

# LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA Y EL DETERIORO DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

## THE VERTICAL STIFFNESS OF THE TRACK AND THE DETERIORATION OF HIGH SPEED LINES

ANDRÉS LOPEZ PITA. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Centro de Innovación del Transporte (CENIT).

**RESUMEN:** El presente artículo efectúa una serie de reflexiones sobre algunas posibles formas de limitar el deterioro de las vías en líneas de alta velocidad, y, por tanto, de reducir el coste de su mantenimiento. El ámbito de referencia en que se sitúan las reflexiones que se exponen, es el de la rigidez vertical de la vía.

**PALABRAS CLAVE:** RIGIDEZ VERTICAL, VÍA, PLACA DE ASIENTO, VIBRACIÓN

**ABSTRACT:** This article considers a number of possible ways to limit the deterioration of the tracks on high speed lines and thereby reduce the cost of their maintenance. The considerations and thoughts set forth in particular to the vertical stiffness of the track

**KEYWORDS:** VERTICAL STIFFNESS, TRACK, BASE PLATE, VIBRATION

### 1. INTRODUCCIÓN

La experiencia adquirida en Europa en los últimos 20 años (1981-2001), en el ámbito de la explotación de líneas con servicios de alta velocidad, ha permitido poner de relieve que el ferrocarril puede llegar a alcanzar, en los servicios interurbanos de viajeros, cuotas de mercado en un corredor dado, de hasta casi un 50%, considerado el conjunto de los modos concurrentes (avión, vehículo particular y autocar), o bien del 80 ó el 90%, si sólo se considera la dualidad ferrocarril-avión.

Esta realidad se ha traducido, desde el punto de vista comercial, en un importante aumento de los ingresos obtenidos por el ferrocarril, que ha ido acompañado por acotados costes de explotación. Sin embargo, una visión global del impacto de estos nuevos servicios, debería tener en cuenta, desde la perspectiva de los Gestores de la infraestructura, la evolución de los costes debidos al mantenimiento de la calidad geométrica de la vía respecto a las líneas convencionales.

Es razonable, por tanto, pensar que en paralelo a los esfuerzos que despliega el ferrocarril para hacer más atractiva y competitiva su oferta comercial, parezca aconsejable tam-

### 1. INTRODUCTION

The experience acquired in Europe over the last 20 years (1981-2001) relating to the operation of lines with high speed services has highlighted the fact that, with respect to inter-city passenger transport services, the railway is capable of securing up to nearly 50% of the market share on any given corridor, taking into consideration all the competing modes of transport (aeroplane, private vehicle and coach), or 80 or 90% if we only consider the competition between the train and the aeroplane.

From the commercial viewpoint, this fact has caused a substantial increase of the railways' income, which has been accompanied by a containment of the costs of operation. From the perspective of the infrastructure managers, however, a global vision of the impact of these new services should take into account the evolution of the costs due to the additional effort required to maintain the geometric quality of the track, as compared with that of the conventional lines.

It is therefore reasonable to assume that, alongside the railway's efforts to make its commercial offer more attractive and competitive, it would also seem advisable to try to

bién tratar de diseñar infraestructuras que requieran el menor mantenimiento posible. Esta evidente reflexión adquiere un mayor interés práctico, si se tiene en cuenta el incremento que se espera en los próximos años, para la velocidad máxima de circulación en servicio comercial. Es el caso de la nueva línea Madrid-Barcelona, donde en algunas secciones se prevé superar los 300 km/h.

En este contexto, el presente artículo, efectúa una serie de reflexiones sobre algunas posibles formas de limitar el deterioro de las vías en líneas de alta velocidad, y por tanto, de reducir el coste de su mantenimiento. El ámbito de referencia en que se sitúan las reflexiones que se exponen en los siguientes apartados, es el de la rigidez vertical de la vía.

## 2. LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA

El análisis mecánico del comportamiento de una vía de ferrocarril bajo cargas verticales, se ha efectuado, tradicionalmente, a partir de la hipótesis que el carril se apoyaba en un medio cuyo comportamiento tenso-deformacional respondía a la formulación de Winkler; es decir, proporcionalidad entre la tensión aplicada y el asiento producido en un mismo punto. De tal manera que el denominado coeficiente de balasto (c) expresado en N/mm<sup>3</sup>, representaba la mayor o menor elasticidad del apoyo del carril.

La escuela alemana y, en especial, el Prof. EISENMANN, (1970) basándose en numerosas medidas experimentales realizadas en las líneas de los ferrocarriles alemanes, en la década de los años 60 y 70, estableció la influencia del tipo de infraestructura sobre la que se apoyaba la vía, en el valor del coeficiente de balasto. Según este autor, para infraestructuras de mala capacidad resistente (arcillas, limos, etc.) el coeficiente c valdría del orden de 0,02 N/mm<sup>3</sup>. Para plataformas de buena calidad llegaría a alcanzar valores próximos a 0,10 ó 0,15 N/mm<sup>3</sup>.

Es indudable, no obstante, que el significado práctico atribuido, habitualmente, al concepto de rigidez vertical de una vía (k) (correspondiente a un hilo de carril), ha sido el cociente entre la carga puntual aplicada en la superficie del carril (Q) y el asiento vertical (y) provocado, en el conjunto de la vía, en el punto de aplicación de la mencionada carga. Matemáticamente:

$$K = \frac{Q}{y} \left( \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \right)$$

A igualdad de resistencia del apoyo del emparrillado de la vía, es decir, del sistema balasto-plataforma, y por tanto, del coeficiente de balasto (c),

El presente artículo efectúa una serie de reflexiones sobre algunas posibles formas de limitar el deterioro de las vías en líneas de alta velocidad, y por tanto, de reducir el coste de su mantenimiento

*This article considers a number of possible ways to limit the deterioration of the tracks on high speed lines and thereby reduce the cost of their maintenance*

*design infrastructures which require as little maintenance as possible. This obvious assumption acquires greater practical interest if we bear in mind the expected increase in the maximum running speed for commercial service over the next few years. This is the case of the new Madrid-Barcelona line, certain sections of which are expected to cater for speeds of over 300 km/h.*

*Within this context, this article considers a number of possible ways to limit the deterioration of the tracks on high speed lines and thereby reduce the cost of their maintenance. The considerations and thoughts set forth in the following sections refer in particular to the vertical stiffness of the track.*

## 2. THE VERTICAL STIFFNESS OF THE TRACK

*The mechanical analysis of the behaviour of a railway track under vertical loads has traditionally been carried out on the basis of the hypothesis which assumes that the rail was supported by an element whose stress and deformation-related behaviour corresponded to Winkler's formulation; i.e. proportionality between the stress applied and the subsidence caused on a particular point of the track. Consequently, what is known as the ballast coefficient (c), expressed in N/mm<sup>3</sup>, represented the greater or lesser elasticity of the rail support.*

*On the basis of numerous experimental measurements made on German railway lines in the 1960s and 1970s, the German school, and particularly Prof. EISENMANN, (1970), established the influence of the type of infrastructure which supported the track as being the value of the ballast coefficient. According to this author, for infrastructures with a poor resistance capacity (clays, silts, etc.) the coefficient c would be approximately 0.02 N/mm<sup>3</sup>. For higher-quality infrastructures, this value would rise to 0.10 or 0.15 N/mm<sup>3</sup>.*

*There is no doubt, however, that the practical significance usually attributed to the concept of vertical stiffness of a track (k) (corresponding to a rail), has been the quotient between the specific load applied to the surface of the rail (Q) and the vertical subsidence (y) caused to the track as a whole, at the point of application of the above-mentioned load. In mathematical terms:*

$$K = \frac{Q}{y} \left( \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \right)$$

*On the basis of the resistance of the support of the track grid, i.e. of the ballast-platform system and, therefore, of the ballast coefficient (c), it is*

Cuadro 1/ Table 1

VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA EN LÍNEAS CONVENCIONALES  
CHARACTERISTIC VALUES OF THE VERTICAL STIFFNESS OF THE TRACK ON CONVENTIONAL LINES

AUTOR (año) AUTHOR(year)	CARACTERÍSTICAS DE LA LINEA CHARACTERISTICS OF THE LINE	RIGIDEZ VERTICAL ESTÁTICA (kN/mm) STATIC VERTICAL STIFFNESS (kN/mm)
BIRMANN (1966)	Plataforma blanda/ <i>Soft platform</i> Plataforma arcillosa/ <i>Argillous platform</i> Plataforma de grava/ <i>Gravel platform</i> Plataforma de roca/ <i>Rock platform</i> Balasto y plataforma heladas/ <i>Frozen ballast and platform</i> Valor medio más frecuente/ <i>Most frequent average value</i>	5 a (to) 25 15 a (to) 20 20 a (to) 60 30 a (to) 40 80 a (to) 160 30
ALIAS (1971)	Plataforma margosa/ <i>Loamy platform</i> Plataforma arcillosa/ <i>Argillous platform</i> Plataforma de grava y roca/ <i>Gravel and rock platform</i> Balasto y plataforma helados/ <i>Frozen ballast and platform</i>	5 a (to) 15 15 a (to) 20 20 a (to) 80 80 a (to) 100

Fuente/Source: : A. López Pita (1976)

se puede conocer la influencia en la rigidez vertical de la vía, de parámetros tales como: el tipo de carril (EI), el área de apoyo efectiva de las traviesas (F) o la separación entre ellas (d). La expresión de ZIMMERMANN, así lo hace posible. Matemáticamente:

$$K = \frac{2F \cdot c}{d} \sqrt[4]{\frac{4EI d}{F \cdot c}} \quad (1)$$

Dado que, en general, la tipología del carril y la traviesa (incluyendo su distancia) estaba relativamente estandarizada en cada país, no sorprende, que en los años 60 y 70 del pasado siglo, la variación de la rigidez vertical de la vía fuese asociada a la capacidad resistente del balasto y la plataforma, tal como se refleja en el cuadro 1.

En todo caso, el Comité D-117 del ORE, (1974), estableció que la rigidez vertical de una vía, con traviesas de madera, era sensiblemente igual a la mitad de la correspondiente a una vía con traviesas de hormigón, aún cuando las medidas realizadas daban lugar a resultados con elevada dispersión. Se recuerda que una traviesa de madera pesa del orden de 80 Kg frente a los más de 300 kg que pesan las traviesas de hormigón monobloque.

### 3. IMPORTANCIA DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE UNA VÍA

La importancia de la rigidez vertical de la vía, fue inicialmente puesta de manifiesto por PRUD'HOMME, en su célebre artículo "La vía" en 1970. En él, el autor francés expu-

possible to calculate the influence on the vertical stiffness of the track of parameters such as: the type of rail (EI), the area of effective support of the sleepers (F) or the distance between them (d). ZIMMERMANN's formula makes this possible. Thus, in mathematical terms:

$$K = \frac{2F \cdot c}{d} \sqrt[4]{\frac{4EI d}{F \cdot c}} \quad (1)$$

Given that, in general, the type of rail and the sleepers (including the distance between them) were relatively standardised in each country, it is not surprising that, in the 1960s and 1970s, the variation of the vertical stiffness of the track was linked to the resistance capacity of the ballast and the platform, as can be seen in table 1.




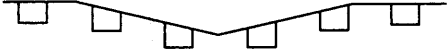
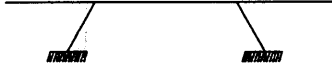
In any case, the ORE's D-117 Committee (1974) established that the vertical stiffness of a track with wooden sleepers was practically half the stiffness of a track with concrete sleepers, even when the measurements gave rise to widely differing results. We should remember that a wooden sleeper weighs about 80 Kg, whereas a monobloc concrete sleeper weighs more than 300 kg.

### 3. IMPORTANCE OF THE VERTICAL STIFFNESS OF A TRACK

The importance of the vertical stiffness of the track was originally highlighted by PRUD'HOMME in his renowned article "The track" in 1970, in which the French author

Cuadro 2/ Table 2

**INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA EN SITUACIONES SINGULARES**  
**INFLUENCE OF THE VERTICAL STIFFNESS OF THE TRACK ON SPECIFIC SITUATIONS**

AUTOR(año) AUTHOR(year)	ÁMBITO DE INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA SCOPE OF INFLUENCE OF THE VERTICAL STIFFNESS OF THE TRACK	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE FORMA ESQUEMÁTICA GRAPHIC REPRESENTATION
PRUD'HOMME (1970)	Solicitaciones verticales ejercidas sobre la vía por el peso no suspendido de los vehículos Vertical stresses exerted on the track by the non-suspended weight of the vehicles	<p>Defectos aleatorios/Random defects</p>  <p>Apoyo uniforme/Uniform support</p>
HIRANO (1972)	Deformación sinusoidal de la vía Sine wave deformation of the track	
KURODA (1973)	Deformación sinusoidal en el carril Sine wave deformation of the rail	
JENKINS (1974)	Sobrecargas verticales en juntas Vertical overloads on joints	
AMIELIN (1974)	Interacción infraestructura natural y obra de fábrica Interaction between infrastructure and construction work	

Fuente/Source: A. López Pita et al. (2000)

so la relación existente entre las sobrecargas dinámicas debidas a las masas no suspendidas de los vehículos y la citada rigidez vertical. Matemáticamente:

$$\sigma(\Delta Q_{NS}) = 0,45 \frac{V}{100} b \cdot \sqrt{m \cdot K \cdot \phi(\epsilon)} \quad (2)$$

siendo:  
 $\sigma(\Delta Q_{NS})$  = Desviación típica de las sobrecargas dinámicas debidas a las masas no suspendidas del material.  
 V = Velocidad de circulación del vehículo  
 b = Variable relacionada con los defectos de la vía y el vehículo  
 m = Masa no suspendida del vehículo  
 K = Rigidez vertical de la vía  
 $\phi(\epsilon)$  = Amortiguamiento de la vía

De la observación de (2) se deducía el interés práctico de disponer del valor más bajo posible de la rigidez vertical de la vía, compatible con un correcto comportamiento tenso-deformacional del conjunto de la vía.

explained the relationship between the dynamic overloads due to the non-suspended masses of the vehicles and the above-mentioned vertical stiffness. In mathematical terms:

$$\sigma(\Delta Q_{NS}) = 0,45 \frac{V}{100} b \cdot \sqrt{m \cdot K \cdot \phi(\epsilon)} \quad (2)$$

where:  
 $\sigma(\Delta Q_{NS})$  = Typical deviation of the dynamic overloads due to the non-suspended masses of the rolling stock.  
 V = Running speed of the vehicle  
 b = Variable relating to the defects of the track and the vehicle  
 m = Non-suspended mass of the vehicle  
 K = Vertical stiffness of the track  
 $\phi(\epsilon)$  = Damping of the track

Observation of the above formula (2) gave rise to the practical interest in having the lowest possible value of the vertical stiffness of the track, compatible with a correct stress and deformation-related behaviour of the track as a whole.

Con posterioridad, HIRANO (1972), KURODA (1973), JENKINS et. al (1974) y AMIELIN (1974) entre otros, pondrían de relieve también, la incidencia de este indicador (rigidez vertical) para diversas configuraciones de la vía (cuadro 2).

En un sentido contrario respecto al valor deseable de la rigidez vertical de la vía expuesto hasta este momento, SAUVAGE y FORTIN (1982), demostraron mediante cálculos, que la potencia disipada en la vía por una rueda disminuye cuando se incrementa la rigidez vertical de la vía.

De cuanto antecede se deducía la necesidad de encontrar un valor óptimo para la rigidez vertical de la vía. Un valor bajo ocasionaría un hundimiento excesivo de la vía, con una importante elevación de la tensión en los carriles, mientras que un valor superior al deseable en la rigidez, incrementaría las sobrecargas verticales ejercidas por los vehículos, y por tanto, aceleraría el deterioro de la vía.

La llegada al ferrocarril, (con la construcción de líneas de alta velocidad) de los catálogos de secciones estructurales para dimensionar el conjunto de capas (balasto, sub-balasto, grava, arena, etc.) a interponer entre la cara inferior de las traviesas y la superficie de la plataforma, no hizo sino confirmar, años más tarde, (década de los años 90) la importancia de establecer un valor óptimo para la rigidez vertical de la vía, en líneas de alta velocidad.

En efecto, de acuerdo con EISENMANN y RUMP (1997), el deseo de disponer en la red alemana de alta velocidad, de una estructura de vía resistente, condujo, sin desearlo, a configurar secciones de la línea con un elevado coeficiente de balasto, tal como se muestra en el cuadro 3.

Se constató, por medidas in situ, que el coeficiente de balasto en las nuevas líneas alemanas de alta velocidad, se multiplicó, al menos por dos, respecto al existente en líneas convencionales con infraestructuras de buena calidad. De acuerdo con (1), la rigidez vertical se incrementó en casi un 70%,

A few years later, HIRANO (1972), KURODA (1973), JENKINS et. al (1974) and AMIELIN (1974), among others, would also highlight the importance of this indicator (vertical stiffness) for various configurations of the track (table 2).

Contrary to the value of the vertical stiffness of the track deemed desirable up until that time, SAUVAGE and FORTIN (1982) used calculations to demonstrate that the power dissipated on the track by a wheel decreases when the vertical stiffness of the track increases.

These findings gave rise to the need to find an optimum value for the vertical stiffness of the track. A low value would cause excessive subsidence of the track, with a significant increase of stress on the rails, whereas a value which exceeded the desirable stiffness value would increase the vertical overloads exerted by the vehicles, and would therefore accelerate the deterioration of the track.

The advent (with the construction of high speed lines) of the calculation tables regarding structural sections for dimensioning the set of layers (ballast, sub-ballast, gravel, sand, etc.) to be inserted between the underside of the sleepers and the surface of the platform, merely confirmed, years later (in the 1990s), the importance of establishing an optimum value for the vertical stiffness of the track on high speed lines.

In fact, according to EISENMANN and RUMP (1997), the desire to have a resistant track structure in the German high speed network inadvertently led to the configuration of sections of the line with a high ballast coefficient, as shown in table 3.

In situ measurements proved that the ballast coefficient on the new German high speed lines was at least twice as high as that which existed on conventional lines with good quality infrastructures. In accordance with (1), the vertical stiffness increased by nearly 70%, which, according to these

**Cuadro 3/Table 3**

**COEFICIENTE DE BALASTO DE ALGUNAS LÍNEAS ALEMANAS**  
**BALLAST COEFFICIENT OF CERTAIN GERMAN LINES**

<b>TIPO DE TRAYECTO</b> <b>TYPE OF LINE</b>	<b>TIPO DE ESTRUCTURA</b> <b>TYPE OF STRUCTURE</b>	<b>COEFICIENTE DE BALASTO</b> <b>BALLAST COEFFICIENT</b> <b>(N/mm<sup>3</sup>)</b>
Línea antigua y mejorada <i>Old and improved line</i>	Mala capacidad resistente/ <i>Poor resistance capacity</i> Buena calidad/ <i>Good quality</i>	0,05 0,15
Nueva construcción/ <i>Recently constructed</i> Hannover-Würzburg Mannheim - Stuttgart	Plataforma natural/ <i>Natural platform</i> Puentes y Túneles/ <i>Bridges and Tunnels</i>	0,30 a 0,40 0,40 a 0,50

Fuente/Source: EISENMANN y RUMP (1997)

lo que supuso, según los citados autores, un prematuro deterioro de la calidad geométrica de la vía de alta velocidad.

**4. CUANTIFICACIÓN DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE UNA VÍA A PARTIR DE LA RIGIDEZ DE SUS COMPONENTES**

**4.1. Rigidez del sistema balasto-plataforma**

La importancia de la rigidez vertical de una vía, condujo, en los años siguientes a los trabajos de Prud'homme (1970) a interesarse por la contribución que en ella tenían los componentes más influyentes en la misma: el balasto y la plataforma, a través de sus propias características: espesores y módulos de elasticidad respectivos.

Desde un punto de vista teórico, el recurso a las expresiones que proporcionaba la teoría de los sistemas elásticos multicapas, para cuantificar la rigidez vertical de la vía, presentaba un indudable atractivo.

Así, el Prof. EISENMANN, (1974), basándose en los trabajos llevados a cabo en el ámbito de los firmes de carretera, estableció la siguiente expresión para la rigidez vertical de una vía, en el supuesto de contar con tres estratos bajo la traviesa: balasto, grava y la propia plataforma:

$$K = E_3 \cdot \left\{ \left( h_1^* \right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{h^*} - \frac{h_2}{h_2^*} \left( \frac{1}{h^*} - \frac{1}{h_1^*} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

siendo:

K = rigidez vertical del sistema balasto plataforma  
 E<sub>3</sub> = módulo de elasticidad de la plataforma

$h^* = h_1 + h_2^*$ , con h<sub>1</sub> igual al espesor de balasto

$h_1^* = n \cdot h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}}$ , con E<sub>1</sub> igual al módulo de elasticidad del balasto

$h_2^* = n \cdot h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}$ , con h<sub>2</sub> igual al espesor de la capa de grava y, su módulo de elasticidad.

n = coeficiente.

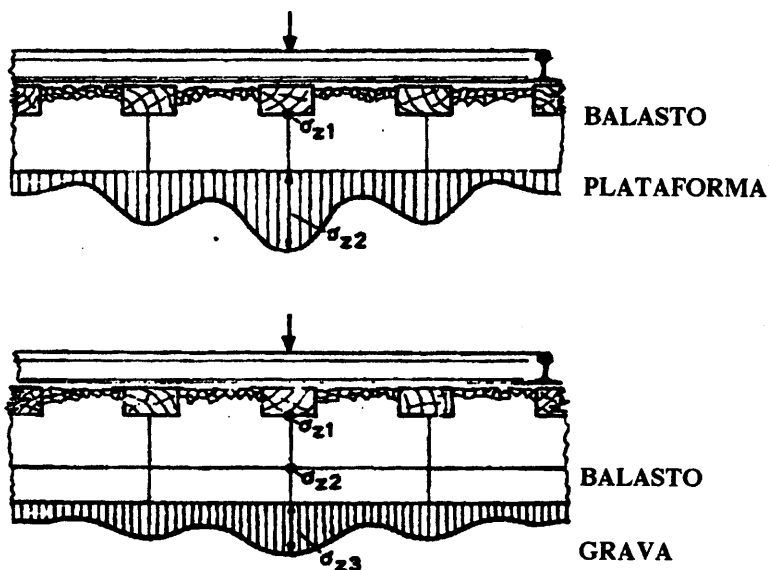


Figura 1. Influencia cualitativa de la homogeneización de tensiones, mediante incorporación de diversos materiales granulares bajo la traviesa  
 Figure 1. Qualitative influence of the homogenisation of stresses, through the incorporation of various granular materials below the sleeper.  
 Fuente/Source: Eisenmann (1974).

authors, caused a premature deterioration of the geometric quality of the high speed track.

**4. QUANTIFICATION OF THE VERTICAL STIFFNESS OF A TRACK ON THE BASIS OF THE STIFFNESS OF ITS COMPONENTS**

**4.1. Rigidity of the ballast-platform system**

After PRUD'HOMME (1970) highlighted the importance of the vertical stiffness of a track, increasing attention was paid to the effect of the components with the greatest influence on this rigidity (the ballast and the

platform) through their respective thicknesses and moduli of elasticity.

From a theoretical point of view, resorting to the formulas provided by the theory of multi-layered elastic systems in order to quantify the vertical stiffness of the track had an obvious appeal.

Thus, Prof. EISENMANN (1974), basing his research on the work carried out in the field of roadbeds, established the following formula for the vertical stiffness of a track, assuming the presence of three strata below the sleeper: ballast, gravel and the platform itself:

$$K = E_3 \cdot \left\{ \left( h_1^* \right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{h^*} - \frac{h_2}{h_2^*} \left( \frac{1}{h^*} - \frac{1}{h_1^*} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

where:

K = vertical rigidity of the ballast-platform system  
 E<sub>3</sub> = modulus of elasticity of the platform

$h^* = h_1 + h_2^*$ , with h<sub>1</sub> equal to the ballast thickness

$h_1^* = n \cdot h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}}$ , with equal to the modulus of elasticity of the ballast

$h_2^* = n \cdot h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}$ , with h<sub>2</sub> equal to the thickness of the layer of gravel and, its modulo of

n = coefficient.

Cuadro 4/Table 4

VARIACIÓN DE LA RIGIDEZ VERTICAL DEL SISTEMA BALASTO-PLATAFORMA CON EL ESPESOR DE BALASTO  
 VARIATION IN THE VERTICAL RIGIDITY OF THE BALLAST-PLATFORM SYSTEM WITH THE WEIGHT OF BALLAST

MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA PLATAFORMA MODULUS OF ELASTICITY OF THE PLATFORM  (daN/cm <sup>2</sup> )	RIGIDEZ VERTICAL EQUIVALENTE DEL SISTEMA BALASTO-PLATAFORMA EQUIVALENT VERTICAL RIGIDITY OF THE BALLAST-PLATFORM SYSTEM  (kN/mm)
130	0,71h + 5,73
300	1,11h + 6,46
700	1,59h + 11,3

Fuente/Source: LÓPEZ PITA (1976)

La expresión (3) presentaba particular interés en un momento en donde el citado autor alemán visualizó (fig. 1) la influencia, en la homogeneización de las tensiones sobre la plataforma de una línea de ferrocarril, de la incorporación de otros materiales (grava y arena) entre el balasto y la plataforma. Es importante, no obstante, recordar que el módulo de deformación de un material granular se ve fuertemente influenciado por el correspondiente a su base de apoyo. Por este motivo, las expresiones precedentes debían utilizarse con cierta precaución.

Desde una perspectiva práctica y, basándose en las medidas realizadas en líneas españolas, el autor de este artículo, obtuvo (1976) la relación existente entre la rigidez vertical del sistema balasto-plataforma, y el espesor (h) de la capa de balasto, expresado en cm (cuadro 4) para determinados módulos de elasticidad de la plataforma en líneas convencionales.

La construcción de la primera línea de alta velocidad en Francia, a comienzos de la segunda mitad de los años 70, significó la llegada al ferrocarril de los catálogos de secciones estructurales. Es decir, la definición de los materiales a colocar entre el balasto y la plataforma propiamente dicha, por considerar insuficientes estos dos estratos, por razones tanto de filtro como de resistencia.

En este contexto, SAUVAGE y LARIBLE (1982), a partir de los trabajos experimentales efectuados por el Comité D-117 del ORE y de los estudios de modelización llevados a cabo en l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, de París, publicaron los resultados indicados en el cuadro 5, sobre la influencia de diferentes materiales y espesores en la rigidez vertical de la vía.

La observación de la información contenida en el cuadro 5 refleja que, para una misma infraestructura, la rigidez vertical del sistema balasto-platafor-

*This formula (3) was particularly interesting at a time when the German author in question visualised (fig. 1) the influence of the incorporation of other materials (gravel and sand) between the ballast and the platform on the homogenisation of the stresses on the platform of a railway line. However, it is important to remember that the modulus of deformation of a granular material is strongly influenced by that corresponding to its supporting base. For this reason, the preceding formulas should be used with a certain degree of precaution.*

*From a practical point of view, and on the basis of the measurements made on Spanish lines, the author of this article obtained (1976) the ratio existing between the vertical rigidity of the ballast-platform system and the thickness (h) of the layer of ballast, expressed in cm (table 4), for certain moduli of elasticity of the platform on conventional lines.*

*The construction of the first high speed line in France, at the beginning of the second half of the 1970s, signified the arrival of the calculation tables regarding structural sections, i.e. the definition of the materials to be placed between the ballast and the platform as a result of these two layers being considered insufficient for reasons relating to both filtration and resistance.*

*In this context, SAUVAGE and LARIBLE (1982), on the basis of the experiments carried out by the ORE's D-117 Committee and the modelling studies carried out at l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées in Paris, published the results indicated in table 5, relating to the influence of different materials and thicknesses on the vertical stiffness of the track.*

*The information contained in table 5 shows that, for the same infrastructure, the vertical rigidity*

La construcción de la primera línea de alta velocidad en Francia, a comienzos de la segunda mitad de los años 70, significó la llegada al ferrocarril de los catálogos de secciones estructurales

*The construction of the first high speed line in France, at the beginning of the second half of the 1970s, signified the arrival of the calculation tables regarding structural sections*

Cuadro 5/ Table 5

**RIGIDEZ VERTICAL DEL SISTEMA BALASTO-PLATAFORMA SOBRE INFRAESTRUCTURAS ARCILLOSAS**  
**VERTICAL RIGIDITY OF THE BALLAST-PLATFORM SYSTEM ON ARGILLOUS INFRASTRUCTURES**

	TIPO DE MATERIAL/TYPE OF MATERIAL			RIGIDEZ VERTICAL DEL SISTEMA BALASTO-PLATAFORMA VERTICAL RIGIDITY OF THE BALLAST-PLATFORM SYSTEM (kN/mm)
	BALASTO/BALLAST	GRAVA/GRAVEL	ARENA/SAND	
ESPESOR DE CADA MATERIAL WEIGHT OF EACH MATERIAL (cm)	25 25 25 25	40 30 15 —	15 15 15 15	107 96 68 46

Fuente/Source: SAUVAGE y LARIABLE (1982)

ma puede variar de 1 a 2, en función de los espesores de grava y arena que se coloquen entre ambos materiales: balasto y plataforma. Este hecho afectaría de modo diferente a las solicitaciones dinámicas de las masas no suspendidas de los vehículos tal como PRUD'HOMME señaló en 1970.

En efecto, por un deseo de reducir, al máximo posible, el nivel de tensiones sobre la plataforma, podría adoptarse una solución estructural formada por: 25 cm de balasto, 40 cm de grava y 15 cm de arena, (con un espesor total de 80 cm), dando lugar a una rigidez vertical de 107 kN/mm, frente a una alternativa basada en 25 cm de balasto, 15 cm de grava y 15 cm de arena, que si fuese estructuralmente suficiente, tendría una rigidez vertical de 68 kN/mm, un 40% inferior a la anterior, presentando además un menor coste de construcción.

#### 4.2. Rigidez de las placas de asiento

La construcción de líneas aptas para la circulación a alta velocidad, determinó la búsqueda de estructuras de vía flexibles, con objeto de reducir los efectos dinámicos ejercidos verticalmente sobre la vía, por parte de los vehículos.

En este marco, los ferrocarriles franceses optaron por introducir en la nueva línea París-Lyon, una placa de asiento entre la traviesa y el carril, caracterizada por tener un espesor de 9 mm, frente a los 4,5 mm utilizados habitualmente en líneas con velocidades máximas de 200 km/h. En términos de rigidez, la nueva placa de asiento para líneas de alta velocidad presentaba un valor de 90 kN/mm, frente a los 150 kN/mm correspondientes a la placa convencional.

Por su parte, los ferrocarriles alemanes, en sus primeras líneas de alta velocidad: Hannover-Würzburg y Mannheim-

of the ballast-platform system may vary between 1 and 2, depending on the thicknesses of gravel and sand placed between both materials (ballast and platform). This variation would have a varying effect on the dynamic stresses of the non-suspended masses of the vehicles, as PRUD'HOMME pointed out in 1970.

In fact, if we wish to reduce the level of stresses on the platform as much as possible, we could adopt a structural solution consisting of: 25 cm of ballast, 40 cm of gravel and 15 cm of sand (with a total thickness of 80 cm), giving rise to a vertical rigidity of 107 kN/mm, as opposed to an alternative based on 25 cm of ballast, 15 cm of gravel and 15 cm of sand, which, if it were structurally sufficient, would have a vertical rigidity of 68 kN/mm (40% less than the first solution), as well as a lower construction cost.

#### 4.2 Rigidity of the base plates

The construction of high speed lines led to the search for flexible track structures, with the aim of reducing the dynamic stresses exerted vertically on the track by the vehicles.

Within this framework, the French national railway company chose to introduce a base plate between the sleeper and the rail on the new Paris-Lyon line, characterised by having a thickness of 9 mm, as opposed to the 4.5 mm normally used on lines with maximum speeds of 200 km/h. In terms of rigidity, the new base plate for high speed lines offered a value of 90 kN/mm, as opposed to the 150 kN/mm corresponding to the conventional plate.

The German national railway company, for its first high speed lines (Hannover-Würzburg and Mannheim-Stuttgart),

Stuttgart, adoptaron el modelo de superestructura de vía denominado: UIC 60 B70 W, con placa de asiento ZW 687a, caracterizada por una rigidez vertical de 500 kN/mm.

Con posterioridad Alemania adoptó el modelo UIC 60 B 70 W 14k 900, en donde la nueva placa de asiento presentaba una rigidez vertical próxima a los 60 kN/mm. Se instaló en algunos tramos de vía con balasto de la nueva línea de alta velocidad entre Hannover y Berlín.

En paralelo, se proyectó un nuevo tipo de superestructura de vía formada por carril de 60 kg/m, traviesas del tipo B75 a 63 cm de distancia y sujeción loarv 300, equipada con placas de asiento de rigidez vertical de 27 kN/mm y hasta 10 cm de espesor. Este modelo se colocó en los 14 km del contorno de la población de Stendal, en la línea de alta velocidad Hannover-Berlín.

Por lo que respecta a la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla, se utilizó una placa de asiento de 6 mm de espesor, de material EVA, con una rigidez vertical de 400 a 500 kN/mm. Para la nueva línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona, el criterio adoptado fue el de utilizar una placa de asiento de 7 mm de espesor y una rigidez aproximada de 100 kN/mm, PUEBLA et al. (1999).

#### 4.3. Rigidez del conjunto de la vía

##### 4.3.1. Valores de cálculo

La asimilación del soporte del carril a un conjunto de sistemas elásticos en serie, ha sido la hipótesis utilizada comúnmente para determinar la rigidez global del citado soporte integrado por: la placa de asiento y el conjunto de materiales granulares colocados bajo la cara inferior de las traviesas.

La hipótesis precedente conduce a la expresión matemática:

$$K_s = \frac{K_{pla} \cdot K_{bp}}{K_{pla} + K_{bp}} \quad (4)$$

Siendo:

$K_s$  = rigidez vertical del soporte del carril formado por la placa de asiento más el conjunto de capas que configura el sistema balasto-plataforma.

$K_{pla}$  = rigidez vertical de la placa de asiento.

$K_{bp}$  = rigidez vertical del sistema balasto-plataforma

La aplicación de (4), a los distintos valores indicados para la rigidez del sistema balasto-plataforma en el cuadro 5, permite analizar la influencia de la rigidez de las placas de

Con posterioridad, Alemania adoptó el modelo UIC 60 B 70 W 14k 900, en donde la nueva placa de asiento presentaba una rigidez vertical próxima a los 60 kN/mm

*Later on, Germany adopted the UIC 60 B 70 W 14k 900 model, in which the new base plate had a vertical rigidity of nearly 60 kN/mm*

adopted the track superstructure model called UIC 60 B70 W, which featured a ZW 687<sup>a</sup> base plate characterised by a vertical rigidity of 500 kN/mm.

Later on, Germany adopted the UIC 60 B 70 W 14k 900 model, in which the new base plate had a vertical rigidity of nearly 60 kN/mm. It was installed with ballast on certain track sections of the new high speed line between Hanover and Berlin.

At the same time, a new type of track superstructure was designed, consisting of a 60 kg/m rail, B75 sleepers situated 63 cm apart from each other with loarv 300 fastening, equipped with a base plate with a vertical rigidity of 27 kN/mm and a thickness of up to 10 cm. This model was installed along the 14 km of railway line around the town of Stendal on the Hanover-Berlin high speed line.

As far as the Madrid-Seville high speed line is concerned, a 6 mm thick EVA base plate with a vertical rigidity of 400 to 500 kN/mm was used.

For the new high speed line between Madrid and Barcelona, the solution adopted consisted of a 7 mm thick base plate and an approximate rigidity of 100 kN/mm, PUEBLA et al. (1999).

#### 4.3. Rigidity of the track as a whole

##### 4.3.1. Calculation values

The assimilation of the rail support to a set of elastic systems mounted in tandem has been the hypothesis commonly used to determine the overall rigidity of this support consisting of: the base plate and the set of granular materials placed below the sleepers.

The preceding hypothesis leads to the mathematical formula:

$$K_s = \frac{K_{pla} \cdot K_{bp}}{K_{pla} + K_{bp}} \quad (4)$$

Where:

$K_s$  = vertical rigidity of the rail support consisting of the base plate plus the set of layers which make up the ballast-platform system.

$K_{pla}$  = vertical rigidity of the base plate.

$K_{bp}$  = vertical rigidity of the ballast-platform system.

The application of (4) to the different values indicated for the rigidity of the ballast-platform system in table 5 allows us to analyse the influence of the rigidity of the base plates

Cuadro 6/ Table 6

**RIGIDEZ VERTICAL DEL SOPORTE DEL CARRIL PARA DIVERSAS ESTRUCTURAS DE ASIENTO Y PLACA DE ASIENTO EN FRANCIA**  
**VERTICAL RIGIDITY OF THE RAIL SUPPORT FOR VARIOUS BED AND BASE PLATE STRUCTURES IN FRANCE**

RIGIDEZ VERTICAL DEL SISTEMA BALASTO+PLATAFORMA VERTICAL RIGIDITY OF THE BALLAST+PLATFORM SYSTEM (kN/mm)	RIGIDEZ VERTICAL DE LA PLACA DE ASIENTO VERTICAL RIGIDITY OF THE BASE PLATE (kN/mm)		RIGIDEZ VERTICAL GLOBAL DEL SOPORTE DEL CARRIL OVERALL VERTICAL RIGIDITY OF THE RAIL SUPPORT (kN/mm)	
	Líneas convencionales Conventional lines	Líneas de alta velocidad High Speed lines	Líneas convencionales Conventional lines	Líneas de alta velocidad High Speed lines
46	150	90	35,2	30,4
68	150	90	46,8	38,7
96	150	90	58,5	46,4
107	150	90	62,4	48,8

Fuente/Source: Elaboración propia

asiento, utilizadas tanto en líneas convencionales como de alta velocidad en Francia (cuadro 6).

Se comprueba el favorable efecto de la mayor elasticidad de las placas de asiento utilizadas en las líneas de alta velocidad en el valor final de la rigidez vertical del soporte del carril  $\approx$  20% menor que en líneas convencionales)

En forma análoga, la aplicación de la expresión (4) al caso alemán, aceptando que el coeficiente de balasto del sistema balasto-plataforma en sus líneas de alta velocidad es del orden de  $0,35 \text{ N/mm}^3$  (ver cuadro 1), da lugar a los datos del cuadro 7. El paso del coeficiente de balasto a la rigidez vertical del sistema balasto-plataforma es inmediato sin más que considerar el área de apoyo de la traviesa.

Las notables diferencias existentes entre la rigidez de la placa de asiento en las líneas francesas y alemanas, conducen a variaciones sensibles en la rigidez global del soporte del carril.

Para calcular la rigidez vertical de la vía, es útil recordar, que la experiencia práctica pone de relieve que la carga que actúa sobre la traviesa más cargada, es aproximadamente el 50% de la carga por rueda actuando sobre el carril. En consecuencia, para una rigidez vertical del sistema balasto-plataforma comprendido entre 90 y 100 kN/mm (caso francés) la rigidez vertical de la vía, sería del orden de 93 kN/mm, en las líneas de alta velocidad francesas; en las líneas alemanas de alta velocidad, dotadas con placas de asiento de 60 kN/mm, la rigidez vertical de la vía se situaría en el entorno de 75 kN/mm.

used on both conventional and high speed lines in France (table 6).

The table shows the favourable effect of the greater elasticity of the base plates used on high speed lines on the final value of the vertical rigidity of the rail support  $\approx$  20% less than on conventional lines).

Similarly, the application of formula (4) to the German case, assuming that the ballast coefficient of the ballast-platform system on the country's high speed lines is approximately  $0.35 \text{ N/mm}^3$  (see table 1), gives rise to the figures shown in table 7. The transposition of the ballast coefficient data to the calculation of the vertical rigidity of the ballast-platform system is immediate upon considering only the area of support of the sleeper.

The considerable differences between the rigidity of the base plate on the French and German lines leads to significant variations in the overall rigidity of the rail support.

In order to calculate the vertical stiffness of the track, it is useful to remember that practical experience highlights the fact that the load which acts on the most heavily loaded sleeper is approximately 50% of the load per wheel acting on the rail. Consequently, for a vertical rigidity of the ballast-platform system of between 90 and 100 kN/mm (French case), the vertical stiffness of the track would be about 93 kN/mm on the French high speed lines; on the German high speed lines, which are equipped with 60 kN/mm base plates, the vertical stiffness of the track would be roughly 75 kN/mm.

Cuadro 7/ Table 7

RIGIDEZ VERTICAL DEL SOPORTE DEL CARRIL PARA DIVERSAS ESTRUCTURAS DE VÍA ALEMANAS  
 VERTICAL RIGIDITY OF THE RAIL SUPPORT FOR VARIOUS GERMAN TRACK STRUCTURES

C (N/mm <sup>3</sup> )	TRAVIESA Y PLACA DE ASIENTO SLEEPER AND BASE PLATE	K <sub>bp</sub> (kN/mm)	RIGIDEZ VERTICAL DE LA PLACA DE ASIENTO VERTICAL RIGIDITY OF THE BASE PLATE (Kn/mm)	RIGIDEZ VERTICAL GLOBAL DEL SOPORTE DEL CARRIL OVERALL VERTICAL RIGIDITY OF THE RAIL SUPPORT (kN/mm)
0,35	B70 ZW 687 a	99,7	500	82,6
0,35	B70 14 K900	99,7	60	37,3
0,35	B75 loarv 300	99,7	27	22,8

Fuente/Source: Elaboración propia

4.3.2. Valores experimentales

Con ocasión de la construcción de la línea de alta velocidad entre París y Lyon, los ferrocarriles franceses llevaron a cabo una serie de ensayos, que permitieron cuantificar, entre otros parámetros, la rigidez vertical de la vía, en algunas secciones de la misma.

De acuerdo con ALIAS y PRUD'HOMME (1981), se obtuvieron los siguientes ordenes de magnitud, para la rigidez vertical de la vía por hilo de carril:

- Rigidez vertical estática: 80 kN/mm
- Rigidez vertical dinámica:  
 V = 300 km/h → 65 kN/mm  
 V = 380 km/h → 55 kN/mm

Con posterioridad, SATO (1993) publicó los resultados obtenidos durante una campaña de medidas llevadas a cabo, en la línea de alta velocidad Tohoku Shinkansen, con distintos tipos de vía, y sobre infraestructuras de diferente capacidad resistente.

Por lo que respecta a las vías con balasto, la rigidez vertical de la vía, por hilo de carril, se situó en el intervalo de los 47 kN/mm hasta 115 kN/mm. El valor medio sería análogo al señalado por los autores franceses.

Las notables diferencias existentes entre la rigidez de la placa de asiento en las líneas francesas y alemanas conduce a variaciones sensibles en la rigidez global del soporte del carril

*The considerable differences between the rigidity of the base plate on the French and German lines leads to significant variations in the overall rigidity of the rail support*

4.3.2. Experimental values

In connection with the construction of the high speed line between Paris and Lyon, the French national railway company carried out a series of tests which enabled it to quantify, among other parameters, the vertical stiffness of the track on certain sections of the line.

According to ALIAS and PRUD'HOMME (1981), the following figures were obtained for the vertical stiffness of the track per rail:

- Static vertical rigidity: 80 kN/mm
- Dynamic vertical rigidity:  
 V = 300 km/h → 65 kN/mm  
 V = 380 km/h → 55 kN/mm

Over a decade later, SATO (1993) published the results obtained during a measurement campaign carried out on the Tohoku Shinkansen high speed line, with different types of track, and on infrastructures with different resistance capacities.

With regard to the tracks with ballast, the vertical stiffness of the track, per rail, fell between 47 kN/mm and 115 kN/mm. The average value would be similar to that indicated by the French authors.

## 5. LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA Y LA VELOCIDAD DE DETERIORO DE LA CAPA DE BALASTO

De manera habitual, la evaluación del deterioro de la calidad geométrica de una vía, debido básicamente a la alteración de la capa de balasto, se ha venido efectuando en base a considerar, las acciones verticales ejercidas por el material y las tensiones generadas en la capa de balasto. La aplicación de la denominada regla de la potencia, permitiría cuantificar la influencia relativa en el citado deterioro, de acciones de distinta magnitud.

Sin embargo, las investigaciones llevadas a cabo en los últimos cinco años, por los ferrocarriles alemanes, han comenzado a poner de relieve, la importancia que debería atribuirse al nivel de vibraciones que el tráfico genera en la superestructura de la vía, y especialmente en la capa de balasto. Los datos publicados por EISENMANN y RUMP (1997) así lo confirman.

En efecto, de acuerdo con los citados autores, la máxima velocidad de vibración en el balasto, no debería superar los 15 a 18 mm/seg, para evitar un rápido deterioro de este material. Sin embargo, y tal como se muestra en la fig. 2, se han medido con circulaciones de hasta 250 km/h, velocidades de vibración próximas a los 30 mm/seg.

En realidad ya en 1976, PRUD'HOMME, registró las aceleraciones producidas en la capa de balasto al paso de la rama de alta velocidad TGV 001, a diferentes velocidades de circulación, obteniendo los valores indicados en el cuadro 8. La aceleración del balasto fue medida entre dos traviesas y a 15 cm aproximadamente bajo la cara inferior de las mismas.

El autor francés apuntaba, en aquel entonces, que el aspecto de mayor preocupación era el aumento de la aceleración en el balasto, con la velocidad de circulación, dado que ello podría ocasionar una atricción de este material, más importante que la que tiene lugar en líneas convencionales.

Por nuestra parte desearíamos subrayar que si el balasto tuviese un comportamiento frente a las vibraciones verticales, análogo al de las arenas, hipótesis que podría considerarse como no alejada de la realidad, la experiencia existente en el campo de la mecánica de suelos aportaría una ayuda muy valiosa.

Cuadro 8/Table 8

### ACELERACIONES MEDIDAS EN LA CAPA DE BALASTO CON EL TGV 001 AVERAGE ACCELERATIONS IN THE LAYER OF BALLAST WITH THE TGV 001

VELOCIDAD/SPEED Km/h	ACELERACIÓN EN EL BALASTO ACCELERATION IN THE BALLAST
140	0,88 g
245	1,40 g
300	1,40 g

Fuente/Source: PRUD'HOMME (1976)

Desearíamos subrayar que si el balasto tuviese un comportamiento frente a las vibraciones verticales análogo al de las arenas, hipótesis que podría considerarse como no alejada de la realidad, la experiencia existente en el campo de la mecánica de suelos aportaría una ayuda muy valiosa

*We would like to stress that if the ballast behaved in a similar way to the sand when subjected to vertical vibrations, a hypothesis which could be regarded as not being far removed from reality, the existing experience in the field of soil mechanics would provide very valuable help*

## 4. THE VERTICAL STIFFNESS OF THE TRACK AND THE SPEED OF DETERIORATION OF THE LAYER OF BALLAST

The deterioration of the geometric quality of a track, basically due to the alteration of the layer of ballast, has usually been evaluated by considering the vertical actions exerted by the rolling

stock and the stresses generated in the layer of ballast. The application of what is known as the power rule made it possible to quantify the relative influence of different levels of action on this deterioration.

However, the research carried out in the last five years by the German national railway company has begun to highlight the importance which should be attributed to the level of vibrations which the traffic generates in the track superstructure, and especially in the layer of ballast. The data published by EISENMANN and RUMP (1997) confirm this.

In fact, according to these authors, the maximum speed of vibration in the ballast should not exceed 15 to 18 mm/sec, in order to avoid a rapid deterioration of this material. However, and as is shown in fig. 2, vibration speeds of nearly 30 mm/sec have been measured at vehicle speeds of up to 250 km/h.

As far back as 1976, PRUD'HOMME had already recorded the accelerations produced in the layer of ballast by the TGV 001 high speed train set at different running speeds, obtaining the values indicated in table 8. The acceleration of the ballast was measured between two sleepers and approximately 15 cm below them.

At that time, the French author pointed out that the most worrying aspect was the rising acceleration in the ballast as the running speed increased, given that this could cause a higher level of attrition of this material than occurs on conventional lines.

For our part, we would like to stress that if the ballast behaved in a similar way to the sand when subjected to vertical vibrations, a hypothesis which could be regarded as not being far removed from reality, the existing experience in the field of soil mechanics would provide very valuable help. In fact, it is worth remembering in this context the experiments carried out by

En efecto cabe recordar en este contexto, las experiencias ya lejanas de d'Appolonia (1967) que se reproducen en la fig. 3. En ella, se observa como la compactación de la arena era relativamente baja, hasta niveles de aceleración de 1g, alcanzándose la máxima compacidad cuando la aceleración llegaba a 2g. Para valores superiores de la aceleración se producía una reducción en la compacidad de la arena.

En todo caso, y desde la finalidad de este artículo, la cuestión que cabe formularse sería, si la modificación del diseño estructural de la vía, podría contribuir a reducir el nivel de vibraciones que se genera en la capa de balasto, especialmente negativo para velocidades de circulación elevadas. En particular el papel ejercido por las placas de asiento.

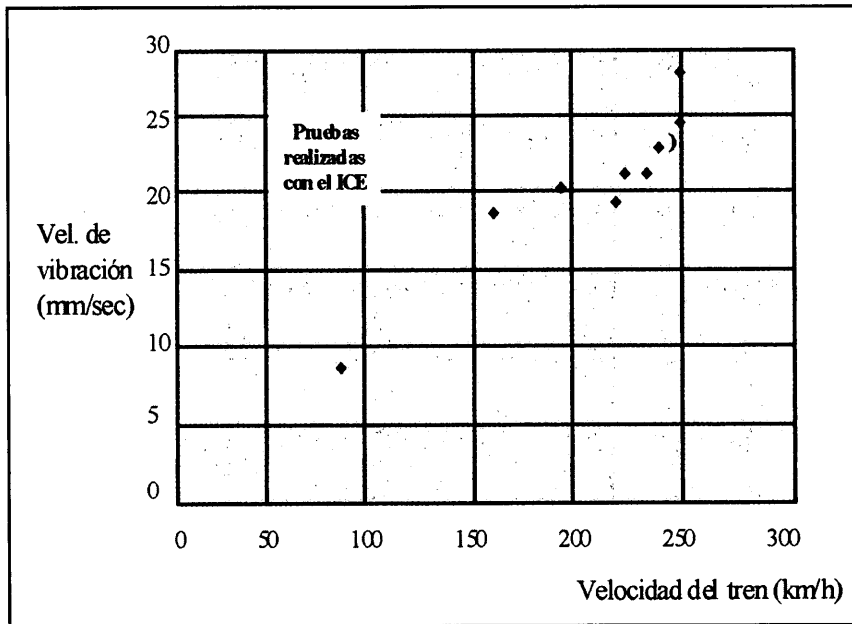


Figura 2. Velocidad de vibración en el balasto/  
 Figure 2. Speed of vibration in the ballast. (Rump et al. 1996).

d'Appolonia (1967), which are reproduced in fig. 3. Here we can see how the compacting of the sand was relatively low up to acceleration levels of 1g, maximum compactness being reached when the acceleration reached 2g. Higher acceleration values corresponded to a reduction in the compactness of the sand.

In any case, and for the purposes of this article, the matters which need to be addressed would be whether the modification of the structural design

of the track could help to reduce the level of vibrations generated in the layer of ballast, especially negative for high running speeds, and, in particular, the role played by the base plates.

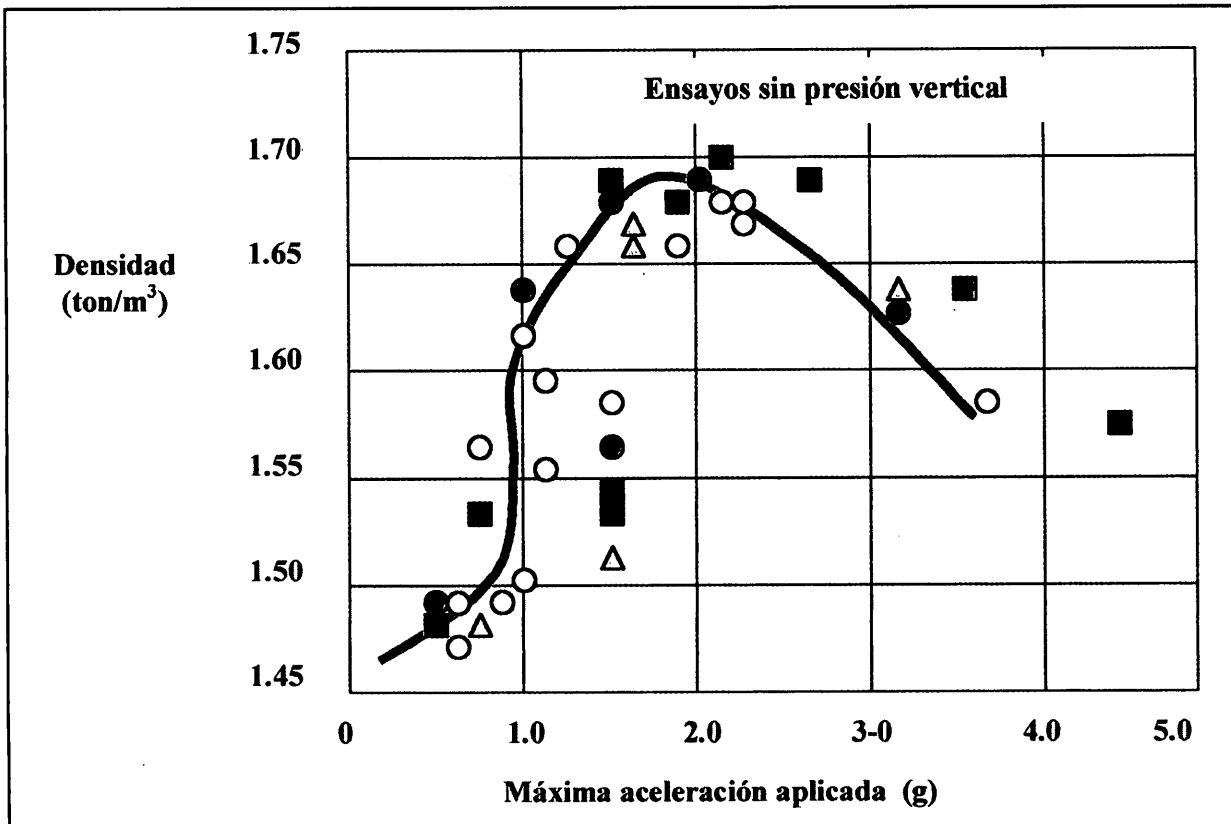


Figura 3. Evolución de la densidad de arenas con la aceleración aplicada/  
 Figure 3. Evolution of the density of the sands with the applied acceleration. (D'Appolonia, 1967).

Figura 4. Influencia de la elasticidad de la placa de asiento en la vibración del balasto/  
 Figure 4. Influence of the elasticity of the base plate on the vibration of the ballast.  
 Fuente/ Source: DBAG.

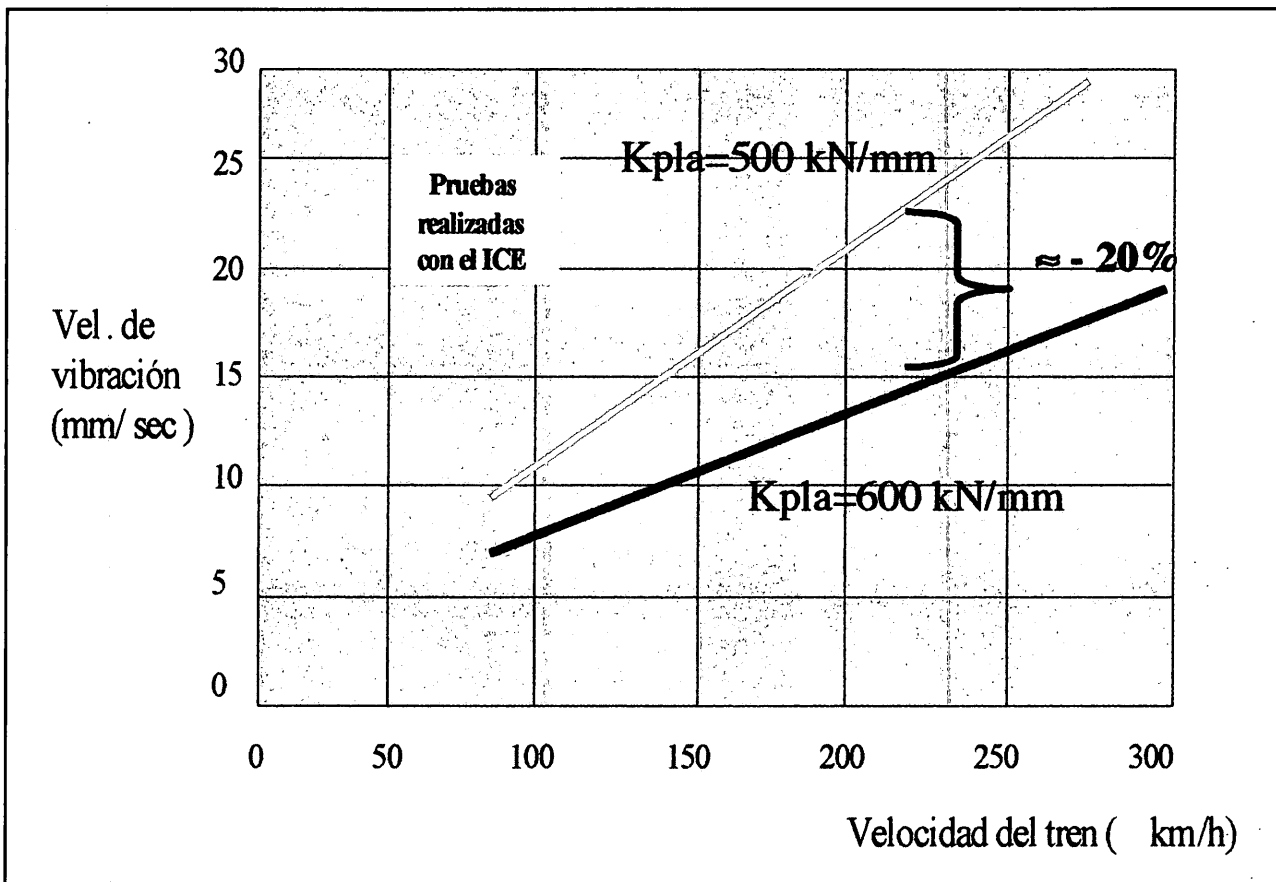
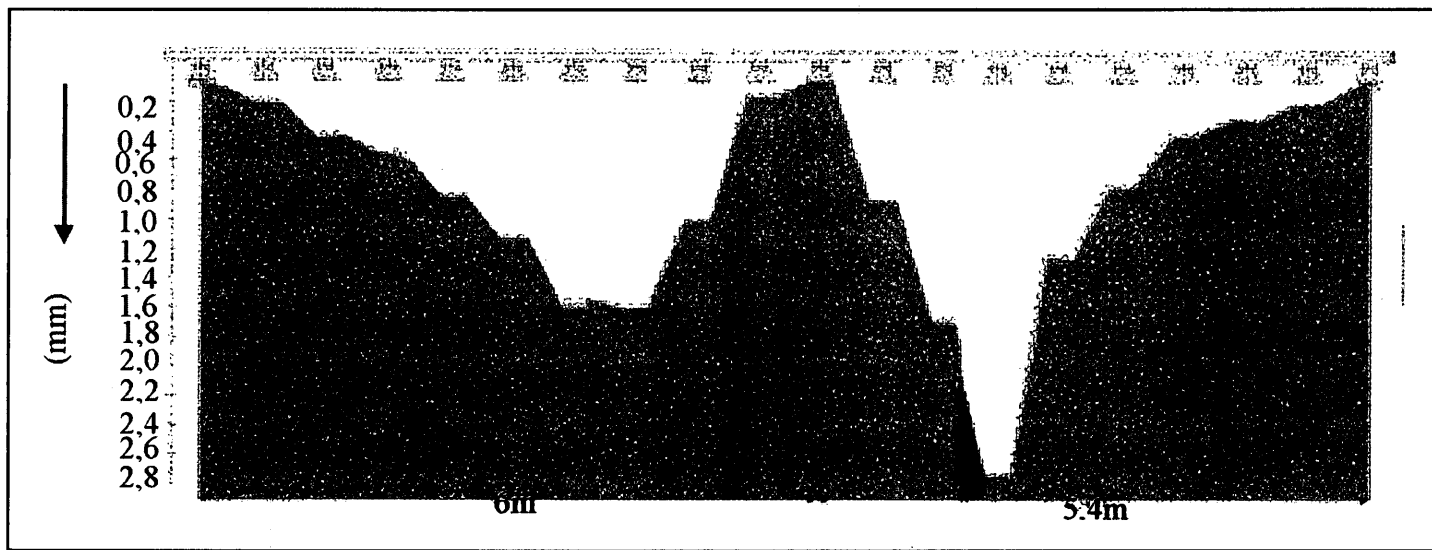


Figura 5. Defectos de danza de las traviesas en la línea de alta velocidad Hannover-Würzburg/  
 Figure 5. Degeneration defects of the sleepers on the Hannover-Würzburg High Speed line.  
 Fuente/ Source: Rump (1997)

En este contexto, las medidas realizadas por los ferrocarriles alemanes utilizando placas de asiento de reducida rigidez vertical, 20 a 60 kN/mm, parecen poner de relieve una apreciable reducción de la velocidad de la vibración que el material ferroviario genera en la

In this context, the measurements made by the German national railway company using the base plates with low vertical rigidity (20 to 60 kN/mm) seem to highlight an appreciable reduction of the vibration speed which the rolling stock generates in



capa de balasto. Es decir, se produciría una menor inclinación en la relación velocidad de vibración-velocidad de circulación (fig. 4).

En síntesis, cabría pensar que la reducción de la rigidez vertical de la vía desempeñaría un importante papel en la disminución del deterioro de la geometría de la vía. Y ello por dos motivos:

- 1º) Por contribuir a limitar las sollicitaciones dinámicas verticales producidas sobre la vía, por las masas no suspendidas de los vehículos.
- 2º) Por contribuir a disminuir la velocidad de vibración de las partículas de balasto, con la velocidad de circulación, especialmente a través de placas de asiento de gran elasticidad.

Es posible que la mayor elasticidad de las placas de asiento obligue a disponer de una sujeción adaptada a unos mayores desplazamientos verticales.

## **6. LIMITACIONES A LA VARIACIÓN LONGITUDINAL DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA**

Es un hecho constatado experimentalmente que la resistencia vertical de la vía, varía a lo largo de ésta, lo que por otro lado se intuye con facilidad. No obstante, quizás sorprende más, la elevada heterogeneidad que se observa en zonas muy próximas. En todo caso, cabe señalar que la citada heterogeneidad resistente se presenta a todos los niveles.

Por lo que se refiere a la infraestructura, LÓPEZ PITA (1980) publicó los resultados obtenidos, mediante ensayos de placa de carga, para la evolución longitudinal del módulo de elasticidad de la plataforma. Se encontraron diferencias de rigidez vertical de hasta un 50%, en distancias inferiores a 100m.

Cabría, en principio, pensar que la capa de balasto contribuiría a disminuir dichas diferencias de rigidez. Sin embargo, la experiencia práctica desmiente esta hipótesis. Nótese, en efecto, en la fig. 5, que los defectos de danza que se observan en líneas de alta velocidad, RUMP (1997), introducen importantes diferencias en la rigidez vertical de traviesas consecutivas.

Finalmente, y en cuanto a la rigidez vertical del conjunto de la vía, los recientes resultados de HUNT (2000), obtenidos en el marco del proyecto EUROBALT, confirman la heterogeneidad resistente en sentido longitudinal de la vía (fig. 6).

Es un hecho constatado experimentalmente que la resistencia vertical de la vía varía a lo largo de ésta, lo que por otro lado se intuye con facilidad

*It is a scientifically proven fact that the vertical resistance of a track varies along the length of the track in question, which is perhaps something that one might easily assume anyway*

*the layer of ballast. In other words, there would be a shallower incline in the vibration speed-running speed ratio ( fig. 4) .*

*To summarise, we can assume that the reduction of the vertical stiffness of the track would play an important role in reducing the deterioration of the geometry of the track, for two reasons:*

- 1º) *By helping to limit the vertical dynamic stresses exerted on the track by the non-suspended masses of the vehicles.*
- 2º) *By helping to reduce the vibration speed of the particles of ballast, together with the running speed, especially through highly resilient base plates.*

*The greater elasticity of the base plates might make it necessary to use a means of fastening which can cope with greater vertical displacements.*

## **6. LIMITATIONS ON THE LONGITUDINAL VARIATION OF THE VERTICAL STIFFNESS OF THE TRACK**

*It is a scientifically proven fact that the vertical resistance of a track varies along the length of the track in question, which is perhaps something that one might easily assume anyway. Nevertheless, what might be more surprising is the high level of heterogeneity which can be observed in areas which are very close to each other. In any case, it is worth pointing out that this heterogeneity of resistance is present at all levels.*

*As far as the infrastructure is concerned, LÓPEZ PITA (1980) published the results obtained from load plate tests. With respect to the longitudinal evolution of the modulus of elasticity of the platform, differences in vertical rigidity of up to 50% were found over distances of less than 100m.*

*In principle, one might assume that the layer of ballast would help to reduce these differences in rigidity. However, practical experience contradicts this hypothesis. Notice, in fact, in fig. 5, that the degeneration defects observed on high speed lines, RUMP (1997), introduce significant differences in the vertical rigidity of consecutive sleepers.*

*Finally, and with regard to the vertical stiffness of the track as a whole, the recent results of HUNT (2000), obtained within the framework of the EUROBALT project, confirm the longitudinal heterogeneity of resistance of the track (fig. 6).*

De cuanto antecede se deduce de forma inmediata, la conveniencia de limitar la variación longitudinal de la rigidez vertical de la vía.

Los análisis numéricos llevados a cabo por LÓPEZ PITA y FONSECA (2000) en la Universidad Politécnica de Catalunya, permiten destacar que si se consideran dos secciones de vía contiguas, presentando variaciones signifi-

cativas de rigidez vertical, el nivel tensional sobre el balasto, puede llegar a ser entre un 30 y un 50% mayor, que el correspondiente a la hipótesis de aceptar una rigidez vertical constante a lo largo de la vía (fig. 7). Esta sobresolicitación aceleraría el proceso de deterioro de la

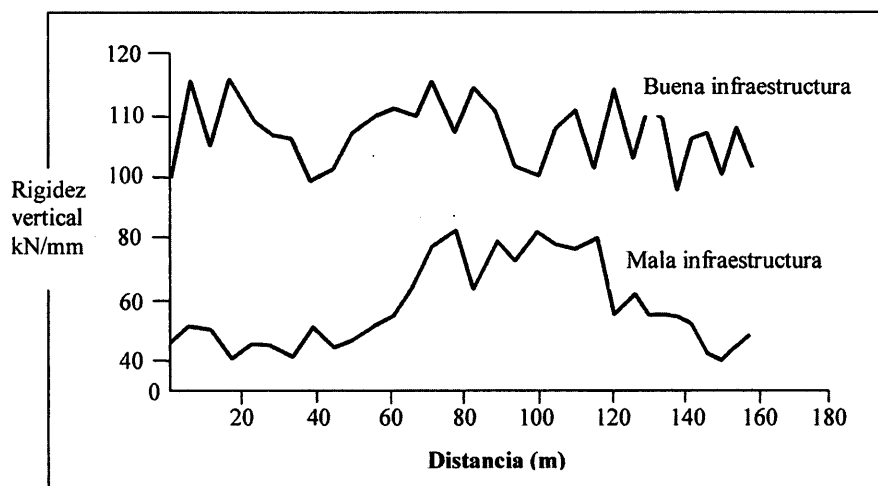


Figura 6. Evolución de la rigidez vertical de la vía en infraestructuras de mala y buena capacidad portante.  
Figure 6. Evolution of the vertical stiffness of the track in Infrastructures with good and bad supporting capacity. Fuente/Source: G. Hunt (2000).

From the above it can be immediately deduced that the longitudinal variation of the vertical stiffness of the track should be limited.

The numerical analyses carried out by LÓPEZ PITA and FONSECA (2000) at the Universidad Politécnica de Catalunya clearly indicate that if we consider two adjacent track sections with significant variations in vertical rigidity, the level of stress exerted on the ballast could be

between 30 and 50% higher than the level corresponding to the hypothesis which assumes a constant vertical rigidity along the length of the track (fig. 7). This excessive stress would accelerate the process of deterioration of the layer of ballast. Hence the

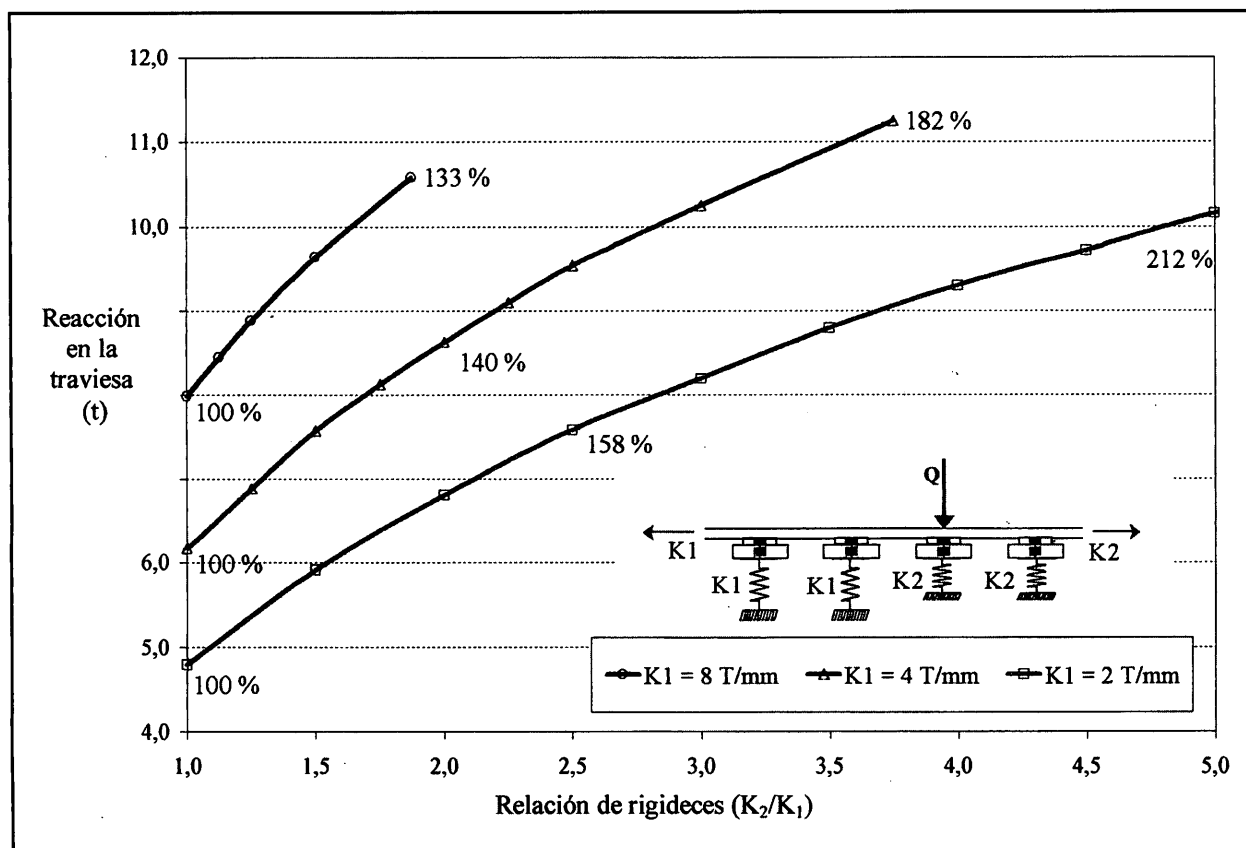


Figura 7. Influencia de la rigidez del sistema balasto-plataforma en la reacción máxima sobre las traviesas.  
Figure 7. Influence of the rigidity of the Ballast-Platform system on the maximum reaction in the sleepers.

capa de balasto. De donde se infiere la oportunidad de establecer un nuevo criterio de calidad en el momento de recepcionar una vía de alta velocidad, que iría más allá de las normativas actuales referidas a la calidad geométrica de la vía, y que afectaría a la homogeneidad de la rigidez vertical de la vía.

Por lo que respecta a la medida práctica de la rigidez vertical de la vía, es útil recordar que ya en 1980, ESVELD, publicó los resultados obtenidos mediante la utilización de una bateadora mecánica, convenientemente equipada. Más recientemente, RASMUSSEN et al. (1999) han puesto a punto nuevos métodos de medida para evaluar el citado parámetro. Es razonable pensar que podría implementarse, desde un punto de vista práctico, un sistema eficiente de conocimiento de la rigidez vertical de la vía.

## 7. CONCLUSIONES

El análisis realizado en el presente artículo, ha tenido por finalidad profundizar en el concepto y en la cuantificación de la rigidez vertical de la vía.

La importancia que desempeñaría este indicador, en los fenómenos de interacción vía-vehículo, y por tanto en el deterioro de la vía, ha ido aumentando en los últimos años, con la construcción de líneas de alta velocidad. Los catálogos de secciones estructurales para el dimensionamiento del sistema balasto-plataforma, determinan un incremento notable de la rigidez vertical de la vía. Este aumento debe compensarse con la utilización de placas de asiento más flexibles para mantener la rigidez del conjunto de la vía dentro de límites aceptables. Valores comprendidos entre 25 y 60 kN/mm, parecerían recomendables.

Por otro lado, la degradación de la capa de balasto por causa de las vibraciones generadas por el material ferroviario, especialmente en líneas de alta velocidad, puede ser limitada con el empleo de las citadas placas de asiento de elevada elasticidad.

Finalmente, es del mayor interés establecer una limitación a la variación longitudinal de la rigidez vertical de la vía, para no ocasionar un desgaste prematuro de su calidad geométrica. En el estado actual de conocimientos y para los valores deseables de la rigidez vertical de la vía, en líneas de alta velocidad, en el entorno de 70 a 80 kN/mm, sería aconsejable que la rigidez de la vía de una traviesa a otra no variase en más del 20%. ■

Los catálogos de secciones estructurales para el dimensionamiento del sistema balasto-plataforma determinan un incremento notable de la rigidez vertical de la vía. Este aumento debe compensarse con la utilización de placas de asiento más flexibles para mantener la rigidez del conjunto de la vía dentro de límites aceptables

*The calculation tables regarding structural sections for the dimensioning of the ballast-platform system determine a considerable increase in the vertical stiffness of the track. This increase must be compensated by using more flexible base plates in order to keep the rigidity of the whole track within acceptable limits*

*inferred opportunity to establish a new criterion of quality when it comes to accepting a high speed track, a criterion which would go beyond the current regulations relating to the geometric quality of the track, and which would affect the homogeneity of the vertical stiffness of the track.*

*As far as the practical measurement of the vertical rigidity of the track is concerned, it should be remembered that, already in 1980, ESVELD published the results obtained with the use of a mechanical tamping machine, adequately instrumented. More recently, RASMUNSSSEN et al (1999) developed new methods of measure for the evaluation of that parameter. It is reasonable to think that, from a practical viewpoint, it would be possible to implement an efficient system for ascertaining the vertical rigidity of the track.*

## 7. CONCLUSIONS

*The aim of the analysis carried out in this article has been to make an in-depth study of the concept and the quantification of the vertical stiffness of the track.*

*The importance of this indicator in track-vehicle interaction phenomena, and therefore in the deterioration of the track, has increased in recent years due to the construction of high speed lines. The calculation tables regarding structural sections for the dimensioning of the ballast-platform system determine a considerable increase in the vertical stiffness of the track. This increase must be compensated by using more flexible base plates in order to keep the rigidity of the whole track within acceptable limits. Values ranging from 25 to 60 kN/mm would seem to be recommendable.*

*Furthermore, the deterioration of the layer of ballast due to the vibrations generated by the rolling stock, especially on high speed lines, could be limited by using these highly elastic base plates.*

*Finally, it would be very useful to establish a limitation on the longitudinal variation of the vertical stiffness of the track so as not to prematurely damage its geometric quality. In the light of all the information currently available and for desirable values of the vertical stiffness of the track on high speed lines (about 70 to 80 kN/mm), it would be advisable for the rigidity of the track from one sleeper to another not to vary by more than 20%. ■*

## REFERENCIAS/REFERENCES

- EISENMANN, J. (1970). Influencia del tamaño de la traviesa, separación entre traviesas y espesor de balasto sobre la solicitación del subsuelo (en alemán) Eisenbahntechnische Rundschau, nº 8, HestraVerlag. *Influence of the size of the sleeper, distance between sleepers and thickness of ballast on the subsidence of the subsoil (in German) Eisenbahntechnische Rundschau, nº 8, HestraVerlag.*
- BIRMANN, F. (1966). Track Parameters, Static and Dynamic. In: Proceedings, The Institution of Mechanical Engineers, vol 180, Part 3F.
- ALIAS, J. (1977). La Voie Ferrée. Editions Eyrolles, Paris. Collection des Chemins de Fer.
- ORE. Frage D.117, (1974). Optimale Ampassung des Klassischen Oberbans an den Künfligen Verkehr, "Bericht N. 4. Rheologisches Verhalten des Gleises, Utrecht.
- PRUD'HOMME, A. (1970). La Voie, Revue Générale des Chemins de Fer, nº 1, Janvier.
- HIRANO, M. (1972). Theoretical Analysis of Variation of Wheel Load, Quarterly Reports, Vol. 13, nº 1.
- KURODA, S. (1973). Dynamics Variation of Whell Load. Attributed to Vertical Deformation of Rail End. Quarterly Reports, Vol. 14, nº 3.
- JENKINS, J. et al. (1974). Incidences des paramètres caracteristiques de la voie et des vehicules sur les efforts dynamics vericaux qui se développent entre rail et roue. Rail International, Vol. 10, octobre.
- AMIELIN, S.V. (1974). La vía y el servicio de vía. Traducción española del original en ruso. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid. *Track and track maintenance. Spanish translation of the Russian original. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid.*
- SAUVAGE et al. (1982). La traînée de roulement des vehicules de chemin de fer, Revue Générale des Chemins de Fer, Juillet-Aout, París.
- EISENMANN, J. et al. (1997) Superestructura de balasto para altas velocidades. Traducción española del original en alemán. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid. *Ballast superstructure for high speeds. Spanish translation of the German original.*
- EISENMANN, J. (1974) Schotteroberbau fur Hohe Geseh Windigkeiten. Eisenbahntechnische Rundschan nº 1/ 2.
- LÓPEZ PITA, A. (1976). Un nuevo método para la determinación del espesor de la capa de balasto. Revista de la Asociación de Investigación del Transporte nº 13, Diciembre. *A new method for determining the thickness of the layer of ballast. Revista de la Asociación de Investigación del Transporte nº 13, Diciembre. (Transport Research Association Magazine, nº 13, December).*
- SAUVAGE, R. et al. (1982). La modélisation para éléments finis des couches d'assise de la voie ferrée. Revue Générale des Chemins de Fer, septembre, nº 8.
- PUEBLA, J. et al. (1999). La vía sobre balasto y su comportamiento elástico. III Congreso Nacional de la Ingeniería Civil, Barcelona (España) pág. 811- 817. *The ballast-supported track and its elastic behaviour. III National Civil Engineering Congress, Barcelona (Spain) pg. 811- 817.*
- ALIAS, J. et al. (1981). La dynamique ferroviarie à grande vitesse. Bulletin de l'Association des Ingenieurs des Ponts et Chaussées. París. Octobre nº 10. Pag. 18 – 21.
- SATO, Y. (1993). Optimum Track Elasticity for High Speed. Running on Railway. S. Tech 93, A4-3- (2).
- PRUD'HOMME, A. (1976) Forces and Behavior of Railroad Tracks at very High Train Speeds; Standars Adopted by SNCF for its Future High Speed Lines (250 to 300 km/h) Railroad Track. Mechanics and Technology. Edited by Arnold D. Kerr. Princeton University. –D'APPOLONIA (1967). Referencia tomada del libro Mecánica de Suelos. W. Lambe. Instituto Tecnológico de Massachusetts. Editorial LIMUSA (1996), pág. 249, fig. 159. *Reference taken from the book Mecánica de Suelos (Soil Mechanics). W. Lambe. Massachusetts Institute of Technology. Published by LIMUSA (1996), pg. 249, fig. 159.*
- RUMP, R. (1997). Warum Feste Fahrbahn? Feste Fahrbhan. Edition ETR. Hestra-Verlag. ISBN 3-7771-0269-5 pág. 8 – 11.
- LÓPEZ PITA, A. et al. (2000). Resistant track homogeneity: a way to reduce maintenance costs. Proceeding of the International Conference "Railway Engineering". London, april-may, pág. 1-10 ISBN 0-947644-45-8.
- ESVELD, C. (1980) Mesurage de la raideur de la voie en utilisant une bourreuse mécanique appropriée. Rail International, Mars, page 146 – 156.
- RASMUSSEN, S. et al. (1999) Measurement techniques for track performance. International Conference "Innovations in the design and assessment of railway track". Delft University of Technology, The Netherlands.