

CONTROL DE LA FISURACIÓN DE TRAVIESAS DE HORMIGÓN SOMETIDAS A FATIGA

S. Diego^{1*}, J.A. Casado¹, I. Carrascal¹, D. Ferreño¹, J.A. Sainz-Aja¹, R. Ovalle¹ y R. Sañudo²

¹LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales).

²GIST Grupo de investigación de Sistemas de Transporte.

Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Av/ Los Castros 44, 39005 Santander, España.

*Correo-e: soraya.diego@unican.es

RESUMEN

El control del comportamiento mecánico de las traviesas de hormigón en Europa se realiza por medio de ensayos de caracterización recogidos en las normativas EN 13230-1/2 que describen los requisitos que han de satisfacer y la metodología de ensayo, respectivamente. El caso dinámico contempla la aplicación de esfuerzos oscilantes por flexión en el asiento del carril, que provocan la aparición de una fisura pasante en la fibra más traccionada. La longitud y apertura de la fisura aumenta con el nivel de los esfuerzos aplicados. Los requisitos exigidos se verifican en función de la progresión de la anchura de la fisura con la traviesa completamente descargada. Esta caracterización, factible desde el punto de vista de laboratorio, se torna inviable cuando la traviesa se encuentra instalada en vía, siendo imposible establecer su grado de fisuración en condiciones de tráfico. Se propone una metodología alternativa para definir el deterioro de traviesas (con distribución de armaduras y geometrías variables) debido a su fisuración mediante el control de la flecha de las mismas por flexión durante la aplicación de cargas dinámicas. Este parámetro, fácil de controlar en condiciones de servicio, se correlaciona tanto con la apertura de la fisura como con la retracción de las armaduras durante el proceso dinámico.

PALABRAS CLAVE: Traviesa pretensada, flexión dinámica, fisuración, armaduras, validación

ABSTRACT

Control of the mechanical behavior of concrete sleepers in Europe is carried out by means of characterization tests according to EN 13230-1/2 which describe the requirements to be met and the test methodology, respectively. The dynamic case involves the application of sinusoidal three point bending flexural stresses in the rail seat, which causes a cracking in the tensile face concrete surface. The length and width of the crack increases with the level of the applied forces. The required requirements are verified as a function of the progression of the width of the crack with the completely unloaded sleeper. This characterization, feasible from the laboratory point of view, becomes unfeasible when the sleeper is installed in the track, being impossible to establish its degree of cracking in traffic conditions. An alternative methodology to define the deterioration of the sleepers has been proposed, (with variable distribution of reinforcements and geometries) due to their cracking by the control of the maximum flexural deflection of the sleeper during the application of dynamic flexural loads. This parameter, which is easy to control under service conditions, correlates with the width crack and the retraction of the reinforcement during the dynamic process.

KEY WORDS: Prestressed sleeper, dynamic bending, cracking, reinforcement, validation

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las condiciones para la homologación técnica, el autocontrol y supervisión de la calidad en fabricación y la recepción de traviesas monobloque de hormigón pretensado con armaduras postesas y pretesas, se lleva a cabo

siguiendo los procedimientos y directrices marcadas por las normativas de referencia EN 13230-1 [1], EN 13230-2 [2] y la Especificación Técnica de Adif ET 03.360.571.8 [3], principalmente.

Sin embargo, no existen indicadores fiables del comportamiento y/o durabilidad a largo plazo de

estos elementos cuando se encuentran en condiciones reales de servicio en vía balastada. Solo las inspecciones visuales rutinarias, el control del ancho de vía y el bateo del balasto, principalmente, son las operaciones de conservación y mantenimiento que se llevan a cabo. No obstante, estas necesarias acciones no aportan información relevante a cerca del estado de las traviesas de hormigón que, sepultadas por el balasto, no muestran su aspecto en la base, donde se inician los defectos, cuya propagación condiciona la durabilidad del componente.

En un trabajo anterior [4] se propuso una metodología capaz de definir el nivel de deterioro de la traviesa, a través de un parámetro de daño, basado en el control de la flecha de la traviesa por flexión, que se asocia a una pérdida de rigidez dinámica de la vía, tras la aplicación de las cargas dinámicas que simulan pasos de ejes de los vagones.

El presente artículo tiene como objetivo verificar si se puede establecer una generalización del método propuesto. Para ello, se realizan ensayos dinámicos adicionales sobre dos traviesas de plena vía, de características y funcionalidad equivalentes a la ya caracterizada en el anterior estudio [4], pero con diferente disposición y geometría de las armaduras pretensadas, factores que dependen exclusivamente de cada fabricante [5].

2 MATERIAL OBJETO DE ENSAYO

Para desarrollar este trabajo se han empleado dos traviesas monobloque de hormigón pretensado AI-04 para ancho internacional (1435 mm) con carril del tipo UIC-60 [6], suministradas Las traviesas han sido suministradas por las empresas COPASA (Traviesa 1) y LUSO GALAICA (Traviesa 2). En el primer caso, se trata de la traviesa que se instala, actualmente, en el tramo de alta velocidad entre las ciudades de Medina y La Meca en Arabia Saudí y, en el segundo caso, de una traviesa fabricada para la vía de alta velocidad del trazado noroeste de España. El esquema de las traviesas se muestra en la Figura 1.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Uno de los ensayos más representativos que se realizan para llevar a cabo el control, verificación de comportamiento y homologación de las traviesas antes de su implementación en

vía es el ensayo dinámico en la sección de asiento del carril.

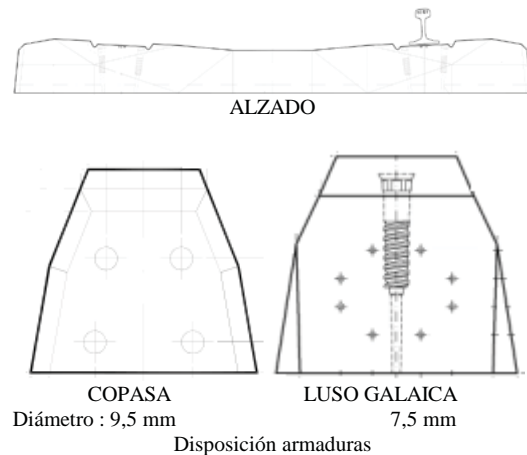
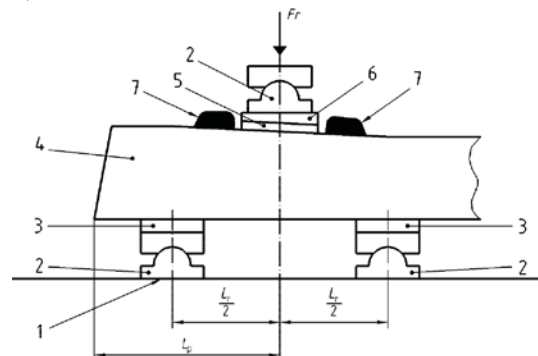


Figura 1. Trazado esquemático de las traviesas

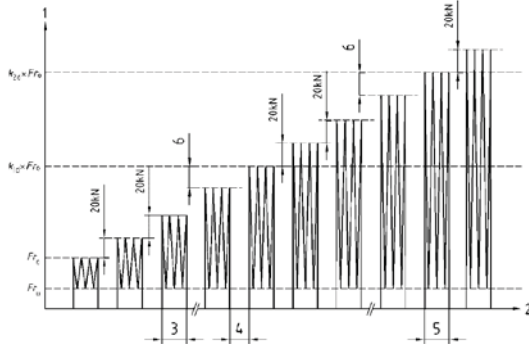
La filosofía del ensayo se basa en la medición y control de la apertura de una fisura que se genera en la fibra más traccionada de la traviesa cuando es solicitada a flexión en tres puntos en la sección bajo carril (ver esquema y fotografía de la Figura 2), bajo esfuerzos dinámicos con amplitud de carga creciente (ver secuencia de aplicación de cargas en el esquema de la Figura 3).



- 1. Soporte rígido
- 2. Soporte articulado
- 3. Placa apoyo elástica
- 5. Placa de asiento de carril
- 6. Cuña de nivelación
- 7. Tope lateral (opcional)

4. Travesía monobloque pretensada

Figura 2. Esquema y disposición del ensayo dinámico en sección bajo carril.



1. Carga
 2. Tiempo
 3. Frecuencia entre 2 y 5 Hz
 4. Tiempo máx de examen 5 min
 5. 5000 ciclos de carga
 6. Escalones de carga de 20 kN
- Carga . $Fr_U = 50 \text{ kN}$ y $Fr_0 = 156 \text{ kN}$

Figura 3. Aplicación de cargas del ensayo dinámico en sección bajo carril.

Los escalones de variación de fuerza senoidal, de 5000 ciclos de duración, se aplicaron a la frecuencia de 5Hz según con los valores indicados en la Tabla 1, de acuerdo con la normativa aplicable. En todos los casos la fuerza mínima de cada intervalo de ensayo se establece en 50 kN. El ensayo finaliza cuando se alcanza el nivel o escalón para el que se alcanza la rotura de la travesía (Fr_B) o bien, cuando se alcanza un valor remanente de apertura de la fisura en descarga de 0.5 mm ($Fr_{0.5}$).

Tabla 1. Valores extremos de variación de fuerza en cada escalón (* Fr_B o $Fr_{0.5}$)

| | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Escalón | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $F_{m\acute{a}x}$ (kN) | 155.8 | 175.8 | 195.8 | 215.8 | 233.7 | 253.7 | 273.7 | 293.7 | 313.7 |
| Escalón | 10 | 11 | ...* | | | | | | |
| $F_{m\acute{a}x}$ (kN) | 333.7 | 342.7 | ... | | | | | | |

Los resultados del ensayo se expresan indicando los niveles de fuerza máxima que producen una apertura de la fisura en descarga, es decir, tras la aplicación de los diferentes escalones de variación de carga de 5000 ciclos de duración, de 0.05 y de 0.5 mm. Estos niveles de carga se denominan $Fr_{0.05}$ y $Fr_{0.5}$, respectivamente y las exigencias requeridas para el componente objeto de ensayo se establecen a partir de los valores

de los términos $k_{1d} \cdot Fr_0$ y $k_{2d} \cdot Fr_0$, de acuerdo con los valores indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de aceptación

| | |
|---|----------|
| k_{1d} | 1.5 |
| k_{2d} | 2.2 |
| $Fr_{0.05} > Fr_0 \cdot k_{1d}$ | 234 kN |
| $Fr_{0.5}$ ó $Fr_B > Fr_0 \cdot k_{2d}$ | 343.2 kN |

4 PROPUESTA DE CONTROL DE DURABILIDAD

La propuesta para poder controlar la durabilidad del componente a lo largo de su vida en condiciones de servicio es controlar el crecimiento de fisura tanto en su apertura como en su longitud, la adherencia de las armaduras y la posición del actuador de la máquina de ensayos.

Aprovechando el dispositivo de ensayo, definido en el apartado anterior, una vez detectada la aparición de la grieta, de altura mínima de 15 mm, dominante del proceso de fisuración, pasante a lo largo de la sección de la travesía, se instrumenta ésta con dos comparadores LVDT, uno a cada lado de la misma de tal forma que se pudiera monitorizar el valor de la apertura de la grieta (ver fotografía de la Figura 4). El control de la evolución del crecimiento longitudinal de la grieta se determina al final de cada escalón de carga registrando la altura alcanzada (ver fotografía de la Figura 4).



Figura 4. Registro y control de la evolución de la grieta.

Como parte de la instrumentación llevada a cabo y con el objeto de determinar la pérdida de

adherencia de las armaduras de acero grafilado, responsables de la resistencia a tracción en la fibra inferior de la traviesa, se colocaron otros dos comparadores LVDT en los extremos, como se puede apreciar en la fotografía de la Figura 5. Con el sistema de medición completo es posible correlacionar los parámetros mencionados en este apartado, es decir, la apertura de grieta, así como su crecimiento longitudinal y la pérdida de adhesión de las armaduras de acero pretensadas con respecto del hormigón en función del número de ciclos aplicados y, por lo tanto, con el nivel de variación de esfuerzos actuantes durante la ejecución de la prueba dinámica en sección bajo carril.



Figura 5. Registro de pérdida de adherencia de las armaduras.

Adicionalmente, se determinó la flecha de la traviesa por medio del desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos, requerido para aplicar las cargas escalonadas, con el objeto de determinar posibles cambios en la flexibilidad del sistema ocasionados principalmente por el crecimiento de la grieta dominante durante el ensayo dinámico en sección bajo carril.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Rigidez dinámica

En el diagrama de la Figura 6, se presentan, en doble eje de ordenadas, por un lado, la envolvente de las ondas senoidales del desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos, que representa la flecha de la traviesa bajo las cargas aplicadas y, por otro, la envolvente de las ondas de apertura de la grieta determinada, en este caso, a través de los comparadores LVDT, en función del número de ciclos. Se aprecia que, en ambas situaciones, las variables medidas fluctúan escalonadamente con

la variación de carga aplicada sobre el componente y crecen hasta que se produce la rotura de la traviesa. También es de destacar que los registros no se producen desde el inicio de la prueba dinámica, es decir, desde el ciclo 1, dado que la fisura no se origina hasta que llevan transcurridos 35000 ciclos para la traviesa 1 y 45000 ciclos para la traviesa. Se puede apreciar que, en ambos casos, los parámetros representados aumentan con el número de ciclos aplicados, lo que es indicativo del daño que progresivamente va siendo acumulado en el componente.

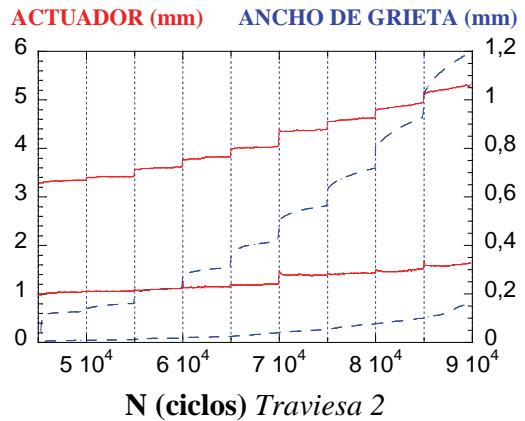
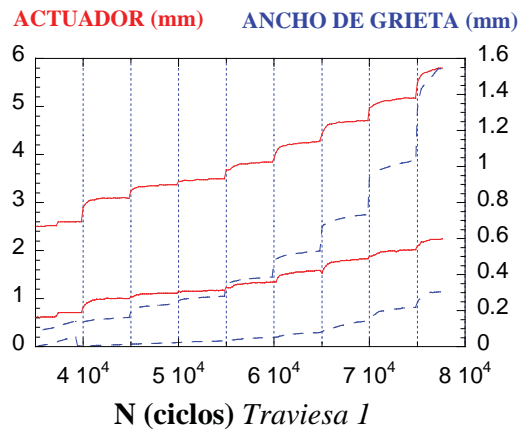


Figura 6. Envolvente ondas de desplazamiento del actuador y de la apertura de la fisura.

Un control del daño producido en la traviesa se puede establecer a partir de la medida de la evolución de la flexibilidad creciente del sistema formado por el conjunto <traviesa-placa de asiento del carril-apoyos elastoméricos (alternativos al balasto)> asociado al origen y crecimiento de la grieta. En este caso, se determina la pérdida de rigidez medida a través del incremento del valor del desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos, con el nivel de carga aplicada en cada escalón de la prueba

dinámica llevada a cabo. En el gráfico de la Figura 7 se representa este parámetro, considerando el máximo valor de la fuerza aplicada en cada escalón.

Se destaca la existencia de tres regiones claramente diferenciadas. En la Región I el incremento progresivo de la rigidez del sistema es consecuencia directa del asentamiento inicial y aplastamiento de los elementos diferentes elementos poliméricos como son los apoyos de caucho, simuladores de la capa de balasto, y de la placa de asiento del carril, debido a las cargas de compresión aplicadas. Este aumento de rigidez termina cuando se produce la aparición de la grieta dominante en la Región II. Durante unos escalones adicionales se compensa el efecto rigidizante del aplastamiento de los apoyos poliméricos citados con el aumento progresivo de la flexibilidad del sistema como consecuencia de la progresión de la grieta y se mantiene cuasi-constante la rigidez del conjunto. Finalmente es en la Región III donde se produce una flexibilización marcada por el efecto dominante de la progresión de la grieta sobre el asentamiento del conjunto y que se prolonga hasta el final del ensayo.

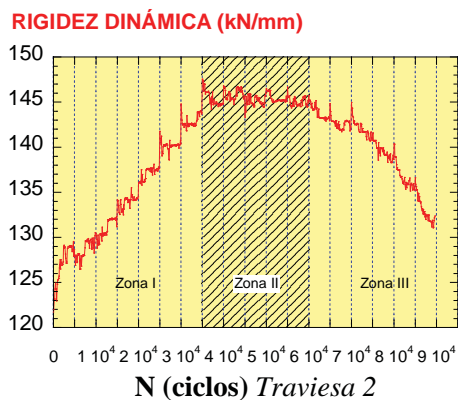
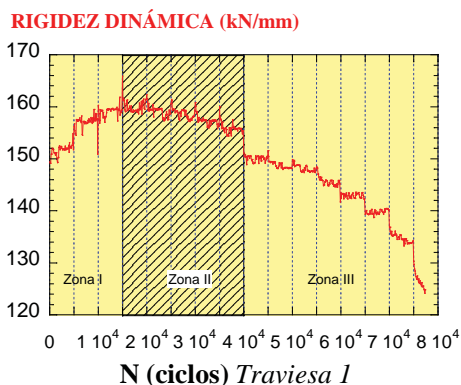
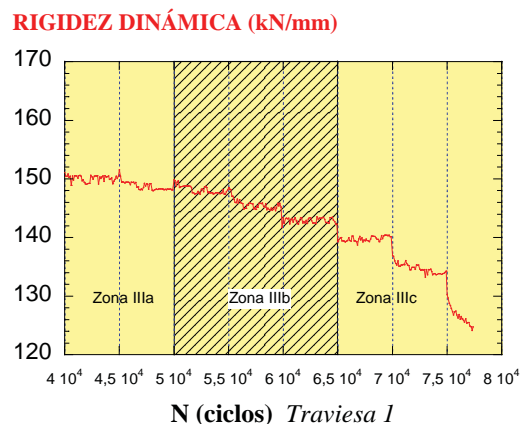


Figura 7. Evolución de la rigidez del sistema Sin embargo, de un análisis más detallado de la Región III se puede apreciar, en el diagrama

detalle de la Figura 8, la existencia de tres sub-regiones diferenciadas, que describen el proceso de daño hasta la rotura en la traviesa:

- En la región IIIa, se mantiene un descenso de del valor de la rigidez marcado por los incrementos de carga con tendencia a la estabilización tras un determinado número de ciclos. Este intervalo arbitrariamente se ha denominado flexibilización estacionaria.
- Sin embargo, en la región IIIb el aumento del número de escalones y, por lo tanto, del nivel de carga aplicada produce una caída de la rigidez del sistema que, tras cierto número de ciclos de ciclos aplicados ya no es capaz de mantener un valor constante. Durante esta secuencia de escalones se produce la aparición de fisuras adicionales en ambos lados de la traviesa (no monitorizadas), a su vez pasantes a lo largo del espesor, que contribuyen de manera notoria al descenso progresivo observado de la rigidez del sistema. Esta región se ha denominado flexibilización acelerada.
- Finalmente, en el último tramo de ensayo, denominado como región IIIc, que se corresponde con la máxima variación de carga a la que se le somete al sistema, el valor de la rigidez, tras su descenso inicial correspondiente al cambio de escalón, más acusado que en los anteriores, ya no se estabiliza, disminuye de forma acusada y antecede al colapso de la traviesa, mostrando el aspecto que ofrece la fotografía de la Figura 9. Esta región se ha identificado como zona de flexibilización inestable.



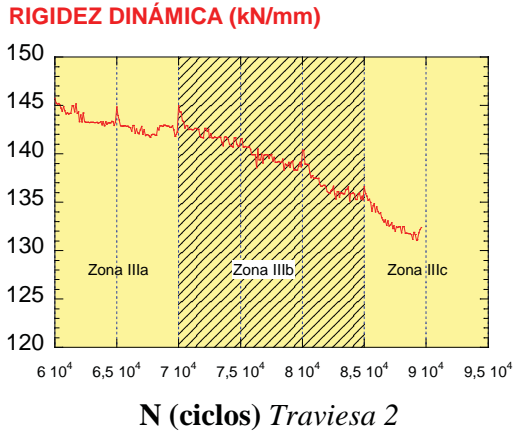


Figura 8. Detalle de la evolución de la rigidez del sistema conteniendo la fisura.



Figura 9. Estado final de la travesía tras el ensayo.

5.2 Deslizamiento de las armaduras

En el gráfico de la Figura 10 se representa, también en doble eje de ordenadas, tanto la apertura de la fisura en la zona inferior de la travesía donde la sollicitación a tracción es mayor (en dirección perpendicular a su eje de avance longitudinal), mostrado anteriormente en la Figura 6, como el deslizamiento de dos de las armaduras de acero con respecto del hormigón, en función del número de ciclos de ensayo. Se puede apreciar que el ritmo de crecimiento de ambas variables es similar pudiéndose establecer una correlación evidente entre ambos parámetros en función del nivel de cargas aplicadas.

La geometría de la travesía y, más en concreto, la altura a la que se encuentran dispuestas las armaduras que la pretensan condicionan la apertura de la grieta, a_w , (parámetro éste controlado, como única exigencia, por la especificación técnica del producto durante el ensayo). Se puede apreciar que cuando la altura de la fisura, a_L , alcanza el nivel de la armadura

superior, la pérdida de adherencia es muy elevada y la apertura remanente de la grieta se hace mucho más acusada evidenciándose una pérdida de capacidad restauradora de las armaduras, como se corrobora en el diagrama de la Figura 10 para el valor de a_w correspondiente, ya sea por la pérdida de adherencia medida o por la posible plastificación del acero, responsable de transferir las cargas de compresión al hormigón que tienden a cerrar la fisura. Estas apreciaciones se pueden comprobar en el diagrama de la Figura 11 donde se muestra la evolución de la longitud de la grieta (a_L) en función de su apertura remanente (a_w), teniendo en cuenta la disposición de los niveles de colocación de las armaduras en la travesía.

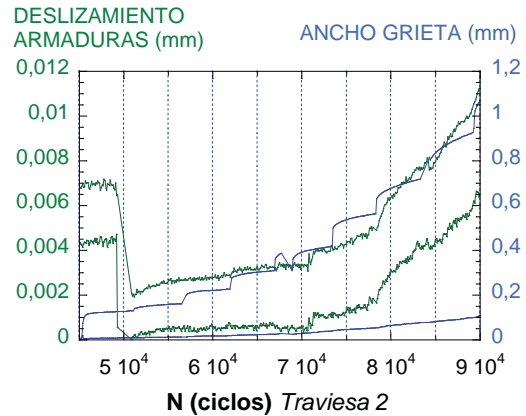
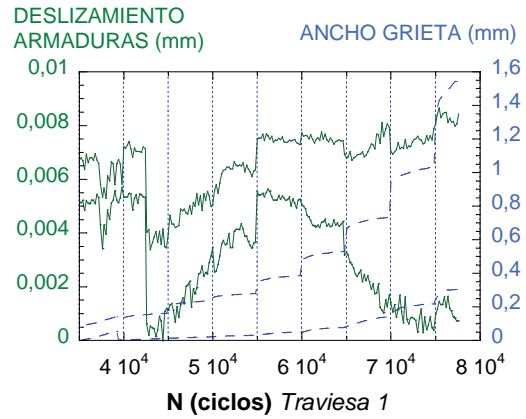


Figura 10. Envoltura ondas de retracción de las armaduras.

.Para los tipos de geometría particular de las travesías se puede establecer una función logarítmica entre ambas variables del tipo indicado en las expresiones que se muestran en las propias gráficas..

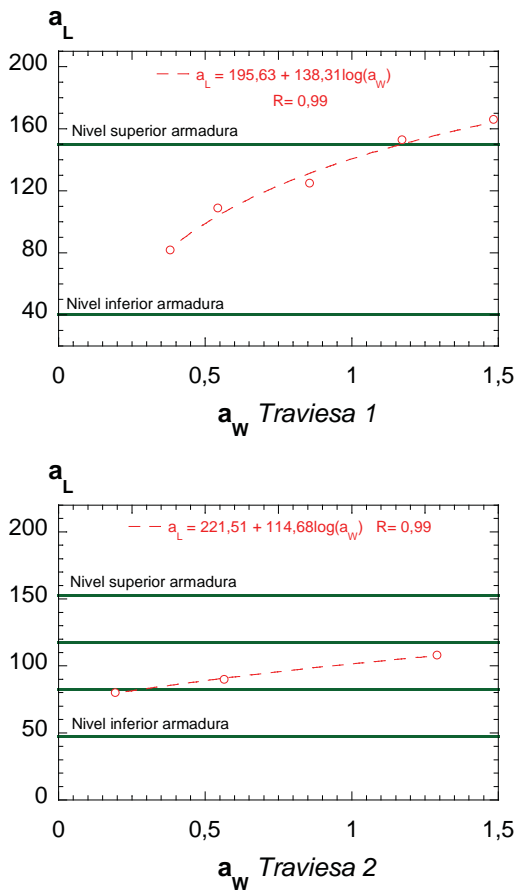


Figura 11. Evolución de la longitud y apertura de grieta.

5.3 Determinación del parámetro de daño crítico (límite de fatiga)

Finalmente se puede determinar el límite de fatiga del componente sometido a ensayo, aplicando las directrices del método Locati [8-9], basado en pruebas dinámicas de fatiga a frecuencia constante con variación de carga creciente hasta la rotura, como es el caso del ensayo dinámico en sección bajo carril abordado en este estudio con la traviesa pretensada. En estas circunstancias, considerando la evolución de la velocidad de crecimiento de tres de las variables analizadas en cada nivel o escalón de variación de fuerza:

1. Crecimiento de la apertura de la fisura
2. Desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos
3. Deslizamiento de las armaduras

y representadas en el gráfico de la Figura 12. En la gráfica correspondiente a las velocidades de la Travesía 1, de los tres parámetros analizados,

es en la velocidad de la anchura donde se observa que en el escalón 12°, entre 55.000 y 60.000 ciclos, deja de estabilizarse. En la gráfica relativa a la traviesa 2 la desestabilización se localiza en el escalón 14°, entre 65.000 y 70.000 ciclos. En estas condiciones, se considera el límite de fatiga del componente, de acuerdo con el método Locati, el escalón de variación de carga inmediatamente anterior al crítico como se ha determinado previamente [10]. Por tanto, los límites de fatiga se establecen, para la traviesa 1, en el rango de cargas comprendido entre 50.000 y 55.000 ciclos y, para la traviesa 2, para entre 60.000 y 65.000 ciclos.

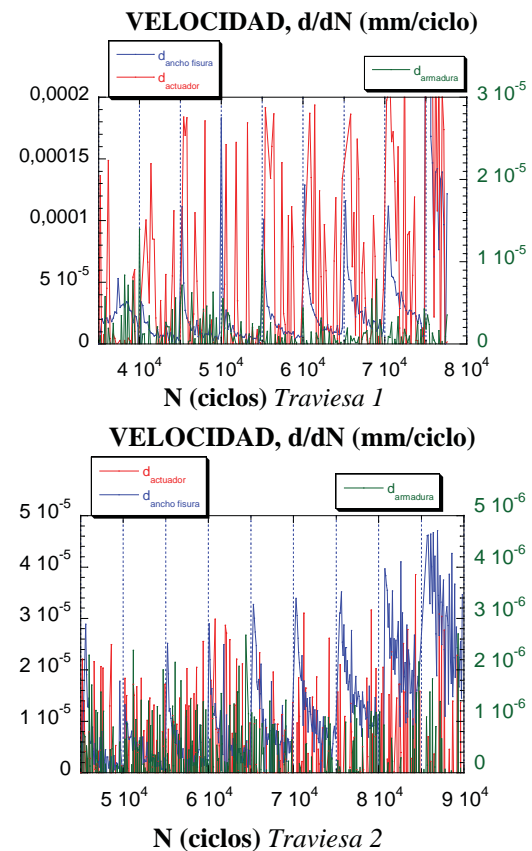
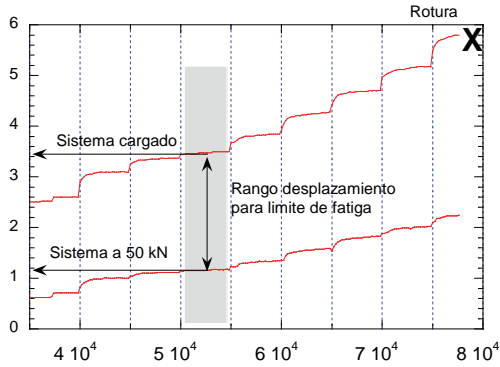


Figura 12. Evolución de grieta, actuador y deslizamiento de armaduras.

Una vez definido el límite de fatiga se puede establecer una correspondencia entre éste valor y el correspondiente rango de nivel de desplazamiento del actuador, que define la variación de flecha registrada por la traviesa. En las condiciones descritas anteriormente, se establece un valor de descenso total del carril en vía para la traviesa 1 de 3,5 mm y para la traviesa 2 de 3,8 mm bajo carga máxima, como se muestra en lo diagramas de la Figura 15, a

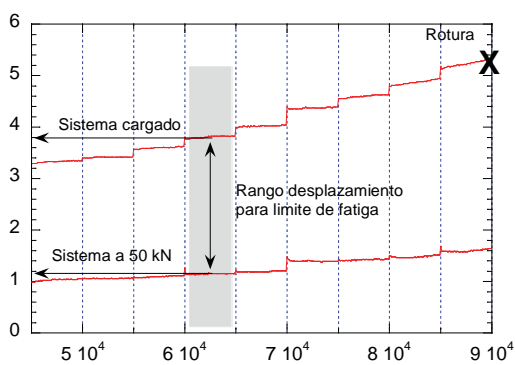
partir del cual se desarrollan los procesos de inestabilidad en el sistema. En esta cantidad se ha contabilizado también el descenso del carril correspondiente a las fases o escalones de carga bajo las que tienen lugar el asentamiento inicial del sistema evaluado.

DESP. ACTUADOR (mm)



N (ciclos) Travesía 1

DESP. ACTUADOR (mm)



N (ciclos) Travesía 2

Figura 15. Desplazamiento actuador en el límite de fatiga.

6 CONCLUSIONES

En un estudio anterior [3] se estableció un método de instrumentación de ensayo capaz de determinar el grado de deterioro y durabilidad de una traviesa de hormigón ensayada bajo cargas dinámicas en sección bajo carril

Este método de control habilita la posibilidad de comprobar el grado de daño en la traviesa mediante una simple comprobación del nivel del descenso del carril con respecto de una referencia inicial fija de la superestructura de la vía. Esta técnica de control rápida y fiable que evitaría el desguarnecido de la vía para comprobar el estado de fisuración de la traviesa

in situ como consecuencia de las cargas del tráfico ferroviario, ha quedado validada al extender el estudio a otras dos geometrías de traviesa diferentes y verificarse en las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento a las empresas COPASA Y LUSO GALAICA DE TRAVIESAS S.A. por el suministro del material e información relativa al sistema de producción, así como por permitir hacer públicos los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- [1] EN 13230-1 2010 (Aplicaciones ferroviarias. Vía.Traviesas y soportes de hormigón. Parte 1: Requisitos generales).
- [2] EN 13230-2 2010 (Aplicaciones ferroviarias. Vía.Traviesas y soportes de hormigón. Parte 2: Traviesas monobloque pretensadas).
- [3] ADIF. Especificación Técnica, ET 03.360.571.8. Traviesas monobloque de hormigón pretensado. 5ª Edición: Diciembre 2014.
- [4] Casado, J.A. et al. Parámetro de daño crítico para traviesas de alta velocidad. Documentación técnica. X Jornadas internacionales. Ingeniería de alta velocidad. Córdoba. Junio 2016.
- [5] Raúl Ovalle. Modelo del daño por fisuración en traviesas de hormigón para ferrocarril de alta velocidad. Generalización a diferentes geometrías. Trabajo fin de máster. Universidad de Cantabria. Octubre 2016.
- [6] ADIF. Dirección de Gestión Operativa de Activos. Número de plano P16.5210.00 Traviesas Monobloque de Hormigón. Traviesas PR (Travesía PR-01 EA. UIC 54 y 60).
- [7] http://www.adif.es/es_ES/ocio_y_cultura/fichas_informativas/ficha_informativa_00037.shtml. (Fecha consulta: 29/04/2016)
- [8] Locati, L. (1950) La Fatica dei Materiali Metallici. Ulrico Hoepli. Milano.
- [9] Locati, L. (1952) Programmed Fatigue Test, Variable Amplitude Rotat. Metallurgia Italiana. Vol 44, nº 4. 135-144
- [10] Casado, J.A. Tesis Doctoral. Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta. Universidad de Cantabria. Abril, 2001.