties of FRPmaterials used for structural strengthening". *Procedia Engineering*,. vol. 108, pp. 371-379, 2015.
- [17] Protchenko, K., Wlodarczyk, M, and Szmigiera, E. "Investigation of behavior of reinforced concrete elements strengthened with FRP". *Procedia Engineering*,. vol. 111, pp. 679-686, 2015

- [18] Sonnenschein, R, Gajdosova, K, and Holly, I. "FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges". *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 6, 2016.
- [19] Xian, G., and Karbhari, V. M. "Segmental relaxation of water-aged ambient cured epoxy". *Journal of Polymer Degradation and Stability*. vol. 92, No. 9, pp. 1650-1659, 2007.
- [20] Steckel, G.; Hawkins, G.; and Bauer, J. "Durability issues for composites in infrastructure". *44th International SAMPE Symposium*. Long Beach, CA. May, pp. 2194-2208, 1999.
- [21] Toutanji, H. "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, 1999.
- [22] Nanni, A., and Bradford, N. "FRP Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression". *Construction and Building Materials*. vol. 9, No. 2, pp. 115-124, 1995.
- [23] Spoelstra, M. R., and Monti, G. "FRP-Confined Concrete Model". *Journal of Composites for Construction, ASCE*. Vol. 3, No. 3. pp, 143-150, 1999.
- [24] Pessiki, S.; Harries, K. A.; Kestner, J.; Sause, R.; and Ricles, J. M. "The Axial Behavior of Concrete Confined with Fiber Reinforced Composite Jackets". *Journal of Composites in Construction, ASCE*. Vol. 5, No. 4, pp. 237-245, 2001.
- [25] Concrete Society. "Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials". *Technical Report No. 55 (TR55)*. Surrey. 128 pp. 2016.
- [26] Ramírez R, D, y Morales, O, A. "Estudio de diagnóstico y evaluación estructural del Hotel Cueto". *Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA)*. La Habana, Cuba, 29 pp, 2016.