

A: XXXIX-0000

COMPORTAMIENTO EN SERVICIO DE LOSAS ALVEOLARES CON CARPETA DE COMPRESIÓN DE HORMIGÓN PRETENSADAS CON TENDONES DE FRP

SERVICE BEHAVIOR OF HOLLOW-CORE SLABS WITH CAST-IN-PLACE CONCRETE TOPPING PRESTRESSED WITH FRP TENDONS

Pablo M. Páez (P)(1)

(1) Dr. Prof. Adjunto, IET, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay.
Dirección para correspondencia: ppaez@fing.edu.uy; (P) Presentador

Área Temática: Análisis estructural: métodos teóricos y computacionales.

Resumen

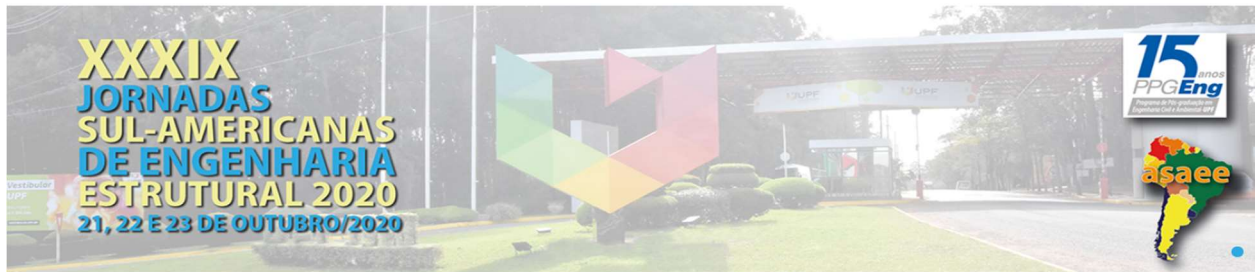
El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento en el corto y en el largo plazo de losas alveolares pretensadas simplemente apoyadas con carpeta de compresión de hormigón vertido en sitio en segunda etapa bajo cargas de servicio. La originalidad de este trabajo radica principalmente en que las losas son pretensadas mediante tendones de polímero reforzado con fibra (FRP). En este trabajo se examinan dos tipos de tendones de polímero reforzado con fibra: los de fibra de carbono (CFRP) y los de fibra de aramida (AFRP). El análisis es realizado mediante la implementación de un modelo computacional basado en el método del coeficiente de envejecimiento para el análisis en el tiempo de elementos de hormigón. Como principales conclusiones mencionaremos que losas alveolares que se han pretensado con tendones de CFRP o AFRP muestran en estado no fisurado menores pérdidas de pretensado y menores deflexiones a largo plazo para los mismos niveles iniciales de la fuerza de pretensado. Esta característica está acompañada por el efecto beneficioso de la construcción de la carpeta de compresión de hormigón que incide positivamente en la redistribución de tensiones entre ambos hormigones a lo largo del tiempo. En el caso de secciones fisuradas se observan algunas diferencias en las deflexiones verticales, sin embargo los resultados obtenidos no permiten extraer conclusiones precisas. La principal ventaja radica en la propiedad de no corrosión de los tendones de FRP en donde podrían admitirse anchos de fisuras mayores en comparación a los tendones de acero.

Palabras-clave: polímero reforzado con fibra, losas alveolares, pérdidas de pretensado.

Abstract

The objective of this work is to evaluate the short- and long-term behavior of simply supported, prestressed hollow-core slabs with cast-in-place concrete topping under service loads. The originality of this work lies mainly in the fact that the slabs are prestressed using fiber-reinforced polymer (FRP) tendons. Two types of fiber-reinforced polymer tendons are examined in this paper: carbon fiber (CFRP) and aramid fiber (AFRP). The analysis is carried out through the implementation of a computational algorithm based on the age-adjusted effective modulus method for the time analysis of concrete elements. As main conclusions we will mention that hollow-core slabs that have been prestressed with CFRP or AFRP tendons show lower prestress losses and lower long-term deflections in the uncracked state for the same initial levels of prestress force. This characteristic is accompanied by the beneficial effect of the construction of the cast-in-place concrete compression layer, which has a positive effect on the redistribution of stresses between both concretes over time. In the case of cracked sections, some differences in vertical deflections are observed, but the results obtained do not allow reliable conclusions to be drawn. The main advantage lies in the non-corrosion property of FRP tendons, where larger crack widths could be allowed compared to steel tendons.

Keywords: fiber-reinforced polymer, hollow-core slab, prestress loss, serviceability.



1. INTRODUCCIÓN

Las placas alveolares pretensadas son elementos prefabricados de hormigón producidos tanto por extrusión del hormigón o mediante moldeadoras deslizantes. Su uso más común ha sido como sistema de piso en diferentes tipos de estructuras. El hormigón de la carpeta de compresión vertido en sitio genera un comportamiento compuesto de la losa, que no solo da mayor resistencia flexional al sistema sino que también permite transmitir fuerzas horizontales debido a la acción de diafragma que se genera. Una particularidad de este tipo de losas es que las únicas barras de refuerzo son los tendones de pretensado colocados longitudinalmente. Transversalmente los esfuerzos son soportados por la resistencia a tracción del hormigón. Los efectos reológicos de cada uno de los hormigones y la relajación de los tendones de pretensado provocan una redistribución de esfuerzos en la sección, resultando en la pérdida de la fuerza de pretensado y en el incremento de las deformaciones de largo plazo. Los tendones de FRP presentan dos principales ventajas sobre los tendones de acero, su elevada resistencia a la tracción y ser no corrosivos. Existen muy pocos estudios analíticos y/o trabajos experimentales sobre el comportamiento en el corto y largo plazo de placas alveolares pretensadas mediante tendones de FRP, entre los cuales podemos citar los trabajos de Baran (2015), Mathys and Taerwe (1998), Páez (2021) y Shapack et al. (2015). En este trabajo se realizará un estudio teórico sobre el comportamiento bajo cargas de servicio (corto y largo plazo) de losas alveolares simplemente apoyadas con carpeta de compresión de hormigón vertido en sitio pretensadas con tendones de fibra de carbono (CFRP), fibras de aramida (AFRP) y tendones acero. Se considerarán los estados fisurados y no fisurados.

2. ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES

2.1. Hormigón

Bajo cargas de servicio, cuando la tensión en el hormigón no supera el 45% de la resistencia media a la compresión en probetas cilíndricas f_{cm} , podemos asumir que éste se comporta como un material viscoelástico lineal con envejecimiento (MC10 2012). La linealidad implica la validez del principio de superposición (Ross 1958), con lo que la variación en la deformación unitaria total de una fibra del hormigón en un tiempo t a temperatura constante, puede escribirse haciendo uso del método del módulo de elasticidad efectivo ajustado por la edad, Ecuación (1) (Bazant 1972):

$$\Delta\varepsilon(t) = \bar{E}_c(t)\Delta\sigma_c(t) + \frac{\phi(t,t_0)}{E_c(t_0)}\sigma_c(t_0) + \varepsilon_{sh}(t,t_s) \quad (1)$$

donde $\bar{E}_c(t)$ es el módulo de elasticidad efectivo ajustado por la edad, Ecuación (2):

$$\bar{E}_c(t) = \frac{1+\chi(t,t_0)\phi(t,t_0)}{E_c(t_0)} \quad (2)$$

$E_c(t_0)$ es el módulo de elasticidad del hormigón en el instante t_0 , $\sigma_c(t_0)$ es la tensión en el hormigón en dicho instante, $\chi(t,t_0)$ es el coeficiente de envejecimiento, $\phi(t,t_0)$ es el coeficiente de fluencia entre los tiempos t_0 y t y $\varepsilon_{sh}(t,t_s)$ es la deformación por retracción entre los tiempo t_s y t .

2.2. Tendones de acero y FRP

La relación tensión deformación para los tendones de pretensado, ya sean estos de acero o de FRP puede escribirse como la Ecuación (3):

$$\sigma_{r(i)}(t) = E_{r(i)} \left(\varepsilon_{r(i)}(t) + \varepsilon_{r(i),0} - \varepsilon_{r,rel(i)}(t) \right) \quad (3)$$

donde $E_{r(i)}$ es el módulo de elasticidad del tendón ubicado en la i -ésima capa, $\varepsilon_{r(i),0}$ es su deformación unitaria inicial y $\varepsilon_{r(i)}(t)$ y $\varepsilon_{r,rel(i)}(t)$ son su deformación unitaria y su deformación debida a la relajación en el tiempo t . En el caso de tendones de acero la ecuación anterior es válida



hasta su límite elástico característico, mientras que para los tendones de FRP es válida hasta la rotura. Sin embargo, las tensiones en los tendones de FRP quedan limitadas por su *resistencia a la rotura por fluencia* (Guimaraes and Burgoyne 1992).

La relajación del acero ocurre para tensiones superiores al 50% de su tensión máxima característica (f_{pt}). Para aceros de baja relajación puede estimarse en 2.5% para una tensión de $0.70 \times f_{pt}$ (a 1000 horas y a 20°C) (MC10 2012). Los tendones de CFRP presentan una relajación despreciable para tensiones del orden del 60% de su resistencia a tracción garantizada (f_{pu}). Los tendones de AFRP muestran una relajación del orden del 7% para tensiones del orden del 60% de f_{pu} (Saadatmanesh and Tannous 1999a, 1999b; Zou 2003). A partir de las consideraciones establecidas, la norma ACI 440.4R (2004) limita la tensión inicial de pretensado a $0.40 \times f_{pu}$ para los tendones de aramida y a $0.60 \times f_{pu}$ para los tendones de carbono.

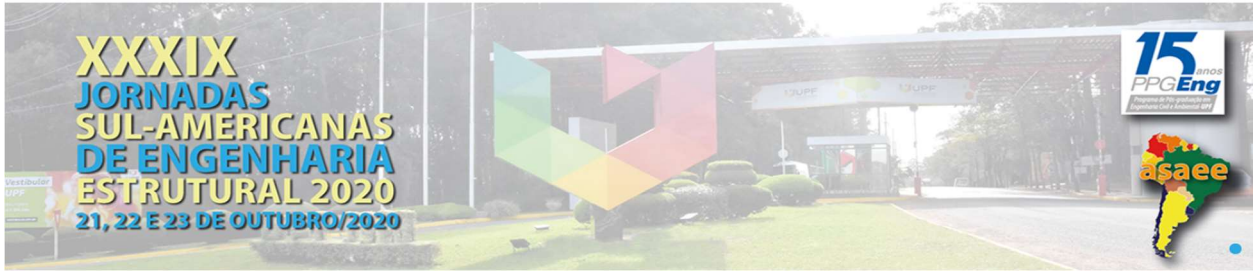
3. ANALISIS SECCIONAL E IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Al analizar una sección bajo cargas de servicio se consideran las siguientes hipótesis: 1) las secciones se mantienen planas y perpendiculares al eje deformado, 2) existe adherencia perfecta entre los tendones de pretensado y el hormigón, sean estos de FRP o acero, 3) el hormigón se comporta como un material viscoelástico lineal y 4) los tendones cumplen la Ecuación (3).

Cuando en una sección de un elemento de hormigón sometido a preso-flexión, la tensión en la fibra extrema alcanza su resistencia a tracción por flexión ($f_{ctm,fl}$), la sección se fisura. Si bien el hormigón en dicha sección no será capaz de llevar demasiada tensión de tracción, el hormigón intacto entre las fisuras sí lo será. Esta contribución del hormigón entre fisuras se denomina *tension stiffening* (Bischoff 2005). En este trabajo se implementó el modelo de deformación unitaria axial media y de curvatura media (Ghali et al. 2002; UNE-EN 1992-1-1 2016).

Dado que en las piezas pretensadas la fuerza de pretensado se transmite mediante adherencia entre los tendones de pretensado y el hormigón, la fuerza de pretensado no será constante a lo largo de la pieza. La longitud necesaria para transferir la fuerza de pretensado al hormigón se denomina *longitud de transferencia*. Esta longitud, además de depender de la resistencia característica del hormigón, depende de las características propias del tendón, entre otros factores. Para el caso de tendones de FRP los trabajos de investigación se dividen según el tipo de fibra y el fabricante. En este trabajo se utiliza la fórmula propuesta por Zou (2003) para tendones Arapree (AFPR) y Carbopree (CFRP) y la fórmula propuesta por Mahmoud et al. (1997) para tendones CCFC (CFRP) fabricados por Tokyo Rope. Para el caso de tendones de acero se siguen los lineamientos de la norma UNE-EN 1992-1-1 (2016).

Consideremos una losa alveolar con carpeta de compresión. Sea Oyz un sistema de ejes coordenados de referencia tal que Oz es positivo hacia abajo y coincidente con el eje de simetría de la losa; el punto O de referencia se ubica en la fibra superior de la carpeta. En una secuencia típica de construcción de este tipo de losas, las cargas son aplicadas a diferentes edades. Denominemos por t_0 la edad de la losa al momento de la transferencia del pretensado y por t_i cualquier otro instante de tiempo posterior a t_0 . Consideremos además que el hormigón de la carpeta es vertido en el tiempo t_k posterior a t_0 . La sección comienza a trabajar en forma compuesta una vez que el hormigón de la carpeta ha adquirido suficiente resistencia. En este trabajo admitiremos que la acción compuesta comienza a los tres días del hormigonado de la carpeta, momento en el cual asumiremos comienzan a desarrollarse las deformaciones por retracción de dicho hormigón. Sin pérdida de generalidad, analicemos un instante de tiempo t_i mayor que t_k . Si en dicho instante se aplicada una fuerza axial en O , $N(t_i)$ y un momento flector $M(t_i)$, la variación en la deformación unitaria en O y la curvatura pueden escribirse, Ecuación (4):



$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_O(t_i) \\ \Delta \kappa(t_i) \end{bmatrix} = \hat{R}(t_i) \cdot \begin{bmatrix} N(t_i) \\ M(t_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

siendo $\hat{R}(t_i)$ la matriz de flexibilidad de la sección, Ecuación (5):

$$\hat{R}(t_i) = \left(\frac{1}{R_A(t_i)R_I(t_i) - R_B(t_i)^2} \right) \cdot \begin{bmatrix} R_I(t_i) & -R_B(t_i) \\ -R_B(t_i) & R_A(t_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde $R_A(t_i)$, $R_B(t_i)$ y $R_I(t_i)$ son la rigidez axial, la rigidez relativa al momento de primer orden y la rigidez flexional de la sección transformada con respecto al sistema de ejes de referencia en el instante t_i , respectivamente. La variación en la deformación axial en O y la curvatura entre los tiempos t_{j-1} y t_j , puede obtenerse mediante la Ecuación (6):

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_r(t_j) \\ \Delta \kappa(t_j) \end{bmatrix} = \hat{R}(t_j) \cdot \left(\bar{E}_{c,G}(t_j) \sum_{i=0}^{j-1} \hat{F}_{e,G}(t_j, t_i) \begin{bmatrix} N_{c,G}(t_i) \\ M_{c,G}(t_i) \end{bmatrix} + \bar{E}_{c,G}(t_j) (\varepsilon_{sh,G}(t_j, t_0) - \varepsilon_{sh,G}(t_{j-1}, t_0)) \begin{bmatrix} A_{c,G} \\ B_{c,G} \end{bmatrix} + \bar{E}_{c,D}(t_j) \sum_{i=k}^{j-1} \hat{F}_{e,D}(t_j, t_i) \begin{bmatrix} N_{c,D}(t_i) \\ M_{c,D}(t_i) \end{bmatrix} + \bar{E}_{c,D}(t_j) (\varepsilon_{sh,D}(t_j, t_k) - \varepsilon_{sh,D}(t_{j-1}, t_k)) \begin{bmatrix} A_{c,D} \\ B_{c,D} \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^{i=m_p} A_{r(i)} E_{r(i)} \varepsilon_{r,rel(i)}(t_j) \begin{bmatrix} 1 \\ z_{r(i)} \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

donde $\hat{R}(t_j)$ es la matriz de flexibilidad de la sección transformada ajustada por la edad, $z_{r(i)}$ es la posición del tendón de la i -ésima capa, $N_{c,G}(t_i)$ y $N_{c,D}(t_i)$ son las fuerzas axiales en O del hormigón de la losa (G) y de la carpeta (D), respectivamente, debidos a la carga aplicada en el tiempo t_i , y $M_{c,G}(t_i)$ y $M_{c,D}(t_i)$ son los momentos flectores en cada uno de los hormigones. $A_{c,G}$ y $A_{c,D}$ son el área del hormigón de la losa y de la carpeta, respectivamente, y $B_{c,G}$ y $B_{c,D}$ sus momentos de primer orden con respecto al eje Oy . $\hat{F}_{e,G}(t_j, t_i)$ y $\hat{F}_{e,D}(t_j, t_i)$ vienen dados por la Ecuación (7):

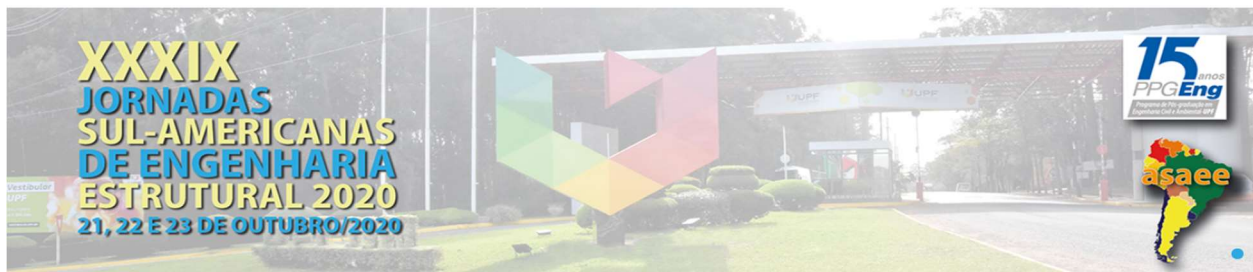
$$\hat{F}_{e,G}(t_j, t_i) = \frac{\phi_G(t_j, t_i) - \phi_G(t_{j-1}, t_i)}{E_{c,G}(t_i)} \quad (7a)$$

$$\hat{F}_{e,D}(t_j, t_i) = \frac{\phi_D(t_j, t_i) - \phi_D(t_{j-1}, t_i)}{E_{c,D}(t_i)} \quad (7b)$$

Si, bajo la acción de la fuerza axial y del momento flector aplicados en t_i , las tensiones en las fibras extremas, calculadas asumiendo un estado no fisurado, alcanzan $f_{ctm,fl}$, la sección se fisura. Si bien sigue siendo válido el principio de superposición, el análisis seccional es no-lineal. Asumiendo que la fisuración ocurre en las fibras inferiores (como es de esperarse en una pieza simplemente apoyada), $N(t_i)$ y $M(t_i)$ pueden particionarse de la siguiente manera, Ecuación (8):

$$\begin{bmatrix} N(t_i) \\ M(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(t_i) \\ M_1(t_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_2(t_i) \\ M_2(t_i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

donde $N_1(t_i)$ y $M_1(t_i)$ son la fuerza axial en O y el momento flector necesarios para llevar a cero las tensiones existentes en el hormigón de la losa previo a la aplicación de $N(t_i)$ y $M(t_i)$, y $N_2(t_i)$ y $M_2(t_i)$ son las solicitaciones que producen la fisuración. Bajo la acción de las solicitaciones $N_2(t_i)$ y $M_2(t_i)$, es necesario realizar un procedimiento iterativo para obtener la posición de la línea neutra. El análisis dependiente del tiempo se realiza aplicando la Ecuación (6), sin embargo es necesario realizar un proceso de doble bucle debido a la variación de la posición de la línea neutra a lo largo del tiempo. Las propiedades seccionales son calculadas teniendo en cuenta la fisuración y $A_{c,G}$, $B_{c,G}$, $A_{c,D}$, y $B_{c,D}$ representan las áreas y los momentos de primer orden de las partes no fisuradas del hormigón de la losa y de la carpeta, respectivamente.



Para llevar a cabo el análisis propuesto, se implementó un algoritmo computacional. La longitud de vano de la losa alveolar se divide en varios segmentos a los que se les aplica la formulación descrita. La deflexión se calcula mediante doble integración numérica de la curvatura a partir de la curvatura media.

4. CASO DE ESTUDIO

A los efectos del estudio, se consideró una losa alveolar con carpeta de compresión cuya geometría se observa en la Fig.1. La losa simplemente apoyada, tiene una luz de vano de 9.50 metros. La resistencia característica a compresión del hormigón de la losa es de 35 MPa y del hormigón de la carpeta de 25 MPa. Se asume una humedad relativa y una temperatura media de 70% y 20°C, respectivamente. Se considera cemento Portland normal. La losa alveolar es curada durante 3 días, momento en el cual el pretensado es transferido. Se considera que el hormigón de la carpeta es vertido a los 28 días luego de hormigonada la losa y que la acción compuesta inicia a los 3 días. Se designaron cinco tipos de losas en función del arreglo de los cables de pretensado y del fabricante de los mismos, Tablas 1 y 2. La principal característica es que la fuerza inicial de pretensado es la misma para todas ellas.

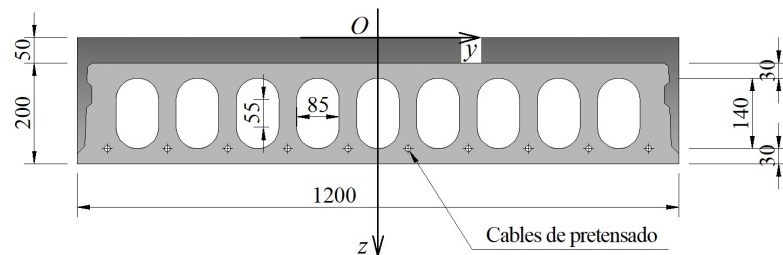


Figura 1. Sección transversal de la placa alveolar con carpeta de compresión.

Cuatro casos de carga fueron analizados. En el primero se supone que las únicas cargas actuantes son el peso propio de la losa $q_W=3.49$ kN/m y el de la carpeta $q_C=1.50$ kN/m. Para los restantes casos fue considerada una carga muerta adicional q_{CM} aplicada a los 60 días del hormigonado de la losa de valores 3.66 kN/m, 5.75 kN/m, 7.00 kN/m. Para los dos primeros la losa no está fisurada, mientras que para el último sí lo está. Para todos los casos se asume que la carga es mantenida constante hasta los 10000 días.

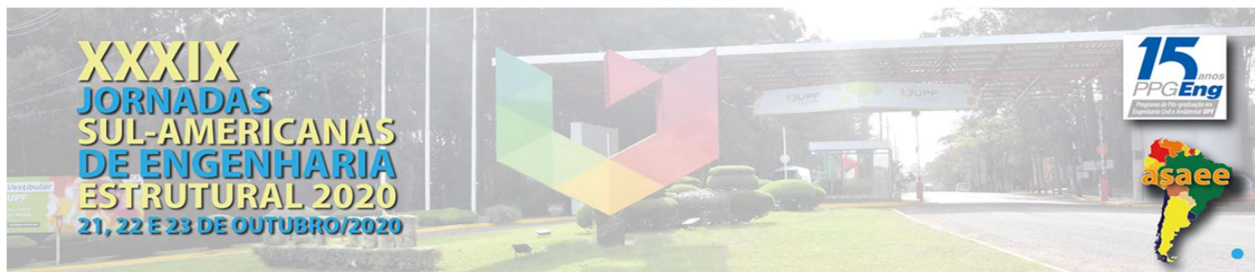
Tabla 1. Designación de las placas alveolares y propiedades del pretensado.

| Designación | Fabricante del cable | Designación del cable | E_p [GPa] | f_{pu} [MPa] | A_p [mm ²] | Tensión admisible |
|-------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| HCT-C1 | Tokyo Rope | 1x7-Φ10.5 | 155 | 2439 | 57.8 | $0.6 \times f_{pu}$ (*) |
| HCT-C2 | Carbopree | Φ10 | 130 | 2450 | 78 | $0.6 \times f_{pu}$ (*) |
| HCT-A | Arapree | Φ12 | 61 | 1400 | 114 | $0.4 \times f_{pu}$ (*) |
| HCT-S1 | Acindar | 1x7- Φ12.7 | 195 | 1860 | 98.7 | $0.75 \times f_{pt}$ |
| HCT-S2 | Acindar | 1x7- Φ12.7 | 195 | 1860 | 98.7 | $0.75 \times f_{pt}$ |

(*) Basado en las recomendaciones de ACI 440.4R (2004).

4.1. Análisis comparación y discusión de los resultados

La Fig. 2 muestra la deflexión al centro del vano y la pérdida de pretensado en dicha sección en función del tiempo para cada una de las designaciones utilizadas. Los números 1, 2 y 3 (seguidos de la designación) se refieren al caso de carga, respectivamente. La primera observación que puede realizarse es que, como era de esperarse, la deflexión al momento de la transferencia es la misma



para todos los sistemas de pretensado. Respecto al Caso N°1 (peso propio, peso de la carpeta de compresión y pretensado), la mayor deflexión a largo plazo de la losa se obtiene para tendones de acero, siendo ésta del orden de 4 mm hacia abajo. Para el caso de los tendones de FRP la deflexión a largo plazo es del orden de 0.6 mm. También para los casos de carga N°2 y N°3 las deflexiones obtenidas utilizando tendones de acero son mayores que al utilizar tendones de FRP, del orden del 15% y del 8% mayores, respectivamente. En cuanto a la pérdida de pretensado, las mayores pérdidas se obtienen para los tendones de acero, siendo ésta del orden del 18%, 15% y 13% para los casos de carga N°1, N°2 y N°3, respectivamente. Las menores pérdidas se obtienen para los tendones de CFRP, siendo éstas del orden del 10%, 8% y 7%, respectivamente. Las pérdidas obtenidas utilizando tendones de AFRP son algo menores que las obtenidas mediante tendones de acero.

Tabla 2. Designación de las placas alveolares y propiedades del pretensado, continuación.

| Designación | Numero de cables | Tensión inicial admisible por cable [N] | Fuerza inicial por cable [N] | Fuerza de pretensado inicial [N] | Tensión inicial [MPa] |
|-------------|------------------|---|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| HCT-C1 | 9 | 84585 | 70933 | 638397 | 1227 ($0.46 \times f_{pu}$) |
| HCT-C2 | 7 | 114660 | 91200 | 638400 | 1169 ($0.48 \times f_{pu}$) |
| HCT-A | 10 | 63740 | 63840 | 638400 | 560 ($0.4 \times f_{pu}$) |
| HCT-S1 | 7 | 91791 | 91200 | 638400 | 924 ($0.50 \times f_{pt}$) |
| HCT-S2 | 5 | 137687 | 127680 | 638400 | 1294 ($0.70 \times f_{pt}$) |

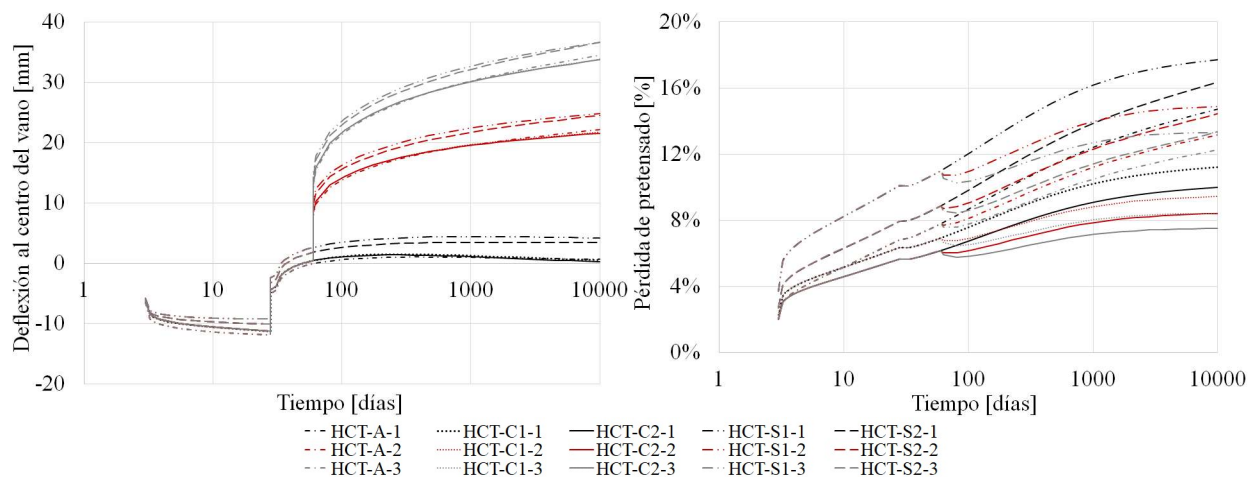


Figura 2. Deflexión y pérdida de pretensado en la sección del centro del vano: secciones no fisuradas.

Este comportamiento para las secciones no fisuradas se puede explicar de la siguiente manera. Dado que todas las losas están sometidas al mismo nivel de tensión inicial (o aproximadamente al mismo) y a las mismas condiciones de exposición ambiental, la deformación no restringida del hormigón a la altura del centro de gravedad de los tendones es aproximadamente la misma. Por otro lado, dado que la sección no está fisurada, las propiedades de la sección transversal transformada por el módulo efectivo ajustado por edad no difieren significativamente entre sí. Por tanto, la variación de la deformación a nivel del centro de gravedad de los tendones es aproximadamente igual para todas las losas y, debido al menor módulo de elasticidad de los tendones de FRP, esto se traduce en una menor pérdida de pretensado.

Con respecto al caso de carga N°4, las deflexiones máximas en el centro del vano se obtiene para la losa HCT-A alcanzando un valor de 77 mm hacia abajo, seguida por la losa HCT-S2 cuya



deflexión es 74 mm. Las deflexiones mínimas se obtienen para la losa HCT-S1 siendo estas del orden de 67 mm. Mediante el uso de tendones de CFPR la deflexión es del orden de 69 mm. Las mayores pérdidas de pretensado se producen para los tendones de acero.

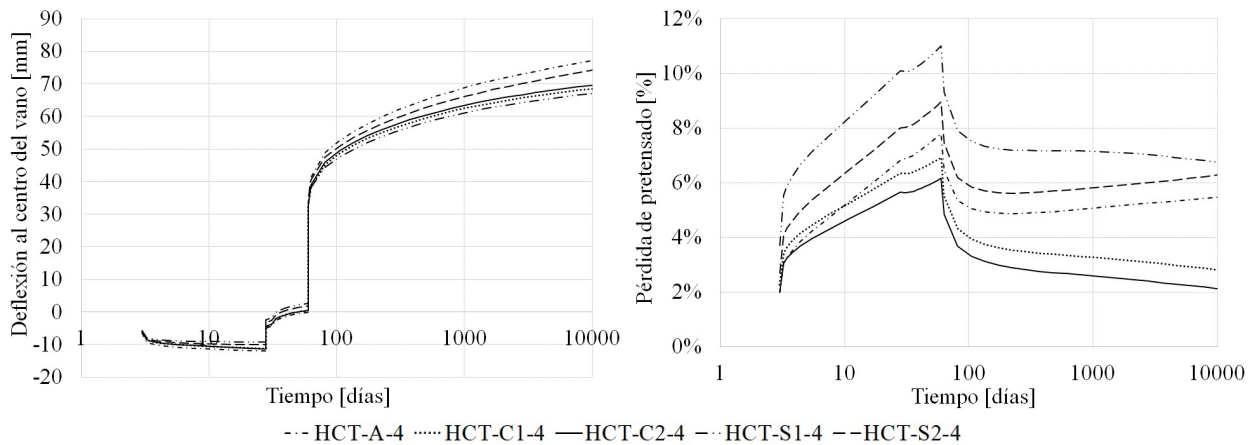


Figura 3. Deflexión y pérdida de pretensado en la sección central del vano: sección fisurada.

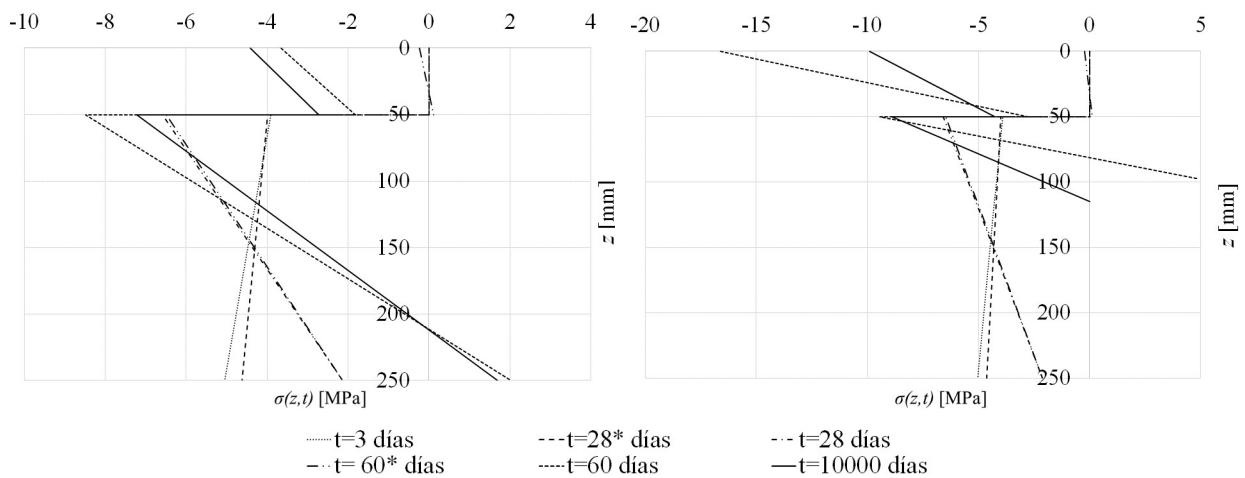
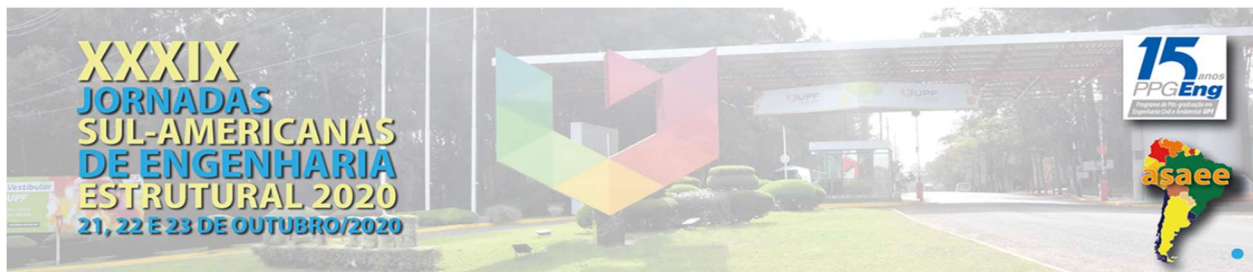


Figura 4. Diagrama de tensiones en la sección central de la losa HCT-C1: en la gráfica izquierda para el caso de carga N°2 y en la derecha para el caso N°4.

Las gráficas de la Fig.4 muestran los diagramas de tensión en el hormigón en la sección central de la losa HCT-C1 para distintos instantes de tiempo. La gráfica izquierda corresponde al caso de carga N°2 y la derecha al N°4. El asterisco indica el instante previo a la aplicación de la carga. Cuando la sección no está fisurada, las tensiones en la carpeta de compresión en valor absoluto, tienden a aumentar con el tiempo, disminuyendo así las tensiones en la losa alveolar (en valor absoluto). Para los intervalos de tiempo en que la carga permanece constante, la posición de la línea neutra presenta una variación muy poco significativa. En el caso de sección fisurada la situación es algo diferente. En este caso las tensiones en la carpeta de compresión disminuyen en valor absoluto a lo largo del tiempo. La posición de la línea neutra aumenta (medida desde la cara superior de la carpeta), aumentando así la rigidez de la sección. Sin embargo las fibras previamente fisuradas ya no son capaces de tomar tracciones.

5. CONCLUSIONES



Las losas alveolares simplemente apoyadas con carpeta de compresión de hormigón vertido en sitio en segunda etapa, pretensadas con tendones de CFRP o AFRP, muestran menores pérdidas de pretensado que las pretensadas con tendones de acero, tanto en estados fisurados como no fisurados y para los mismos niveles iniciales de tensión en la sección debidos a la fuerza de pretensado. En estado no fisurado, las menores deflexiones se obtuvieron para las losas con tendones de FRP. Si bien se observan algunas diferencias en las deformaciones en estado fisurado, los resultados obtenidos no permiten extraer conclusiones precisas. Sin embargo es posible concluir que la principal ventaja radica en la propiedad de no corrosión de los tendones de FRP en donde podrían admitirse anchos de abertura de fisuras superiores en comparación a los tendones de acero. Por último mencionar que, la construcción de la carpeta de compresión muestra tener un efecto favorable sobre la redistribución de las tensiones entre los hormigones, disminuyendo las tensiones de compresión en la losa en el caso de secciones no fisuradas (en valor absoluto) y aumentando la rigidez de la sección a lo largo del tiempo en el caso de secciones fisuradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 440.4R-04. 2004. *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons*. Farmington Hills, MI.
- Baran, E. 2015. "Effects of Cast-in-Place Concrete Topping on Flexural Response of Precast Concrete Hollow-Core Slabs." *Engineering Structures* 98:109–17.
- Bazant, Z. P. 1972. "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method." *ACI Journal Proceedings* 69(4):212–17.
- Bischoff, Peter H. 2005. "Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars." *ASCE, Journal of Structural Engineering* 131(5):752–67.
- Ghali, A., R. Favre, and M. Eldbadry. 2002. *Concrete Structures: Stresses and Deformation*. 3rd ed. edited by New York: Spon Press.
- Guimaraes, G. B., and C. J. Burgoyne. 1992. "Creep Behaviour of a Parallel-Lay Aramid Rope." *Journal of Materials Science* 27:2473–89.
- Mahmoud, Z. I., S. H. Rizkalla, and E. E. R. Zaghoul. 1997. "Transfer and Development Length of CFRP Reinforcement." Pp. 101–10 in *Proceedings of 1997 CSCE Annual Conference*.
- Mathys, S., and L. Taerwe. 1998. "Long-Term Behaviour of Concrete Slabs Prestensioned with AFRP or Prestressing Steel." Pp. 95–106 in *Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction*.
- Model Code 2010. 2012. *Model Code 2010, Vol. 1. CEB-FIP Bulletin No. 65*. Lausanne, Switzerland.
- Páez, P. M. 2021. "Theoretical Study of Short and Long-Term Behavior in Hollow Core Concrete Slabs Prestressed with FRP Tendons." in *The XLII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE-2021) the 3rd Pan American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2021)*.
- Ross, A. D. 1958. "Creep of Concrete under Variable Stress." *Journal of The American Concrete Institute* 54.
- Saadatmanesh, H., and F. E. Tannous. 1999a. "Long-Term Behavior of Aramid Fiber Reinforced Plastic (AFRP) Tendons." *ACI Materials Journal* 96(3):297–305.
- Saadatmanesh, H., and F. E. Tannous. 1999b. "Relaxation, Creep, and Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Plastic Tendons." *ACI Materials Journal* 96(2):143–53.
- Shapak, G., R. Seracino, G. Lucier, and S. Rizkalla. 2015. "Flexural Behavior of Cored Slabs Prestressed with Carbon Fiber Strands." in *The 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-12) & The 5th Asia-Pacific Conference on Fiber Reinforced Polymers in Structures (APFIS-2015)*.
- UNE-EN 1992-1-1. 2016. *Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. edited by UNE-EN 1992-1-1:2013/A1:2015. Eurocode 2.
- Zou, P. X. W. 2003. "Long-Term Properties and Transfer Length of Fiber-Reinforced Polymers." *Journal of Composite for Construction* 7(1):10–19.