

REFORZAMIENTO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE EL SISTEMA NSM-PRF

Danay Aguado Machín¹, Omar Zamora Díaz-Comas²

¹Ingeniera Civil. Ministerio de Educación Superior (MES), Departamento de Inversiones, Calle San Miguel #1111 entre Mazón y Basarrate, Plaza de la Revolución, danay1508@mes.gob.cu

²Ingeniero 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

RESUMEN

El reforzamiento estructural en elementos de hormigón armado mediante materiales compuestos de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF), se puede englobar bajo dos modalidades: el refuerzo con materiales compuestos en forma de tejidos adheridos externamente, y más recientemente, el refuerzo mediante barras de PRF insertadas en el recubrimiento (NSM-PRF). Esta última técnica de refuerzo presenta una serie de ventajas respecto al pegado externo de tejidos de PRF; sin embargo, debido en parte a su menor desarrollo, todavía no se encuentra tan implementada en la actualidad. Los objetivos de este trabajo consisten en evaluar el comportamiento de elementos de hormigón armado reforzados mediante el sistema NSM-PRF, y establecer las diferencias en cuanto a la ductilidad del fallo, entre los diseños de reforzamientos a flexión mediante barras NSM-PRF y los reforzamientos a flexión mediante tejidos de PRF. Se establecen los principales modelos analíticos que sirven de base para diseñar el reforzamiento a flexión y a cortante mediante el sistema NSM-PRF, y se aplican en la rehabilitación de losas y vigas de hormigón armado pertenecientes a una edificación existente. Los resultados revelan la efectividad de los reforzamientos realizados a través de la obtención de incrementos de resistencia a flexión entre los 15% y 55%, e incrementos de resistencia a cortante entre los 4% y 30%, y se demostró estadísticamente, que los elementos reforzados a flexión mediante barras NSM-PRF, presentan, de manera significativa, una menor disminución de la ductilidad del fallo con relación a los elementos reforzados mediante tejidos de PRF.

Palabras claves: hormigón armado, polímeros reforzados con fibras (PRF), reforzamiento a cortante, reforzamiento a flexión, refuerzo insertado en el recubrimiento (NSM).

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS USING THE NSM-FRP SYSTEM

ABSTRACT

The structural strengthening in elements of reinforced concrete using composite materials of Fiber Reinforced Polymers (FRP) can be encompassed under two types: strengthening with composite materials in the form of externally bonded fabrics and more recently, the strengthening using Near Surface Mounted FRP bars (NSM-FRP). This latest strengthening technique features a number of advantages over external bonding of FRP fabrics, however, due in part to its lower development, it is still not so implemented today. The objectives of this work is to evaluate the behavior of reinforced concrete elements reinforced by the NSM-FRP system, and to establish the differences regarding the ductility of failure, between the designs of flexural strengthening using NSM-FRP bars and flexural strengthening using FRP fabrics. The main analytical models that serve as the basis for designing the flexural reinforcement and to shear using the NSM-FRP system, and are applied in the rehabilitation of concrete slabs and beams armed belonging to an existing building. The results reveal the effectiveness of the strengthening applied by obtaining increases in flexural strength between 15% and 55%, and increases shear strength between 4% and 30%, and it was statistically demonstrated that the reinforced elements to bending using NSM-FRP bars, show, significantly, a lower decrease in the ductility of failure in relation to elements reinforced by FRP fabrics.

Key words: fibers reinforced polymers (FRP), flexural strengthening, near surface mounted (NSM), reinforced concrete, shear strengthening.

Nota Editorial: Recibido: julio 2020; Aceptado: noviembre 2020

1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones de hormigón armado son diseñadas para una determinada vida útil, sin embargo, existen numerosas obras construidas con este material, que se han dañado considerablemente en un tiempo menor que el previsto, debido a múltiples causas como el impacto de agentes agresivos, cambios de uso en la edificación, errores existentes de proyecto o de ejecución, así como acciones sísmicas o de otros desastres naturales. Debido a lo anterior, cabe señalar el contexto mediante el cual funciona el sector de la construcción hoy en día. Cada vez se hace más importante rehabilitar, siendo en la actualidad las cifras de inversión destinadas a este fin en algunos casos análogas a las empleadas en una nueva construcción.

En los últimos años, 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.

Dentro de las acciones de rehabilitación de una edificación se incluye el término de reforzamiento estructural. El reforzamiento de un elemento estructural se puede conseguir mediante la incorporación de un material que le ayude en su misión de soportar las cargas que actúan sobre él [1]. Los métodos que más han prevalecido para reforzar estructuras de hormigón armado son los llamados métodos tradicionales, entre los que se encuentran el recrecido de secciones de hormigón armado, el adosado de perfiles metálicos y el encolado exterior de bandas de acero con adhesivo epoxi. Estas técnicas de reforzamiento presentan algunos inconvenientes como la generación de mayor peso propio sobre las edificaciones, la posibilidad latente de corrosión del acero de refuerzo, mayor dificultad constructiva, así como el incremento de rigidez que conlleva a alterar la distribución de esfuerzos en el conjunto de la estructura.

Los avances en el campo de los materiales compuestos de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF), han dado como resultado el desarrollo de nuevos materiales con excelentes potenciales para el reforzamiento de elementos estructurales de hormigón armado en áreas donde los materiales convencionales no han presentado buenos resultados [2].

El reforzamiento estructural mediante materiales compuestos de PRF, se puede englobar en la actualidad bajo dos modalidades de refuerzo. Por un lado, el material compuesto en forma de laminados o tejidos de PRF puede ser adherido a la superficie del elemento a reforzar bajo diferentes configuraciones, en función del tipo de refuerzo considerado y el tipo de elemento a reforzar. Por otro lado, como alternativa e incluso como complemento al pegado externo de laminados o tejidos de PRF, el refuerzo en forma de barras de PRF, puede ser insertado y adherido en el recubrimiento del hormigón del elemento a reforzar, a través de ranuras realizadas en su superficie [3]. Esta última técnica de refuerzo con materiales compuestos, conocida comúnmente bajo las siglas NSM (del inglés Near Surface Mounted), presenta una serie de ventajas respecto al pegado externo de laminados de PRF y solventa, en mayor o menor grado, algunas de sus limitaciones. Resultados de investigaciones recientes han revelado que el sistema NSM-PRF ha mostrado ser efectivo en el reforzamiento de elementos de hormigón armado ante esfuerzos de flexión [4-6], y en el reforzamiento de elementos de hormigón armado ante esfuerzos de cortante [7-9]; sin embargo, debido en parte a su menor desarrollo, esta técnica de refuerzo todavía no se encuentra tan implementada en la actualidad, como si lo ha sido el pegado externo mediante laminados o tejidos de PRF.

Según Cisneros Quero [10], entre las principales ventajas que presenta el sistema NSM-PRF con relación al pegado externo de tejidos de PRF se encuentran las siguientes: el refuerzo mediante NSM-PRF requiere de menos preparación de la superficie del elemento; este sistema de refuerzo se encuentra menos expuesto al impacto, fuego o vandalismo; las barras NSM-PRF que se emplean pueden ser pretensadas con mayor facilidad; y el refuerzo mediante NSM-PRF es menos propenso al desprendimiento, debido a que las barras empleadas se encuentran rodeadas de adhesivo. Esta última ventaja, es muy importante en el empleo de este sistema de reforzamiento en los elementos de hormigón armado que trabajan a flexión, ya que a diferencia de lo que ocurre con los laminados o tejidos de PRF, donde su principal debilidad radica precisamente en el fallo por despegue, provoca que su capacidad de deformación se vea limitada, sobre todo por la presencia de una insuficiente adherencia con el sustrato de hormigón. En este sentido, como las barras NSM-PRF, se encuentran completamente rodeadas de adhesivo, se incrementa la superficie de adherencia, lo que permite aumentar la deformación efectiva del sistema de refuerzo NSM-PRF, y por lo tanto, confiere a los elementos de hormigón armado reforzados a flexión, de una menor reducción de la deformación del acero traccionado, lo que hace suponer, en términos de ductilidad del fallo, que se comporte de una manera más favorable con relación a los elementos reforzados mediante tejidos de PRF.

A partir de todo lo planteado, los objetivos fundamentales de este trabajo consisten en evaluar el comportamiento de elementos de hormigón armado reforzados mediante el sistema NSM-PRF, y establecer las diferencias en cuanto a la ductilidad del fallo, de los reforzamientos a flexión mediante el sistema NSM-PRF y los reforzamientos a flexión empleando tejidos de PRF.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 El sistema de reforzamiento NSM-PRF y sus propiedades para el diseño

El sistema NSM-PRF, consiste en un reforzamiento externo en forma de barra de PRF de reducida sección, que se inserta en el recubrimiento del elemento de hormigón armado a través de ranuras mecanizadas en su superficie, para finalmente adherirlo al sustrato mediante un adhesivo.

Las barras de PRF empleadas en este tipo de refuerzo, son en general de sección circular o rectangular y pueden presentar diversos tratamientos superficiales con el objetivo de mejorar el comportamiento adherente de la unión [11].

En la mayor parte de las aplicaciones de este sistema de reforzamiento se emplean barras de PRF de fibra de carbono (PRFC), aunque también existen aplicaciones mediante barras de PRF de fibra de vidrio (PRFV).

En lo que respecta al adhesivo de pegado, su papel es esencial, ya que es el que transfiere las tensiones en la interfase hormigón-NSM-PRF. Sus propiedades más importantes son la resistencia a la tracción y la resistencia al cortante. Las resinas epoxi son los adhesivos más utilizados en los sistemas NSM-PRF [12].

Dentro de las propiedades mecánicas que más destacan en los sistemas de refuerzo NSM-PRF, se encuentra el comportamiento ante esfuerzos de tracción de las barras de PRF, ya que, si bien es cierto que existe también el comportamiento ante esfuerzos de compresión, su empleo en elementos que trabajan ante este tipo de sollicitación todavía se encuentra muy limitado [2].

Cuando una barra de PRF es sometida a un ensayo de tracción uniaxial, la respuesta del material no exhibe un comportamiento plástico (fluencia) antes de la rotura. El comportamiento a tracción de materiales de PRF que se constituyen por un tipo de fibra, se caracteriza por presentar una relación tensión-deformación lineal-elástico hasta la rotura, lo que se traduce en tipo de fallo frágil.

Las resinas y las fibras de los sistemas NSM-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 y la deformación última a la tracción, 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 [13, 14].

Debido a lo anterior, desde el punto de vista del diseño del reforzamiento, los factores mencionados se recogen en un único coeficiente que se denomina factor de reducción medioambiental (C_E) y que incluye todas las posibles afectaciones de los sistemas NSM-PRF cuando estos se ven expuestos en diferentes condiciones medioambientales. La tabla 1, ilustra los valores a emplear para el factor de reducción medioambiental (C_E), en función del tipo de fibra que presenten las barras de PRF y de las condiciones de exposición existentes en el lugar del reforzamiento.

Tabla 1: Factores de reducción medioambientales a emplear en los sistemas NSM-PRF [15].

| 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 NSM-PRF, las propiedades mecánicas como la tensión última a la tracción (f_{fu}^*) y la deformación última a la tracción (ϵ_{fu}^*), se verán afectadas a través del factor de reducción medioambiental (C_E) mostrado en la tabla anterior, tal y como se observa en las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \tag{1}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \tag{2}$$

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 materiales, se determina a través de la ley de Hooke, como se representa en la ecuación 3, sin verse afectado por el factor de reducción medioambiental (C_E).

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

2.2 Diseño del reforzamiento a flexión mediante el sistema NSM-PRF

La resistencia a flexión de una sección de hormigón armado reforzada mediante el sistema NSM-PRF (ΦM_n), tiene que ser superior al momento flector requerido para la combinación pésima de las cargas (M_u). De acuerdo con lo anterior, la norma cubana NC 207 del 2019 [16], propone un coeficiente reductor de resistencia (Φ) y el código estadounidense ACI-440.2R del 2017 [15] otro coeficiente reductor de resistencia adicional ($\psi_f = 0,85$), este último aplicado únicamente a la contribución a flexión del sistema NSM-PRF. Este factor de reducción adicional (ψ_f), está pensado para tener en cuenta una más baja fiabilidad del sistema de reforzamiento NSM-PRF, comparado con el acero de refuerzo del hormigón armado.

La capacidad resistente que presenta un elemento de hormigón armado reforzado a flexión mediante el sistema NSM-PRF, puede determinarse a través de la compatibilidad de deformaciones, del equilibrio interno de fuerzas y del modo de fallo que controla el diseño a nivel de sección.

Se asume que el fallo por aplastamiento del hormigón ocurre, si la deformación a compresión en el hormigón alcanza su máxima deformación unitaria ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,003$), por otro lado se asume, que el fallo por desprendimiento del sistema NSM-PRF del recubrimiento del hormigón ocurre, si dicho refuerzo alcanza su máxima deformación a tracción ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$), antes de que el hormigón logre su máxima deformación a compresión.

El desprendimiento de las barras NSM-PRF del recubrimiento del hormigón, ocurre si la fuerza aplicada en las barras no se puede sostener en dicho recubrimiento. Para prevenir este tipo de fallo, se limita el nivel de deformación desarrollado en el sistema NSM-PRF. Este nivel de deformación se conoce como deformación de diseño (ε_{fd}), y oscila entre los valores de $0,6\varepsilon_{fu}$ a $0,9\varepsilon_{fu}$, dependiendo de varios factores como: las dimensiones del elemento, las cuantías de acero de refuerzo y de las barras NSM-PRF, así como la rugosidad de la superficie de las barras NSM-PRF. Finalmente, basado en una investigación efectuada a través de un análisis de bases de datos existentes [17], se recomienda usar como valor de deformación de diseño, el representado en la ecuación 4.

$$\varepsilon_{fd} = 0,7\varepsilon_{fu} \quad (4)$$

El máximo nivel de deformación que se puede alcanzar en el refuerzo NSM-PRF, se regirá por el nivel de deformación desarrollado en el punto donde el hormigón falla por aplastamiento, o en el punto donde se desprende del recubrimiento del hormigón el sistema NSM-PRF. Mediante la compatibilidad de deformaciones, a través de la ecuación 5, se determina el nivel de deformación efectiva del sistema NSM-PRF.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (5)$$

Donde:

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

d_f : Peralto efectivo del refuerzo NSM-PRF.

c : Profundidad de la línea neutra.

ε_{bi} : Deformación inicial en el sustrato antes de colocar el refuerzo NSM-PRF.

El nivel de deformación inicial en el sustrato de hormigón antes de colocar el sistema NSM-PRF (ε_{bi}), se determina a partir de un análisis elástico de la sección existente, considerando que actúa al menos el peso propio del elemento durante la instalación del sistema de NSM-PRF.

Para determinar las deformaciones unitarias en el resto de los materiales involucrados en la capacidad resistente de la sección reforzada, se aplica la ley de compatibilidad de deformaciones a nivel de sección.

Una vez determinadas las deformaciones unitarias, se calculan los niveles de tensiones y las fuerzas resultantes de los materiales a nivel de sección, y se procede a chequear el equilibrio, 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. En la figura 1 se muestra el diagrama de deformaciones y de fuerzas resultantes de una sección de hormigón armado reforzada a flexión mediante el sistema NSM-PRF.

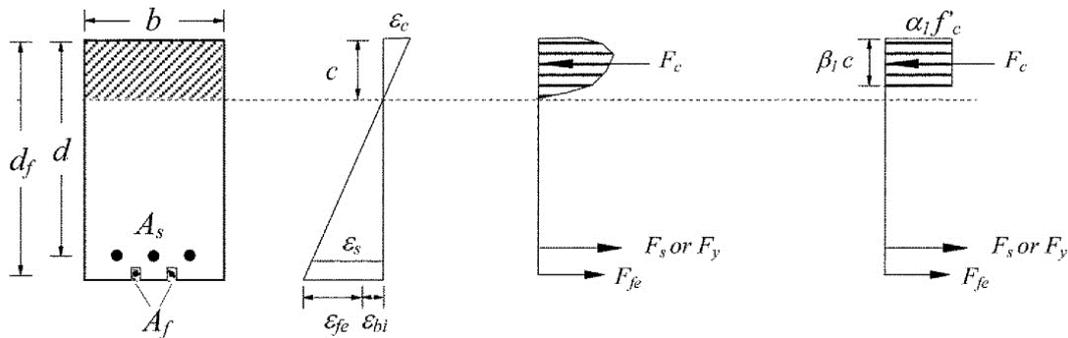


Figura 1: Esquema de deformaciones y de fuerzas de una sección de hormigón armado reforzada a flexión mediante barras NSM-PRF [15].

Una vez alcanzado el equilibrio de fuerzas, se procede a determinar el momento resistente de la sección de hormigón armado reforzada mediante el sistema NSM-PRF (ϕM_n) a través de la ecuación 6, y se revisa la condición de resistencia del elemento.

$$\phi M_n = \phi [A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} (d_f - \frac{\beta_1 c}{2})] \quad (6)$$

2.3 Diseño del reforzamiento a cortante mediante el sistema NSM-PRF

La capacidad resistente a cortante de un elemento de hormigón armado reforzado mediante el sistema NSM-PRF (ϕV_n), debe exceder el valor de cortante requerido para la combinación pésima de las cargas (V_u). La capacidad resistente a cortante (ϕV_n), se determina utilizando el factor de reducción de resistencia $\phi = 0,75$, según establece la NC 207 del 2019 [16].

La capacidad nominal a cortante de un elemento de hormigón armado reforzado mediante el sistema NSM-PRF, se determina adicionando la contribución a cortante del refuerzo NSM-PRF ($V_{NSM-PRF}$), a las contribuciones a cortante del acero de refuerzo (V_s) (estribos, ganchos o espirales) y del hormigón (V_c) respectivamente.

Las contribuciones resistentes a cortante del hormigón (V_c) y de la armadura pasiva (V_s), se determinan a partir del procedimiento de cálculo establecido en la pertinente normativa NC 207 del 2019 [16].

Existen varios modelos analíticos que evalúan la capacidad resistente a cortante de los sistemas NSM-PRF empleados como reforzamiento en elementos de hormigón armado [17-21]. En este trabajo se utilizó el modelo de De Lorenzis y Nanni [18], debido a que es el modelo más empleado a nivel internacional, fue el primer modelo en aparecer, por lo tanto, es el más sencillo y esto hizo que los modelos analíticos que le sucedieran se basaran en él, y también, porque de todos los modelos revisados, es el que más se ajusta al método de diseño establecido para el cumplimiento del Estado Límite Último a cortante.

En el modelo propuesto por De Lorenzis y Nanni [18], la contribución del refuerzo NSM-PRF a la resistencia a cortante del elemento, se limita a través de un valor mínimo entre dos resultados que están relacionados al fallo adherente y a la máxima deformación permisible del refuerzo respectivamente, tal y como se muestra en la ecuación 7.

$$V_{NSM-PRF} = \text{mín}(V_{1F}, V_{2F}) \quad (7)$$

El primer término (V_{1F}), tiene en cuenta la contribución a la resistencia a cortante del sistema NSM-PRF en base al fallo adherente último, y el segundo término (V_{2F}), calcula el aporte del sistema NSM-PRF en base a la máxima deformación permisible en las barras NSM-PRF, de manera que se mantenga la integridad resistente del hormigón frente a esfuerzos de cortante. A niveles superiores de la máxima deformación permisible, el ancho de las fisuras generadas podría ser tal, que se perdería el aporte del hormigón en la resistencia a cortante a través del mecanismo de resistencia por el engranamiento de los áridos.

Para el cálculo de ambos términos, se define previamente un valor reducido de la altura de la sección que contienen el refuerzo externo de NSM-PRF, y que se define mediante la ecuación 8.

$$d_{net} = d_r - 2c \quad (8)$$

Donde d_r es la altura de la zona reforzada y c es el recubrimiento de hormigón en el refuerzo longitudinal.

Cálculo de V_{1F}

El término V_{1F} se determina mediante la ecuación 9, y tiene en cuenta la contribución de la resistencia a cortante del sistema NSM-PRF en base al fallo adherente en las proximidades del Estado Límite Último.

El esfuerzo cortante resistente aportado por el sistema NSM-PRF, se obtiene como la suma del esfuerzo cortante de cada barra de NSM-PRF atravesada por la fisura principal, en ambas caras laterales, y este último, puede ser calculado como el producto de la tensión de adherencia media y el área lateral de cada barra, para la menor longitud de adherencia en la que idealmente quedan divididas estas.

$$V_{1F} = 2\pi d_b \tau_b L_{tot} \quad (9)$$

En la ecuación 9, d_b es el diámetro de las barras NSM-PRF, τ_b es la tensión de adherencia media y L_{tot} es la suma de las longitudes mínimas adheridas de todas las barras NSM-PRF atravesadas por la fisura principal. L_{tot} debe ser calculada para el caso más desfavorable que corresponde al valor mínimo de éste, tal y como se muestra en la ecuación 10.

$$V_{1F} = 2\pi d_b \tau_b L_{tot \text{ mín}} \quad (10)$$

$L_{tot \text{ mín}}$ depende de d_{net} , del espaciamiento entre barras de refuerzo (s) y de la inclinación del refuerzo.

Para refuerzo vertical (90°), $L_{tot \text{ mín}}$ se determina mediante las ecuaciones 11 y 12.

$$L_{tot \text{ mín}} = d_{net} - s \quad \text{para} \quad \frac{d_{net}}{3} < s < d_{net} \quad (11)$$

$$L_{tot \text{ mín}} = 2d_{net} - 4s \quad \text{para} \quad \frac{d_{net}}{4} < s < \frac{d_{net}}{3} \quad (12)$$

Para refuerzo inclinado (45°), $L_{tot \text{ mín}}$ se determina mediante las ecuaciones 13 y 14.

$$L_{tot \text{ mín}} = (2d_{net} - s) \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \text{para} \quad \frac{2d_{net}}{3} < s < 2d_{net} \quad (13)$$

$$L_{tot \text{ mín}} = 2\sqrt{2}(d_{net} - s) \quad \text{para} \quad \frac{d_{net}}{2} < s < \frac{2d_{net}}{3} \quad (14)$$

Cálculo de V_{2F}

El término V_{2F} tiene en cuenta la contribución a cortante del sistema NSM-PRF en base a la máxima deformación admisible de este refuerzo fijada en 0,004. La longitud de adherencia efectiva de una barra NSM-PRF cruzada por una fisura para un valor de deformación de 0,004, se determina empleando la ecuación 15.

$$\bar{L}_l = 0,001 \frac{d_b E_f}{\tau_b} \quad (15)$$

Donde E_f es el módulo de elasticidad de las barras NSM-PRF. La máxima longitud de adherencia efectiva para una orientación del refuerzo a 90° se determina mediante la ecuación 16.

$$L_{i \text{ máx}} = \frac{d_{net}}{2} \quad (16)$$

Y para una orientación del refuerzo a 45° se calcula mediante la ecuación 17.

$$L_{i \text{ máx}} = \frac{d_{net}}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Si $L_{i \text{ máx}} < \bar{L}_l$, el cálculo de V_{2F} no es necesario, en caso contrario, V_{2F} debe ser calculado. Para una orientación del sistema NSM-PRF a 90° , V_{2F} se determina mediante las ecuaciones 18 y 19.

$$V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b \bar{L}_l \quad \text{para} \quad \frac{d_{net}}{2} < s < d_{net} \quad (18)$$

$$V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b \bar{L}_l \frac{3d_{net} - 4s}{d_{net}} \quad \text{para} \quad \frac{d_{net}}{4} < s < \frac{d_{net}}{2} \quad (19)$$

Y para una orientación del refuerzo a 45° , V_{2F} se determina mediante las ecuaciones 20 y 21.

$$V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b \bar{L}_l \quad \text{para} \quad d_{net} < s < 2d_{net} \quad (20)$$

$$V_{2F} = 2\pi d_b \tau_b \bar{L}_l \frac{3d_{net} - 2s}{d_{net}} \quad \text{para} \quad \frac{d_{net}}{2} < s < d_{net} \quad (21)$$

2.4 Caso de estudio

La edificación objeto de estudio se encuentra señalada hoy con el número 154, de la calle de los Oficios, ubicado en la Plaza de San Francisco, en el municipio de La Habana Vieja, provincia La Habana.

El edificio de manera general tiene planta en forma de C. Presenta un bloque de ascensores y dos escaleras, una principal y otra de servicio al fondo. El sistema estructural de la edificación está conformado mediante pórticos de hormigón armado, con presencia de vigas principales y secundarias, las losas de entrepisos y de cubierta son de hormigón armado, y tanto la caja de ascensores como de escaleras están compuestas por muros de ladrillos.

A partir del año 2018, como parte del desarrollo económico del país a través de la implementación del plan de inversiones para la ejecución de instalaciones hoteleras de alto estándar en edificaciones existentes con valor patrimonial, la inmobiliaria ALMEST asumió la inversión para convertir al edificio Oficinas No. 154 en una instalación hotelera bajo el nombre Hotel Palacio de los Corredores. La idea es someter la edificación a una remodelación general, respetando su estructura original y su fachada para adecuarla dentro de las posibilidades, a los requerimientos actuales del turismo. A partir de tomada la decisión, la Inmobiliaria ALMEST, solicitó al Departamento de Diagnóstico y Levantamiento de la Empresa de Proyectos de Arquitectura y Urbanismo (RESTAURA), la realización de un Diagnóstico Patológico con el objetivo de caracterizar los materiales existentes en la estructura de la edificación, para posteriormente determinar su capacidad de reserva de resistencia. En la tabla 2, se muestran los resultados del diagnóstico que sirven para caracterizar los elementos estructurales de hormigón armado de la edificación objeto de estudio.

Tabla 2: Caracterización de los elementos de hormigón armado del edificio Oficinas No. 154 [22].

| Elemento | f'c (MPa) | Sección transversal | Acero de refuerzo longitudinal | Acero de refuerzo transversal |
|-------------------|-----------|---------------------|---|-------------------------------|
| Columnas | 20 | 50x50 cm | 12 barras No.36 (en todo el perímetro) | Cercos No. 13 @ 200 mm |
| Vigas principales | 20 | 50x60 cm | 4 barras No.25 (acero inferior) | Cercos No. 10 @ 200 mm |
| Vigas secundarias | 20 | 30x60 cm | 3 barras No.25 (acero inferior) | Cercos No. 10 @ 200 mm |
| Losas | 20 | 15 cm de espesor | Barras No. 16 @ 200 mm (en una dirección) | No presenta |
| | | | Barras No. 16 @ 400 mm (en la otra dirección) | |

2.4.1 Descripción de la modelación del edificio

Para modelar y calcular la estructura del edificio objeto de estudio, se consideró el nuevo uso que va a tener el inmueble que en este caso es el de una edificación destinada a un hotel de alto estándar. Para ello se empleó el programa computacional ETABS (versión 17.01), que está basado en el método de elementos finitos. Como el objetivo fundamental de la modelación es determinar la capacidad de reserva de resistencia de los elementos estructurales existentes de hormigón armado, ante el nuevo uso que va a adquirir la edificación, solo se tuvieron en cuenta los resultados del proceso de modelación que involucra a dichos elementos estructurales. No obstante, se incluyeron en la modelación, aunque sin analizar sus resultados, los muros de mampostería que constituyen las cajas de escaleras y ascensores respectivamente.

Geometría

El edificio presenta un total de nueve niveles (incluyendo un piso técnico), además de una planta baja y un sótano, lo que lo coloca con una altura total de aproximadamente 28 m sobre el terreno. Los puntales de cada piso no son uniformes, varían en función del piso y sus valores oscilan entre 2,74 m y 4,6 m respectivamente. Solo existe un puntal de 0,8 m para el piso técnico.

A partir del primer nivel, la edificación presenta una planta en forma de C. Solo se tiene la misma geometría en planta del primero al sexto nivel, en el resto de los pisos cada uno presenta su propia geometría. De manera general, el edificio es más largo que ancho, presentando una distancia total en el sentido horizontal (sentido del eje X en el modelo) de aproximadamente 45 m, mientras que en el sentido vertical (sentido del eje Y en el modelo) presenta una distancia total de aproximadamente 20 m. En la figura 2, se muestra la planta del primer nivel y una vista tridimensional de la edificación objeto de estudio.

Las losas de entrepiso y de cubierta son de 15 cm de espesor y se modelaron como elementos tipo “shell – thin” y a todas se les asignó la propiedad de diafragma rígido. Las columnas presentan una sección transversal de 50x50 cm y fueron modeladas como elementos tipo “frame”. Con relación a las vigas se modelaron dos tipos: vigas principales de sección transversal de 50x60 cm en la dirección vertical en planta (sentido del eje Y en el modelo) y vigas secundarias de sección transversal de 30x60 cm en la dirección horizontal en planta (sentido del eje X en el modelo). Todas las vigas fueron modeladas como elementos tipo “frame”. Los muros que conforman las cajas de escaleras y ascensores presentan forma de C en planta y fueron modelados como elementos tipo “shell – thin” con 30 cm de espesor.

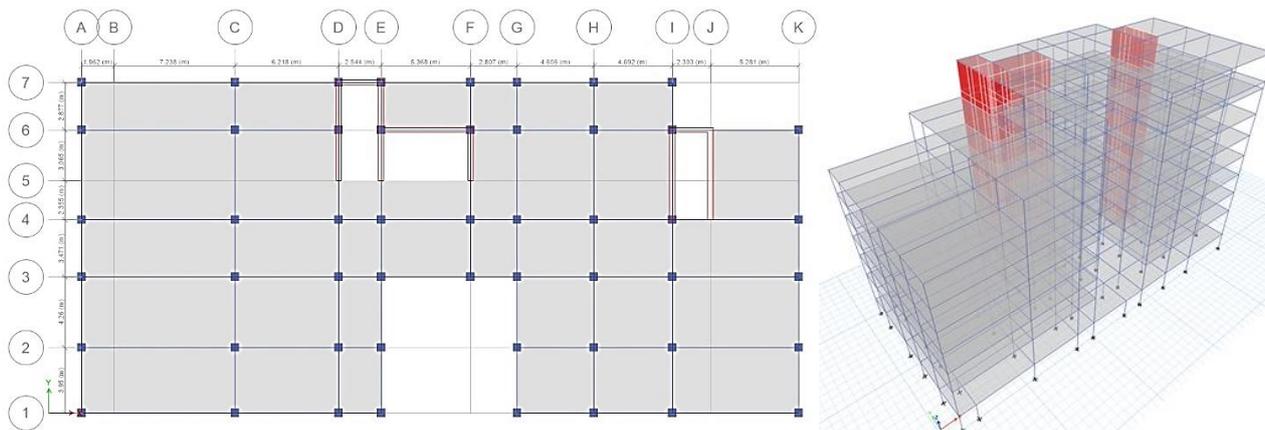


Figura 2: Planta del primer nivel y vista tridimensional de la estructura del hotel Palacio de los Corredores.

Material

Todas las losas, vigas y columnas se definieron de hormigón armado hormigonado “in situ” con una resistencia característica a compresión de $f'_c = 20 MPa$, un peso específico de $\gamma = 24kN/m^3$, un módulo de deformación longitudinal $E = 21019 MPa$ y coeficiente de Poisson $\mu = 0,2$.

Los muros que conforman las cajas de escaleras y ascensores, se definieron de mampostería, con una resistencia característica a la compresión de $f'_m = 13,79 MPa$, un peso específico de $\gamma = 21,2kN/m^3$, un módulo de elasticidad $E = 12411 MPa$ y coeficiente de Poisson $\mu = 0,2$.

El acero de refuerzo empleado en forma de barras en los elementos de hormigón armado, se definió de calidad G-40, con un valor de tensión de fluencia $f_y = 300 MPa$, un peso específico de $\gamma = 78,50 kN/m^3$ y un módulo de elasticidad $E = 200000 MPa$.

Condiciones de borde

Las uniones columna-columna y viga-columna se consideraron continuas en toda la extensión del edificio. Las bases de las columnas y de los muros se consideraron empotradas a la cimentación. Los paños de losas presentan continuidad en todos sus apoyos y los muros que conforman las cajas de escaleras y ascensores presentan continuidad en todos los niveles.

Cargas

Para la asignación de las cargas permanentes se empleó la NC 283 del 2003 [23]. Se consideró el peso propio de todos los elementos, así como las cargas mostradas en la tabla 3, con la excepción del piso técnico.

Tabla 3: Valores de cargas permanentes asignadas en el modelo.

| Material | Peso específico | Carga sobre la losa (kN/m ²) | |
|-----------------------------|----------------------------|--|----------|
| | | Entrepiso | Cubierta |
| Relleno | 0,18 kN/m ² /cm | 1,80 | - |
| Mortero de Cemento Portland | 20 kN/m ³ | 0,50 | - |
| Losas cerámicas | 0,20 kN/m ² /cm | 0,50 | - |
| Tabiques divisorios | 1,50 kN/m ² | 1,50 | - |
| Falso techo | 0,15 kN/m ² | 0,15 | - |
| Instalaciones | 0,20 kN/m ² | 0,20 | - |
| Enrajonado y soladura | 2,0 kN/m ² | - | 2,0 |

Con relación al nivel del piso técnico (nivel 07T en el modelo), se asumió un valor de carga permanente uniformemente distribuida en la losa de entrepiso igual a 8 kN/m².

Para la asignación de las cargas de uso se empleó la NC 284 del 2003 [24]. Se consideraron las cargas mostradas en la tabla 4, a excepción de la cubierta que se le asignó un valor de carga de uso de 2 kN/m², ya que es una azotea de techo plano con desagüe por tragante no accesible al público.

Tabla 4: Valores de cargas de uso asignadas en el modelo.

| Denominación del local | Valor de la carga (kN/m ²) |
|---|--|
| Talleres, cámaras frías y salas polivalentes | 5,0 |
| Sauna – gimnasio, restaurantes y locales de venta | 4,0 |
| Local de camareras, oficinas y circulación de servicios | 2,0 |
| Habitaciones | 1,5 |
| Bares cafeterías | 3,0 |

Para el cálculo de la carga de viento se utilizó el procedimiento de determinación de la componente estática del viento que aparece en la NC 285 del 2003 [25]. La presión básica del viento que actúa sobre la edificación es de $q_{10}=1,3 \text{ kN/m}^2$ y los coeficientes que afectan a dicha presión se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Coeficientes para el cálculo de la componente estática del viento.

| Coeficiente | Valor |
|---|--|
| Coeficiente de recurrencia (C_t) (Periodo de recurrencia de 50 años) | 1 |
| Coeficiente de sitio (C_s) (Sitio normal) | 1 |
| Coeficiente de altura (C_h) (Para cada uno de los niveles de altura z) | $C_h = \left(\frac{z}{10}\right)^{0,32}$ |
| Coeficiente de ráfaga (C_r) | 1,1243 |
| Coeficiente de reducción de área (C_{ra}) | 0,74 |
| Coeficiente de forma (C_f) | Presión +0,8 |
| | Succión -0,5 |

La edificación se encuentra a menos de 500 m de la línea del mar, por lo tanto, siguiendo los criterios de la NC 285 del 2003 [25], se empleó para los cálculos el tipo de terreno A.

Combinaciones de Cargas

Las combinaciones de cargas factorizadas que se emplearon para la modelación del edificio fueron seleccionadas según la Norma Cubana NC 450 del 2006 [26].

- 1,4 CP
- 1,2 CP + 1,6 CU_{entr} + 0,5 CU_{cub}
- 1,2 CP + 1,6 CU_{cub} + 0,5 CU_{entr}
- 1,2 CP + 1,6 CU_{cub} + 0,8 CV
- 1,2 CP + 0,5 CU_{cub} + 0,5 CU_{entr} + 1,4 CV
- 0,9 CP + 1,4 CV

Donde:

CP: Carga permanente.

CU_{entr}: Carga de uso de entresuelo.

CU_{cub}: Carga de uso de cubierta.

CV: Carga de viento. Analizada en los cuatro sentidos para cada combinación.

3. RESULTADOS

Una vez efectuado el proceso de modelación, se determinó la capacidad resistente de los elementos de hormigón armado que forman parte de la estructura del hotel Palacio de los Corredores, con vistas a establecer la necesidad o no de reforzamiento en aquellos casos en que las solicitaciones actuantes superen a las solicitaciones resistentes.

Con relación a las losas de hormigón armado, se obtuvo un total de nueve paños dentro de la edificación con necesidad de reforzamiento a flexión en la dirección de la menor transmisión de carga, donde presentan una capacidad resistente a flexión de **14,49 kNm/m**. A partir de este resultado, y apoyándose en el procedimiento de cálculo mostrado en el apartado 2.2 del presente documento, se procedió al diseño del reforzamiento a

flexión de las losas mediante el empleo de barras NSM-PRF, empleando en este caso, barras de PRFV (fibra de vidrio), con las siguientes propiedades mecánicas y geométricas:

Resistencia a la tracción en la rotura: $f_{fu}^* = 1350 \text{ MPa}$

Deformación unitaria en la rotura por tracción: $\varepsilon_{fu}^* = 0,0167$

Módulo de elasticidad a tracción: $E_f = 64000 \text{ MPa}$

Área nominal de la sección transversal de una barra : $a_f = 0,7126 \text{ cm}^2$

En la tabla 6, se muestra el resumen del diseño del reforzamiento a flexión mediante barras NSM-PRFV de todas las losas de hormigón armado de la estructura del hotel Palacio de los Corredores que así lo requerían.

Tabla 6: Resultados de los diseños de reforzamiento a flexión mediante barras NSM-PRFV en las losas de hormigón armado.

| Ubicación del paño de losa | M_u (kNm/m) | $S_{NSM-PRFV}$ (cm) | $\emptyset M_{n,NSM-PRFV}$ (kNm/m) | Incremento de resistencia (%) |
|--|------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Planta baja, entre los ejes: 4,6,B y C | 16,39 | 100 | 18,44 | 27,3 % |
| Nivel 1, entre los ejes: 4,6,A y C | 21,10 | 50 | 22,48 | 55,1 % |
| Nivel 1, entre los ejes: 2,3,A y C | 16,48 | 100 | 18,44 | 27,3 % |
| Nivel 2, entre los ejes: 4,6,A y C | 16,62 | 100 | 18,45 | 27,3 % |
| Nivel 3, entre los ejes: 4,6,A y C | 16,79 | 100 | 18,45 | 27,3 % |
| Nivel 4, entre los ejes: 4,6,A y C | 16,84 | 100 | 18,45 | 27,3 % |
| Nivel 5, entre los ejes: 4,6,A y C | 16,62 | 100 | 18,45 | 27,3 % |
| Nivel 6, entre los ejes: 4,6,A y C | 17,81 | 100 | 18,45 | 27,3 % |
| Nivel 7T, entre los ejes: 4,6,A y C | 17,71 | 100 | 18,45 | 27,3 % |

Con relación a las vigas de hormigón armado, de los resultados de la modelación del edificio, se determinó que existen un total de cinco vigas secundarias que requieren reforzamiento a flexión. La capacidad resistente a flexión de las vigas secundarias es de **200,38 kNm**, y en la tabla 7, se muestra el resumen del diseño del reforzamiento a flexión empleando barras NSM-PRFV, de todas las vigas de hormigón armado de la estructura del hotel Palacio de los Corredores que así lo requerían.

Tabla 7: Resultados de los diseños de reforzamiento a flexión mediante barras NSM-PRFV en las vigas secundarias de hormigón armado.

| Ubicación de la viga | M_u (kNm) | No. de barras NSM-PRFV | $\emptyset M_{n,NSM-PRFV}$ (kNm) | Incremento de resistencia (%) |
|--|----------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Nivel 1, en el eje 6, entre los ejes A y C | 234,82 | 3 barras | 243,63 | 21,6 % |
| Nivel 1, en el eje 4, entre los ejes A y C | 259,60 | 5 barras | 266,33 | 32,9 % |
| Nivel 1, en el eje 3, entre los ejes A y C | 235,08 | 3 barras | 243,63 | 21,6 % |
| Nivel 1, en el eje 2, entre los ejes A y C | 241,40 | 3 barras | 243,50 | 21,5 % |
| Nivel 6, en el eje 4, entre los ejes A y C | 222,77 | 2 barras | 231,10 | 15,3 % |

Con relación al cortante, se determinó que existen un total de nueve vigas secundarias que requieren reforzamiento ante este tipo de solicitación. A partir de este resultado y apoyándose en el modelo analítico mostrado en el apartado 2.3 del presente documento, se procedió al diseño del reforzamiento a cortante mediante el empleo de barras NSM-PRFV dispuestas a 45°. En la tabla 8, se muestra el resumen del diseño

para este tipo de reforzamiento, aclarando que solamente se muestran los valores de cortante actuante (V_u) que superan el valor del cortante resistente, que para las vigas secundarias es de **175,33 kN**.

Tabla 8: Resultados de los diseños de reforzamiento a cortante mediante barras NSM-PRFV dispuestas a 45° en las vigas secundarias de hormigón armado.

| Ubicación de la viga | V_u (kN) | | $S_{NSM-PRFV}$ (mm) | | $\phi V_{n,NSM-PRFV}$ (kN) | | Incremento de resistencia (%) | |
|--|------------|---------|---------------------|-------|----------------------------|--------------|-------------------------------|--------|
| | V_u^+ | V_u^- | V^+ | V^- | ϕV_n^+ | ϕV_n^- | V^+ | V^- |
| Nivel 1, en el eje 6, entre los ejes A y C | 211,89 | 204,85 | 300 | 350 | 213,08 | 205,68 | 21,5 % | 17,3 % |
| Nivel 1, en el eje 4, entre los ejes A y C | 226,96 | 221,18 | 200 | 240 | 227,89 | 221,97 | 30,0 % | 26,6 % |
| Nivel 1, en el eje 3, entre los ejes A y C | 208,51 | 203,71 | 330 | 360 | 208,64 | 204,20 | 19,0 % | 16,5 % |
| Nivel 1, en el eje 2, entre los ejes A y C | 216,76 | 210,71 | 270 | 310 | 217,52 | 211,60 | 24,1 % | 20,7 % |
| Nivel 2, en el eje 4, entre los ejes A y C | - | 187,81 | - | 680 | - | 188,47 | - | 7,5 % |
| Nivel 3, en el eje 4, entre los ejes A y C | - | 187,50 | - | 680 | - | 188,47 | - | 7,5 % |
| Nivel 4, en el eje 4, entre los ejes A y C | - | 187,81 | - | 680 | - | 188,47 | - | 7,5 % |
| Nivel 5, en el eje 4, entre los ejes A y C | - | 190,09 | - | 670 | - | 190,67 | - | 8,4 % |
| Nivel 6, en el eje 4, entre los ejes A y C | 184,58 | 181,09 | 690 | 710 | 186,28 | 181,90 | 6,2 % | 3,3 % |

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de las losas y vigas de hormigón armado reforzadas mediante barras NSM-PRFV, se analizó la influencia que ejercen, en las capacidades resistentes a flexión y a cortante, las siguientes variables involucradas en los diseños de reforzamiento: número de barras NSM-PRFV, ángulo de inclinación de las barras empleadas en el reforzamiento a cortante, así como el espaciamiento del acero de refuerzo transversal a cortante. También se realizó una comparación acerca del comportamiento de la ductilidad, desde el punto de vista del fallo, entre los reforzamientos a flexión realizados mediante barras NSM-PRFV y reforzamientos a flexión empleando tejidos de PRFV.

3.1 Análisis de los resultados

Análisis de los resultados de los diseños de reforzamiento a flexión

Analizando la influencia que tiene en el diseño del reforzamiento a flexión, el incremento del refuerzo NSM-PRFV, se observa en la figura 3, como en la medida que se aumenta el número de barras NSM-PRFV, lógicamente se evidencia un incremento de la capacidad resistente a flexión, pero sin que exista un valor límite de ese incremento.

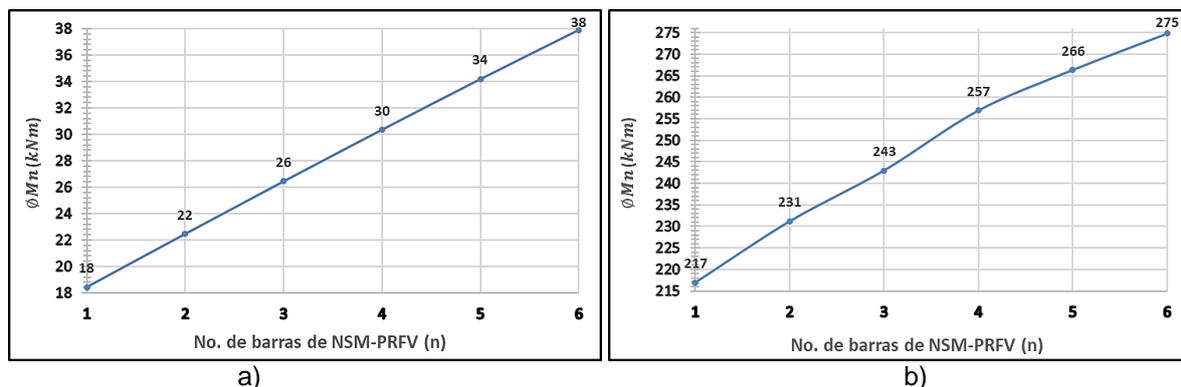


Figura 3: Influencia de la cantidad de refuerzo NSM-PRFV en la capacidad resistente a flexión. a) Losas de hormigón armado y b) Vigas de hormigón armado.

De lo mostrado en la figura anterior, se tiene que, para las losas de hormigón armado, por cada barra NSM-PRFV que se coloca, se obtienen incrementos de capacidad resistente a flexión que oscilan entre 12% y 18%, y para las vigas, por cada barra NSM-PRFV colocada, se obtienen incrementos de resistencia que oscilan entre 3% y 6%, lo que evidencia la efectividad de este tipo de reforzamiento en las losas y vigas analizadas.

La no existencia de un límite de incremento de capacidad resistente a flexión en las losas y vigas de hormigón armado reforzadas mediante barras NSM-PRFV, se debe fundamentalmente al bajo valor de cuantía geométrica de acero de refuerzo traccionado presente en ambos elementos estructurales, que los califica como elementos muy hiporreforzados desde el punto de vista del diseño a flexión, por ejemplo, en el caso de las losas, este valor de cuantía es igual al 0,44%, mientras que en las vigas es igual al 0,96%. Estos valores a su vez, se encuentran por debajo del valor de cuantía del acero de refuerzo que establece un nivel de deformación de $\epsilon_s = 0,005$, y que determina el valor límite de la ductilidad deseada en los diseños a flexión de elementos de hormigón armado. Precisamente este valor límite de cuantía corresponde a un 1,8%, lo que lo separa a más de cuatro veces del valor de cuantía del acero de las losas, y a poco menos de dos veces del valor de cuantía del acero de las vigas. Debido a todo lo anterior, se puede ver en la figura 4, como en la medida que se incrementa el número de barras NSM-PRFV en las losas y vigas de hormigón armado de la edificación objeto de estudio, lógicamente se evidencia un descenso de los valores de la deformación del acero traccionado, pero nunca por debajo del límite de $\epsilon_s = 0,005$, lo que garantiza la ductilidad deseada desde el punto de vista del fallo a flexión, y ratifica la total efectividad de los reforzamientos aplicados.

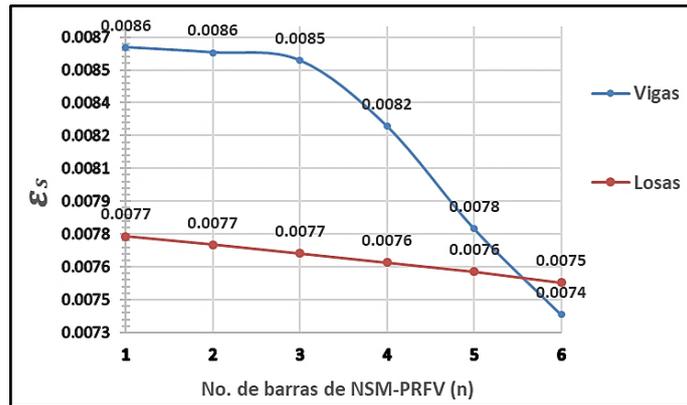


Figura 4: Influencia de la cantidad de refuerzo NSM-PRFV en la deformación del acero traccionado.

Análisis de los resultados de los diseños de reforzamiento a cortante

Analizando lo que sucede con la capacidad resistente a cortante cuando se modifica el ángulo de inclinación del refuerzo NSM-PRFV, se muestra en la figura 5, como para inclinaciones de las barras a 90° y a 45°, los mayores valores de capacidad resistente se obtienen con las barras dispuestas a 45°, debido a que en este caso el reforzamiento se coloca perpendicular a las fisuras por cortante, lo que trae consigo un trabajo mucho más efectivo ante los esfuerzos ocasionados por las tracciones diagonales. Las diferencias de capacidad resistente obtenidas con ambos ángulos de inclinación del refuerzo NSM-PRFV, para los espaciamientos analizados en la figura 5, oscilan entre un 7,5% y 13,2% respectivamente.

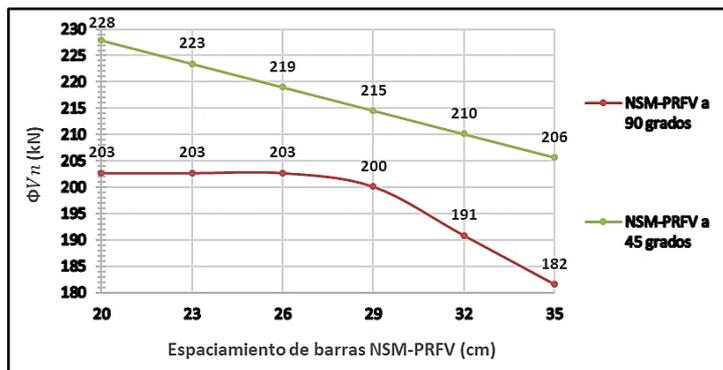


Figura 5: Influencia de la inclinación del refuerzo NSM-PRFV en la capacidad resistente a cortante.

Si se analiza el tipo de fallo que controla o gobierna el diseño del reforzamiento a cortante, a partir del aporte que brinda el sistema NSM-PRFV en el mecanismo resistente, se puede observar en la figura 6, como para los menores valores de espaciamiento de las barras NSM-PRFV, el tipo de fallo que controla el diseño es el que está relacionado con la máxima deformación permisible de dicho refuerzo (V_{2F}), lo que suele ocurrir cuando existe una elevada demanda de reforzamiento; sin embargo, para los mayores valores de espaciamiento de las barras NSM-PRFV, el tipo de fallo que controla el diseño es el que está relacionado con fallo adherente último (V_{1F}), lo que suele suceder cuando existe muy poca demanda de reforzamiento.

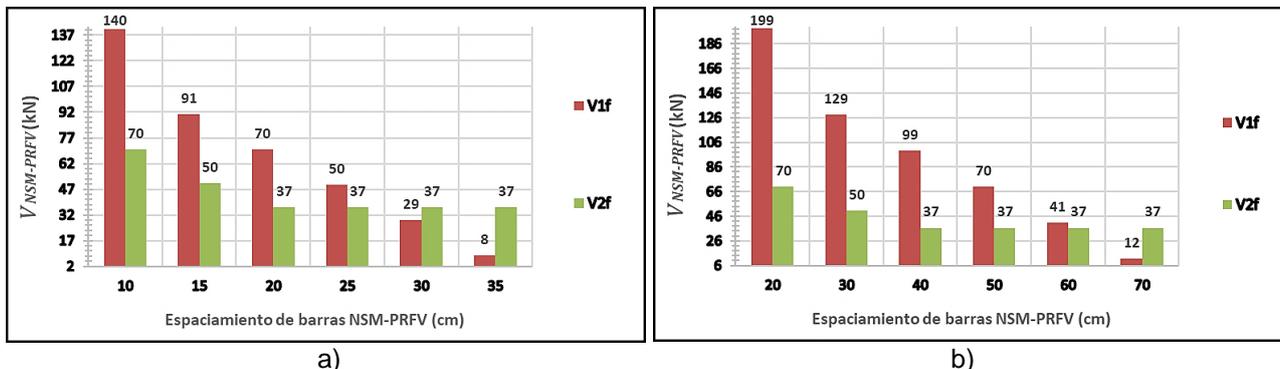


Figura 6: Contribuciones a cortante del sistema NSM-PRFV en función del espaciamiento del refuerzo. a) Refuerzo NSM-PRFV a 90° y b) Refuerzo NSM-PRFV a 45°.

Por otro lado, analizando el comportamiento de los porcentajes de incrementos de capacidad resistente a cortante, en función del espaciamiento del acero de refuerzo transversal presente en las vigas reforzadas mediante NSM-PRFV, se puede ver en la figura 7, como en la medida de que el acero de refuerzo transversal disminuye su espaciamiento, los porcentajes de incremento de capacidad resistente a cortante tienden a disminuir también, por lo que se reduce la efectividad del reforzamiento aplicado. Este resultado permite establecer que, un reforzamiento a cortante en vigas de hormigón armado, empleando barras NSM-PRFV, es mucho más efectivo, en la medida que la viga se encuentre menos armada con acero de refuerzo transversal.

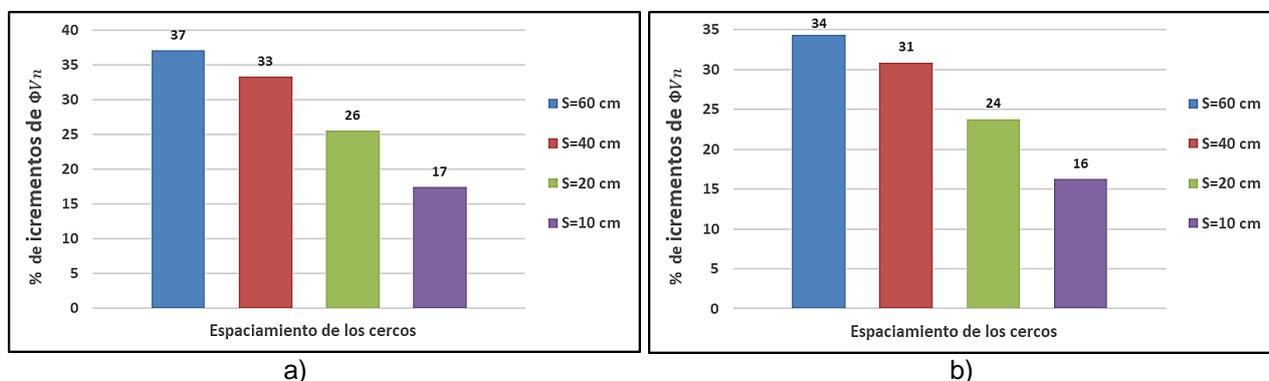


Figura 7: Influencia del espaciamiento de los cercos en la efectividad del reforzamiento a cortante mediante NSM-PRFV. a) Refuerzo NSM-PRFV a 90° y b) Refuerzo NSM-PRFV a 45°.

Análisis de la ductilidad del fallo en los diseños de reforzamiento a flexión mediante NSM-PRF y mediante tejidos de PRF

Efectuando una comparación que permita analizar el comportamiento de la ductilidad del fallo de las losas y vigas de hormigón armado, reforzadas a flexión mediante barras NSM-PRFV y mediante tejidos de PRFV, se puede ver en la figura 8, como en la medida que se incrementa la cantidad de refuerzo, el sistema mediante barras NSM-PRFV disminuye mucho menos la deformación del acero traccionado, con relación a cuando se emplean los tejidos de PRFV. Esto se debe, a que el nivel de deformación efectiva que se alcanza en el sistema NSM-PRFV siempre es mayor comparado con el nivel de deformación alcanzado en el sistema de tejidos de PRFV, lo que provoca por compatibilidad de deformaciones, que el acero traccionado se deforme más cuando la viga o losa se encuentra reforzada mediante barras NSM-PRFV, garantizándose mayor ductilidad, desde el punto de vista del fallo. Otro aspecto que contribuye a ratificar lo anterior, es que el sistema de refuerzo NSM-PRFV es menos propenso al fallo por desprendimiento del recubrimiento del hormigón, con relación al fallo por despegue del sustrato del hormigón que ocurre en el sistema de tejidos de PRFV, lo que provoca a su vez, que el valor de deformación de diseño de las barras NSM-PRFV se comporte superior al valor de deformación de diseño de los tejidos de PRFV. Obsérvese también en la propia figura, como en la medida que se aumenta el número de capas de tejidos de PRFV, se llega a disminuir el nivel de ductilidad deseada, a partir de obtener valores de deformación en el acero traccionado por debajo de $\epsilon_s = 0,005$, lo que nunca sucede en el comportamiento de los reforzamientos a flexión realizados mediante barras NSM-PRFV.

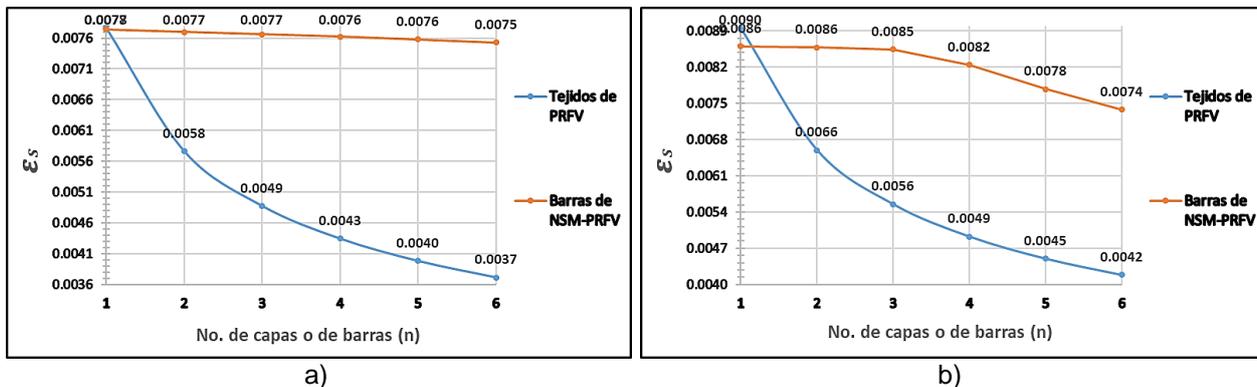


Figura 8: Influencia del tipo de reforzamiento a flexión empleado en la deformación del acero traccionado. a) Losas de hormigón armado y b) Vigas de hormigón armado.

Para demostrar estadísticamente el comportamiento mostrado en la figura 8, se efectuaron diseños de experimentos unifactoriales de comparación simple, donde la variable factor es el tipo de reforzamiento empleado, que solo toma dos niveles: barras NSM-PRFV y tejidos de PRFV, y la variable respuesta, es la deformación del acero traccionado obtenida por cada capa o barra de refuerzo que se aplique. Con la ayuda del programa STATGRAPHICS Centurion XV, al que se introdujeron los datos de la figura 8, se muestran en la tabla 9 los resultados estadísticos de las pruebas de hipótesis realizadas.

Tabla 9: Resultados de los diseños de experimentos de comparación de las deformaciones del acero obtenidas en función del tipo de reforzamiento a flexión empleado.

| Tipo de elemento | Valor del estadígrafo | Valor de la probabilidad | Resultado de la prueba |
|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| Losas | t= 4,08997 | P = 0,002179 | Se rechaza H ₀ |
| Vigas | t= 3,14868 | P = 0,010356 | Se rechaza H ₀ |

Como se observa en ambas pruebas de hipótesis realizadas, con los valores de los estadígrafos obtenidos, el programa arroja valores de probabilidad asociada menores que el nivel de significación de la prueba que es de un 5% en este caso, por lo tanto, siempre que el valor de P se encuentre por debajo del nivel de significación, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula en favor de la hipótesis alterna. Estos resultados demuestran, que las losas y vigas de hormigón armado reforzadas a flexión mediante barras NSM-PRFV presentan, de manera significativa, una menor disminución de la ductilidad del fallo, con relación a las losas y vigas reforzadas mediante tejidos de PRFV.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra las bases para el diseño de los reforzamientos a flexión y a cortante de elementos de hormigón armado mediante el sistema NSM-PRF, y su aplicación en una edificación existente que requiere de rehabilitación estructural. Con relación a la evaluación del comportamiento de las losas y vigas que fueron reforzadas mediante el sistema NSM-PRFV, los resultados revelan que: en los reforzamientos a flexión realizados se garantiza una ductilidad deseada desde el punto de vista del fallo; que el reforzamiento a cortante resulta más efectivo en la medida en que las barras NSM-PRFV se coloquen perpendicular a las fisuras ocurridas por la tracción diagonal; que el tipo de fallo que controla el diseño del reforzamiento a cortante depende del espaciamiento de las barras NSM-PRFV y que en la medida que una viga de hormigón armado exhiba menor cuantía del acero transversal, el reforzamiento a cortante con NSM-PRFV resulta más efectivo. Y con relación a la comparación efectuada entre los reforzamientos a flexión empleando barras NSM-PRFV y los reforzamientos a flexión mediante tejidos de PRFV, los resultados revelan que los elementos de hormigón armado reforzados mediante el sistema NSM-PRFV, presentan de manera significativa, una menor disminución de la ductilidad del fallo, con relación a los elementos reforzados mediante tejidos de PRFV.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lee, H., W.T. Jung, and W. Chung. "Field test of an old RC bridge before and after NSM strengthening". *Composite Structures*. Vol. 202. pp. 793-801. 2018.
- Al-Saadi, N. Mohammed, A. Al-Mahaidi, Riadh S. "A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures". *Construction and Building Materials*. Vol. 209. pp. 748-769. 2019.
- Zhang, S. "Bond strength model for near-surface mounted (NSM) FRP bonded joints: Effect of concrete edge distance". *Composite Structures*. Vol. 201. pp. 664-675. 2018.

4. D'Antino, T. and M.A. Pisani. "Evaluation of the effectiveness of current guidelines in determining the strength of RC beams retrofitted by means of NSM reinforcement". *Composite Structures*. Vol. 167. pp. 166-177. 2017.
5. El-Gamal, SE Al-Nuaimi, A Al-Saidy, A Al-Lawati, A. "Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC beams". *Construction and Building Materials*. Vol. 118. pp. 52-62. 2016.
6. Abdallah, M. Al Mahmoud, F. Boissiere, R., Abdelouahab M., Julien. "Experimental study on strengthening of RC beams with Side Near Surface Mounted technique-CFRP bars". *Composite Structures*. Vol 234. 2020.
7. Baghi, H., J.A. Barros, and F. Menkulasi. "Shear strengthening of reinforced concrete beams with Hybrid Composite Plates (HCP) technique: Experimental research and analytical model". *Engineering Structures*. Vol. 125. pp. 504-520. 2016.
8. Shomali, A., D. Mostofinejad, and M.R. Esfahani. "Effective strain of CFRP in RC beams strengthened in shear with NSM reinforcements". *Structures*. Vol. 23. pp. 635-645. 2020.
9. Al Rjoub, Y Ashteyat, A Obaidat, Y Bani-Youniss and Saleh. "Shear strengthening of RC beams using near-surface mounted carbon fibre-reinforced polymers". *Australian Journal of Structural Engineering*. Vol. 20. No. 1. pp. 54-62. 2019.
10. Quero, D.C. "Estudio teórico-experimental de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortante mediante materiales compuestos de matriz polimérica insertados en el recubrimiento". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. pp. 202. 2017. Disponible en: <http://oa.upm.es/48228/1/>.
11. Sharaky, IA Selmy, SAI El-Attar, MM Sallam, HEM. "The influence of interaction between NSM and internal reinforcements on the structural behavior of upgrading RC beams". *Composite Structures*. Vol. 234. 2020.
12. Zhang, H., L. He, and G. Li. "Bond failure performances between near-surface mounted FRP bars and concrete for flexural strengthening concrete structures". *Engineering Failure Analysis*, Vol. 56. pp. 39-50.2015.
13. Masoud, S. and K. Soudki. "Evaluation of corrosion activity in FRP repaired RC beams". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28. No. 10. pp. 969-977. 2006.
14. 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.
15. 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.
16. NC 207. "Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón parte 2: bases de diseño". *Oficina Nacional de Normalización*. El Vedado, La Habana. Cuba. pp. 142. 2019.
17. Bianco, V., G. Monti, and J.A. Barros. "Design formula to evaluate the NSM FRP strips shear strength contribution to a RC beam". *Composites Part B: Engineering*. Vol. 56. pp. 960-971. 2014.
18. De Lorenzis, L. and A. Nanni. "Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods". *Structural Journal*. Vol. 98. No. 1. pp. 60-68. 2001.
19. Rizzo, A. and L. De Lorenzis. "Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement". *Construction and Building Materials*. Vol. 23. No. 4. pp. 1555-1567. 2009.
20. Bianco, V J. Barros and G. Monti. "A new approach for modeling the contribution of NSM FRP strips for shear strengthening of RC beams". *Journal of Composites for Construction*. Vol. 14. No. 1. pp. 36-48. 2010.
21. Baghi, H. and J.A. Barros. "Design approach to determine shear capacity of reinforced concrete beams shear strengthened with NSM systems". *Journal of Structural Engineering*. Vol. 143. No. 8. 2017.
22. Oroza, A.H. "Diagnóstico del estado de conservación de los elementos estructurales del Palacio de los Corredores". *Departamento de Diagnóstico y Levantamiento*. Empresa RESTAURA. La Habana. pp. 27. 2019.
23. NC 283. "Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño". *Oficina Nacional de Normalización*. Vedado, La Habana, Cuba. pp. 11. 2003.

24. NC 284. "Edificaciones. Cargas de uso". *Oficina Nacional de Normalización*. Vedado, La Habana, Cuba. pp. 12. 2003.
25. NC 285. "Carga de viento. Método de cálculo". *Oficina Nacional de Normalización*. Vedado, La Habana, Cuba. pp. 70. 2003.
26. NC 450. "Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones". *Oficina Nacional de Normalización*. Vedado, La Habana. Cuba. pp. 9. 2006.