

# ESTUDIO NUMÉRICO DE LA FISURACIÓN DE TRAVIESAS MONOBLOQUE POLIVALENTES DE HORMIGÓN PRETENSADO INSTALADAS EN LA VÍA

J. Donaire-Ávila<sup>1</sup>, J.F. Aceituno<sup>1</sup>, F. Suárez<sup>1\*</sup>

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

\* Persona de contacto: [fsuarez@ujaen.es](mailto:fsuarez@ujaen.es)

## RESUMEN

Las traviesas monobloque polivalentes de hormigón pretensado permiten adoptar tanto anchos de vía estándar (1435 mm) como ibérico (1668 mm). Se ha observado en ellas la presencia de fisuración longitudinal, tanto en las acopiadas como en las instaladas en la vía. En este estudio se analiza la evolución en la apertura de fisura durante las fases de fabricación, acopio e instalación en la vía (incluyendo la neutralización de tensiones y la fijación de carriles), considerando las acciones térmicas y mecánicas del proceso, excluyendo las producidas por el ferrocarril. Se utiliza para ello un modelo numérico no-lineal validado experimentalmente. Se evalúa el grado de fisuración de traviesas fabricadas con hormigón de árido calizo y vainas poliméricas de alto módulo de deformación para la fijación directa de carriles mediante el sistema SKL. Los resultados muestran que el grado de expansividad térmica y de rigidez de las vainas junto con el nivel de la temperatura ambiente son aspectos que influyen de forma determinante en el nivel de fisuración y en la capacidad para la fijación de las traviesas, sobre todo en aquellas fabricadas en época fría e instaladas en ambiente cálido.

**PALABRAS CLAVE:** Traviesas monobloque pretensadas, fisuración, temperatura, modelo fisuración difusa.

## ABSTRACT

Multipurpose monoblock prestressed sleepers allow for the installation of rails in both Standard-gauge (1435 mm) and Iberian-gauge (1668 mm) railway tracks. Longitudinal cracking has been observed in both stockpiled and track-installed sleepers of this type. This study analyzes the evolution of crack opening in sleepers during the phases of manufacturing, stockpiling and track installation (including stress-neutralization and fastening of the rails), considering the thermal and mechanical loads, but excluding live loads from trains. An experimentally validated nonlinear numerical model is used for this analysis. The degree of cracking is analyzed in sleepers fabricated with concrete using carbonate aggregate and high elastic modulus polymeric dowels embedded in the concrete for direct rail fastening, using the SKL system. The results show that the degree of thermal expansion and the stiffness of the dowels, along with the ambient temperature, significantly influence the level of cracking and the fastening capacity of the sleepers, particularly of those manufactured in cold weather and installed in a warm environment.

**KEYWORDS:** Monoblock prestressed sleepers, cracking, temperature, smeared crack model.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las traviesas de ferrocarril son elementos estructurales cruciales para la estabilidad y seguridad de las vías, redistribuyendo cargas y manteniendo la geometría del trazado. Las polivalentes de hormigón pretensado, utilizadas en España, permiten al operador de infraestructuras configurar dos posibles anchos de vía—Ibérico (1668 mm) o estándar (1435 mm)—según el tipo de tráfico ferroviario. Su durabilidad es fundamental para reducir costes y el impacto ambiental [1]. Uno de los principales desafíos es la fisuración, que puede originarse por la acción del ferrocarril, la acción del clima y la de los sistemas de sujeción. Estudios previos han demostrado que un par de apriete excesivo de la sujeción [2] y el empleo de materiales de anclaje con alto módulo

elástico y expansión térmica sometidos a incrementos de temperatura [3] pueden incrementar la fisuración. El objetivo de este trabajo es analizar la evolución de la fisuración longitudinal en traviesas monobloque polivalentes de hormigón pretensado, desde la fabricación hasta su puesta en obra, considerando la carga de pretensado, las variaciones de temperatura durante el acopio y la instalación sobre la vía y el par de apriete utilizado para la fijación de carriles.

## 2. TRAVIESA POLIVALENTE DE REFERENCIA

Las traviesas polivalentes de hormigón pretensado consideradas en este estudio incluyen el sistema de sujeción elástica y directa SKL (Figura 1). Como se

puede observar, cuenta con cuatro vainas que permiten el anclaje de dos tirafondos, en la configuración de ancho ibérico o estándar, que se utilizan para fijar el carril a la traviesa a través del clip elástico SKL-1. En este caso, se presenta la configuración para el ancho ibérico que será el analizado en este estudio.

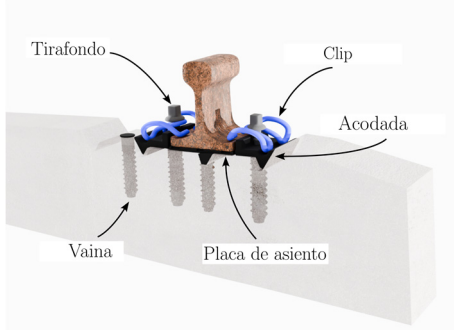


Figura 1. Sistema de sujeción SKL.

La Figura 2 muestra información sobre la geometría y los componentes de la traviesa polivalente, presentando solo la mitad de ella por su simetría. Es un elemento de hormigón en masa con cuatro barras de acero para pretensar de 10.5 mm de diámetro.

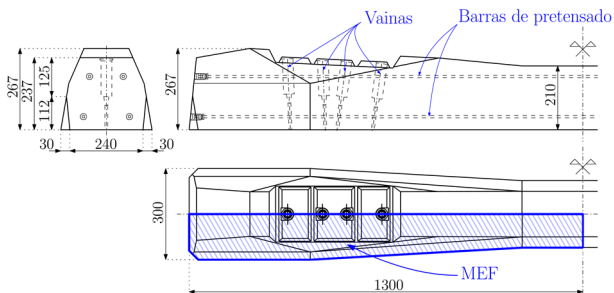


Figura 2. Geometría y componentes de la traviesa.

### 3. MODELO NUMÉRICO DE LA TRAVIESA

El modelo numérico es de tensión plana—en adelante MEF-2D—en el que, aprovechando la doble simetría de la traviesa, representa un cuarto de la misma (área sombreada en azul en la Figura 2). En la Figura 3 se muestra un detalle del MEF-2D en el que se incluyen: (i) las condiciones de contorno B.C.1 y B.C.2 en las que se determina el desplazamiento horizontal ( $u$ ), el vertical ( $v$ ) y el giro ( $\theta_z$ ) de los nodos de los bordes en los ejes de simetría; (ii) elementos finitos de hormigón en color azul

claro y rojo que corresponden a espesores de la traviesa de 230 mm y 210 mm, respectivamente; (iii) elementos finitos de vainas poliméricas y tirafondos en color azul oscuro y magenta, respectivamente, con espesores de 210 mm; (iv) elementos *truss* conectados a los elementos 2D de hormigón, para representar la línea de centro de gravedad de las dos barras de pretensado incluidas en el MEF-2D, con la deformación inicial necesaria para alcanzar la fuerza de pretensado de proyecto.

Además, en la Figura 3 se han indicado cinco zonas de elementos finitos junto al eje a lo largo de B.C.1, identificadas como  $Z_1$  a  $Z_5$  que se utilizarán para describir el proceso de fisuración longitudinal de la traviesa. Únicamente se contempla el comportamiento no-lineal en el hormigón, dado que se constata que el resto de materiales no llegan a plastificar para el conjunto de acciones previstas en este estudio. El modelo constitutivo a compresión es el de Popovics-Thorenfeldt y para tracción se considera un modelo de fisuración difusa (*smearred crack*) con curva de ablandamiento lineal. Para el comportamiento histerético se considera el modelo de Ramsberg-Osgood para descarga y el lineal para recarga.

El modelo así definido, considerando una resistencia a compresión del hormigón de 60 MPa y de tracción de 4.05 MPa (según datos del fabricante de traviesas), fue validado experimentalmente [3].

### 4. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA TRAVIESA SOMETIDA AL PAR DE APRIETE DE LOS TIRAFONDOS

#### 4.1. Relación entre el par de apriete y axil del tirafondo

Los carriles se fijan a las traviesas aplicando un par de apriete  $T$  a los tirafondos de la sujeción que se ven sometidos a una fuerza axial  $N_t$  cuando finalmente quedan fijados entre la vaina y el clip SKL-1. La relación entre  $T$  y  $N_t$  es la siguiente:

$$T = KN_t\phi_{M,t} \quad (1)$$

donde  $\phi_{M,t}$  es el diámetro mayor de la rosca del tirafondo (= 22 mm) y  $K$  es el coeficiente del par de torsión. La determinación de  $K$  para la sujeción SKL se hizo de forma experimental en el laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Jaén, midiendo la secuencia de par de apriete y deformación del clip SKL-

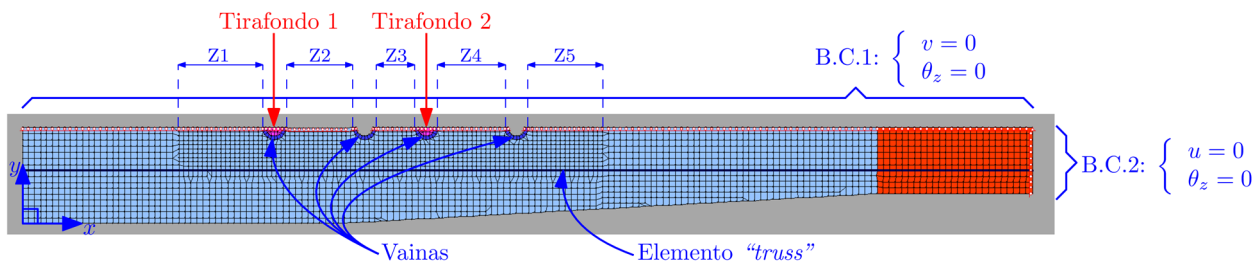


Figura 3. Modelo de elementos finitos (Vector 2).

1 para fijar una porción de carril UIC-55 a una traviesa polivalente con vainas de poliamida. Se utilizaron clips esmaltados y tirafondos zincados, tanto nuevos como utilizados en servicio. El par de apriete se obtuvo mediante llave dinamométrica con registro continuo de datos. El axil del tirafondo se obtuvo de forma indirecta como sigue: (i) se midió experimentalmente el desplazamiento vertical del clip SKL-1,  $v_c$ , al aplicar la secuencia de par de apriete, utilizando relojes comparadores analógicos y digitales; (ii) se utilizó la relación empírica  $N_t - v_c$  obtenida en LADICIM [4]. Se obtuvo un valor de  $K = 1.06$  tanto en las sujeciones nuevas como en las que habían estado en servicio.

#### 4.2. Tensiones generadas por el sistema de sujeción en la traviesa

La Figura 4a muestra un esquema de las tensiones normales que generan las vainas de la sujeción SKL en el hormigón circundante de la traviesa. Teniendo en cuenta el carácter helicoidal de la superficie de contacto de la vaina con el hormigón, el valor de la tensión radial que genera la vaina sobre el hormigón,  $\sigma_r$ , se calcula como sigue:

$$\sigma_r = \frac{N_t}{S_{tot}} \tan \theta \quad (2)$$

donde  $S_{tot}$  es el área de la superficie helicoidal de la vaina en contacto con el hormigón y  $\theta$  es el semi-ángulo de rosca (Figura 4a) que es de  $45^\circ$  para el tipo de vaina utilizada.

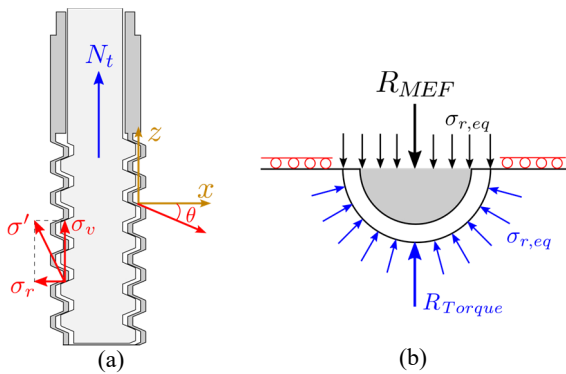


Figura 4. Tensiones generadas en el hormigón por la sujeción (a) y modelo equivalente en tensión plana (b)

En la Figura 4b se muestra un detalle de la vaina con tirafondo en el MEF-2D, indicando en color azul la acción del hormigón sobre la vaina, donde  $\sigma_{r,eq}$  es la tensión radial equivalente a  $\sigma_r$  que produce la misma resultante considerando la geometría simplificada de la vaina del MEF-2D. La relación entre  $\sigma_{r,eq}$  y  $\sigma_r$  es la siguiente:

$$\sigma_{r,eq} = \frac{\sigma_r S_{tot}}{\pi \phi_{M,v} l_v} \quad (3)$$

donde  $\phi_{M,v}$  es el diámetro de la vaina en el MEF-2D and  $l_v$  es la longitud de la vaina.

#### 4.3. Simulación del par de apriete mediante modelo térmico equivalente

Las tensiones de compresión generadas por la vaina debido al par de apriete,  $\sigma_r$ , pueden estimarse de forma equivalente en el MEF-2D aplicando incrementos de temperatura equivalentes tanto a la vaina como al tirafondo,  $\Delta T_{eq,v}$  y  $\Delta T_{eq,t}$ , respectivamente. Dado que la vaina y el tirafondo tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica,  $\alpha_v$  y  $\alpha_t$ , se considerará la relación  $\Delta T_{eq,v} = \Delta T_{eq,t} \alpha_t / \alpha_v$  para que la dilatación sea uniforme. El valor teórico de la resultante que ejerce el hormigón sobre la vaina en el MEF-2D (Figura 4b), aplicando las Ecuaciones 1, 2 y 3, es:

$$R_{Torque} = \sigma_{r,eq} \phi_{M,v} l_v = T \tan \theta / (K \phi_{M,t} \pi) \quad (4)$$

El valor de la tensión en el borde de contacto simplemente apoyado (B.C.1, Figura 3) del sistema vaina-tirafondo del MEF-2D será igualmente  $\sigma_{r,eq}$  y su resultante  $R_{MEF}$  (Figura 4b). El objetivo es determinar  $\Delta T_{eq,v}$  y  $\Delta T_{eq,t}$  tal que, una vez aplicado en el MEF-2D, la resultante teórica del hormigón sobre la vaina,  $R_{Torque}$ , sea igual a la que se produzca en el MEF-2D, esto es,  $R_{MEF}$ .

### 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO COMPLETO DE INSTALACIÓN DE TRAVIESAS

La simulación numérica contempla el conjunto de acciones mecánicas y térmicas que actúan sobre la traviesa desde su fabricación hasta su puesta en obra en la vía. Por tanto, se contempla acoplamiento entre el comportamiento mecánico y el térmico. Los diferentes casos de carga de las simulaciones numéricas, contemplan las diferentes fases del proceso completo de instalación de las traviesas, que son las siguientes:

- **Fabricación.** Se consideran tres valores de temperatura de fabricación,  $T_f$ , que son 10, 20 y 30 °C, correspondientes a los meses de invierno, primavera/otoño y verano, respectivamente. Durante esta fase se aplica el pretensado para alcanzar un valor de proyecto en la traviesa de 450 kN (112.5 kN por barra), que corresponde a 225 kN aplicados en el elemento *truss* del MEF-2D.
- **Acopio.** se contemplan seis estados posibles [3], con una temperatura,  $T_f + \Delta T_a$ , donde  $\Delta T_a$ : 10, 20, 30, 40, 50 y 60 °C.
- **Instalación en la vía y neutralización de tensiones en carriles.** Las traviesas son colocadas sobre el balasto de la vía, considerando como temperatura de instalación,  $T_i$ , la de neutralización de tensiones de los carriles,  $T_n$ , paso previo a su fijación sobre la traviesa. En este estudio se contempla la neutralización mediante calentamiento solar, en el que los carriles dilatan y se mueven libremente sobre las traviesas hasta alcanzar  $T_n$ , instante en el que son fijados a las mismas. Se considera  $T_n = 30$  °C, que es

un valor intermedio entre 24 y 37 °C contemplados para la red ferroviaria española [5]. Por lo tanto,  $T_i = T_n = T_f + \Delta T_i$ , lo que implica que  $\Delta T_i$  puede alcanzar 0, 10 and 20 °C para traviesas fabricadas en verano, primavera o invierno, respectivamente.

- **Fijación de carriles.** Cuando se alcanza  $T_n$  se fijan los carriles a la traviesa de forma secuencial, con un par de apriete nominal de 220 Nm [6]. Primero se fija el tirafondo 2 (T2) y posteriormente el tirafondo 1 (T1) (ver Figura 3).

En este estudio se consideran vainas de poliamida reforzadas con fibra de vidrio (35%) de alto módulo con un espesor medio de 4.6 mm y hormigón de árido calizo. Las propiedades de los materiales que se utilizan en la traviesa se recogen en la Tabla 1, donde  $f_{cp}$  y  $f_{tp}$  son los valores máximos de compresión y tracción,  $E$  es el módulo de deformación,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson y  $\alpha$  el coeficiente de dilatación térmica.

Tabla 1. Propiedades de los materiales

Material	$f_{cp}$ (MPa)	$f_{tp}$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\nu$	$\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )
Hormigón (HP-60-C)	60	4.05	34,694	0.20	$6 \cdot 10^{-6}$
Acero Pretensado	1335	1335	200,000	0.30	$10 \cdot 10^{-6}$
Acero Tirafondo	500	500	200,000	0.30	$10 \cdot 10^{-6}$
Vaina poliamida	120	120	11,000	0.39	$10 \cdot 10^{-5}$

Se llevaron a cabo diferentes simulaciones no-lineales utilizando el software Vector 2 [7], en las que se establecieron cinco casos de carga: (i) pretensado a la temperatura  $T_f$  (fabricación); (ii)  $\Delta T_a$  (acopio); (iii)  $\Delta T_{ia} = \Delta T_i - \Delta T_a$  (instalación y neutralización); (iv) fijación de T2 a  $T_n$ ; (v) fijación de T1 a  $T_n$ .

## 6. ANÁLISIS DE LA FISURACIÓN DE LAS TRAVIESAS

### 6.1. Fabricación

Las traviesas mostraron un comportamiento lineal y elástico con ausencia de fisuración, excepto en las zonas de anclaje de las barras de pretensado, en los extremos de la traviesa.

### 6.2. Acopio

La Figura 5 muestra la apertura de fisura y la tensión principal de tracción,  $\sigma_{t1}$ , obtenida del MEF-2D para  $\Delta T_a = 20$  °C y  $\Delta T_a = 30$  °C. En el primer caso apenas existe fisuración, con  $\sigma_{t1} > 0$  desde  $Z_1$  a  $Z_5$ . En el segundo caso, la apertura de fisura,  $w$ , es notable, sobre todo en  $Z_2$  y  $Z_3$ , con valores de  $\sigma_{t1} \approx 0$  de la zona de ablandamiento de la ley constitutiva.

La Figura 6 muestra el perfil de  $w$ , en el eje de la traviesa para las zonas  $Z_1$  a  $Z_5$  (Figura 3). Entre 20 y 30 °C se observa el incremento de  $w$  indicando anteriormente. Para  $\Delta T_a = 20$  °C, la máxima apertura de fisura fue  $w = 0.004$  mm. Sin embargo, a partir de ese estado, el incremento es significativo, alcanzándose un valor máximo de  $w = 0.027$  mm para  $\Delta T_a = 30$  °C en  $Z_2$ . Para  $40$  °C  $\leq \Delta T_a \leq 60$  °C, los valores máximos de  $w$  se alcanzan en  $Z_2$  y  $Z_3$  en un rango entre 0.038 y 0.06 mm.

### 6.3. Instalación de traviesas en la vía

Las traviesas se colocan sobre el balasto de la vía y, a continuación, se instalan los carriles a la temperatura  $T_i$  de neutralización permitiendo que éstos se muevan libremente sobre las primeras. Al igual que en la fase de acopio, los valores máximos de  $w$  en esta fase se producen en  $Z_2$  y  $Z_3$ , siendo representados en la Figura 7 donde en el eje de abscisas se muestra el incremento de temperatura sufrido en la fase previa de acopio,  $\Delta T_a$ .

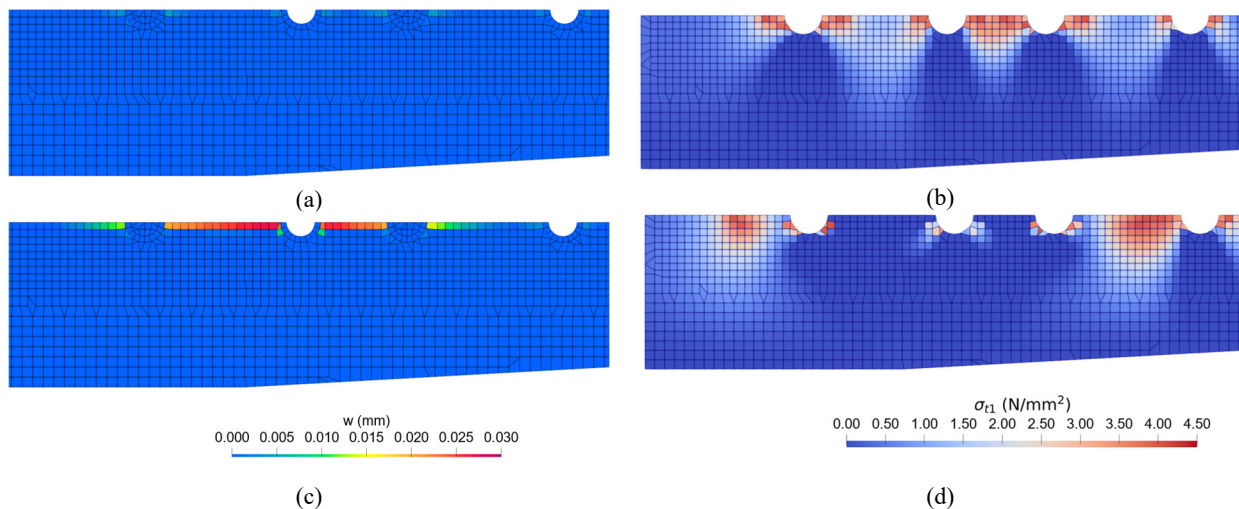


Figura 5. Apertura de fisura (columna izquierda) y tensión principal de tracción (columna derecha) en el hormigón de la traviesa para  $\Delta T_a = 20$  °C (a y b) y  $\Delta T_a = 30$  °C (c y d).

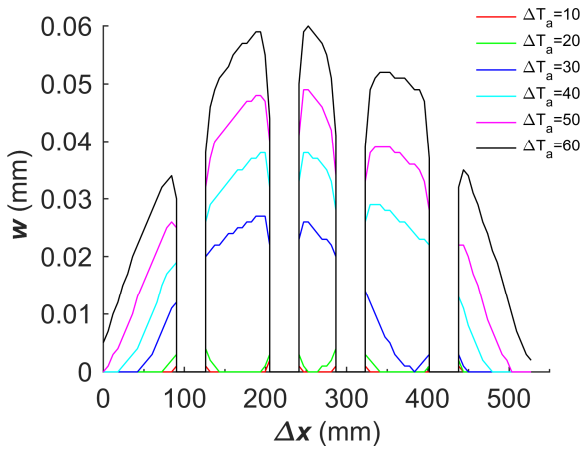


Figura 6. Perfil de apertura de fisura en las zonas  $Z_i$  durante el acopio de traviesas.

Cuando  $\Delta T_i > \Delta T_a$  (es decir, cuando  $T_i > T_a$ ), los valores de  $w$  se incrementan respecto a la fase de acopio mientras que para  $\Delta T_i \leq \Delta T_a$  disminuyen. No obstante, para  $\Delta T_a \geq 30$  °C, se observan valores crecientes de  $w$  para un determinado  $\Delta T_i$  lo que indica un menor grado de recuperación de la apertura de fisura cuanto mayor ha sido la temperatura de acopio a la que ha estado sometida la traviesa. Asimismo, cuando  $\Delta T_a \geq 30$  °C las diferencias en los valores de  $w$  respecto a los observados para  $\Delta T_i = 0$  °C son aproximadamente del doble para  $\Delta T_i = 10$  °C y hasta del cuádruple para  $\Delta T_i = 20$  °C.

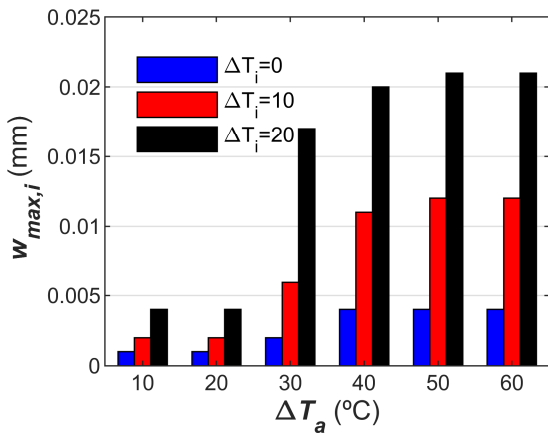


Figura 7. Apertura máxima de fisura para  $T_i = T_n$

#### 6.4. Fijación de carriles a las traviesas

En esta fase, se aplica el par de apriete de montaje requerido,  $T_r = 220$  Nm, a los tirafondos para la fijación de los carriles a la traviesa. Para realizar la simulación del mismo en el MEF-2D, se aplica un incremento de temperatura equivalente tanto al tirafondo como a la vaina, según se ha detallado en el apartado 4.3.

Para ello es preciso conocer la relación  $R_{MEF} - \Delta T_{eq,t}$  de cada sistema vaina-tirafondo (VT, 1 o 2 según Figura 3). Para VT-2 se obtiene como sigue: (i) en el MEF-2D se aplican los tres primeros casos de carga, es decir el

pretensado y unos valores determinados de  $\Delta T_a$  y  $\Delta T_i$ ; (ii) a continuación, se aplica una secuencia de 15 etapas con  $\Delta T_{eq,t,i} = 5$  °C y  $\Delta T_{eq,v,i} = 5\alpha_t/\alpha_v$  °C en cada  $i$ -ésima etapa, para facilitar la convergencia en el análisis; (iii) en cada una de las 15 etapas, se determina el  $R_{FEM}$  que corresponde a cada valor de  $\Delta T_{eq,t}$ .

En la Figura 8 se obtienen las diferentes relaciones  $R_{MEF} - \Delta T_{eq,t}$  para el sistema VT-2, es decir, teniendo en cuenta las combinaciones posibles entre  $\Delta T_a$  y  $\Delta T_i$ . Estos diagramas reflejan la capacidad resistente de la traviesa frente al par de apriete representado por  $\Delta T_{eq,t}$ , en función del grado de fisuración de la misma.

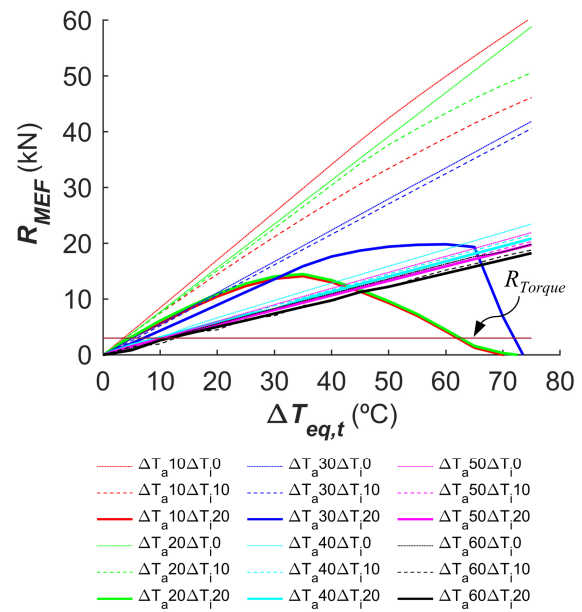


Figura 8. Relaciones  $R_{MEF} - \Delta T_{eq,t}$  para VT-2

Por otro lado, según la Ecuación 4,  $R_{Torque} = 3.00$  kN para  $K = 1.06$ ,  $\phi_{M,t} = 22$  mm y  $\theta = 45^\circ$ , que se representa en la Figura 8 con una línea horizontal. La intersección con las diferentes curvas  $R_{MEF} - \Delta T_{eq,t}$  permiten obtener los valores de  $\Delta T_{eq,t}$  y  $\Delta T_{eq,v} = \Delta T_{eq,t} \alpha_t/\alpha_v$  °C, que simulan los efectos del par de apriete en cada situación. Estos valores se aplican en la traviesa para obtener el cuarto caso de carga.

Una vez aplicados  $\Delta T_{eq,t}$  y  $\Delta T_{eq,v}$  de VT-2, se realiza el mismo procedimiento indicado anteriormente, para obtener la relación  $R_{MEF} - \Delta T_{eq,t}$  del sistema VT-1 (Figura 9). De igual forma, se obtiene el incremento de temperatura equivalente en tirafondo y vaina, igualando  $R_{MEF}$  y  $R_{Torque} = 3.00$  kN (Figura 9), que aplicado en el MEF-2D correspondería al quinto caso de carga.

En las Figuras 8 y 9 se observa una reducción en la capacidad resistente debido a la fisuración que se produce con el incremento de  $T_a$ ,  $T_i$  y par apriete. No obstante, existe seguridad frente a la rotura frágil de la traviesa, dado que el valor límite de  $R_{MEF}$  obtenido en el MEF-2D es considerablemente superior (mayor de 5 en todos los

casos) al producido por el par de apriete requerido,  $R_{Torque}$ .

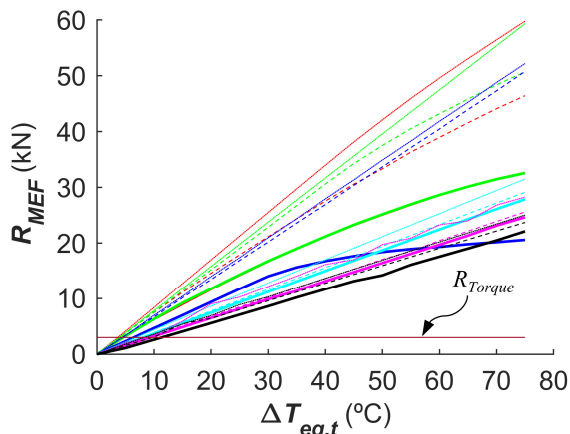


Figura 9. Relaciones  $R_{MEF} - \Delta T_{eq,t}$  para VT-1

La Figura 10 muestra tanto los valores de apertura máxima de fisura obtenida en la fase de instalación de las traviesas sobre la vía (barras gruesas, Figura 7) como la obtenida tras el par de apriete de T1 y T2 (barras finas). Se observan incrementos entre 0.001 y 0.003 mm para  $\Delta T_s \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$  que están en el rango de las mediciones que se obtuvieron de campañas experimentales realizados por el fabricante de traviesas.

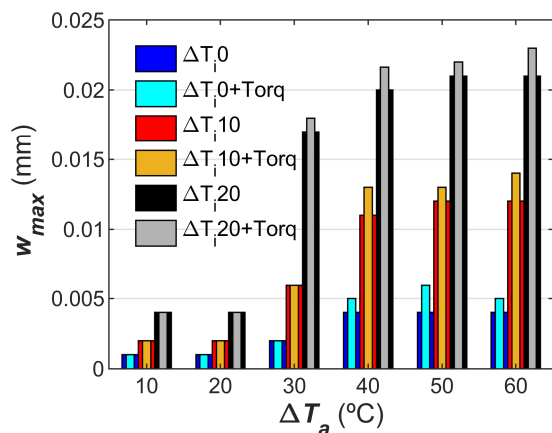


Figura 10. Comparación de  $w_{max}$  obtenida en las fases de instalación y fijación de carriles

## 7. CONCLUSIONES

En este estudio se ha llevado a cabo un análisis numérico para determinar los efectos en la apertura de fisura de los diferentes procesos que intervienen en las traviesas monobloque de hormigón pretensado con sistema de sujeción SKL como son: fabricación, acopio, instalación sobre la vía y fijación de carriles. Se obtienen las siguientes conclusiones:

- El coeficiente del par de torsión,  $K$ , presenta un valor muy elevado ( $=1.06$ ) para el conjunto vaina de

poliamida y tirafondo zincado del sistema de sujeción SKL.

- Las vainas de poliamida reforzada con fibra de vidrio presentan una elevada rigidez y expansividad térmica, originando fisuración apreciable en el hormigón para incrementos de temperatura de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  o superiores a la de fabricación.
- Incrementos de temperatura en acopio y durante la instalación de traviesas en la vía sobre la de fabricación, iguales o superiores a  $30$  y  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente, implican incrementos significativos en los niveles de fisuración que se acentúan al aplicar el par de apriete. Por lo tanto, se deben extremar las precauciones en las traviesas fabricadas en época invernal e instaladas en la vía época estival.
- Aunque la reducción de la capacidad resistente frente al par de apriete puede ser considerable debido a la fisuración previa, en todos los casos se mantiene un factor de seguridad mayor de 5 respecto al par de apriete requerido ( $220 \text{ kNm}$ ).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto PID2023-149321OA-C33 (NUMFIB), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, por la Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033) y por el FSE+. Los autores también agradecen la colaboración de la empresa ANTRASA que ha proporcionado información de las traviesas prefabricadas.

## REFERENCIAS

- [1] W. Ferdous, A Manalo. *Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies – Review of current practice*, Engineering Failure Analysis, 44 (2014)17-35
- [2] W. Derkowski, L. Slaga. *The effect of too stiff rail to base fastening on damage mechanism in RC ballastless track structure*, Structural Concrete 21 (2020) 1544-1556
- [3] J. Donaire-Ávila, A. Montañés-López, F. Suárez. *Influence of temperature on the longitudinal cracking in multipurpose precast concrete sleepers prior to their installation*, Materials 12 (2019) 1-17
- [4] D. Ferreño, JA. Casado, IA Carrascal, S. Diego, E. Ruiz, M. Saiz, JA Sainz-Aja, AI Cimentada. *Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system*, Engineering Structures 188 (2019) 553-563
- [5] NAV 7-1-4.1: Neutralización y homogeneización de tensiones del carril en la vía sin juntas. ADIF (2023)
- [6] PAV 01\_01.01.000\_ED2: Sujeción VE - Características generales y componentes. ADIF (2024)
- [7] Vector 2 (v. 4.3). University of Toronto (2020)