

LOSA DE FONDO DE LA ESTACIÓN DE LA SAGRERA. ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LOS EFECTOS ESTRUCTURALES DEBIDOS RETRACCIÓN

“LA SAGRERA” STATION DEEP GROUND SUPPORTED SLAB. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF STRUCTURAL EFFECTS CAUSED BY THE SHRINKAGE

Albert DE LA FUENTE ANTEQUERA

Dr. Ingeniero de Caminos
Universidad Politécnica de Catalunya
Profesor Lector
albert.de.la.fuente@upc.edu

Ana Isabel CUARTERO RODRÍGUEZ

Ingeniero de Caminos
Bridge Technologies
Ingeniera de Estructuras
ana.cuartero@btechno.es

Ángel Carlos APARICIO BENGOCHEA

Dr. Ingeniero de Caminos
Universidad Politécnica de Catalunya
Catedrático
angel.carlos.aparicio@upc.edu

Ingrid PUJOL ALAMANY

Ingeniero de Caminos
Dragados
Responsable de Oficina Técnica
ipujola@dragados.com

RESUMEN

La losa de losa de fondo de la estación intermodal de La Sagrera se proyecta con cantos que oscilan entre 2,0 y 3,9 m, sin juntas y conectada a las pantallas laterales del vaso. El proyecto inicial considera una cuantía geométrica del 1.8‰ respecto al área de la sección de la losa. Atendiendo a las pantallas distan entre sí 80 m, esta cuantía resultaría insuficiente si la losa fisurase debido a los esfuerzos de tracción diferidos que se producen a causa de la coacción de la retracción por secado. Esta fisuración, junto con la acción de las cargas exteriores, modificaría el esquema resistente y podría comprometer la estanqueidad y seguridad estructural. Se ha llevado a cabo un estudio experimental y numérico para optimizar la cuantía de refuerzo.

ABSTRACT

The “La Sagrera” deep ground supported slab is designed with deeps that range from 2.0 to 3.9 m, without joints and laterally connected to the earth retaining walls (80 m between walls). The former project considered a minimum skin reinforcement of 1.8‰ respect to the transversal slab cross section. This amount would be insufficient in case of cracking occurs due to the time different tensile forces that are expected to appear due to the restrained drying shrinkage. In case of this occurs, the mechanical behaviour would be modified and both the waterproofing and the structural reliability compromised. An experimental and numerical program has been carried out to optimize the reinforcement amount.

PALABRAS CLAVE: cuantías mínimas, losa de gran canto, transferencia de humedad.

KEYWORDS: minimum reinforcement, deep ground supported slab, humidity transfer.

1. Introducción

Para la futura estación ferroviaria intermodal de La Sagrera (Barcelona) se proyectan cinco niveles, siendo el inferior el que albergará los andenes de la red de Cercanías. A tal fin, se diseña una losa de fondo de hormigón armado y canto entre 2,0 m y 3,9 m. La losa tiene una superficie aproximada

de 38.000 m² e involucra la producción de unos 110.000 m³ de hormigón. Consecuentemente, la optimización tanto de la composición del hormigón como de la cuantía de acero, manteniendo o mejorando prestaciones y requerimientos especificados, son aspectos determinantes.

En este sentido, exceptuando las zonas de descarga de pilares y algunos puntos singulares, el resto de la losa se plantea con la cuantía mínima geométrica del 1,8‰ respecto al área de la sección transversal propuesta en la EHE-08 [1] y que permite hacer frente a las tracciones en las fibras extremas asociadas a estados tensionales autoequilibrados generados por fenómenos termohigrométricos (Figura 1b). Esta cuantía podría ser suficiente para controlar las fisuras que pudiesen aparecer debido a estos estados; sin embargo, la losa se proyecta sin juntas y, además, sus extremos se conectan con las pantallas laterales de contención del vaso. Por tanto, se espera se desarrollen esfuerzos de tracción (N_{ext}) diferidos fruto de la retracción por secado (Figura 1c) no tenidos en cuenta en el proyecto inicial y que podrían conducir a fisuras que seccionen el canto de la losa (Figura 1d) o, incluso, a una rotura frágil si al producirse la fisuración la armadura plastificase.

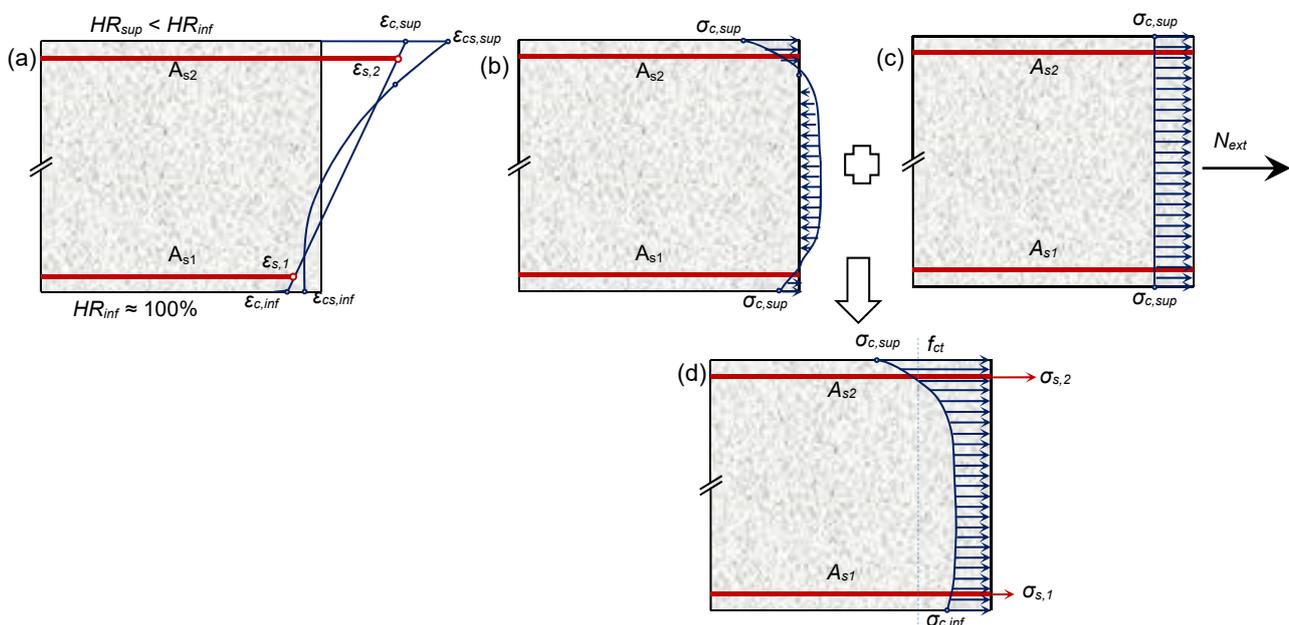


Figura 1. (a) Deformación de retracción (ϵ_{cs}) y total (ϵ_c); (b) tensiones autoequilibradas debido a la retracción diferencial; (c) tensiones debidas al axil N_{ext} originado por la coacción lateral y (d) estado total de tensiones (suma de b y c).

Esta situación conduce a que deba replantearse la configuración de armadura, pues de alcanzarse la fisuración diferida por el acoplamiento de sendos fenómenos implicaría un cambio del esquema estructural así como un problema grave de filtraciones al encontrarse la losa bajo el nivel freático.

Con el fin de minimizar los efectos estructurales de la retracción se plantea la ejecución de la losa en sectores de 20x30 m² en planta con las juntas sin conectar durante un periodo, a determinar, de modo que parte de la retracción se haya desarrollado. Por otra parte, para estimar la cuantía óptima de armadura, se debe conocer la evolución de los perfiles de retracción. Para ello, desarrolla una campaña experimental en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales Lluís Agulló de la UPC (LATEM) en la que se caracteriza la retracción en prismas con distintas dosificaciones de hormigón y en condiciones ambientales controladas. En paralelo, se ejecutan en las mismas instalaciones de la obra 4 dados de hormigón de 2,0 m de canto considerando dos cuantías distintas de refuerzo, dos dosificaciones de hormigón y condiciones de curado diferentes. En estos se mide

la evolución interna de las temperaturas así como las deformaciones en varias fibras de hormigón y del acero.

Los resultados obtenidos se analizan y se emplean para calibrar un modelo higo-mecánico que ha permitido: (1) estimar la influencia de la edad del bloqueo de las juntas en el desarrollo de las tensiones de tracción y (2) optimizar el refuerzo para distintos escenarios de ejecución de la losa y condiciones termo-higrométricas. Cabe destacar que las cuantías obtenidas están por debajo de las cuantías recomendadas por diversas normativas internacionales. Esta comunicación es un resumen fruto de la Tesis de Master [2].

A nivel nacional, se han llevado a cabo trabajos similares para cuantificar los efectos estructurales de las deformaciones termohigrométricas en: puentes [3,4], presas [5], dovelas para túneles ejecutados con TBM [6], forjados [7] y que han sido referencia para este trabajo.

2. Campaña experimental

2.1. Introducción

Se estudian 3 dosificaciones distintas de hormigón bombeable que se distinguen por el tipo y cuantía de cemento y el uso de un agente compensador de la retracción (Tabla 1).

MATERIAL	D1	D2	D3
	CEM II/A-L 42,5R	CEM II/B-L 32,5N	CEM II/A-L 42,5R
Cemento	310 kg/m ³	330 kg/m ³	310 kg/m ³
Arena 0/4	898 kg/m ³	890 kg/m ³	898 kg/m ³
Arena 0/2	211 kg/m ³	210 kg/m ³	191 kg/m ³
Gravilla 10/20	778 kg/m ³	772 kg/m ³	778 kg/m ³
Adit. Polifuncional	0,90 % spc	0,90 % spc	0,90 % spc
Adit. Superfluidificante	0,39 % spc	0,39 % spc	0,39 % spc
Adit. Expansionante	-	-	20 kg/m ³
Relación a/c	0,50	0,50	0,50

Tabla 1. Composición de las dosificaciones planteadas.

El valor característico de la resistencia a compresión del hormigón (f_{ck}) especificado en proyecto es de 30 N/mm² a 28 días de edad. Se prevé un curado de al menos 14 días con la posibilidad incluso de mantener temporalmente una capa de arena húmeda en la cara superior.

Elegir entre las dosificaciones D1 y D2 requiere hallar un óptimo técnico-económico. La D1 requiere 310 kg/m³ de CEM 42,5R para alcanzar la resistencia contractual, mientras que la D2 330 kg/m³ de CEM 32,5N. El CEM 42,5R tiene mayor finura de molido. Pese a que la D2 requiera un 6,1% más de cemento respecto a la D1, se espera que esta última presente un mayor potencial de retracción y, por ende, más necesidad de armadura geométrica. Por este motivo, se desarrolla una campaña experimental y numérica que permita cuantificar estas variables y dar respuesta a este proceso de optimización. Adicionalmente, se plantea el uso de un aditivo expansionante en la dosificación D3 (310 kg/m³ de CEM 42,5R).

2.2. Campaña en laboratorio

Se moldearon 3 probetas prismáticas 600x150x150 mm³ para las dosificaciones D1 y D2 y 2 para la D3. Asimismo, se moldearon probetas cilíndricas para la caracterización de la resistencia a compresión.

Se instaló una galga extensométrica de cuarto de puente de Wheastone (Figura 2a) y puntos de referencia en la cara superior y lateral para medir deformaciones con reloj comparador (Figura 2b) en cada probeta. Las probetas se mantuvieron 24 horas en la planta de hormigón y posteriormente se transportaron a la cámara climática del LATEM donde fueron apoyadas sobre una lámina de plástico y cubiertas con arpillera húmeda durante 14 días. Estas condiciones responden a que la capa freática estará en contacto con la cara inferior de la losa y que el curado se llevará cabo por inundación de la cara superior durante 14 días.



Figura 2. (a) Galgas extensométricas colocadas en el centro de la probeta y (b) puntos de comparación anclados en la cara superior y lateral para medir deformaciones longitudinales.

En la Figura 3 se presenta la evolución los valores medios de las deformaciones registradas en el centro de gravedad de las probetas (galgas) y en la cara superior para las dosificaciones D1 y D2. Se recoge también la evolución de la HR y de la temperatura registrada en la cámara climática.

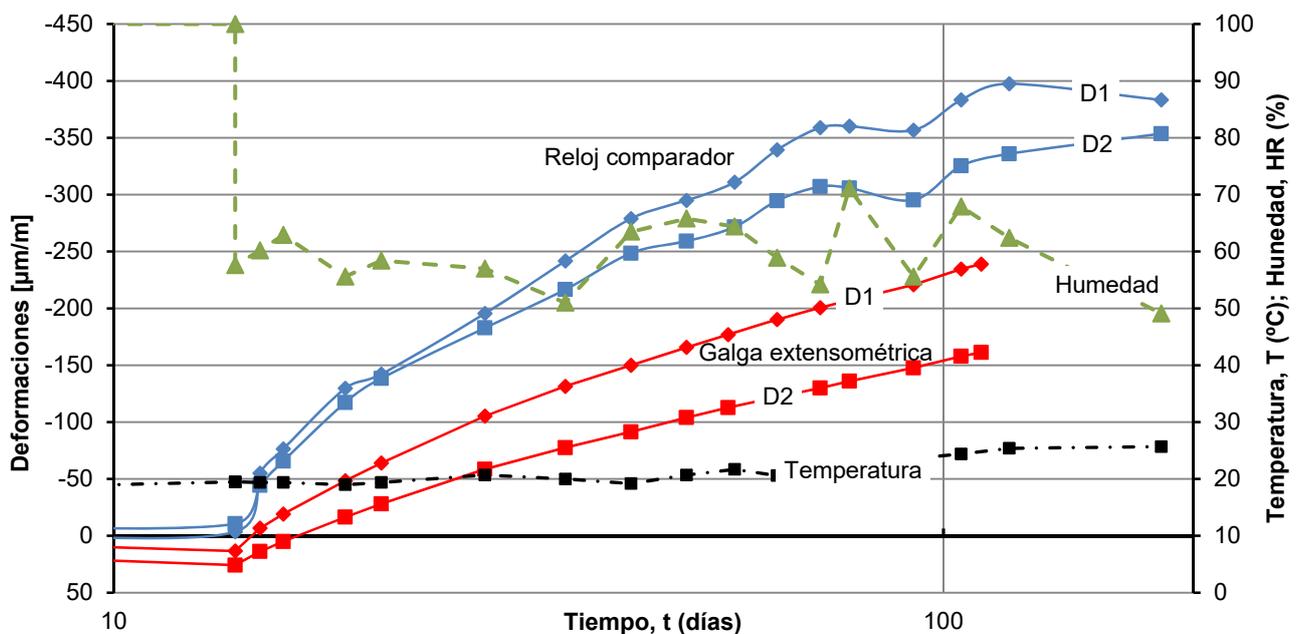


Figura 3. Registros de las deformaciones en las probetas y de la HR y temperatura en la cámara.

En la Figura 3 se omiten los resultados registrados para la D3 (con agente expansivo) porque conduce a resultados similares a la D2 y, debido al alto coste de esta dosificación, se decidió no considerarla en el estudio de optimización.

Ambas dosificaciones alcanzan la $f_{ck,28} = 30 \text{ N/mm}^2$ especificada en el proyecto. Por otra parte, en base a las lecturas registradas y presentadas en la **Figura 3**, se concluye que:

- Durante la fase de curado ($t \leq 14$ días) con $HR = 100\%$, las galgas extensométricas registran hinchamientos ($13 \mu\text{m/m}$ D1 y $25 \mu\text{m/m}$ D2). Las medidas en la cara superior conducen a deformaciones de retracción prácticamente nulas.
- Durante la fase de secado ($t > 14$ días), en la que los valores medios de HR y T son 60% y 23°C , respectivamente, las deformaciones detectadas con las galgas extensométricas a 105 días son de $-235 \mu\text{m/m}$ para la D1 y $-159 \mu\text{m/m}$ para la D2; así, la D1 conduce a un 33% más de deformación de retracción a esta edad. Sin embargo, los registros de las galgas indican que la tendencia aún es creciente – no hay estabilización porque el proceso de transferencia de humedad sigue activo – y que posiblemente la retracción potencial a largo plazo de ambas dosificaciones sea similar. En esta línea, las deformaciones en la cara superior, que están estabilizadas, difieren en menos de un 12% entre ambas dosificaciones y pueden tomarse como valores del potencial de retracción.

Con el fin de cuantificar de forma más fidedigna el comportamiento deformacional de cada dosificación, se recurre a una campaña experimental con elementos a escala real ejecutados y curado en las condiciones reales y considerando ambas dosificaciones.

2.3. Campaña *in situ* con elementos a escala

Se fabricaron cuatro dados prismáticos de 1,20 m de ancho, 2,40 m de profundidad y 2,00 m de canto (**Figura 4**) instrumentados con: (1) galgas extensométricas embebidas en el hormigón a alturas de 0,15, 1,00 y 1,85 m; (2) galgas instaladas en las barras centrales y exteriores de las capas superior e inferior y, (3), termopares en las mismas cotas que se instalan las galgas para hormigón. Toda la instrumentación se concentra en la sección central de los dados.

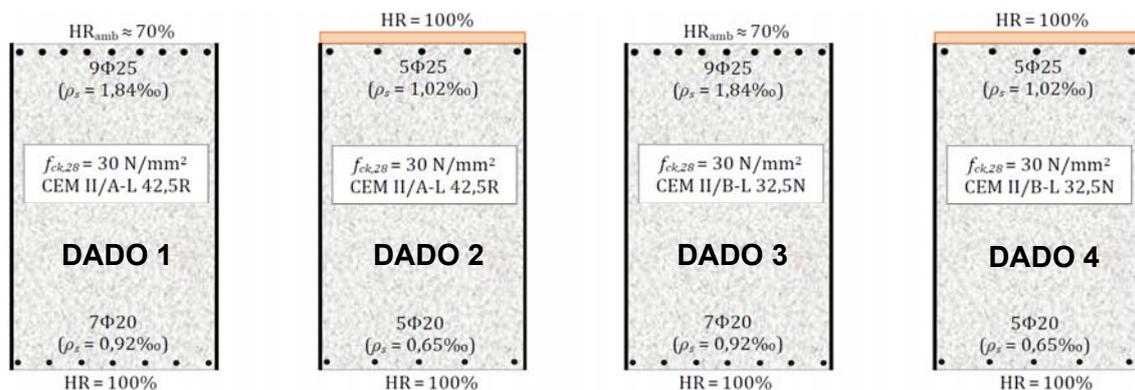


Figura 4. Vista frontal de los prismas de hormigón con la configuración de armadura.

Los dados 1 (D1) y 3 (D2) se arman con cuantías del $1,84\%$ y $0,92\%$ en las caras superior e inferior, respectivamente. Por el contrario, para los dados 2 (D1) y 4 (D2) se considera una potencial reducción del armado, siendo el refuerzo del $1,02\%$ en la cara superior y del $0,65\%$ en la inferior. Todos los dados descansan sobre una lámina de plástico para garantizar una $HR = 100\%$; del mismo modo, se mantienen los encofrados durante toda la fase de ensayo para evitar la pérdida lateral de humedad. El curado se prolonga hasta $t = 14$ días mediante inundación de la cara superior; sin embargo, transcurrido este periodo, en los dados 1 y 3 se elimina la capa de agua activándose así la transferencia con la atmósfera ($HR \approx 70\%$ según los datos de la estación más cercana). Por el contrario, en los dados 2 y 4 se mantiene una capa de arena húmeda ($HR = 100\%$).

En la [Figura 5](#) se presentan los registros térmicos detectados por los termopares instalados.

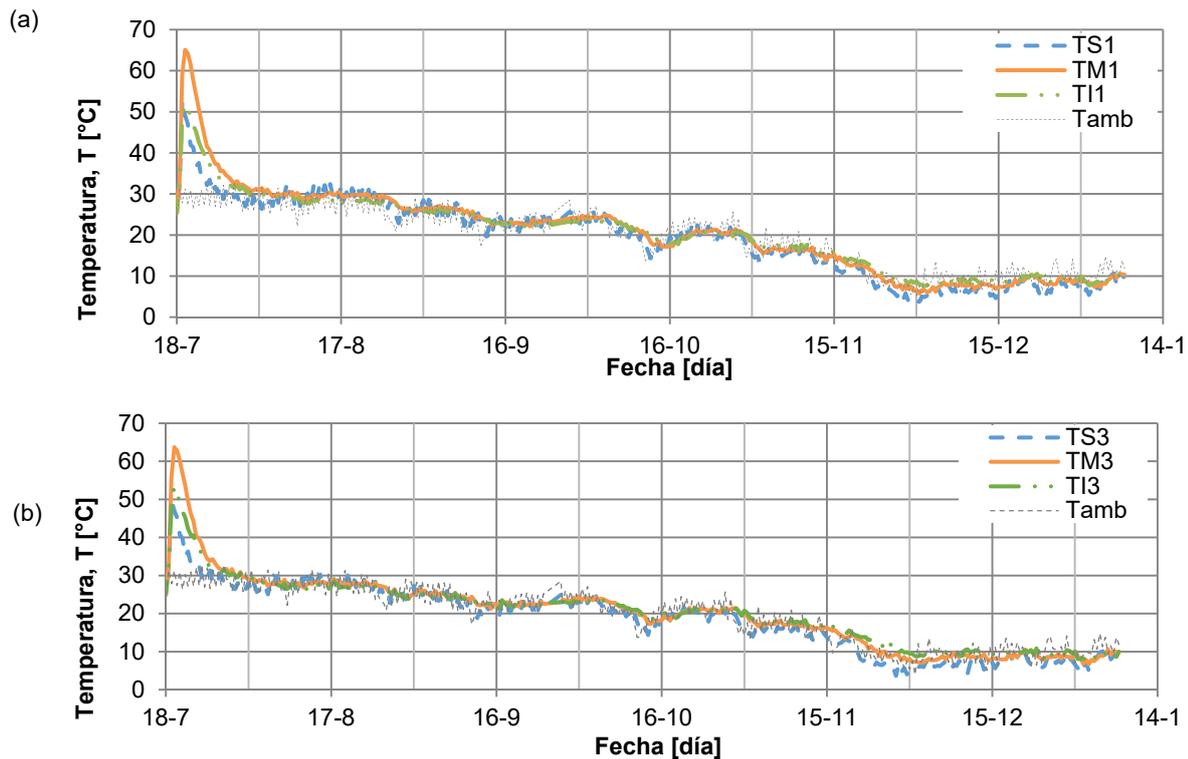


Figura 5. Registros térmicos en los datos 1 (a) y 3 (b).

En base a los registros de la [Figura 5](#) y a las inspecciones visuales, se concluye que:

- Las temperaturas máximas en la fibra media (TM) son poco sensibles a la dosificación, siendo de 65 °C para la D1 (310 kg/m³ de CEM 42.5R) y de 63 °C para la D3 (330 kg/m³ de CEM 32.5N). Si bien, estos valores de la temperatura deben considerarse adecuadamente, pues valores próximos a los 70 °C pueden activar un proceso de formación retardada de etringita.
- No se aprecian fisuras superficiales causadas por un potencial gradiente térmico excesivo. No obstante, en situación de hormigonado en tiempo frío, se estima que el gradiente térmico entre las fibras TI y TS (40 °C - 50 °C) y el ambiente (5 °C) puede alcanzar hasta los 3 °C/cm, y por tanto, el riesgo de fisuración aumenta sobremanera. Este aspecto también deberá tenerse en cuenta adecuadamente en el proceso y secuencia de hormigonado.
- El calor de hidratación se disipa transcurridos unos 10 días tras el hormigonado

Desafortunadamente, ninguna de las galgas embebidas en el hormigón registró datos coherentes de las deformaciones, siendo estas de expansión y con valores de hasta 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$, que indicarían degradación del hormigón. Se concluyó que los movimientos inducidos durante el hormigonado pudieron mover las galgas y desestabilizarlas. Por tanto, los resultados se han desestimado.

Por el contrario, las galgas ancladas en las barras de acero registraron lecturas coherentes. En la [Figura 6](#) se recogen los datos para los datos 1 y 3; los datos 2 y 4 presentan resultados homólogos.

Se puede observar que, pese a no haber impedimento físico de la transferencia de humedad con la cara superior en los datos 1 y 3 ([Figura 4](#)), se registra entumecimiento de hasta 125 $\mu\text{m}/\text{m}$ (dato 3) y 175 $\mu\text{m}/\text{m}$ (dato 1) cuando teóricamente cabía esperar retracción. Estos resultados son coherentes tanto en magnitud como en signo, pues durante el ensayo se produjeron varios eventos

de precipitación que inundaron la cara superior de los dados y, además, a menos de 10,0 m de distancia hay una balsa de decantación que genera un ambiente húmedo en las proximidades.

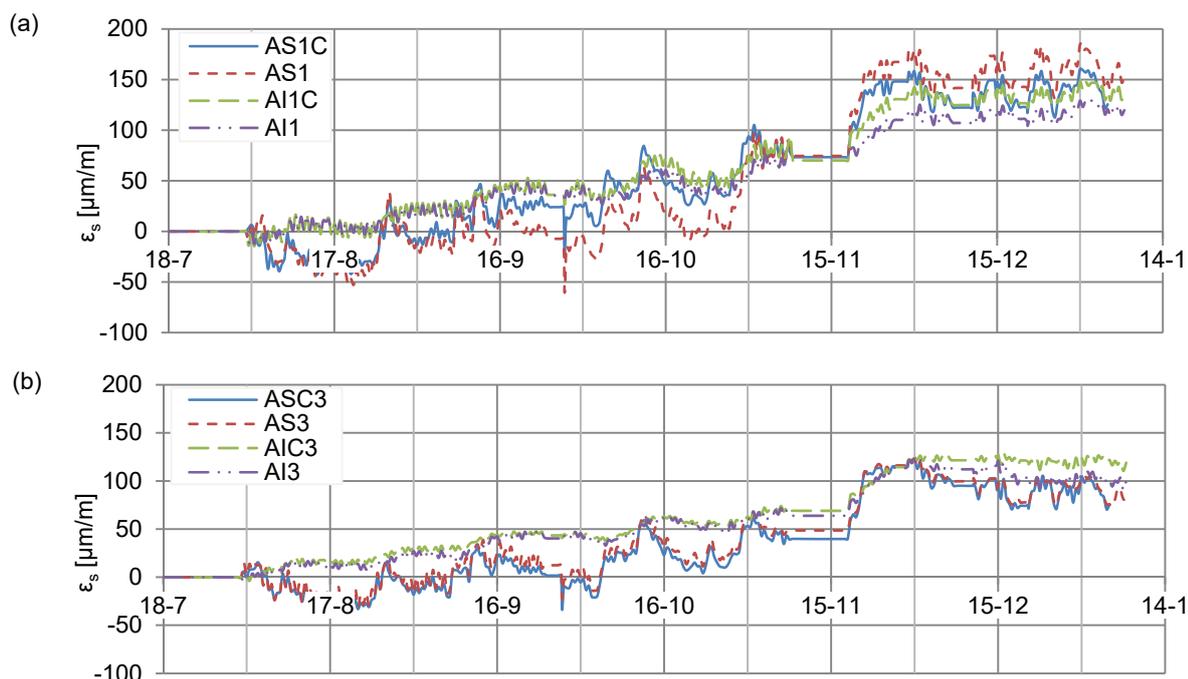


Figura 6. Registros de las deformaciones en la armadura de los dados 1 (a) y 3 (b).

Se pone de manifiesto que el proceso de transferencia de humedad de estos elementos masivos de hormigón es muy lento y depende de las condiciones de contorno en las que se produce el secado.

3. Simulación numérica de los ensayos

3.1. Transferencia de humedad

El proceso de difusión de la humedad desde el interior del hormigón hacia una superficie expuesta a una atmosfera no saturada está gobernado por la ecuación de Fourier. Se trata de una ecuación diferencial no lineal donde que para su resolución se plantea un esquema de diferencias finitas unidimensional (la transferencia de humedad es vertical) considerando las expresiones [8].

La cara superior de la losa se prevé que esté expuesta a $HR \approx 70\%$ hasta que no se ejecuten los forjados superiores y entre en servicio la estación. En este sentido, entre el hormigonado y la puesta en servicio pueden pasar varios meses. Posteriormente, se prevé que en la cara superior se ejecute un recrecido de hormigón, reduciéndose así el grado de transferencia de humedad. Sin embargo, de caras a la seguridad se considerará el valor de $HR = 70\%$.

En Figura 7 se presentan los perfiles $HR-z$ para distintos instantes de tiempo (hasta 100 años) así como la profundidad relativa del frente de secado (x_s/h , siendo x_s la profundidad de la fibra con $HR = 99\%$ y h el canto de la losa, 2,0 m).

Los resultados recogidos en la Figura 7 ponen de manifiesto que el proceso de transferencia de humedad es extremadamente lento (transcurridos 50 años, por ejemplo, el frente de secado apenas alcanzaría el 50% de profundidad) y, por tanto, el proceso se convierte en un fenómeno muy local. Sin embargo, el gradiente de HR en los primeros centímetros es elevado y el que puede conducir a la fisuración de las caras extremas, motivo por el que se requiere la armadura de piel.

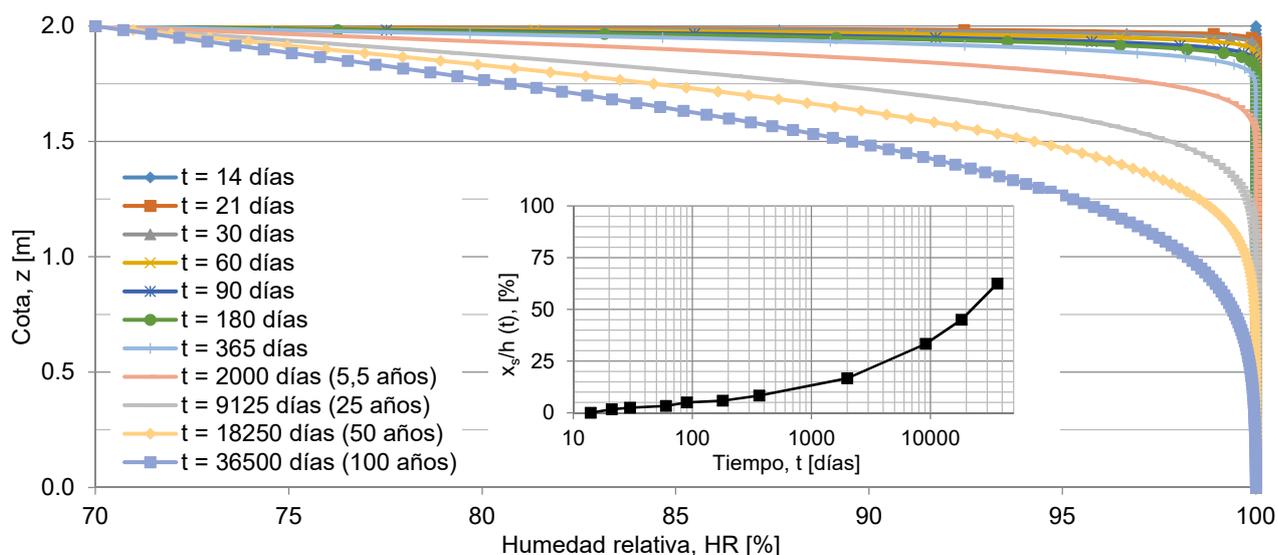


Figura 7. Perfiles de HR con el tiempo y profundidad relativa del frente de secado.

3.2. Estados tensionales

Los perfiles de humedad relativa presentados en la [Figura 7](#) se han obtenido independientemente del tipo de dosificación. Sin embargo, la evolución y magnitud de las tensiones depende de la dosificación, pues el potencial y evolución de la retracción dependen del tipo y cuantía de cemento, resistencia a compresión del hormigón y otros parámetros. Para estimar la evolución de la retracción en cada fibra de la losa y para cada dosificación se han empleado los perfiles de HR obtenidos y la formulación propuesta en [\[9\]](#).

Por otra parte, el fenómeno de transferencia de humedad conduce a un proceso de deformaciones diferenciales de retracción (deformaciones distintas en cada fibra) y, a su vez, a estados tensionales autoequilibrados. Asimismo, se activan procesos de fluencia del hormigón que requieren de modelos avanzados de análisis seccional para abordarlos. Para resolver este problema mecánico se ha recurrido al modelo numérico presentado en [\[10\]](#) y se ha considerado el comportamiento lineal del hormigón incluso tras la fisuración.

En la [Figura 8](#) se presenta la evolución de las tensiones en las fibras extremas de la losa ($h = 2,0$ m) para la dosificación D1 y la D2 así como la evolución del valor medio de la resistencia a tracción del hormigón, que depende del grado de hidratación (y por tanto del grado de humedad).

Los resultados de la [Figura 8](#) ponen de manifiesto que en las fibras extremas se generan tracciones de tracción desde el inicio del proceso de secado, siendo el valor máximo un 42% superior en el caso de la D1 ($6,0$ N/mm²) respecto la D2 ($3,5$ N/mm²). En cualquier caso, se prevé que haya fisuración en la cara superior y que se requiera, en consecuencia, armadura de piel.

Considerando que el bloqueo de las juntas se ejecuta a los 90 días y que en ese momento empieza a actuar el axil de tracción N_{ext} debido a la coacción lateral ([Figura 1](#)), la fisuración de la fibra inferior (la superior está fisurada) será la que indicará el instante en el que la sección puede estar sujeta a una rotura frágil si no se pone la armadura a tal efecto. En esta línea, se quiere evitar el uso de una cuantía superior a la geométrica y para ello es necesario saber a qué edad se estima la fisuración, pues será el margen de tiempo para ejecutar las plantas superiores. Las plantas superiores y las sobrecargas ejercen esfuerzos favorables en la losa de caras a reducir el riesgo de fisuración.

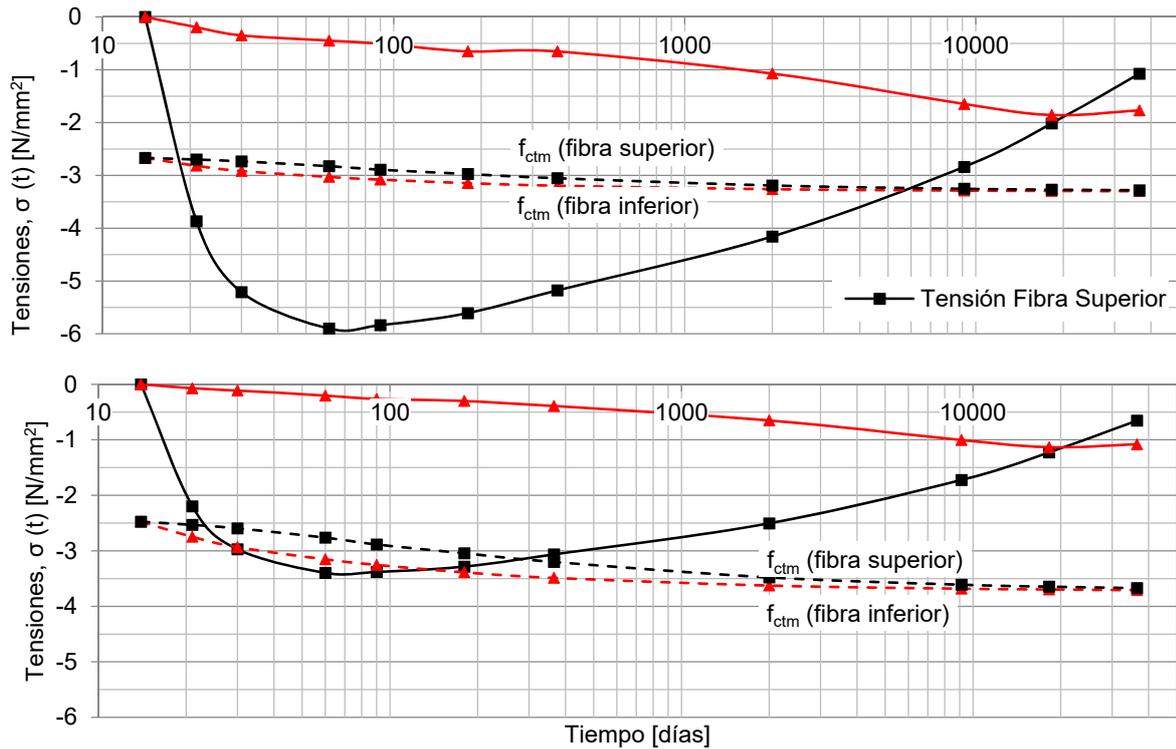


Figura 8. Evolución de las tensiones en las fibras extremas para las dosificaciones (a) D1 y b (D2).

En la Figura 9 se presenta la evolución de las tensiones de tracción en la fibra inferior para la D1. Se estima, con un coeficiente de seguridad de 2,0 para f_{ctm} , que la fisuración se produciría a los 8,5 años; tiempo máximo requerido para ejecutar la estación y ponerla en servicio.

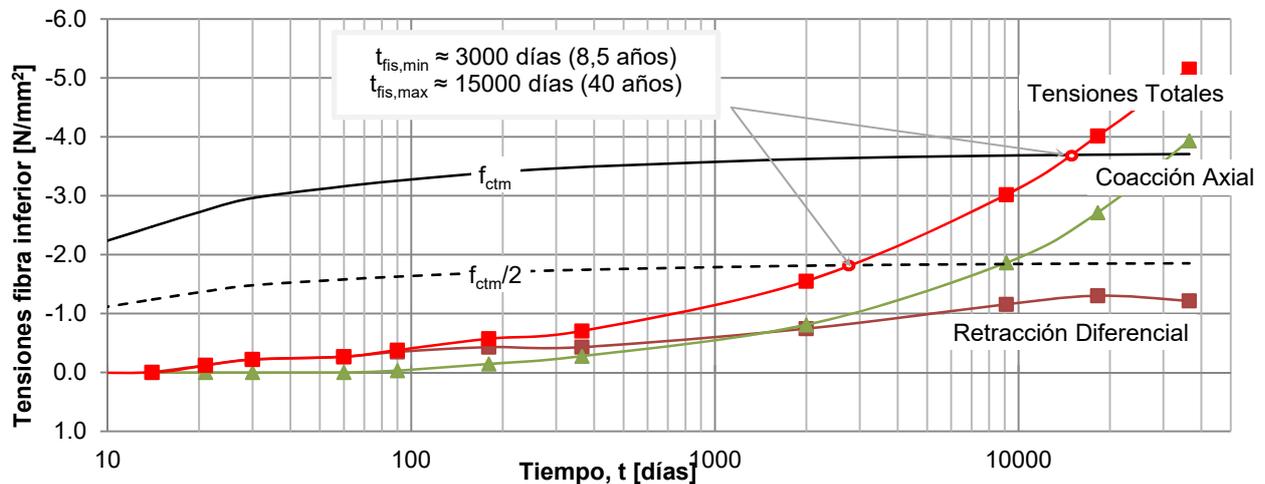


Figura 9. Evolución de las tensiones de tracción causadas por la retracción de secado y coacción.

3.3. Estimación de las cuantías mínimas de armadura

Para estimar las cuantías mínimas a disponer en cada cara de la losa se han integrado las tensiones de tracción en los bloques de tracción delimitados por z_{sup} y z_{inf} , obteniéndose las resultantes $F_{c,sup}$ y $F_{c,inf}$, respectivamente (Figura 10). Recurriendo al criterio que el ancho de fisura puede estar controlado a 0,25 mm si la tensión de trabajo de la armadura es inferior a un 60% de f_{yk} (500 N/mm²), se han obtenido las cuantías geométricas mínimas ($\rho_{s,min}$) a disponer en función de la dosificación.

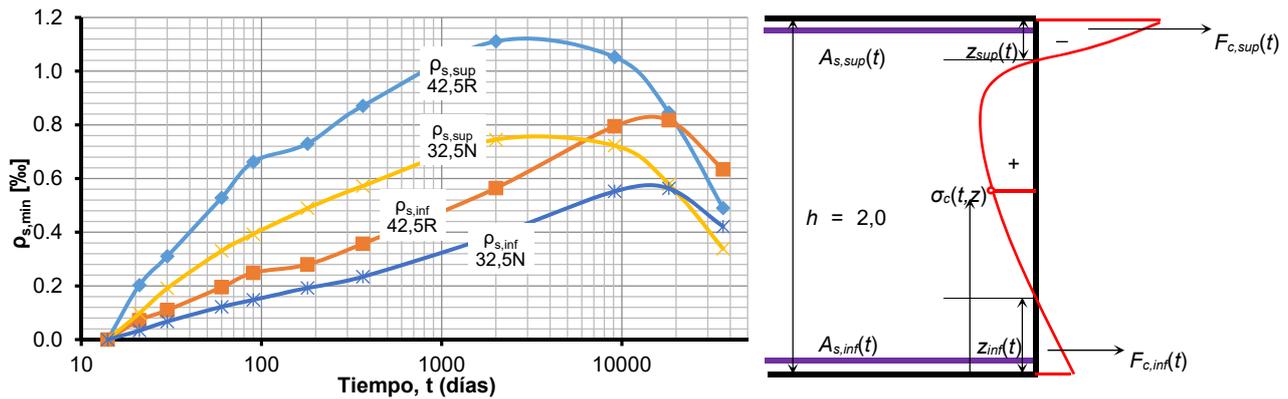


Figura 10. Cuantías geométricas mínimas en función del tipo de la dosificación.

4. Conclusiones

- El proceso de secado de la losa es muy gradual y, en consecuencia, la edad de bloqueo de las juntas no es un parámetro importante de cara a reducir los efectos estructurales de la retracción.
- Se desprende del análisis higro-mecánico que las cuantías geométricas en para la losa ejecutada con el CEM 42.5R son de 1,12‰ y 0,84‰ (total 1,96‰) en la cara superior e inferior, respectivamente; mientras que si se ejecuta con un CEM 32,5N las cuantías se reducen a 0,76‰ y 0,56‰ (total 1,32‰).
- Estas cuantías difieren con las establecidas en la EHE – 08 (1,80‰) y se sugiere su estudio particular para este tipo de elementos estructurales y, en particular, en función del canto y de las condiciones higrométricas a la que estará expuesta.

Referencias

- [1] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [2] A.I. Cuartero, Optimización del refuerzo frente a deformaciones termo-higrométricas de las losas estructurales de gran canto, Tesis de Master, Ingeniería de Caminos Canales y Puertos, UPC, 2014.
- [3] E. Mirambell, A. Aguado, Temperature and Stress Distributions in Concrete Box Girder Bridges, ASCE Journal of Structural Engineering. 116 (1990) 2388-2409.
- [4] E. Mirambell, J. Costa, Thermal Stresses in Composite Bridges According to BS 5400 and EC 1, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings.122 (1997) 281-292.
- [5] L. Agulló, E. Mirambell, A. Aguado, A Model for the Analysis of Concrete Dams due to Environmental Thermal Effects, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 6 (1996) 25-36.
- [6] M.D. Crespo, Comportamiento del hormigón armado a tempranas edades. Efectos estructurales de las deformaciones impuestas impedidas. Tesis Doctoral, UPC (Barcelona), 2011.
- [7] E. García, E. Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental. Tesis de Máster, UPM (Madrid), 2011.
- [8] Z.P. Bazant, Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete. Nueva York: John Wiley & Sons, 1988.
- [9] Z.P. Bazant, L. Panula, Practical prediction of time-dependent deformation of concrete. Part 1: Shrinkage. Part 2: Creep, Matériaux et Construction. 11 (1978) 307–328.
- [10] A. de la Fuente, A. Aguado, C. Molins, J. Armengou, Numerical model for the analysis up to failure of precast concrete sections, Computerts and Structures. 106-107 (2012) 105–14.