

INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA A FATIGA DEL TIPO DE ARMADURA Y SU ANCLAJE EMPLEADO EN TRAVIESAS MONOBLOQUE DE HORMIGÓN PRETENSADO

J. Carpio, J.A. Casado, I. Carrascal, J.A. Polanco y F. Gutiérrez-Solana

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria.
E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. Avenida de los Castros, s/n. 39005 Santander (Cantabria)

Resumen: Este artículo describe la influencia que tienen algunas variables en la resistencia a fatiga de las traviesas monobloque de hormigón pretensado que se pretenden utilizar en las nuevas líneas de alta velocidad española (AVE): diámetro de armaduras, acabado superficial de las armaduras, empleo o no de armaduras pasivas de cabeza y el ancho para el que se utiliza la traviesa, ancho internacional o ancho Renfe. Para poner de manifiesto esas influencias, los ensayos realizados son el ensayo dinámico con variación de carga escalonada y el ensayo dinámico con amplitud de carga constante. Ambos ensayos, que se realizan según la norma EN 13230-2, simulan las condiciones reales de la vía, y los resultados obtenidos permiten determinar el tipo de traviesa más adecuado para un óptimo funcionamiento en servicio con un mantenimiento mínimo y una máxima seguridad, según las especificaciones y protocolos vigentes al respecto del Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF).

Abstract: This paper describes the influence of some variables over the fatigue resistance of prestressed monoblock sleepers used in the new Spanish High Speed railways (AVE): Bar diameter, bar surface finishing, the presence or not of head passive bars, and the railway width, international width or Spanish width. These influences are shown by the development of two tests, dynamic test with increasing load cycles, and dynamic test with constant load amplitude. Both of them, which are set by standard EN 13230-2, simulate railway real conditions, and results allow to determine the most appropriate kind of sleeper for an excellent working with minimal maintenance and the highest security, following the specifications from the Spanish Railway Infrastructure Manager (GIF).

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF), ente dependiente del Ministerio de Fomento, está realizando una fuerte inversión en renovación y nueva construcción de líneas de tren, sobre todo de Alta Velocidad. Estas infraestructuras han de construirse teniendo en cuenta que han de ser capaces de soportar las cada vez mayores solicitaciones mecánicas de naturaleza dinámica, debidas a las mayores velocidades exigidas, al aumento del tráfico ferroviario, etc., en condiciones de máxima seguridad y mínimo mantenimiento.

Un elemento fundamental de esas estructuras son las traviesas, elementos transversales al eje de la vía, que han de transmitir los esfuerzos mecánicos al balasto, para que éste los distribuya de una forma equilibrada y amortiguada. Durante gran parte de los siglos XIX y XX las traviesas se han construido en madera. Pero en la segunda mitad del siglo XX se ha producido una evolución en los materiales utilizados, apareciendo traviesas de acero con cabezas de hormigón (traviesas bibloque reforzadas), y traviesas íntegramente de hormigón (traviesas monobloque), que son las que se están generalizando en las nuevas construcciones.

El objetivo principal de este estudio es conocer, en condiciones de servicio, la influencia de algunas variables en el comportamiento a fatiga de las traviesas monobloque de hormigón pretensado que se utilizan en las nuevas líneas del AVE. Las variables que se tienen en cuenta son las siguientes:

- Diámetro de la armadura.
- Acabado superficial de la armadura: lisa, corrugada o grafilada.
- Presencia o ausencia de una armadura pasiva en las cabezas de la traviesa.
- Tipo de ancho para los que se utilizará la traviesa. Para poner de manifiesto esta variable se ensayarán dos tipos de traviesa: traviesa AI-99, que sólo puede utilizarse en ancho internacional, es decir, para alta velocidad, y traviesa PR-01, que puede utilizarse tanto para ancho internacional como para ancho Renfe.

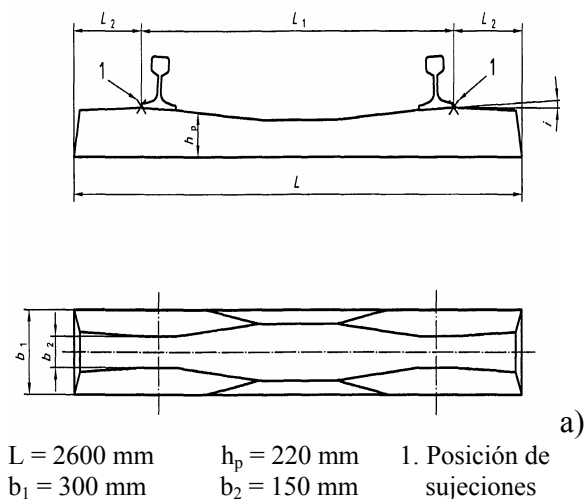
Todas las armaduras son del mismo tipo de acero y han sido pretensadas a la misma tensión, empleando para ello una fuerza proporcional a su diámetro, manteniéndose siempre la misma proporción. Las traviesas AI-99 y PR-01 tienen las mismas dimensiones y geometría, sólo varían en cuanto al tipo de asiento para el carril, ya que la traviesa PR-01 tiene que incluir asiento para ancho Renfe. En cuanto al

anclaje, las traviesas que llevan armadura lisa van provistas de arandelas y tuercas (o ñiñas) de anclaje en sus extremos, mientras que las corrugadas o grafiladas no lo llevan.

Los ensayos que revelarán la influencia de esas variables en el comportamiento de las traviesas serán el ensayo dinámico con variación de carga escalonada en sección bajo carril y el ensayo dinámico con amplitud de carga constante en sección bajo carril, recogidos en la norma EN 13230-2:2002 como ensayo dinámico en sección bajo carril y ensayo de fatiga en sección bajo carril, respectivamente [1]. El objetivo de estos ensayos es simular el comportamiento en vía de la traviesa, con lo que los resultados obtenidos se pueden utilizar como criterio de la elección de la traviesa más adecuada para el funcionamiento óptimo en ancho internacional o ancho Renfe, con un mantenimiento mínimo y en las condiciones de seguridad definidas en las especificaciones y protocolos vigentes en el GIF.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

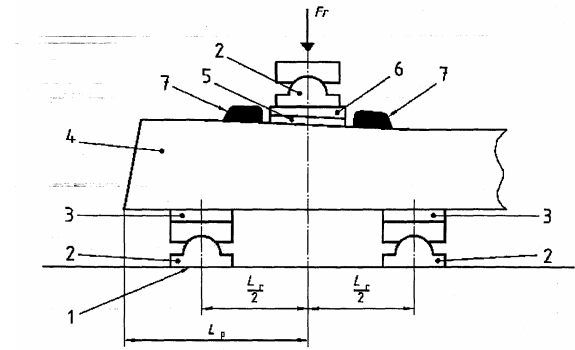
En la Fig. 1a) se muestra un esquema de la forma y dimensiones principales de una traviesa monobloque de hormigón pretensado. En la Fig 1b) se muestra la disposición de las armaduras en la traviesa. Además, en alguna de las traviesas existe una armadura pasiva adicional de cabeza.



$L = 2600 \text{ mm}$ $h_p = 220 \text{ mm}$ 1. Posición de sujeciones
 $b_1 = 300 \text{ mm}$ $b_2 = 150 \text{ mm}$

Fig. 1. Esquema de una traviesa monobloque de hormigón pretensado.

En la Fig. 2 aparece un esquema del montaje necesario para la realización de los ensayos dinámico con variación de carga escalonada y dinámico con amplitud de carga constante.



- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1. Soporte rígido | 2. Soporte articulado |
| 3. Placa de goma | 4. Traviesa monobloque |
| 5. Placa de asiento de rail | 6. Placa niveladora |
| 7. Topes laterales | |

Fig. 2. Montaje de los ensayos en sección bajo carril.

En el caso de las traviesas PR-01, es necesario utilizar un suplemento soporte de carril de poliamida en forma de cuña que se dispone debajo de la placa de asiento debido a la especial geometría de las traviesas, que las hace aptas para ancho internacional y ancho Renfe.

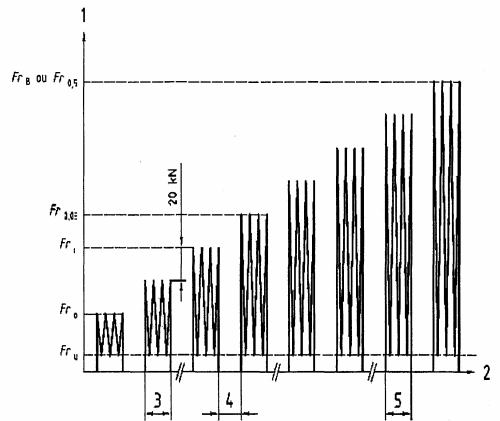
Los ensayos se realizaron con un actuador servohidráulico de ensayos estáticos y dinámicos dotado de una célula de carga de 500 kN de capacidad, marca INSTRON, montado sobre una bancada dotada de las dimensiones adecuadas para la determinación de las características requeridas.

En la fotografía de la Fig. 3 se puede apreciar el dispositivo de ensayo con los útiles de carga y de apoyo utilizados.



Fig. 3. Dispositivo de ensayo

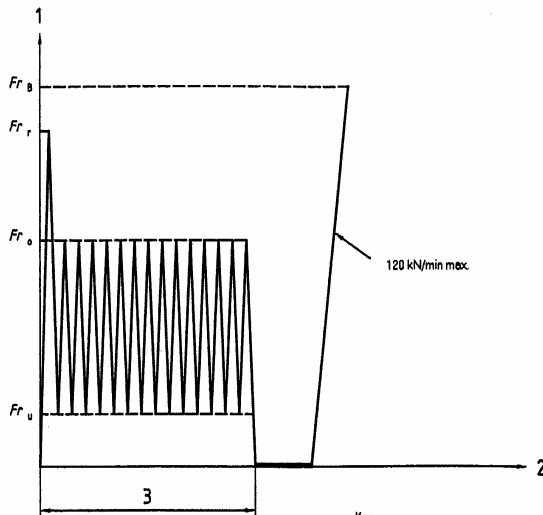
El procedimiento a realizar en cada ensayo se resume en las Fig. 4 y 5, que muestran en diagramas carga-tiempo la sucesión de ciclos de variación de carga a los que se ha de someter la traviesa en cada ensayo.



1. Carga
2. Tiempo
3. 5000 ciclos de carga
4. Tiempo máximo de examen: 5 minutos

5. Frecuencia = 2-5 Hz

Fig. 4. Procedimiento de ensayo dinámico con variación de carga escalonada en sección bajo carril.



1. Carga
 2. Tiempo
 3. Frecuencia = 2-5 Hz, durante 2 millones de ciclos.
- NOTA: Primer ciclo hasta Fr_r , fuerza necesaria para la generación de una grieta.

Fig. 5. Procedimiento de ensayo dinámico con amplitud de carga constante en sección bajo carril.

Se realizó el ensayo dinámico con variación de carga escalonada sobre 12 traviesas, divididas en subgrupos de dos. Cada subgrupo tiene las características descritas en la Tabla 1 de identificación de muestras.

Tabla 1. Identificación de muestras del ensayo dinámico con variación de carga escalonada en sección bajo carril.

Identificación	Descripción (ϕ en mm)
2	Traviesas AI-99 con varilla corrugada ϕ 10
4	
6	Traviesas AI-99 con varilla lisa ϕ 9.40 y arandela de anclaje
8	
102	Traviesas PR-01 con varilla corrugada ϕ 10
104	
102 (Ancho Renfe)	Traviesas PR-01 con varilla corrugada ϕ 10
104 (Ancho Renfe)	
117	Traviesas PR-01 con varilla corrugada ϕ 7 y armadura pasiva de cabeza
118	
213	Traviesa PR-01 con varilla grafilada ϕ 10.5
214	

Se realizó el ensayo dinámico con amplitud de carga constante sobre 3 traviesas, cada una de un tipo diferente, tal y como aparece en la Tabla 2 de identificación de muestras.

Tabla 2. Identificación de muestras del ensayo dinámico con amplitud de carga constante en sección bajo carril.

Identificación	Descripción (Φ en mm)
112	Traviesa PR-01 con varilla corrugada ϕ 10
112 (Ancho Renfe)	Traviesa PR-01 con varilla corrugada ϕ 10
16	Traviesa AI-99 con varilla lisa ϕ 9,40 con tuerca de anclaje

Todas las traviesas, salvo en las que se indica expresamente, se ensayan para ancho internacional, lo que implica que la cota L_r que aparece en la Fig. 2 es $L_r = 0,60$ m. En caso de ensayarse ancho Renfe esa cota es $L_r = 0,50$ m. El ensayo en ancho Renfe también implica un cambio en el valor de la fuerza máxima inicial de ensayo, Fr_0 , de las Fig. 3 y 4 que, según la norma EN 13230-2, se calcula por:

$$Fr_0 = 4 \cdot M_{dr} / (L_r - 0.1) \quad (1)$$

Donde M_{dr} es un momento de fuerzas que depende de cada traviesa en cada tipo de ancho. En el caso que nos ocupa, los valores de Fr_0 para los dos tipos de ancho (el tipo de traviesa no influye ya que las dos son iguales en lo que se refiere al momento) son:

- Para ancho internacional: $Fr_0 = 156$ kN
- Para ancho Renfe: $Fr_0 = 130$ kN

Para medir la anchura de las grietas que se originan por acción de los ciclos de carga, se utilizó una cámara de vídeo marca SONY modelo SCC-C, dotada de una lente adecuada para facilitar la observación. La cámara fue conectada a un monitor de televisión a través del cual se estableció la anchura de las grietas en cada traviesa.

3. RESULTADOS

En el ensayo dinámico con variación de carga escalonada en sección bajo carril se ha de obtener:

- Valor de carga máxima para la que aparece la primera fisura, $Fr_{1^{FISURA}}$.
- Valor de carga máxima para la que la fisura principal alcanza una anchura de 0.05 mm, $Fr_{0.05}$.
- Valor de carga máxima para la cual la fisura principal alcanza una anchura de 0.5 mm o la traviesa se rompe. En todos los casos ensayados la traviesa ha fracturado antes de que la grieta llegase al valor de anchura especificado. Esa carga de fractura se representa por Fr_b .

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos dinámicos con variación de carga escalonada en sección bajo carril. Los requerimientos exigidos por la norma EN 13230-2 para dar por válida la traviesa son los siguientes:

- Para ancho internacional:
 $Fr_{0.05} \geq 1.5 \cdot Fr_0 = 234 \text{ kN}$
 $Fr_b \geq 2.2 \cdot Fr_0 = 343 \text{ kN}$
- Para ancho Renfe:
 $Fr_{0.05} \geq 1.5 \cdot Fr_0 = 195 \text{ kN}$
 $Fr_b \geq 2.2 \cdot Fr_0 = 286 \text{ kN}$

Tabla 3. Resultados de los ensayos dinámicos con variación de carga escalonada en sección bajo carril.

Traviesa	$Fr_{1^{FISURA}}(\text{kN})$	$Fr_{0.05}(\text{kN})$	$Fr_b(\text{kN})$
2	256	356	416
4	236	316	416
6	236	276	376
8	236	276	376
102	216	316	376
104	216	316	376
102 (R)	250	350	390
104 (R)	190	350	410
117	196	256	336
118	196	276	336
213	236	316	376
214	236	316	376

NOTAS: (R): Ensayo realizado en ancho Renfe.

En el ensayo dinámico con amplitud de carga constante en sección bajo carril se ha de obtener:

- El valor de carga estática para el que aparece la primera fisura, representado por Fr_r en la Fig. 4.
- El valor de la anchura de dicha grieta, estando sometida la traviesa a una carga igual a Fr_0 , y tras la

aplicación de $2 \cdot 10^6$ ciclos de carga entre los valores de 50 kN y Fr_0 . Se representa como “anchura bajo Fr_0 ”.

- El valor de anchura de la grieta, sin someter la traviesa a carga alguna, tras la aplicación de $2 \cdot 10^6$ de ciclos entre los valores de 50 kN y Fr_0 . Se representa como “anchura sin carga”.
- El valor de la carga necesaria para romper la traviesa tras los $2 \cdot 10^6$ de ciclos a los que se ha sometido. La velocidad de aplicación de la carga no debe superar los 120 kN/min. Se representa por Fr_b .

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos dinámicos con variación de carga constante en sección bajo carril. Los requerimientos exigidos por la norma EN 13230-2 para dar por válida la traviesa son los siguientes:

- Para ancho internacional:
Anchura bajo $Fr_0 \leq 0.10 \text{ mm}$
Anchura sin carga $\leq 0.05 \text{ mm}$
 $Fr_b \geq 2.5 \cdot Fr_0 = 390 \text{ kN}$
- Para ancho Renfe:
Anchura bajo $Fr_0 \leq 0.10 \text{ mm}$
Anchura sin carga $\leq 0.05 \text{ mm}$
 $Fr_b \geq 2.5 \cdot Fr_0 = 325 \text{ kN}$

Tabla 4. Resultados de los ensayos dinámicos con amplitud de carga constante en sección bajo carril.

Traviesa	$Fr_r (\text{kN})$	Anchura a Fr_0 (mm)	Anchura sin carga (mm)	$Fr_b (\text{kN})$
112	216	0.05	0.01	394
112 (R)	250	0.07	0.04	450
16	256	0.02	0.01	476

NOTAS: (R): Ensayo realizado en ancho Renfe.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se ha comentado en el Apartado 1, con este trabajo se pretende conocer el comportamiento a fatiga de la traviesa monobloque de hormigón pretensado. Dicho comportamiento se estudia en función de algunas de las variables habituales que se tienen en cuenta para cualquier estructura de hormigón provista de armaduras activas [2]. La influencia de las mismas, tras el análisis de los resultados obtenidos, es la siguiente:

- Diámetro: Se comprueba que al reducirse el diámetro de la armadura disminuye la resistencia a fatiga (Fig. 6). El único subgrupo de traviesas que no ha superado el ensayo dinámico con variación de carga escalonada es el subgrupo 117-118, que tenían un diámetro de armadura de 7 mm, inferior al resto.

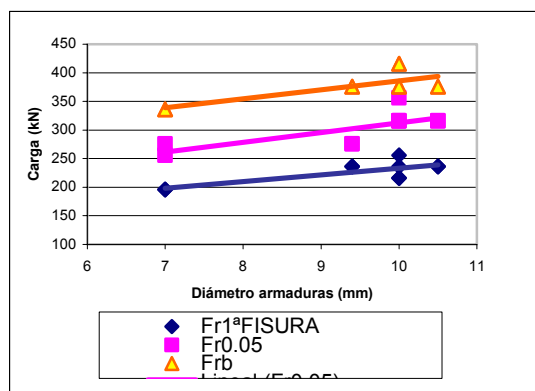


Fig. 6. Gráfico resistencia a fatiga-diámetro de las armaduras de las traviesas para ancho internacional.

- Acabado superficial de la armadura: Las armaduras estudiadas son lisas, corrugadas y grafiladas. Las traviesas con armaduras corrugadas tienen tendencia a formar varias grietas en el ensayo dinámico con variación de carga escalonada en sección bajo carril, de modo que la carga aplicada por el actuador se reparte entre ellas. Las traviesas que presentan armaduras lisas con arandelas y tuercas de anclaje presentan una única grieta, que es la que acumula toda la carga aplicada por el actuador (Ver Fig. 7 de crecimiento y Fig. 8 de rotura). En este caso, el comportamiento en el ensayo con amplitud de carga constante es excelente. Sólo fue posible ensayar las dos cabezas de una misma traviesa si su armadura era corrugada, ya que la adherencia hormigón-acero se encuentra muy fortalecida. En el caso de armaduras lisas, en las que intervienen arandelas de anclaje, si se rompe una de las cabezas, las armaduras pierden toda la adherencia.
- Presencia o ausencia de una armadura pasiva de cabeza: La presencia de armadura pasiva de cabeza aumenta la resistencia a fatiga de la traviesa. En el caso del subgrupo de traviesas 117-118, hace que la caída de la resistencia no sea tan acusada como sería de esperar con una reducción del diámetro de la armadura del 30%. Aún así, la armadura pasiva no compensa totalmente la pérdida de diámetro, y las traviesas no pasan el ensayo.
- Tipo de ancho para los que se utilizará la traviesa: Se comprobó que el cambio de ancho en el ensayo no implicaba un perjuicio del comportamiento de la traviesa a fatiga. En los tres casos ensayados se obtuvieron resultados óptimos.

Todas las traviesas sometidas a ensayo dinámico con variación de carga escalonada rompieron antes de que la grieta principal llegara a tener la anchura requerida de 0,5 mm. Se observa que hay dos tipos de fractura:

- Un tipo de fractura en el que simplemente la grieta principal cruza toda la traviesa y empieza a desprenderse material de la parte superior de la misma, como se observa en la fotografía de la traviesa 6, mostrada en la Fig. 7.

- Otro tipo de fractura en la que el hormigón se resquebraja por varios sitios y la traviesa rompe en varios trozos, desprendiéndose de las armaduras, como se observa en la traviesa 102 ensayada en ancho Renfe, mostrada en la figura 8.



Fig. 7. Fotografía de la sección bajo carril de la traviesa 6 tras el ensayo dinámico con variación de carga escalonada en ancho internacional (\ grieta).



Fig. 8. Fotografía de la sección bajo carril de la traviesa 112 tras el ensayo con variación de la carga escalonada en ancho Renfe.

El comportamiento de todas las traviesas en el ensayo dinámico con variación de carga escalonada es similar e indicativo del comportamiento a fatiga de la traviesa. En primer lugar, a valores cercanos de Fr_0 , la traviesa no presenta ninguna grieta durante ninguno de los 5000 ciclos de cada etapa. Al llegar a $Fr_{1ªFISURA}$, la grieta se genera en los primeros ciclos de la etapa. A medida que se aumenta la carga aplicada, la grieta crece paulatinamente hasta llegar a cargas próximas a $Fr_{0.05}$. A partir de entonces, al aumentar la carga se supera el límite elástico del acero, y la grieta aumenta rápidamente su anchura hasta que, en algún caso, se colapsa la traviesa al producirse la rotura por tracción de la armadura, como se puede observar en la Fig. 9, que muestra una barra de la armadura de la traviesa 102, sometida al ensayo dinámico con variación de carga escalonada en ancho Renfe.



Fig. 9. Detalle de la rotura por tracción de la armadura de la traviesa 102 tras el ensayo dinámico con variación de carga escalonada y en ancho Renfe.

En el ensayo dinámico con amplitud de carga constante, el hecho de mantener la amplitud en valores en torno a Fr_0 , hace que no se supere el umbral de propagación de la grieta (que se asume que es $Fr_{0,05}$), como se puede observar en el gráfico de la Fig. 10, en la que aparece representado el valor medio de $Fr_{0,05}$ para las traviesas de $\phi = 10$, frente al esquema de ciclos del ensayo con amplitud de carga constante. Por lo tanto, se obtiene un comportamiento en fatiga óptimo de forma ilimitada.

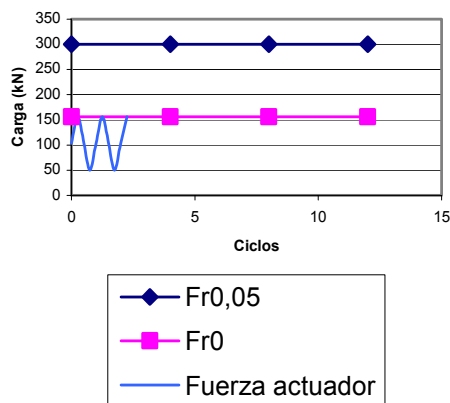


Fig. 10. Representación del esquema de ciclos del ensayo con amplitud de carga constante frente al umbral de propagación de la grieta ($Fr_{0,05}$).

La rotura estática de la traviesa tras este ensayo se produce a valores similares o superiores a los obtenidos en el ensayo con variación de carga escalonada.

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden sacar del estudio realizado son dos:

1. En traviesas monobloque de hormigón pretensado:
 - La resistencia a fatiga aumenta con el diámetro de las armaduras.
 - Existe una mayor adherencia entre hormigón y acero en armaduras corrugadas. Con este acabado

superficial se forman varias grietas entre las que se reparte el esfuerzo aplicado, aumentando la resistencia a fatiga respecto a traviesas con armaduras lisas, en las que se forma una sola grieta. Además, en caso de fractura de una de las cabezas de la traviesa, las armaduras corrugadas mantienen la adherencia hormigón-acero en el resto de la misma, mientras que las lisas no la mantienen.

- La presencia de una armadura pasiva de cabeza aumenta la resistencia a fatiga.
- Utilizar ancho Renfe en vez de ancho internacional no tiene porqué perjudicar el comportamiento de la traviesa a fatiga.

2. Las traviesas que superan el ensayo dinámico con variación de carga escalonada también superan el ensayo dinámico con amplitud de carga constante. El valor de Fr_b es superior en el segundo caso que en el primero, debido a que no hay daño acumulado, y a que el conjunto trabaja por debajo de su valor de resistencia a la fatiga.

Los ensayos realizados en este estudio simulan el comportamiento de la traviesa en servicio, por lo que sus resultados pueden emplearse como criterio de elección del tipo de traviesa más adecuado en cuanto a funcionamiento, coste de mantenimiento y seguridad, en la infraestructura ferroviaria de las nuevas líneas de la Alta Velocidad Española (AVE).

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Fomento la ayuda económica recibida para llevar a cabo el proyecto de “Optimización y control de comportamiento de sujeciones para vías de ferrocarril de alta velocidad española”, gracias al cual se han podido realizar estos estudios, y a la empresa DRACE, S.A., su colaboración en el suministro del material necesario y en la publicación de los resultados obtenidos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] EUROPEAN STANDARD EN 13230-2 “*Railway applications - Track – Concrete sleepers and bearers – Part 2: Prestressed monoblock sleepers*”. European Committee for Standardization. Brussels (2002).
- [2] “*Instrucción de Hormigón Estructural. EHE*”. Comisión Permanente del Hormigón. 2ª Edición. Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones. Madrid (1999).
- [3] EUROPEAN STANDARD EN 13230-1 “*Railway applications – Track – Concrete sleepers and bearers – Part 1: General requirements*”. European Committee for Standardization. Brussels (2002).