

# Análisis estadístico de cargas dinámicas para el estudio de la fatiga de una línea de alta velocidad con tráfico mixto

J. L. CÁMARA (\*), V. CUÉLLAR (\*\*), P. GONZÁLEZ (\*\*\*),  
G. MARTÍN (\*\*\*\*), R. D. CASQUERO (\*\*\*\*\*), M. RODRÍGUEZ (\*\*\*\*\*), y J. A. VILLARONTE (\*\*\*\*\*)

**RESUMEN** Con el fin de definir la historia de cargas por eje de un tren de mercancías tipo a utilizar en el estudio de fatiga de líneas de alta velocidad sometidas a tráfico mixto, se han registrado las cargas dinámicas de 141 trenes de mercancías por medio de un conjunto de detectores de impacto en vía, instalados por ADIF en una estación de control en el Corredor Ferroviario Mediterráneo. El análisis estadístico de los datos proporcionados por el paso de 12.925 cargas de ejes de mercancías ha permitido determinar las distribuciones de frecuencia de: la velocidad del tren, la carga nominal por eje, la longitud del tren y el coeficiente de impacto. La variación de ese coeficiente con la carga nominal por eje y la velocidad del tren ha sido representada en un gráfico 3D en el que aparecen claramente diferenciados los picos máximos. Los resultados obtenidos están siendo utilizados para evaluar experimentalmente el efecto que puede tener el paso de 2 millones de ejes del tren de mercancías tipo, en la fatiga de los diferentes componentes de una sección de 21 metros de longitud de una línea de alta velocidad, construida a escala 1:1 en la célula de ensayos del CEDEX, después de haber sido sometida al paso de 5 millones de ejes de un tren de pasajeros tipo de alta velocidad.

## STATISTICAL ANALYSIS OF DYNAMIC LOADS FOR THE FATIGUE TESTING OF A HIGH SPEED LINE WITH MIXED TRAFFIC

**ABSTRACT** *Aiming to define the axle load time history of a prototype freight train to be used for fatigue testing of high speed lines subjected to mixed traffic, the dynamic loads of 141 freight trains have been recorded by means of a set of rail impact detectors deployed by ADIF at a control station in the Mediterranean railway corridor. The statistical analysis of the data provided by the passage of 12,925 freight axle loads has allowed to determine the frequency distributions of: the train speed, the nominal axle load, the train length and the impact coefficient. The variation of that coefficient with the nominal axle loads and the train speeds has been presented in a 3D plot. The results obtained are being used at present to assess experimentally the effect that the passage of 2M axle loads of the prototype freight train may have in the fatigue behaviour of the different components of a section, 21 m long, of a high speed line, built at 1:1 scale in the CEDEX track box, after having been subjected to the passage of 5M axle loads of a prototype high speed passenger train.*

**Palabras clave:** Estadístico, Mercancías, Trenes, In situ, Vía, Impacto, Detectores.

**Keywords:** Statistical, Freight, Trains, In situ, Rail, Impact, Detectors.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es determinar una carga por eje uniforme para un tren de mercancías tipo con el fin de llevar a cabo el estudio de fatiga de líneas de alta velocidad sometidas a tráfico mixto.

El análisis estadístico de las cargas dinámicas de 141 trenes de mercancías (12.925 ejes), registradas por medio de un detector de impacto en vía, instalado por ADIF en la estación de control de Torredembarra en el Corredor Mediterráneo, ha permitido la identificación de esa carga. Se utilizará para evaluar experimentalmente el efecto que puede tener el paso de 2 millones de ejes de ese tipo en el comportamiento a fatiga de los componentes de la superestructura y la infraestructura de diferentes secciones de una línea de alta velocidad construida a escala 1:1 en la célula de ensayos del CEDEX, después de haber sido sometida a la aplicación de 5 millones de ejes de un tren de pasajeros tipo definido con anterioridad. Para este tren de pasajeros tipo se adoptó, para el ensayo de fatiga en la célula de ensayos, una carga por eje uniforme de 170 kN (carga nominal por eje máxima aceptada por ADIF para trenes de pasajeros de alta

(\*) Ingeniero en Electrónica. E-mail: [juan.l.camara@cedex.es](mailto:juan.l.camara@cedex.es)

(\*\*) Dr. Ingeniero de Caminos. E-mail: [vicente.cuellar@cedex.es](mailto:vicente.cuellar@cedex.es)

(\*\*\*) Ingeniero de Caminos. E-mail: [pgonzalez@fundacioncdh.com](mailto:pgonzalez@fundacioncdh.com)

(\*\*\*\*) Ingeniero de Caminos. E-mail: [gmartindemiguel@adif.es](mailto:gmartindemiguel@adif.es)

(\*\*\*\*\*) Ingeniero de Caminos. E-mail: [rcasquero@adif.es](mailto:rcasquero@adif.es)

(\*\*\*\*\*\*) Licenciado en Ciencias Geológicas. E-mail: [mrodriguez@adif.es](mailto:mrodriguez@adif.es)

(\*\*\*\*\*\*) Ingeniero de Caminos. E-mail: [jovillaronte@adif.es](mailto:jovillaronte@adif.es)



FIGURA 1. Vista superior de la célula de ensayos del CEDEX debidamente modificada para poder simular tráfico mixto.

velocidad). Detalles relativos a los ensayos y las características de la célula de ensayos del CEDEX se dan en Cuéllar et al (2011) [1] y Manzanos et al (2007) [2].

En el siguiente texto se realizará, en primer lugar, una introducción de la estación de control de Torredembarra. A continuación, se presentará el análisis estadístico de los datos registrados. Los resultados obtenidos se compararán con los derivados de la función de daños de Dormon y las expresiones de Prud'homme y Eisenmann. Por último, se mostrarán las conclusiones relativas a la carga por eje uniforme buscada.

## 2. EL DETECTOR DE IMPACTO EN VÍA DE TORREDEMBARRA

El detector de impacto en vía (DIV) es un sistema de protección que supervisa las cargas dinámicas de rueda producidas por cada tren en circulación. La información obtenida se envía a un ordenador central y se utiliza para identificar indicios de problemas y, en algunos casos, para tomar medidas preventivas que permitan evitar daños en la infraestructura.

El propósito del DIV es minimizar la posibilidad de dañar la vía por la existencia de “planos” de rueda o vehículos sobrecargados e identificar el tren responsable de estos daños. Esto es realmente importante porque los daños a la infraestructura causados por planos de las ruedas y vagones sobrecargados suponen un gran coste al ferrocarril, en particular, las cargas de impacto originadas por ruedas dañadas son una causa importante de desperfectos en el carril.

El DIV utiliza datos procedentes de secciones de vía instrumentadas para medir el pico de carga y la carga media de cada paso rueda. Estos valores se utilizan posteriormente para calcular las cargas de impacto por eje, las fuerzas nominales por eje y el tonelaje del tren. El DIV funciona a la máxima velocidad de la línea, por lo que todos los trenes en circulación son monitorizados. Los datos son procesados y enviados mediante IP a un equipo de visualización localizado en una central de control remoto. Si se detecta una carga de eje elevada o un impacto, en la sala de control de la central se activa una alarma, de forma que pueden tomarse medidas, incluyendo la detención del tren.

El DIV de Torredembarra está situado cerca de Tarragona, en un emplazamiento donde la vía, recta y sin pendiente, permite a los trenes circular a una velocidad constante, evitando cambios en esa variable que podrían estar relacionados con los planos de rueda. El fácil acceso a la energía eléctrica y a las líneas de teléfono que presenta el lugar también ha contribuido a su elección para la instalación del sistema DIV, véase Figura 2.



FIGURA 2. Emplazamiento del DIV de Torredembarra.

El equipo DIV consta de varias bandas de medida de tensión de cortante fijadas en el alma de los carriles. Están dispuestas, en cada uno de los puntos seleccionados del alma del carril, formando un puente de Wheatstone eléctrico cuyos cambios en la resistencia eléctrica están relacionados a través de los voltajes de salida medidos después de ser examinados y filtrados, con el paso de las cargas de las ruedas. Las señales procesadas se calibran correctamente mediante el estudio del efecto producido por ruedas de vehículos con cargas conocidas.

Las bandas disponen de una cobertura protectora y los cables que cruzan la vía desde las bandas hasta el ordenador de la estación de medida están protegidos por tubos. Las bandas, dos cada dos travесas adyacentes, véase la Figura 3, se distribuyen a lo largo de un tramo de vía de ocho metros de longitud para permitir la detección de cualquier defecto de rueda. Las señales de las bandas de cortante son registradas por un ordenador situado junto a la vía desde el cual se transmiten los datos a un ordenador central para su visualización. Sumando las señales proporcionadas por las bandas de cortante entre travесas, se mide la carga de cada una de las ruedas tantas veces como número de travесas hay en el tramo de vía de ocho metros de longitud dividido entre dos.

El equipo DIV instalado en Torredembarra monitoriza vehículos que circulan a velocidades de hasta 160 km/h y es capaz de registrar datos de trenes consecutivos separados un intervalo de tiempo mínimo de 120 segundos. A velocidades por debajo de 25 km/h, los defectos de las ruedas no se pueden detectar de forma fiable.

Las siguientes variables son registradas en la estación DIV:

- Fecha y hora de paso
- Características del vehículo
- Velocidad ( $\pm 4$  km/h)

y a partir de las diversas mediciones llevadas a cabo, para cada rueda, en el tramo de vía de 8 m:

- Carga media de rueda (kN) para cada rueda
- Carga pico de rueda (kN) para cada rueda

Una vez que los datos han sido registrados y tratados, se considera que **la carga media de rueda representa la carga nominal de rueda y el pico de carga de rueda representa la carga de impacto de rueda.**



FIGURA 3. Bandas de cortante en el alma del carril entre dos traviesas consecutivas.

Esa información puede utilizarse para la evaluación de:

- Número total de ejes
- Frecuencia y magnitud de las fuerzas de rueda causantes de daños
- Tonelaje total de tráfico
- Daños en la vía
- Predicción de vida de los distintos componentes de la vía
- Circulación de vehículos
- Control del estado de los vehículos
- Análisis de los costes y beneficios del control de vehículos con ruedas defectuosas

Para analizar los datos se ha utilizado un programa de software desarrollado por EAE Technology. Proporciona informes que incorporan localización, fecha, hora, tipo de vehículo, tonelaje, velocidad, recuento de ejes, vía, carril, valores límite de carga y las cargas nominal y de impacto de rueda, véase la Figura 4. En esa figura las líneas verdes representan las cargas medias de las ruedas derecha e izquierda en una vía y los puntos rojos representan las cargas pico de las ruedas derecha e izquierda detectadas a lo largo del tramo de 8 metros de vía. Si una de las cargas pico está fuera de los límites de tolerancia, suena una alarma en la sala de control del puesto central y se visualiza un mensaje aconsejando un plan de actuación adecuado.

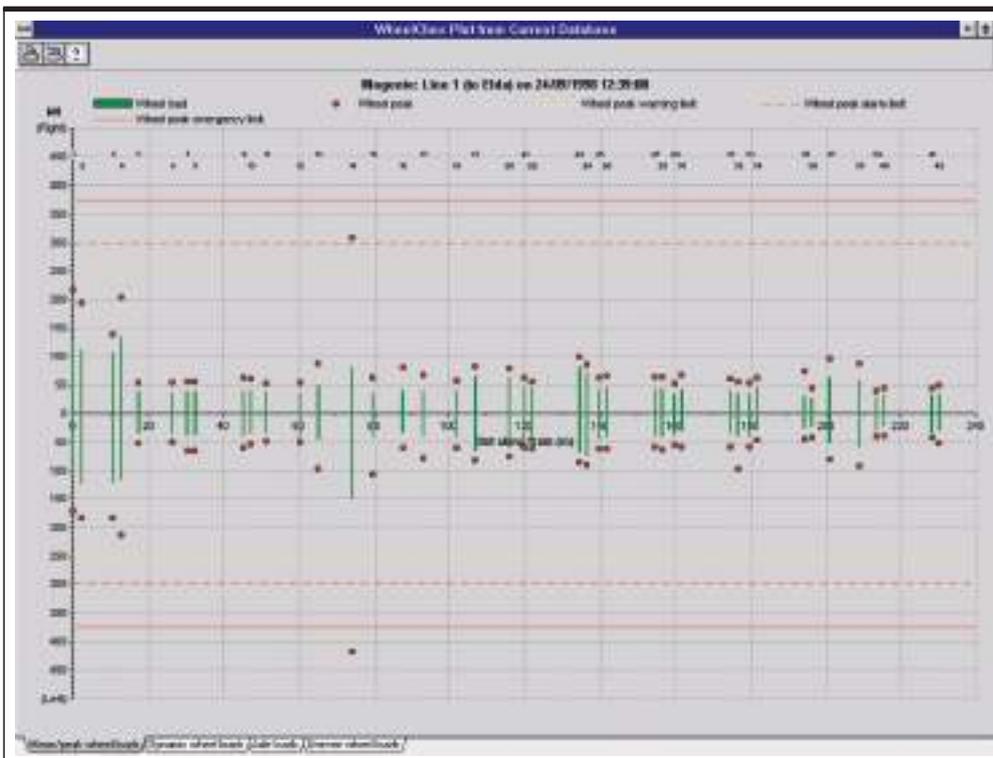


FIGURA 4. Valores límite de carga de rueda (líneas rojas), cargas nominales de rueda (líneas verdes) y cargas de impacto de rueda (puntos rojos) proporcionados por el programa de software del equipo DIV.

### 3. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA BASE DE DATOS

De los 141 trenes analizados, 76 trenes circularon por la vía n° 1 (sentido sur-norte) y 65 trenes por la vía n° 2 (sentido norte-sur). Considerando los ejes, de las 12.925 cargas de eje estudiadas, 7.173 corresponden a la vía n° 1 y 5.752 a la vía n° 2. La Tabla 1 muestra, para la vía n° 1, la vía n° 2 y las

vías n° 1 + n° 2 en conjunto, los resultados de un primer análisis en el que se muestran el mínimo, el máximo, la media y la desviación estándar de la velocidad, número de ejes, longitud, tonelaje, carga media de eje (como suma de los valores medios de las ruedas derecha e izquierda) y carga pico de eje (como suma de las cargas pico de ambas ruedas derecha e izquierda).

PARÁMETRO ESTADÍSTICO	VÍA n°	VELOCIDAD [km/h]	NÚMERO DE EJES	LONGITUD (m)	PESO [toneladas métricas]	CARGA MEDIA DE EJE [kN]	CARGA PICO DE EJE [kN]
MÍNIMO	1	72	50	173	370	39	59
MÁXIMO	1	100	156	540	1.684	225	456
MEDIA	1	90	94	436	1.017	106	149
DESVIACIÓN EST.	1	6	23	83	288	60	69
MÍNIMO	2	80	52	158	623	37	55
MÁXIMO	2	100	116	538	1.671	226	460
MEDIA	2	93	88	426	1.074	118	160
DESVIACIÓN EST.	2	5	16	85	249	54	63
MÍNIMO	1+2	72	50	158	370	37	55
MÁXIMO	1+2	100	156	540	1.684	226	460
MEDIA	1+2	91	92	432	1.040	111	154
DESVIACIÓN EST.	1+2	6	20	84	273	58	67

TABLA 1. Parámetros estadísticos de los 141 trenes de mercancías analizados.

Los parámetros estadísticos de la velocidad de los trenes asociados a cada una de las vías considerados en el análisis son bastante similares. Se obtuvieron unas velocidades de tren máxima y mínima de 100 km/h y 72 Km/h respectivamente, así como un **valor de velocidad media de 91 km/h**. Por otro lado, los valores de carga de eje identificados para cada una de las vías son muy coherentes, obteniendo unos valores mínimo, **máximo y medio de carga nominal de eje de 37 kN, 226 kN y 111 kN** respectivamente. Los **valores mínimo, máximo y medio de carga de impacto por eje fueron 55 kN, 460 kN y 154 kN** respectivamente.

Los parámetros estadísticos de la carga media de eje (nominal) y carga pico de eje (impacto) para la vía n° 2 son superiores a los de la vía n° 1, lo que podría estar relacionado con el hecho de que el porcentaje de vagones mas cargados en la vía n° 2 es superior al de la vía n° 1. El número de ejes por la vía n° 1 con una carga superior a 100 kN es de 3.032 ejes de un total de 7.173, lo que representa un 42%, mientras que por la vía n° 2, solamente 3.200 ejes de 5.752 tienen una carga mayor de 100 kN contabilizando un 56%.

Se puede pensar que la carga nominal de eje mínima obtenida de 37 kN está asociada a un vagón sin carga, mientras que el valor máximo de 226 kN corresponde a un vagón completamente cargado, por lo que a cada eje de un vagón completamente cargado se le puede asociar una carga de mercancía de 189 kN. El gráfico de la Figura 5 muestra los porcentajes de ejes en ambas vías (vía n° 1 + vía n° 2) con carga de mercancía en los intervalos 0%-30%, 30%-60% y 60%-100% de la carga máxima de mercancía soportada por el eje de un vagón completamente cargado (189 kN). En esta figura se puede observar que aproximadamente un 30% de los ejes analizados soportan una carga de mercancía de entre 113 kN y 189 kN, lo que corresponde con una carga nominal de eje de entre 150 kN (113 kN + 37 kN) y 226 kN (189 kN + 37 kN).

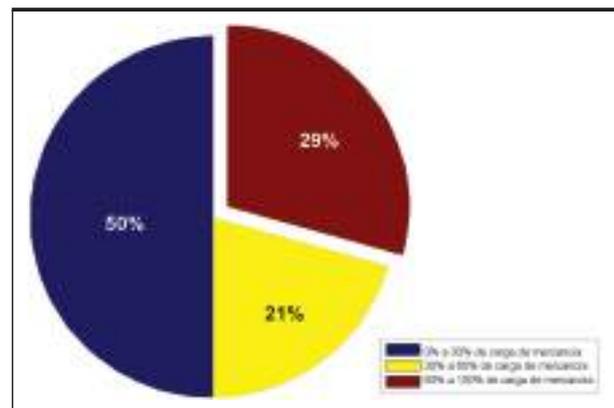


FIGURA 5. Distribución de ejes de trenes soportando diferentes porcentajes de carga de mercancía máxima (195 kN).

### 4. HISTOGRAMAS Y DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA DE CARGAS NOMINALES DE EJE Y VELOCIDADES DE LOS TRENES

En la Figura 6 se representa un histograma con las cargas nominales de eje. Es un histograma multimodal donde quedan reflejados tres tipos de trenes: descargados, medio cargados y totalmente cargados. Sus valores máximo y mínimo, ya comentados, son 37 kN y 226 kN. La media es de 111 kN y la desviación estándar es 57 kN.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este trabajo es identificar la carga de eje más adecuada para la realización de ensayos de fatiga en la célula de ensayos del CE-DEX, parece razonable fundamentar su definición en la

distribución del intervalo superior de cargas identificado en el capítulo anterior (30% del total de las cargas nominales medidas, que oscilan entre los 150 kN y 226 kN).

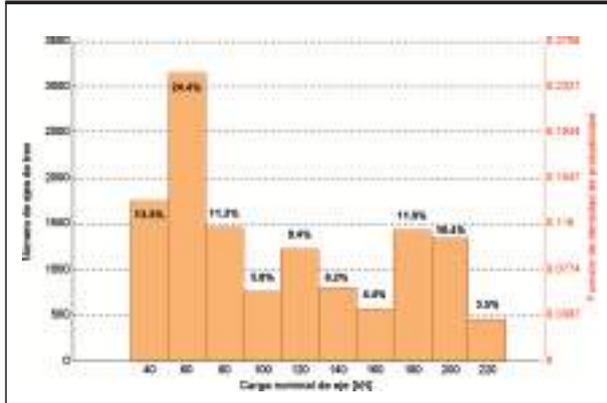


FIGURA 6. Histograma de las cargas nominales de eje.

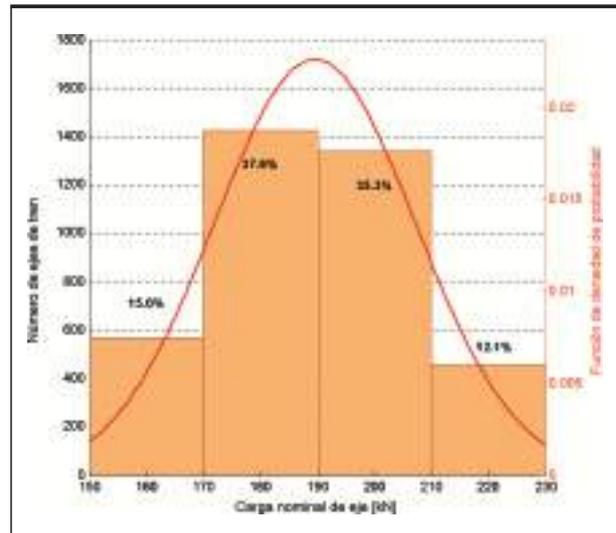


FIGURA 7. Histograma y función de densidad normal de las cargas nominales de eje, utilizada para definir la carga de eje uniforme del tren de mercancías tipo.

El histograma para ese intervalo de cargas, representado en la Figura 7, con una media de 189,63 kN, una mediana de 189 kN y una desviación estándar de 17,63 kN, se ajusta muy bien a la función de densidad de probabilidad normal, con las mismas coordenadas de abscisas, representadas en esa figura. Para un intervalo de confianza de 95,4%, encontramos en esa curva de densidad de probabilidad una carga nominal máxima de 189 kN + 2x17,63 kN = 224,26 kN.

Por otra parte, la Figura 8 muestra el histograma y la distribución de frecuencias acumuladas de velocidades de los trenes para el 30% de las 12.925 cargas nominales de eje, que oscilan entre 150 kN y 226 kN. Para ese intervalo de cargas, los valores de la media, la mediana y la desviación estándar son 90,83 km/h, 93 km/h y 5,64 km/h respectivamente. Tomando una función de densidad normal con un valor medio de 93 km/h (igual a la mediana de los datos estudiados) y una desviación estándar de 5,64 km/h. El valor máximo que corresponde a un intervalo de confianza del 95,4%, en esa curva de densidad normal, sería 93 km/h + 2x5,64 km/h = 104,28 km/h.

### 5. CARGA DINÁMICA A PARTIR DE LA FUNCIÓN DE DAÑO

Para combinar las diferentes cargas nominales de eje que oscilan entre los 150 kN y 226 kN, los 3.878 valores de  $P_{Di}$  correspondientes a esas cargas nominales pueden hacerse equivalentes al mismo número de cargas nominales de eje teniendo todas el mismo valor  $P_{De}$  mediante la siguiente ley de daños de Dormon:

$$P_{De} = \left[ \frac{\sum P_{Di}^{1/n}}{N} \right]^n \quad (1)$$

donde  $N = 3.878$  y  $n = 0,2$  es el valor sugerido por Shenton y adoptado por Dormon.

Aplicando esta fórmula al intervalo de cargas nominales de eje comprendidas entre 150 kN y 226 kN, se ha obtenido un valor  $P_{De} = 197$  kN.

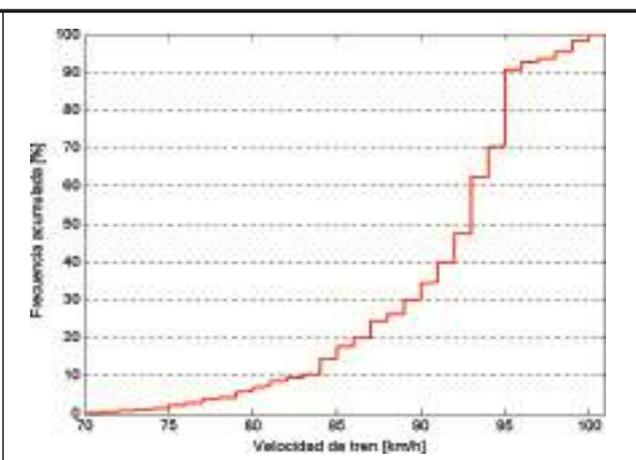
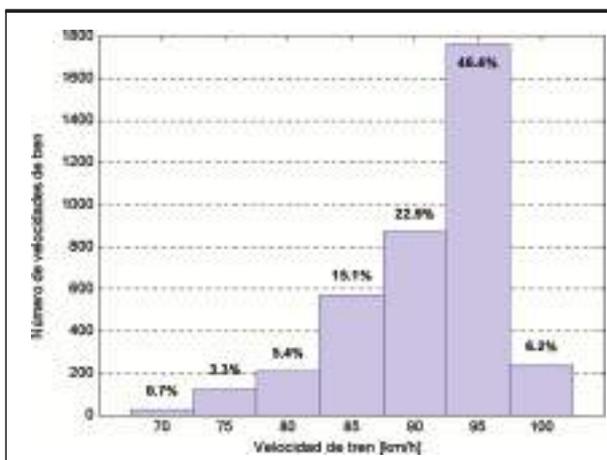


FIGURA 8. Histograma y distribución de frecuencias acumuladas de velocidades de los trenes utilizados para definir la velocidad del tren de mercancías tipo.

### 6. CARGA DINÁMICA A PARTIR LAS EXPRESIONES DE PRUD/HOMME

Considerando una distribución normal de las cargas dinámicas de rueda con un valor medio de 94,5 kN igual a la media de la carga nominal de eje determinada anteriormente (189 kN) dividida entre 2, Prud'homme (1970) [3] incorpora el efecto de las irregularidades en la superficie del carril a través de la desviación estándar  $\sigma$  de dicha distribución utilizando las siguientes expresiones:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_{NS}^2} \tag{2}$$

donde

$$\sigma_s = \frac{0.2VM_s}{200} \tag{3}$$

y

$$\sigma_{NS} = 0.0042bV \sqrt{\frac{M_{NS}K}{10}} \tag{4}$$

En estas ecuaciones  $\sigma$ ,  $\sigma_s$  y  $\sigma_{NS}$  están expresadas en toneladas métricas y V en km/h; el parámetro "b" representa la máxima irregularidad vertical tolerable en una "cuerda" de 3 m en la vía;  $M_s$  y  $M_{NS}$  representan las masas suspendidas y no suspendidas, respectivamente, en toneladas métricas, siendo  $M_{NS} \approx 10\%$  de la carga nominal y K es la rigidez de vía expresada en kN/mm.

Para una carga nominal de rueda de 94,5 kN, una velocidad de tren de 93 km/h (valor de la mediana de la distribución normal de velocidades para cargas nominales de eje en el intervalo 150 kN - 226 kN), un valor de "b" de 1 mm y una rigidez de vía de 100 kN/mm, las expresiones anteriores dan un valor  $\sigma = 1,43$  toneladas métricas = 14,3 kN. Para un intervalo de confianza del 95,4%, el valor máximo de la carga dinámica de rueda es 94,5 kN + 14,3x2 kN = 123,1 kN y la carga dinámica de eje máxima será 246,2 kN.

### 7. CARGA DINAMICA A PARTIR DE LAS EXPRESIONES DE EISENMANN

Suponiendo también una distribución normal de cargas dinámicas en la vía, Eisenmann determina el valor del Factor de Amplificación Dinámico (FAD) mediante la siguiente expresión:

$$FAD = 1 + n\alpha\phi \tag{5}$$

donde n, que incorpora el nivel de confianza del análisis, adopta un valor n = 2 para el 95,4% de intervalo de confianza,  $\alpha$  es un parámetro que depende del estado de la vía, adoptando el valor 0,2 para una vía en buen estado y  $\phi$  es otro parámetro que, en función de la velocidad del tren en km/h viene dado por la siguiente ecuación:

$$\phi = 1 + \frac{V - 60}{140} \tag{6}$$

Para una velocidad V = 93 km/h (mediana de los datos estudiados) se obtiene  $\phi = 1,236$ , con lo que tenemos un FAD = 1,494, que aplicado a la carga de 189,63 kN (media de los

valores estudiados) nos da una carga dinámica de eje de 283,36 kN.

### 8. COEFICIENTES DE IMPACTO DE EJES

Dividiendo las cargas pico de eje entre las cargas medias de eje, tal y como se representan en la Figura 4, se pueden obtener una serie de coeficientes de impacto de eje para cada tren registrado. Si representamos ahora los coeficientes de impacto de las 3.878 cargas nominales de eje con valores entre 150 kN y 226 kN frente a esas cargas nominales de eje, obtenemos la gráfica de la Figura 9.

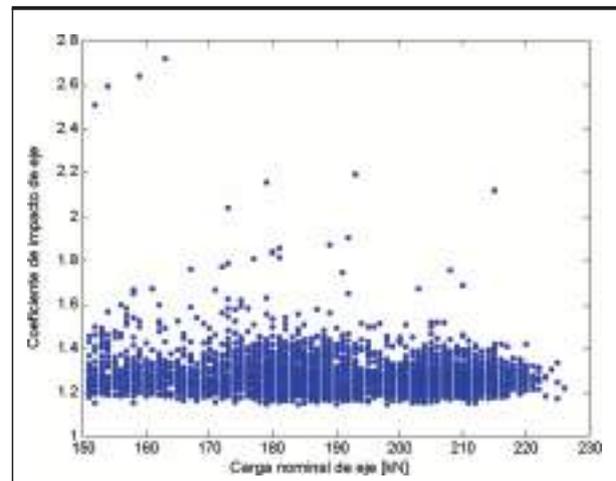


FIGURA 9. Coeficientes de impacto de ejes frente a las cargas nominales de eje comprendidas entre 150 kN y 226 kN.

Para el intervalo de cargas nominales de eje considerado en este estudio (150 kN-226 kN), la Figura 10 muestra los coeficientes de impacto de eje representados frente a las velocidades de los trenes. En la Figura 11 se han representado, en un gráfico 3D, los valores de esos coeficientes (eje

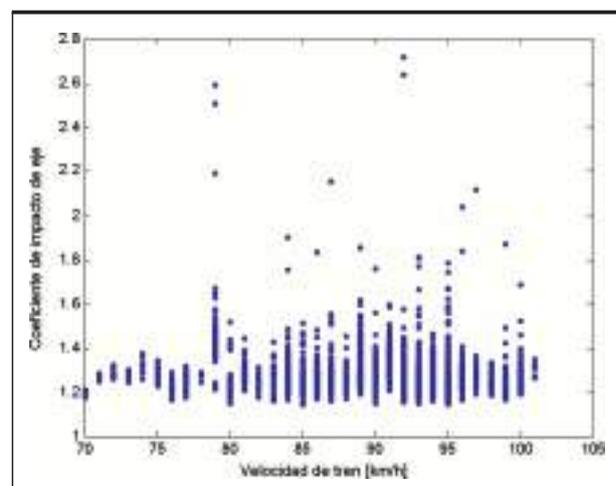


FIGURA 10. Coeficientes de impacto de eje frente a las velocidades de los trenes para cargas nominales de eje comprendidas entre 150 kN y 226 kN.

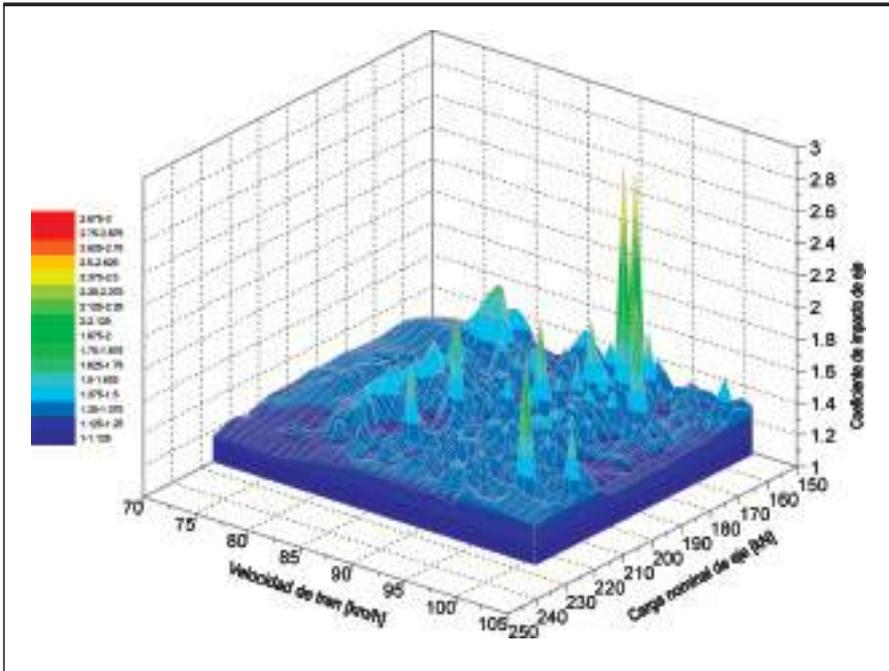


FIGURA 11. Gráfico 3D de los coeficientes de impacto de eje frente a las velocidades de los trenes y las cargas nominales de eje comprendidas entre 150 kN y 226 kN.

vertical) frente a las cargas nominales de eje (un eje horizontal) y las velocidades de los trenes (el otro eje horizontal). En esta serie de figuras, se han obtenido unos valores máximo y mínimo de 2,718 y 1,145, que corresponden a cargas nominales de eje de 163 kN y 190 kN y velocidades de tren de 92 km/h y 95 km/h respectivamente. A partir de estos valores, se puede obtener una carga dinámica máxima de eje de 445 kN (165 kN x 2,718).

En la Figura 12 se ha representado un histograma y su correspondiente función de densidad normal, con el mismo eje de abscisas, de los coeficientes de impacto de eje para el intervalo de cargas nominales seleccionado.

Se han obtenido unos valores para la media, la mediana y la desviación estándar de 1,276, 1,260 y 0,094 respectivamente

y un valor máximo de  $1,448 = 1,260 + 2 \times 0,094$  para un intervalo de confianza del 95,4% de la función de densidad normal que se ajusta a la distribución estadística con esos parámetros. Multiplicando el valor medio de la carga nominal de eje (189,63 kN) por el coeficiente de impacto correspondiente al valor máximo del intervalo de confianza del 95,4% (1,448), se obtiene una carga de dinámica de 275 kN.

Por otra parte, el producto de la carga nominal de eje correspondiente al intervalo de confianza del 95,4% (224,6 kN) y el valor medio de la distribución normal de los coeficientes de impacto (1,26), proporciona un resultado de 283 kN equivalente al obtenido mediante las expresiones de Eisenmann.

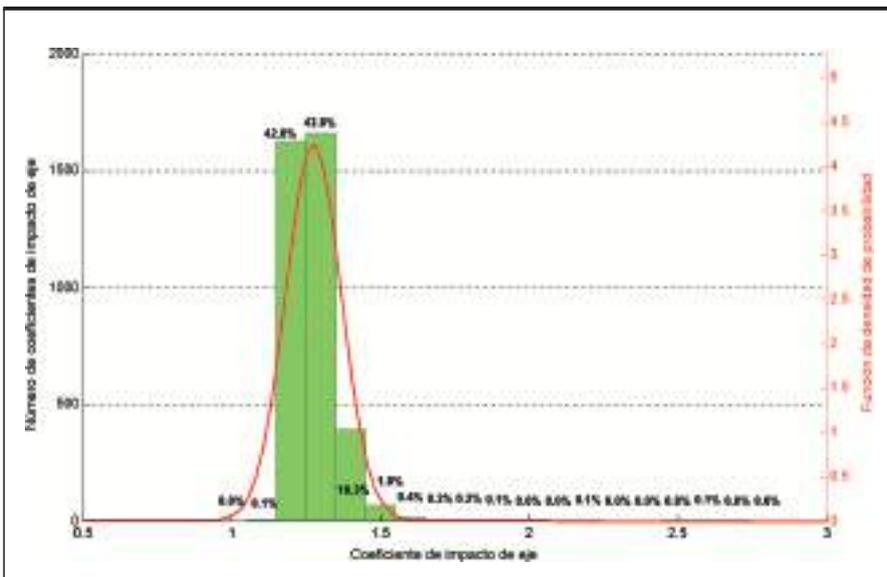


FIGURA 12. Histograma y función de densidad normal de los coeficientes de impacto de eje para las cargas nominales de eje comprendidas entre 150 kN y 226 kN.

## 9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Tomando como origen el análisis estadístico de 12.925 cargas nominales de eje correspondientes a 141 trenes de mercancías circulando por ambas vías en la estación DIV de Torredembarra, se ha considerado una muestra de 3.878 cargas de eje con valores nominales que oscilan entre 150 kN y 226 kN como representativa para la definición de una carga uniforme de eje, para ser utilizada posteriormente en ensayos de fatiga en la célula de ensayos del CEDEX. Partiendo de la distribución de frecuencia normal para ese rango de cargas nominales por eje, se ha obtenido un valor medio de 189,63 kN y, para un intervalo de confianza del 95,4%, una carga máxima por eje de 224,26 kN (correspondiente al percentil 97). Aplicando la función de daños de Dornon a los 3.878 valores nominales seleccionados se ha obtenido un valor equivalente de 197 kN.

La distribución normal a la que se ajustan las velocidades de los trenes, para el conjunto de ejes mencionado en el párrafo anterior, tiene una mediana igual a 93 km/h y un valor máximo de 104,28 km/h para un intervalo de confianza del 95,4%.

Para este mismo intervalo de confianza, se ha determinado una carga dinámica de eje máxima de 246,2 kN a partir de las expresiones de Prud'homme que incorporan las irregularidades de algunas líneas de ferrocarril francesas no analizadas en este trabajo.

En cuanto a los coeficientes de impacto detectados en la estación DIV de Torredembarra, se ha obtenido una carga dinámica de eje máxima de 443 kN en el intervalo de cargas nominales de eje considerado en este estudio (150 kN - 226 kN). A partir de las distribuciones normales de las cargas nominales de eje y de los coeficientes de impacto, para el rango de cargas nominales mencionado, se ha llegado a un valor dinámico de eje de 275 kN al combinar el percentil 50 de la carga nominal de eje con el percentil 97 de los coeficientes de impacto y un valor dinámico de eje de 283 kN al combinar el percentil 97 de la carga nominal de eje con el percentil 50 de los coeficientes de impacto, valor este último

que coincide con el obtenido mediante las expresiones de Eisenmann.

A la luz de este resumen y, en una primera fase de la campaña de ensayos de fatiga que se va a llevar a cabo en la célula de ensayos del CEDEX reproduciendo el paso de trenes de mercancías en vías de alta velocidad, se recomienda utilizar una carga uniforme de eje de 225 kN, (55 kN superior a la carga de eje uniforme utilizada en campañas anteriores cuando se reprodujo el paso de trenes de pasajeros a 300 km/h) y una velocidad de 105 km/h.

En una segunda fase, se podría considerar una carga de eje de 250 kN a la misma velocidad si se desea tener en cuenta en el ensayo de fatiga el efecto de las irregularidades en una vía de buena calidad.

En una tercera fase, se podría incorporar el efecto del impacto de los defectos de rueda aumentando la carga de eje hasta 280 kN, manteniendo la misma velocidad.

Por último, se podría considerar un único eje aislado de amplitud 445 kN para intentar analizar el máximo efecto que los defectos de rueda de trenes a plena carga, similares a los registrados en Torredembarra, pueden causar en los componentes de la superestructura e infraestructura de una vía de alta velocidad sometida a tráfico mixto.

## 10. REFERENCIAS

- [1] Cuéllar, V., Navarro, F., Andréu, M.A., Cámara, J.L., González, F., Rodríguez, M., Núñez, A., González, P., Díaz, R., Navarro, J. & Rodríguez, R., 2011. Short and long term behaviour of high speed lines as determined in 1:1 scale laboratory tests. 9th World Congress on Railway Research, Lille, France.
- [2] Manzanos, J., Moreno, J., Cuéllar, V., Andréu, M.A. & Navarro, F., 2007. CEDEX's experimental facility for testing railway tracks. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, vol. 4, pp. 2037-2055.
- [3] Prud'homme, A., 1970. La voie. Revue Générale des Chemins de Fer, January.