

Análisis no lineal mediante modelos de fibras de estructuras largas sometidas a deformaciones impuestas; aplicación a puentes pérgola.

Nonlinear analysis using fiber models of long structures subjected to imposed deformations; application to pergola bridges.

Luis C. Pérez Tato^a, Ana I. Ortega^b

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. XC Ingeniería Estructural. l.pereztrato@xcingenieria.com

^bIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. XC Ingeniería Estructural. ana.ortega@xcingenieria.com

RESUMEN

En las estructuras largas, los esfuerzos debidos a las deformaciones impuestas pueden resultar determinantes en su dimensionamiento. Este artículo presenta un procedimiento para el estudio de las deformaciones impuestas en estas estructuras, empleando modelos de fibras que incorporan las deformaciones de retracción y fluencia en su formulación, para analizar la respuesta del hormigón y las armaduras. El método propuesto puede resultar útil para evitar la disposición de juntas en estas estructuras. Todo el software empleado en el análisis es de código abierto.

ABSTRACT

In long structures, the stresses due to imposed deformations can be decisive in their sizing. This article presents a procedure for the study of imposed deformations in this kind of structures, using fiber models that incorporate shrinkage and yield deformations in their formulation, to analyze the response of concrete and reinforcement. The proposed method can be useful to avoid the arrangement of joints in those structures. All the software used in the analysis is open source.

PALABRAS CLAVE: hormigón estructural, def. reológicas, estructuras largas

KEYWORDS: structural concrete, creep and shrinkage, long structures

1. Introducción

La estructura objeto de estudio forma parte del *Proyecto Modificado de Construcción de Plataforma de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Castilla La Mancha-Comunitat Valenciana-Región de Murcia. Tramo: Conexión entre la L.A.V. Madrid-Levante y la L.A.V. Madrid-Barcelona en el Término Municipal de Madrid. Fase 2*. Se trata de una pérgola que resuelve el salto de carnero del eje VSB del proyecto sobre la L.A.V. Madrid-Barcelona antes de enlazar con esta en el final de obra. La pérgola se apoya sobre dos pórticos

paralelos a dicha línea situados a ambos lados de la misma.

1.1. Descripción de la estructura proyectada

La obra proyectada permitirá el paso de la nueva vía sentido Barcelona, sobre la línea Madrid-Barcelona (actualmente en servicio). El trazado en planta de la vía sobre la estructura describe un acuerdo en su primera mitad ($a = 158.459$) hasta alcanzar una curva circular de radio 1280 m, quedando integrado el alzado completo en un acuerdo parabólico de

parámetro $K = 7000$. El ángulo de esviaje es variable entre 12.60° en el estribo 1 y 6.30° en el estribo 2.

Se trata de una pérgola del tipo conocido como mariposa o pajarita, en la que el vano sobre las vías existentes se resuelve con elementos prefabricados y la entrada y la salida se extienden mediante losa de hormigón armado para permitir la disposición de juntas ortogonales al trazado entre estribos y tablero. La longitud de la estructura es de unos 158 m.

Los pórticos de la pérgola están formados por un dintel de 1.5×1.5 m de sección, apoyado en pilas circulares de 1.25 m de diámetro espaciadas 5 m entre sí y con alturas entre 5.5 y 7 m. Estas pilas se apoyan sobre un encepado sobre pilotes en prolongación de las pilas y cuyas longitudes varían entre 8 y 24 m debido a las variaciones en la profundidad del estrato competente. Las dimensiones del encepado son también 1.5×1.5 m.

Una serie de vigas prefabricadas, apoyadas en los dinteles ya descritos y separadas 2.5 m entre sí, soportan una losa de hormigón de 0.3 m de espesor que aumenta de espesor hasta 0.65 m fuera del ámbito de la estructura porticada (zonas en «pajarita»).

Para reducir en lo posible la profundidad de las excavaciones en el entorno de la vía existente los encepados quedan a la intemperie.

1.2. Necesidad de la modificación

Al realizar el replanteo de la estructura, se detectó que la mayor parte de los pilotes de la nueva pérgola atravesaban unos colectores de pluviales de 1 m de diámetro que no fue posible detectar en fase de proyecto.

Como consecuencia de ello y ante las dificultades que imponía desplazar esos colectores, se hizo necesario introducir las siguientes modificaciones en el diseño de la pérgola:

- Desplazar el pórtico izquierdo unos 3 m hacia el norte.
- Desplazar el pórtico derecho aproximadamente 2.5 m hacia el sur.
- Desplazar el estribo 1 unos 17 m hacia el oeste.

- Adaptar la geometría de las losas que conectan con los estribos y las pilas-pilote que las soportan.

Además de estas modificaciones, se decidió estudiar la posibilidad de suprimir los aparatos de apoyo entre el dintel y las cabezas de las pilas extremas, previstos en el proyecto original (ver figura 1), para mejorar el monolitismo de la obra y facilitar su construcción.

1.3. Estructura modificada

Para acomodar estos cambios, la geometría de la pérgola varía del siguiente modo (ver también figura 2):

- El ancho de la pérgola aumenta en unos 5.5 m hasta hacer un total de 25.5 m.
- Las pilas del pórtico izquierdo pasan de 29 a 33, y la longitud del pórtico aumenta en unos 17,5 m para alcanzar al estribo 1 en su nueva posición. Esto hace un total de 164,2 m.
- El pórtico 2, conserva el número de pilas (30) pero su dintel se acorta en algo más de 3,2 m al interrumpirse antes de alcanzar el estribo 2.
- Para reducir la rigidez a flexión de las pilas y, por tanto, los esfuerzos debidos a deformaciones impuestas en el dintel, se reemplazan las pilas circulares por otras apantalladas.
- En el centro de los pórticos se disponen sendos diafragmas para materializar el punto fijo de la estructura.

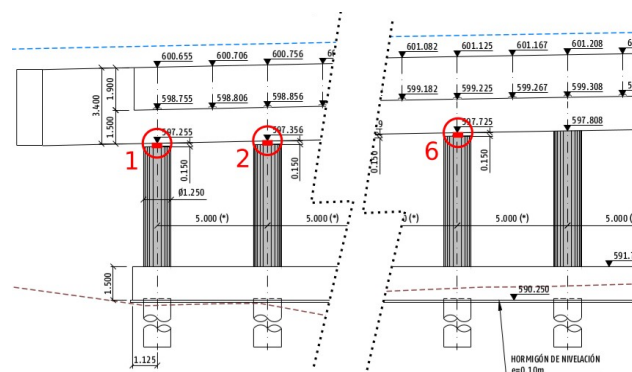


Figura 1. Apoyos previstos para aliviar los efectos de la retracción (proyecto original).

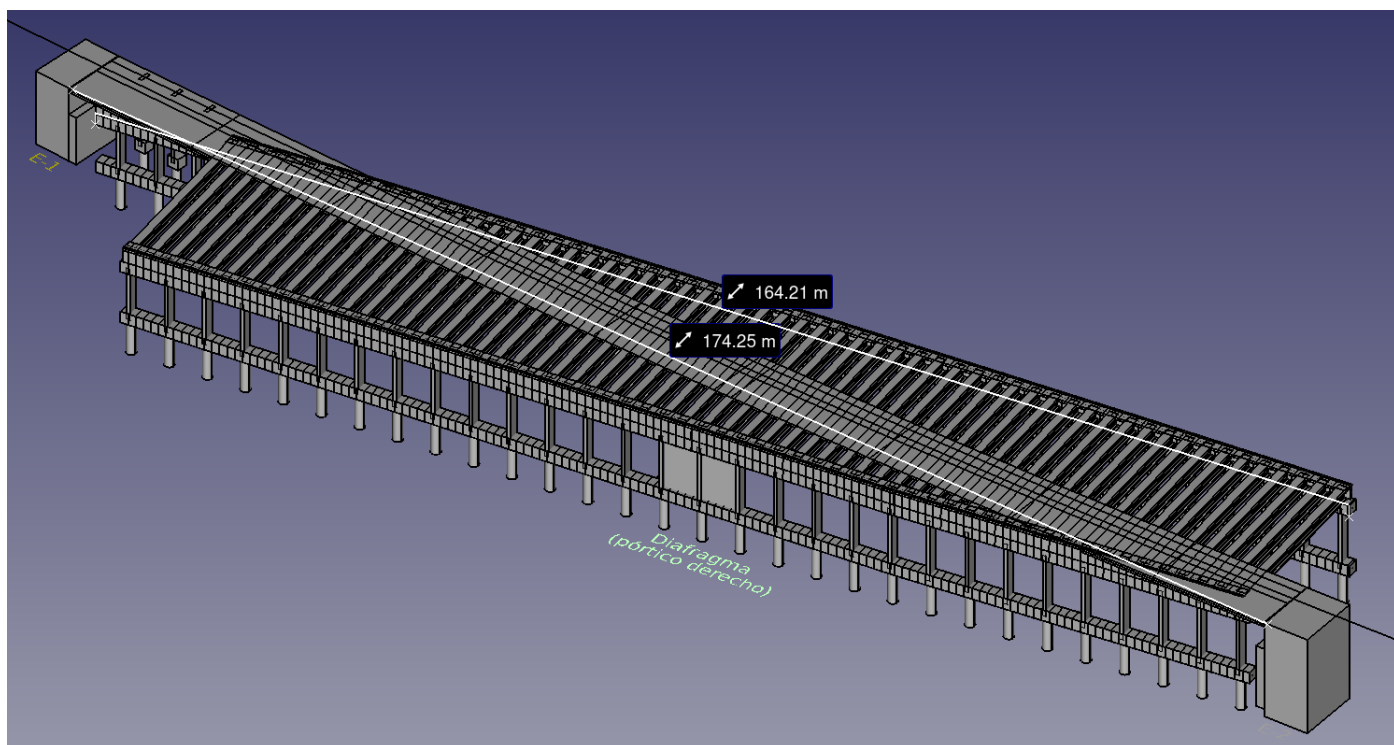


Figura 2: Aspecto de la pérgola objeto de estudio

1.4. Planteamiento del problema y objetivo del estudio

El incremento de longitud de la estructura, hace que los esfuerzos que introduce retracción del tablero y de los encepados (que quedan a la intemperie) sean también mayores. Para paliar este problema, por una parte, se hace más flexible la sección de las pilas y, por otra, se analiza detalladamente la fluencia en pilas y pilotes para evaluar en qué medida puede reducir los esfuerzos de flexión en estos elementos. El objetivo de este artículo es exponer los resultados de este último análisis.

2. Esquema del documento

Primero, se resume el fundamento teórico del método empleado para analizar la fluencia. Después, se describirá el empleo de dicho método en el análisis de la estructura. Por último, se mencionan las principales conclusiones del estudio realizado y se indican algunas líneas de investigación destinadas a que el método pueda aplicarse de modo más general.

3. Fundamento teórico

Se presenta aquí brevemente la base teórica del método empleado.

3.1. Modelo de fibras

El modelo de cálculo utilizado se desarrolló para estudiar la flecha de vigas de hormigón con árido reciclado [1], aunque no está limitado a este tipo de hormigón. En dicho modelo, el comportamiento de las secciones de hormigón armado frente a tensiones normales a lo largo de las barras, se simula discretizando la sección en un conjunto de fibras (ver figura 3) a las que se asocia un área y un diagrama tensión deformación¹. Cada una de estas fibras almacena, en cada instante, el estado tensional de su material (hormigón, acero, u otro).

3.1.1 Evolución en el tiempo

Como la retracción² y la fluencia del hormigón se desarrollan en el tiempo, es necesario introducir esta variable en el análisis. Para ello se emplea el llamado «pseudo-time» que viene a ser una variable que representa el tiempo «vigente» en el modelo.

1 Unas fibras tendrán el diagrama del acero (barras de armadura) y otras el del hormigón.

2 Aunque en este estudio se analiza la fluencia del material, el modelo utilizado para el análisis contempla también la retracción.

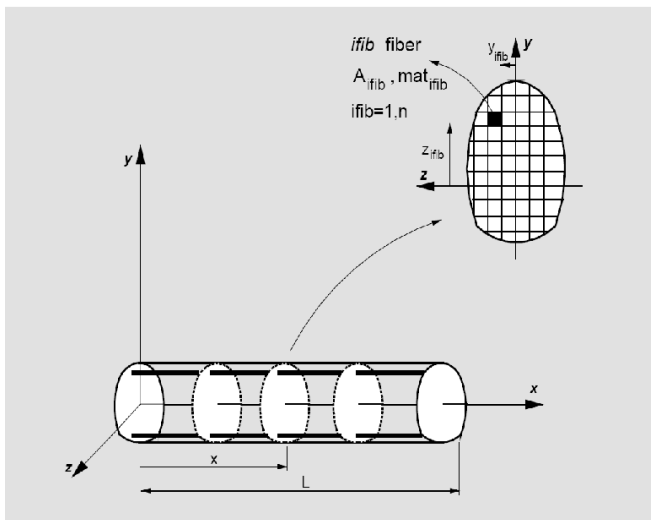


Figura 3: Modelo de fibras (tomada de la referencia [2])

Este artificio permite, por ejemplo, expresar la variación de las acciones en el tiempo. Aquí, se empleará para expresar dicha variación en el caso de las acciones reológicas.

3.2. Hipótesis básicas

Para el modelo del material se admiten las siguientes simplificaciones:

1. La edad de puesta en carga del hormigón no será inferior a dos días.
2. Se admite que el hormigón comprimido permanece en régimen elástico durante todo el proceso (análisis en servicio).
3. Las fibras en las que se excede la resistencia a tracción del hormigón conservan una tensión residual que simula la rigidización por colaboración del hormigón entre fisuras (ver figura 4).
4. El módulo elástico y la resistencia a compresión del hormigón se suponen constantes durante el análisis. Dicho de otro modo; no se considera el incremento de resistencia y de rigidez del hormigón con el tiempo. Esta aproximación resulta razonable cuando la edad de puesta en carga es superior a siete días. Para estructuras que se cargan antes sería necesario un modelo numérico que incorpore el endurecimiento del hormigón.
5. La tensión en cada fibra se supone constante en cada paso del análisis.

6. La deformación por fluencia en tracción y compresión se suponen iguales para el mismo nivel de tensión. De acuerdo con la referencia [3] la fluencia del hormigón traccionado es mayor que la del hormigón en compresión aunque, al parecer, las investigaciones realizadas hasta 2011 no son concluyentes.
7. En las fibras en las que se ha producido la fisuración, la fluencia se sigue produciendo, pero bajo la tensión reducida antes citada (ver figura 4).

3.3. Modelo constitutivo para la fluencia

El material denominado «TDConcrete» define su deformación total en el instante t , como:

$$\epsilon_{total} = \epsilon_m(t) + \epsilon_{cr}(t) + \epsilon_{sh}(t) \quad (1)$$

Siendo ϵ_m la deformación mecánica ϵ_{cr} la deformación por fluencia y ϵ_{sh} la deformación debida por retracción.

En cada paso del análisis y para cada fibra, se determina el valor de los términos de la expresión anterior, iterando hasta alcanzar la convergencia.

En cada iteración se procede como sigue:

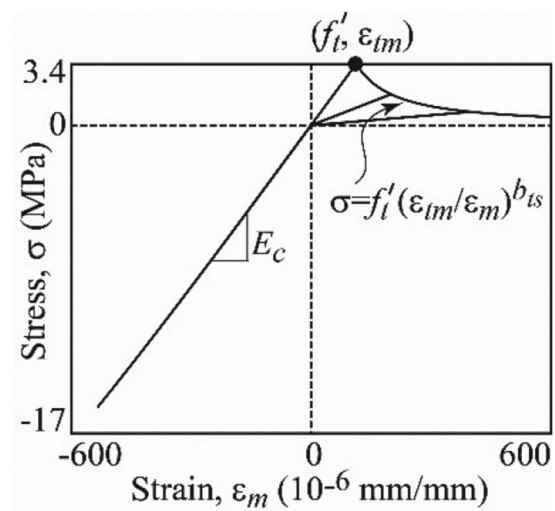


Figura 4: Diagrama σ - ϵ del hormigón (tomada de la referencia [1])

- La deformación de retracción que solo depende del tiempo se calcula para el intervalo transcurrido desde la finalización del curado.

- La deformación por fluencia se calcula suponiendo que la tensión obtenida en el paso anterior permanece constante en este.
- La deformación mecánica se obtiene sustrayendo de la deformación total (que se obtuvo en la última iteración) las dos anteriores. A partir del diagrama tensión-deformación del material se obtiene la tensión en la fibra correspondiente.
- Conocidas todas las tensiones en las fibras de cada elemento se calculan sus esfuerzos que se pasan al análisis global para calcular el residuo y comprobar la convergencia.

Como se muestra en la figura 5b (en la que $\phi_i(t)=\phi(t,t_i)$ y $\Delta\sigma_i=\Delta\sigma_c(t_i)$) y se explica en [4], el valor de la fluencia en el instante t bajo tensiones variables en el tiempo se puede determinar empleando el principio de superposición como se indica en la ecuación 2.

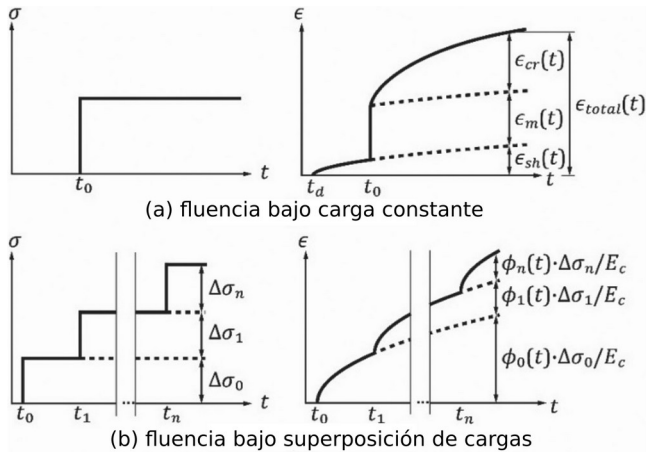


Figura 5: Fluencia del hormigón (tomada de la referencia [1]).

$$\epsilon_{cr}(t_j) = \sum_{i=0}^j \phi(t_j, t_i) \frac{\Delta\sigma_c(t_i)}{E_c} \quad (2)$$

En síntesis, el modelo constitutivo aquí descrito simula:

- Las deformaciones impuestas evaluándolas en cada intervalo del análisis.
- La fisuración obteniendo, por iteración, el estado tensional en cada fibra según el modelo constitutivo de la figura 4 (ver punto 3 del apartado 3.2).

4. Análisis de la estructura

4.1. Retracción en el tablero y los encepados

La retracción en el tablero y en los encepados se considera como una deformación impuesta y se ignora el efecto de la fluencia en tracción, lo que resulta conservador. La evolución en el tiempo de esta deformación impuesta se representa en las figuras 6 y 7.

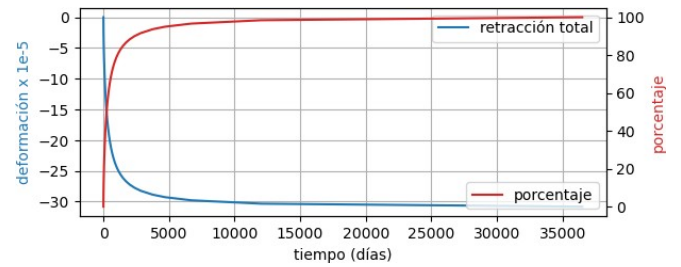


Figura 6: Retracción total en el tablero

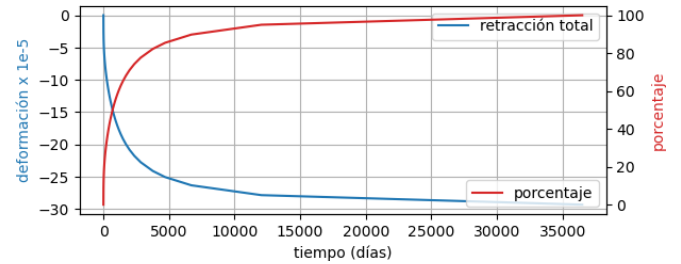


Figura 7: Retracción total en los encepados

En el caso de los encepados la retracción se ha calculado considerando expuestas las dos caras laterales y la superior (excepto la parte protegida por las pilas). Como puede verse, no hay gran diferencia con la retracción en el tablero (29.3×10^{-5} frente a 30.8×10^{-5}), pero sí en cuanto a la velocidad con la que se desarrolla el fenómeno: los encepados tardan algo más de 6 meses en alcanzar el 30% de su retracción final y unos nueve años en alcanzar el 80%.

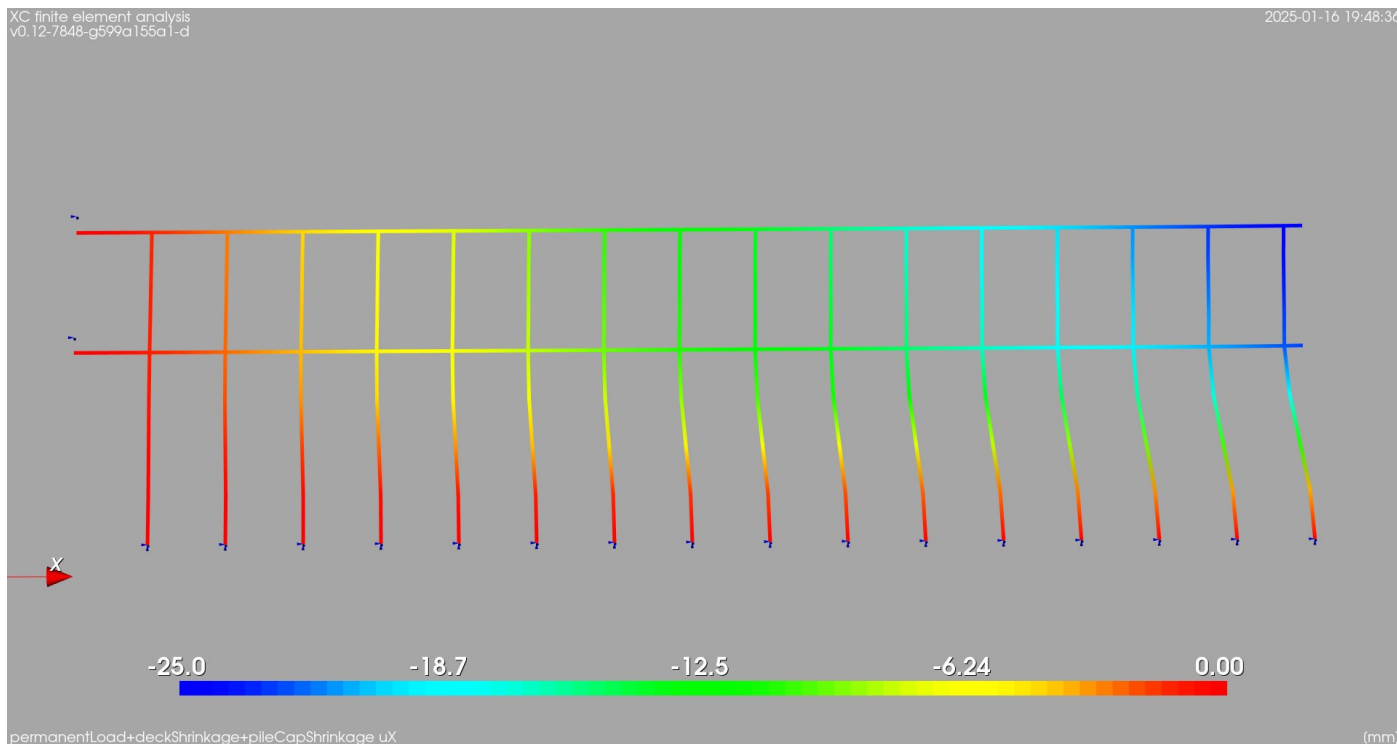


Figura 8: Modelo simplificado de medio pórtico

4.2. Modelo de cálculo

El análisis se ha realizado sobre un modelo simplificado de un pórtico (ver figura 8). Sobre este modelo se han estudiado los casos que se indican en la tabla 1.

4.2.1 Parámetros del modelo

Los parámetros que se han considerado en el análisis son:

- Encepado enterrado o en superficie: como se ha dicho anteriormente, si el encepado queda enterrado, su retracción por secado es nula y la retracción total se reduce a la autógena.
- Geometría del fuste de las pilas: se han considerado dos secciones transversales para estas, una circular de 1,25 m de diámetro idéntica a la del proyecto original y otra rectangular de 1.4 m de ancho y 0.45 m de canto que presenta una rigidez semejante frente a los desplazamientos transversales de la pérgola, pero muy inferior frente a los desplazamientos longitudinales.
- Efecto de la fisuración y la fluencia: ambos fenómenos reducen los esfuerzos de flexión en pilotes y pilas. La fisuración reduce la rigidez de la sección y la fluencia hace que esta se deforme

absorbiendo parte de la deformación impuesta. Ambos efectos se han analizado empleando el modelo descrito en el apartado 3.

- Longitud elástica de los pilotes: los pilotes se han considerado como barras empotradas a una profundidad igual a su longitud elástica. Para determinar esta se ha procedido por iteraciones variando la misma hasta que el valor del desplazamiento obtenido para el pórtico coincide con el que resulta de utilizar el modelo tridimensional de la estructura (ver figura 9). En este segundo modelo, la coacción lateral que el terreno impone a los pilotes se introdujo empleando los valores del módulo de reacción horizontal propuestos en el estudio geotécnico para los diferentes estratos.

4.2.2 Variables analizadas

Las variables que se han analizado para caracterizar el resultado son las siguientes:

- Desplazamientos en los extremos del dintel y del encepado: estos valores, y su comparación con los que tendrían lugar si la retracción no estuviera coaccionada, proporcionan una idea de la mayor o menor rigidez de la estructura frente al fenómeno de la retracción.

Tabla 1: Desplazamientos y esfuerzos debidos a la retracción

	Sección de las pilas	Efecto de la fisuración y de la fluencia	Longitud elástica del pilote (m)	Desplazamiento en el extremo del dintel (mm)	Porcentaje respecto a retracción libre (%)	Desplazamiento en el extremo del encepado (mm)	Porcentaje respecto a retracción libre (%)	Axil extremo en el tablero (kN)	Axil extremo en el encepado (kN)	Momento extremo en las pilas (kN.m)	Momento extremo en los pilotes (kN.m)
Encepado en superficie	C	No	13.72	-24.5	98%	-18.8	79%	1290	1760	450	2240
	R	No	13.72	-24.9	99%	-20.0	84%	488	2640	50	2180
	C	Si	13.72	-24.7	99%	-18.7	79%	780	780	220	930
	R	Si	13.72	-25.0	100%	24.0	-101%	0	1540	0	941
Encepado enterrado	C	No	13.72	-22.0	88%	-11.0	217%	6420	-5140	3130	0
	R	No	13.72	-24.5	98%	-6.1	121%	1110	-394	550	532
	C	Si	13.72	-22.1	88%	-11.0	217%	6190	-5540	2950	3
	R	Si	13.72	-24.5	98%	-6.1	121%	1090	-1560	498	1

- Valores extremos (máximos o mínimos) del esfuerzo axil en el tablero y en el encepado.
- Valores extremos del momento flector en los pilotes y en las pilas.

4.2.3 Interpretación de los resultados

Del análisis de estos resultados (ver tabla 1) se desprenden las siguientes conclusiones:

- La circunstancia de que en el proyecto se haya previsto construir los encepados en superficie para reducir la excavación junto a las vías, resulta favorable. Si el encepado queda enterrado, los esfuerzos en el dintel, en el propio encepado y en las pilas aumentan de manera drástica, reduciéndose la flexión en los pilotes que quedan «protegidos» por el encepado. Esta «protección» de los pilotes hace que la fisuración y fluencia quede limitado a las pilas por lo que su efecto resulta bastante

modesto: en el caso de pilas circulares el axil en el dintel se reduce un 3.6%, y para las pilas apantalladas la reducción es del 1.8% solamente. Por el contrario, el secado del hormigón del encepado permite que los pilotes, embebidos en un terreno bastante flexible en el estrato más superficial, absorban parte del efecto de la retracción.

- Como era previsible, la disposición de pilas rectangulares reduce notablemente los esfuerzos de tracción en el tablero y los esfuerzos de flexión en las propias pilas. Cuando la conexión entre tablero y encepado es relativamente rígida, el esfuerzo necesario para flexionar los pilotes de modo que la retracción tenga lugar se reparte entre ambos elementos (1290 kN de tracción en el tablero y 1760 kN en el encepado). Al disponer pilas más flexibles el tablero queda

«liberado» de esta colaboración (el axil de tracción desciende a 488 kN) y es el encepado el que asume el incremento necesario³, pasando a resistir un axil de tracción de 2640 kN.

- El efecto de la fisuración y de la fluencia del material disipa el 40 % del axil de tracción en el encepado y el 55 % del momento flector en los pilotes.

4.2.4 Traslado de los resultados obtenidos al dimensionamiento de la estructura

Para dimensionar la estructura de la pérgola es necesario un modelo tridimensional que permita simular fielmente su comportamiento en dirección longitudinal y transversal simultáneamente. Por otra parte, el modelo del material aquí descrito, por el momento, solo es apto para el análisis en servicio.

Esto nos hizo descartar su empleo en el modelo 3D, ya que su utilidad sería limitada y la complejidad del modelo aumentaría considerablemente. En vista de ello, se plantearon dos opciones:

- Emplear un modelo elástico en el que las rigideces de pilas y pilotes se modificaran de acuerdo con los resultados del modelo simplificado.
- Afectar la deformación impuesta de un coeficiente reductor «equivalente» a la disipación de esfuerzos que se indica al final del apartado 4.2.3.

Finalmente, dada su simplicidad, se decidió adoptar esta última vía en este proyecto e investigar más a fondo en futuros proyectos las posibilidades que se mencionan en las conclusiones.

5. Conclusiones

El método descrito permite analizar el efecto de la retracción y la fluencia del hormigón en una estructura de barras sin necesidad de hacer hipótesis sobre la rigidez «reducida» a emplear en cada punto de la estructura (ver apartado 3 en la referencia [5]). La generalización del modelo descrito en 3.3 a materiales bidimensionales aptos para elementos finitos de tipo lámina⁴ permitiría su aplicación a

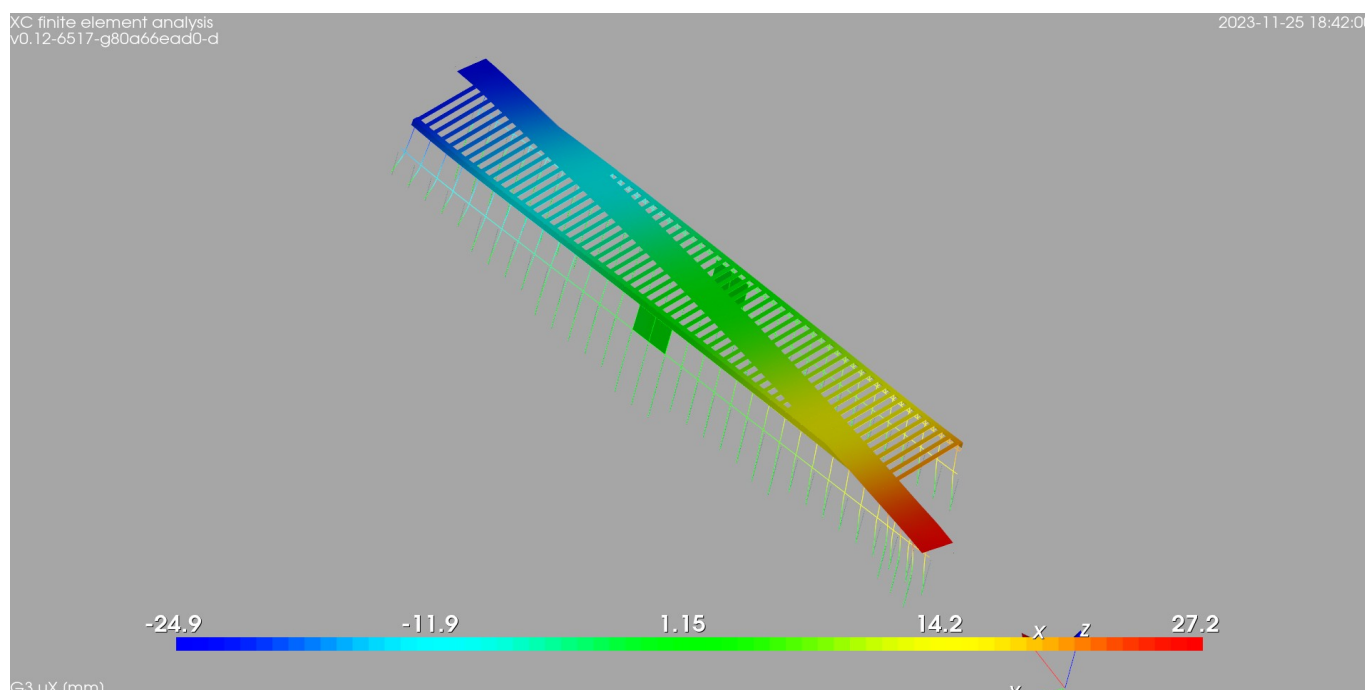


Figura 9: Desplazamiento longitudinal por retracción

3 Al tratarse de una deformación impuesta, el desplazamiento que se impone a la cabeza de los pilotes, y, por tanto, la flexión a la que se les somete, no cambia.

4 Estos materiales emplean múltiples «hojas» superpuestas para simular el comportamiento de las capas de armadura embebidas en el hormigón.

modelos más complejos, como el que se representa en la figura 9, y adquirir un conocimiento más profundo de la respuesta de la estructura frente a este fenómeno. Por otra parte, la modificación del diagrama tensión-deformación del hormigón, para simular su rama de cedencia a compresión, permitiría su empleo en el análisis de estados límite últimos.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la generosidad del Sr. Kurama que puso el código fuente desarrollado durante su investigación a disposición de la comunidad científica. También es necesario agradecer aquí el trabajo de toda la comunidad de desarrolladores de software libre sin el cual las dificultades para desarrollar este estudio hubieran sido mucho mayores.

Referencias

- [1] Knaack, Adam & Kurama, Yahya, Modeling Time-Dependent Deformations: Application for Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates. ACI Structural Journal. (2018) 115. 10.14359/51701153.
- [2] Spacone, E., And, F.C., & Llepartmen, F.F. (1996). Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frame: Part I. Formulation. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 25, 711-725.
- [3] Neville A. M., “Properties of concrete”. Fifth edition. Pearson Publications, Harlow, England. UK. 2011.
- [4] Gilbert, I., and Ranzi, G., Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures, Spon Press, New York, 2011.
- [5] Pérez Caldentey, A. et al. Monografía M-22 de ACHE Proyecto de estructuras frente a los efectos de las deformaciones impuestas.