

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE TRAVIESAS DE FERROCARRIL POLIVALENTES DE HORMIGÓN PRETENSADO DURANTE SU FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

Montañés, A.¹; Donaire J.¹; Suárez, F.¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, EPS de Linares (Universidad de Jaén)
Campus Científico Tecnológico de Linares, Cinturón Sur, s/n 23700 Linares (España)

e-mail: ammontan@ujaen.es

RESUMEN

Las traviesas de hormigón pretensado utilizadas en la superestructura de vía para el transporte por ferrocarril se elaboran mediante procesos normalizados en fábricas de elementos prefabricados. Están compuestas fundamentalmente por hormigón, armadura activa para pretensado, armadura pasiva en zonas muy localizadas y vainas poliméricas que permiten alojar los tirafondos que forman parte del sistema de fijación de los carriles. Los agujeros de las vainas generan debilidades en los extremos de las traviesas debido a la alineación de huecos que presentan, duplicándose estos últimos en el caso de las traviesas polivalentes (permiten la colocación de carriles en ancho ibérico o internacional). Dado que el hormigón entre vainas suele carecer de armadura pasiva transversal, esta zona es susceptible de presentar fisuras longitudinales a lo largo de su vida útil, debido a las sollicitaciones que producen los diferentes tipos de acciones que actúan sobre la traviesa: par de apriete de los tirafondos, gravitatorias, pretensado, térmicas y dinámicas. En el presente estudio se analiza la influencia en la aparición de fisuras y su propagación en traviesas polivalentes ante el empleo de diferentes materiales que componen las vainas. En concreto, se analiza el período comprendido entre la fabricación y su puesta en obra, durante el que las principales sollicitaciones son debidas al pretensado y a variaciones térmicas que puedan darse en este período.

PALABRAS CLAVE: Hormigón pretensado, Traviesas de ferrocarril, Tirafondos, Fisuración longitudinal.

ABSTRACT

Prestressed sleepers used on the track superstructure of railways are manufactured by normalised processes in factories of precast elements. These elements are composed by concrete, prestressing wires, steel rebars in very localised regions and polymeric pods that allow attaching the fastening system of the railway to the sleeper by means of bolts. These holes weaken the concrete element in this region, doubling their number in the case of multipurpose sleepers (they allow fastening rails at two spacings, making them suitable for both, the Iberian and the International widths). Given that the concrete around the pods has no steel rebars, this region is more likely to develop longitudinal cracks between the pod holes during its service life due to different effects, such as the tightening torque of the bolts, gravity, prestressing loading, thermal variations or dynamic loading. In the present study the influence of using different materials for the pods on the appearance of longitudinal cracks and their propagation is analysed. More specifically, this study is focused on the time period between the manufacturing of the element and its placing on the railway, when the main effects are due to prestressing and possible thermal variations.

KEYWORDS: Prestressed concrete, Railway sleepers, Bolts, Longitudinal cracking.

1. INTRODUCCIÓN

Las traviesas de hormigón pretensado son los elementos encargados de transmitir las cargas procedentes de los vehículos móviles al terreno, por lo que son fundamentales para el buen funcionamiento de las vías de ferrocarril. Se trata de piezas que pueden ser consideradas como frágiles ya que cuentan con escasa o nula armadura pasiva, por lo que requieren de armadura activa para dotarlas de suficiente resistencia para

absorber los esfuerzos a las que estarán sometidas a lo largo de su período de vida útil.

La fisuración en este tipo de traviesas es un problema que se ha abordado en diferentes estudios desde hace varios años. Las más habituales son las fisuras longitudinales con origen en la zona de las vainas que sirven para el alojamiento de los tirafondos que forman parte del sistema de sujeción de los carriles. Surgen

como consecuencia del par de apriete de los tirafondos y de la carga de pretensado de los alambres [1] [2].



Figura 1. Fisuración longitudinal según el plano del eje de simetría vertical.

La fragilidad de estos elementos puede hacerlos sensibles a cambios, en principio aparentemente intrascendentes, en los materiales de los componentes de las mismas. Tal es el caso del empleo de materiales de diferente composición en las vainas, o bien de la utilización de áridos de procedencias diversas en la fabricación del hormigón.

En el presente estudio se ha analizado y modelizado una traviesa monobloque polivalente PR-10 para anchos entre railes de 1435/1668mm, homologada por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), según su especificación técnica [3].

Este tipo de traviesa, es simétrica respecto de los planos medios verticales longitudinal y transversal, posee una longitud de 2.600 mm y una altura total de 267 mm. La armadura activa está formada por cuatro alambres grafilados de 10,5 mm de diámetro. Para la sujeción y apoyo de los carriles dispone de cuatro vainas en cada lado.

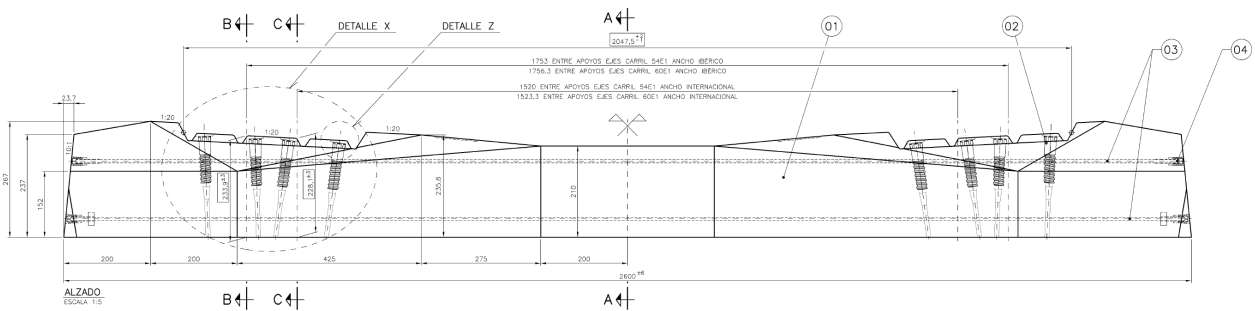


Figura 2.- Plano de alzado de traviesa PR-10. Fuente: Andaluza de Traviesas, S.A.

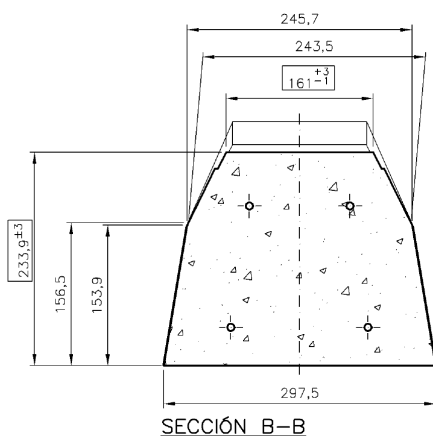


Figura 3.- Plano de sección de traviesa PR-10. Fuente: Andaluza de Traviesas, S.A.

su fabricación vainas y áridos de diferente composición. Se considera el periodo comprendido entre su fabricación y su puesta en obra. En ésta última, se tiene en cuenta únicamente la fase de posicionamiento a la intemperie de las traviesas sin apilamiento junto a la traza de la vía, previa a su colocación definitiva

2. SIMULACIÓN NUMÉRICA

2.1. Acciones y condiciones de contorno

Las traviesas polivalentes de hormigón pretensado son el resultado de un proceso de fabricación industrial controlado y normalizado. Las fases de construcción se resumen a continuación:

- Preparación y limpieza de los moldes metálicos para el alojamiento de dos traviesas de forma paralela.
- Montaje de los alambres de pretensado y de las vainas en los moldes.

El objeto de este artículo es el análisis del comportamiento mecánico de la traviesa al utilizar para

- Tesado individual de los alambres, que poseen un lado activo y otro con anclaje pasivo, mediante gatos hidráulicos de los alambres.
- Hormigonado y vibrado de los moldes, simultáneamente al vertido del hormigón.
- Curado de las traviesas alojadas en los moldes en estufas de curado dotadas de mecanismos para controlar de manera exhaustiva la humedad y la temperatura. Este proceso puede variar entre fabricantes y suele constar de diferentes etapas y escalones de temperatura, alcanzando temperaturas máximas en torno a los 50°C.
- Verificación de la resistencia del hormigón tras retirar los moldes de las estufas, y transferencia del pretensado de forma simultánea en todos los alambres.
- Desmoldeo de traviesas, presentación y colocación de piezas acodadas, placas de asiento, y elementos de sujeción tipo Voslooh. Dichos elementos quedan fijados mediante dos tirafondos, alojados en sus respectivas vainas, a los que se les aplica un ligero par de apriete.
- Paletización de traviesas y acopio en la cama de la planta de fabricación.

Las acciones consideradas en este estudio comprenden los estados de cargas desde el momento de la transferencia de la fuerza de pretensado, hasta el acopio en obra previo a la instalación de la traviesa en la vía.

En primer lugar, se ha considerado una carga de pretensado de 112,5 kN por alambre, que se transmite a toda la sección transversal de la traviesa. Esta carga se ha introducido como una deformación inicial de la armadura (0,0065) a tiempo infinito y sin considerar las pérdidas de pretensado. El valor de la carga se corresponde con la que habitualmente dispone un fabricante de traviesas.

Tras el pretensado las traviesas se someten a soleamiento, siendo en el período estival el caso más desfavorable, cuando se llega a un incremento de temperatura máximo de 48°C, tal y como se concluye en un informe elaborado por la empresa Intemac [4]. El incremento térmico se ha aplicado en escalones crecientes (8 etapas) de 6°C, a todos los materiales que componen la traviesa, considerando un régimen permanente y uniforme de temperatura en cada etapa.

No se ha considerado la acción generada por el par de apriete de los tirafondos. Aunque éstos están colocados en las vainas, el par de apriete con el que se colocan es de 15 N·m, que es prácticamente despreciable respecto del par de apriete de 220 N·m, aplicado en la puesta en obra definitiva.

2.2. Componentes de la traviesa

El modelo numérico, tal y como se puede apreciar en la figura 4, se corresponde con 1/4 de la traviesa, ya que

ésta presenta doble simetría axial y transversal tanto en su geometría como en las cargas. Las condiciones de contorno establecidas son apoyos simples en los bordes que se corresponden con los ejes de simetría. Los elementos que componen el modelo de la traviesa, en los que se ha considerado que existe una buena adherencia en el contacto entre ellos, son los siguientes:

- Hormigón en el extremo y en la zona de las vainas con espesor 210 mm (color azul). La parte central (color naranja) se ha modelizado con un espesor de 120mm.
- Los huecos interiores de las vainas tienen un radio de 10,56mm y un espesor de 120 mm.
- Las vainas (color morado) tienen un espesor de 120 mm y un grosor medio en la dirección radial de 4,59 mm.
- Los tirafondos (color magenta) tienen el mismo espesor que las vainas, 120 mm.
- El acero modelizado es el que se corresponde con dos alambres de 10,50 mm de diámetro.

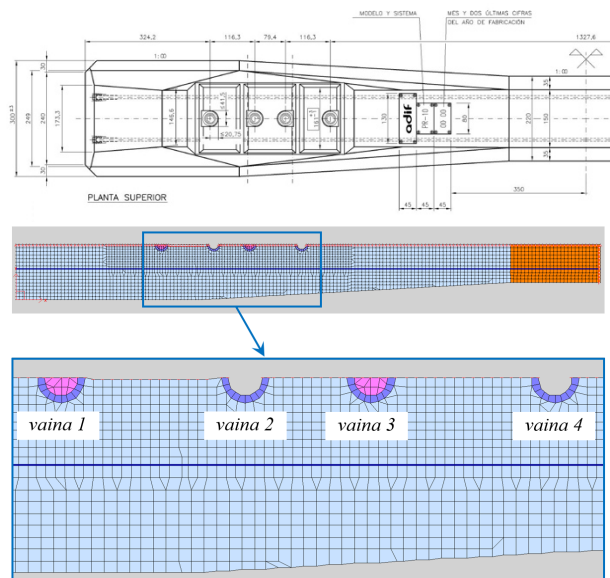


Figura 4. Detalle de 1/4 de traviesa para la obtención del modelo de elementos finitos en tensión plana, con tirafondos alojados en las vainas 1 y 3.

En cuanto al hormigón que conforma la traviesa, se ha considerado el empleo de dos tipos de hormigón con resistencia característica a compresión a 28 días de 60 N/mm² pero con áridos de diferente procedencia: calizo y silíceo. Respecto a la composición del material de las vainas se han analizado tres tipos: Polietileno de alta densidad (Vaina V1), Poliamida (Vaina V2), Poliamida reforzada con fibra de vidrio (Vaina V3).

Las propiedades mecánicas de los materiales empleados en los modelos de numéricos se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales introducidos en el modelo numérico

Material	f_{cy} [N/mm ²]	f_{ty} [N/mm ²]	E [N/mm ²]	ν	α [°C ⁻¹]
HP-60_C	60	4,05	34.694	0,20	8,5e ⁻⁶
HP-60_S	60	4,05	34.694	0,20	13e ⁻⁶
Vaina V1	160	160	1.000	0,39	200e ⁻⁶
Vaina V2	160	160	3.200	0,39	100e ⁻⁶
Vaina V3	160	160	11.000	0,39	100e ⁻⁶
Acero tirafondos	500	500	200.000	0,30	10e ⁻⁶
Acero pretensado	1.335	1.335	200.000	0,30	10e ⁻⁶

Donde:

f_{cy} : límite elástico de compresión.

f_{ty} : límite elástico de tracción. En el caso del hormigón es la resistencia a tracción resultante de aplicar un factor de 0,9 sobre la resistencia a tracción indirecta obtenida del Ensayo Brasileño (Artículo 31.3 de la EHE [5]).

E : Módulo de elasticidad.

ν : Coeficiente de Poisson.

α : Coeficiente de dilatación térmica. (Los valores adoptados para el hormigón calizo y silíceo son similares a los que propone J. Calavera [6])

2.3. Modelo numérico

El proceso de cálculo de la travesía se ha realizado considerando el comportamiento no-lineal del hormigón, utilizando para ello el software VecTor2 [7]. Se ha utilizado para el mismo, un modelo constitutivo elasto-plástico (Parábola (*pre-peak*) y *Modified Park-Kent* (*post-peak*) para compresión; y *Linear Tension Softening* (*post-peak*) para tracción, dado que se trata de un hormigón en masa). La respuesta a los esfuerzos de tracción que considera el modelo de *Linear Tension Softening* (*post-peak*) tiene en cuenta la presencia de tensiones de tracción tras la fisuración del hormigón en masa, según se puede apreciar en la figura 5. La formación de una rotura localizada requiere energía, de forma que a medida que la fisura crece, el hormigón próximo va disminuyendo su tensión, propagándose la energía disipada. La energía de fractura por unidad de superficie considerada en el modelo para la formación de una fisura es de 75 N/m. En relación con el acero y los materiales de las vainas, se ha considerado un modelo elástico, ya que no se prevé la plastificación de estos materiales, tal y como se ha podido comprobar.

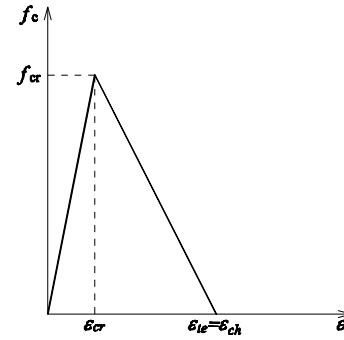


Figura 5. Linear Tension Softening

El modelo de cálculo por elementos finitos supone la formación de fisuras de acuerdo con la Teoría de Fisuras Difuminadas (TFD; *Smearred Crack Theory*). La TFD se apoya en la Teoría de Campo de Tensiones Modificadas [8], que tiene en cuenta la variación de la resistencia a compresión del hormigón entre fisuras. En este estudio se contempla la reorientación de la fisura en función de las direcciones principales de tensiones que estarán alineadas con las homólogas principales de deformación.

Dado que la rotura en un punto del material se desarrolla tomando como valores de referencia los de la deformación principal y que ésta debe traducirse en valores de apertura de fisura, se ha de emplear una longitud de referencia, L_r , dentro del elemento que permita esta conversión, longitud que coincide con la dimensión del elemento en la dirección perpendicular a la fisura [9].

3. RESULTADOS

En los seis modelos estudiados, que combinan los dos tipos de hormigón con los tres tipos de vainas definidos anteriormente, se puede apreciar que para el estado de cargas debido a la transferencia de la fuerza de pretensado al hormigón, que es previo al incremento de temperatura, se obtienen valores de tracción inferiores a la resistencia de tracción del hormigón en los elementos próximos a las vainas. En esta etapa no se producen fisuras en el entorno de las vainas.

En las etapas de cálculo que representan los ocho escalones de incremento de temperatura, hasta llegar al máximo de incremento de 48° C, se ha podido comprobar que el modelo comienza a fisurar junto a las vainas 1 y 3, progresando la fisura entre todas las vainas y hacia el extremo de la travesía.

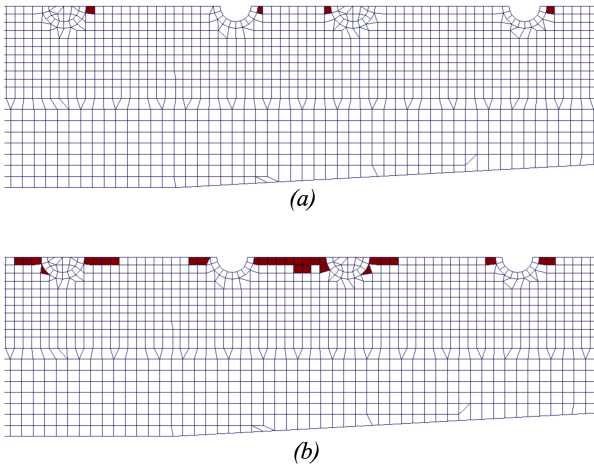


Figura 6. Comienzo de la fisuración $\Delta T 6^\circ\text{C}$ (a) y progresión de la fisura $\Delta T 24^\circ\text{C}$ (b). (En rojo, elementos finitos fisurados).

Se ha analizado también la evolución de la fisuración de uno de los elementos finitos situados entre las vainas más próximas entre sí, que son la 2 y 3, (elemento 1) y en un elemento finito situado entre el extremo de la traviesa y la vaina 1 (elemento 2). El valor de apertura de fisura, w , obtenido a partir de los valores de deformación máxima del modelo de elementos finitos 2D, tiene carácter aproximado por defecto. Esto se debe, fundamentalmente, a la simplificación de utilizar un modelo 2D de elementos finitos para representar el comportamiento mecánico de la traviesa. En dicho modelo, la fisuración se manifiesta en todo el espesor de la pieza, con un valor w constante. Experimentalmente [4], se constató que el valor máximo alcanzado por w para un incremento de temperatura de 48°C fue de 0.05 mm y no en todo el espesor de la traviesa. El correspondiente valor máximo de w en el modelo numérico fue de 0.037 mm.

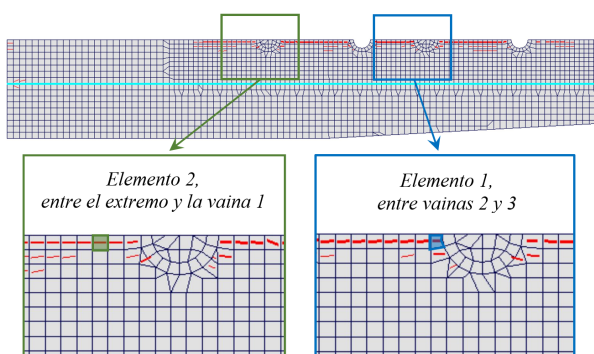


Figura 7. Elementos finitos analizados. Las líneas rojas simbolizan las fisuras y su dirección en cada elemento.

En las Figuras 8 y 9 se muestra la evolución de la apertura de fisura en los elementos 1 y 2 respectivamente para los casos de árido calizo (C) y

silíceo (S) y para las tres vainas consideradas (V1, V2 y V3).

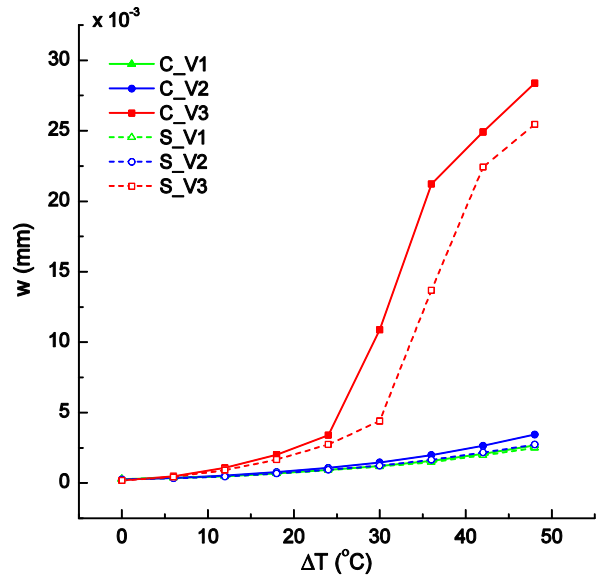


Figura 8. Evolución de w del elemento 1 (situado entre las vainas 2 y vaina 3).

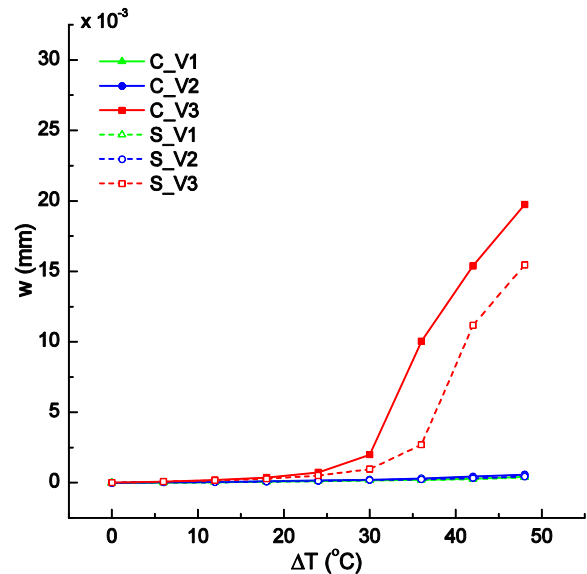


Figura 9. Evolución de w del elemento 2 (situado entre el extremo de la traviesa y la vaina 1).

Tal y como se puede apreciar, w sigue una progresión no lineal, y se acentúa a partir de un incremento de temperatura superior a 24°C , sobre todo en las vainas tipo V3 (de poliamida reforzada con fibra de vidrio). Asimismo, en los modelos en los que se ha empleado hormigón con árido silíceo, w siempre es menor que en los de árido calizo.

Los valores extremos de fisura apreciados son del orden de 0,028 mm para el modelo de hormigón con árido calizo y vainas tipo V3, y de 0,025 mm para el modelo de hormigón con árido silíceo y vainas tipo V3. No obstante, en el caso de la vaina V3, que es la que produce mayores aperturas de fisura tanto para ambos tipos de áridos, es destacable las diferencias que se producen bajo determinados incrementos de temperatura. Por ejemplo, en el rango de incrementos de temperatura entre 30 y 36°C, las aperturas de fisura son del entorno al doble en el caso de emplear árido calizo respecto al árido silíceo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que las traviesas de hormigón son muy sensibles a las propiedades de los materiales que la componen y especialmente a los materiales en los que el coeficiente de dilatación térmica es mucho mayor que el del hormigón. Éstas pueden considerarse como muy frágiles como consecuencia de la inexistencia de armadura pasiva y del empleo de hormigones de alta resistencia.

Los valores de apertura fisura observados en los modelos numéricos que se representan pueden considerarse como valores medios debido a las leyes constitutivas consideradas en el cálculo. Estos valores muestran que el material de las vainas que alojan los tirafondos de sujeción de los raíles puede ser determinante en la aparición de fisuras debidas a efectos térmicos. De entre las vainas analizadas, las vainas de polietileno y de poliamida no parecen inducir fuertes tensiones en el hormigón y la fisuración presenta valores bajos incluso para altos incrementos de temperatura. Por el contrario, la vaina de poliamida con fibra de vidrio, debido a su alto módulo elástico, induce unas tracciones mucho mayores y provoca una fisuración notable en el hormigón.

Por otra parte, los hormigones de árido silíceo presentan w menores que los de árido calizo. Éstas son entre el 7 y el 25 % menores para el caso de mayor incremento de temperatura estudiado. No obstante, es importante destacar que, para incrementos intermedios de temperatura, entre 30 y 36° C, esta diferencia de apertura de fisuras llega a ser del orden del 50%.

Finalmente, cabe llamar la atención sobre el hecho de que en este estudio no se han tenido en cuenta algunos efectos, como el par de apriete final de los tirafondos o las cargas producidas por el paso de vehículos, por lo que es previsible que la fisuración se vea acentuada bajo esas circunstancias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa Andaluza de Traviesas, S.A (Antrasa), por facilitar el acceso a sus instalaciones, mostrar el proceso de producción de las traviesas, y facilitar documentación técnica en relación con los materiales empleados en la fabricación.

REFERENCIAS

- [1] J. Taherinezhad, M. Sofi, P. A. Mendis, and T. Ngo, "A review of behaviour of Prestressed concrete sleepers," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 13, no. 1. pp. 1–16, 2013.
- [2] S. A. Edisy, "Investigation on the Causes of Longitudinal Cracks on Prestressed Monoblock Railway Sleepers of Metric Gauge of," *System*, vol. 1, no. 8, 2008.
- [3] ADIF, "ET 03.360.571.8. Especificación Técnica. Traviesas Monobloque de Hormigón," 2018.
- [4] INTEMAC, "Informe sobre los resultados de la comprobación experimental del comportamiento de traviesas, frente a la exposición por cambios térmicos, efectuada para el estudio de las causas de la fisuración observada en traviesas fabricadas en la factoría de Antrasa," 2018.
- [5] M. Fomento, "Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)," 2008.
- [6] J. Calavera Ruíz, *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón: en masa, armado, pretensado*, 2ª Edición. Intemac, 2008.
- [7] P. S. Wong, F. J. Vecchio, and H. Trommels, *VecTor2 and FormWorks user's manual*. 2013.
- [8] F. J. Vecchio and M. P. Collins, "The Modified Compression Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear," *ACI Struct. J.*, vol. 83, pp. 925–933, 1986.
- [9] Z. P. Bažant, "Concrete fracture models: Testing and practice," *Eng. Fract. Mech.*, 2001.