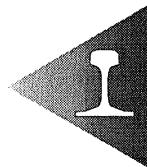


## APROXIMACIÓN A UN MÉTODO RACIONAL PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PLATAFORMAS FERROVIARAS EN LÍNEAS EXISTENTES



Jorge Nasarre y de Goicoechea

*Grupo de Proyectos. Ministerio de Fomento-Renfe.*  
C/ General Oraá, 9. 28006 - Madrid  
Tfno.: 91.563.74.72; Fax: 91.563.15.74

### 1. INTRODUCCIÓN

La estructura de las plataformas ferroviarias para nuevas líneas y ancho de vía internacional está suficientemente definida cualitativa y cuantitativamente en la ficha UIC 719 y su aplicación al dimensionamiento de capas de asiento en la línea de alta velocidad recientemente construida en España ha permitido comprobar el buen comportamiento de las plataformas diseñadas.

La clasificación de plataformas de la ficha UIC 719, con asignación de valores de módulo de deformación de 125 bar para  $PF_1$ , 250 bar para  $PF_2$  y 800 bar para  $PF_3$ , resulta excesivamente simple y conservadora para el estudio afinado de plataformas existentes, cuyas características deben ajustarse para determinar con más precisión los espesores necesarios y suficientes de capas de asiento.

### 2. HIPÓTESIS BÁSICA: LEY DE DORMON

El análisis de un número grande de plataformas sometidas a un número elevado de ciclos de cargas rodantes ha permitido establecer una cierta relación entre la tensión soportada por el suelo de una plataforma y la aparición de asientos permanentes a largo plazo (por efecto de fatiga), habiéndose verificado a partir de ensayos americanos (AASHO) que se cumple la siguiente ley experimental:

Si un carga rodante  $P_i$  transmite a la superficie de **una plataforma** una tensión  $\sigma_i$  en la dirección de  $P_i$  (es decir, vertical), la acción de  $N_i$  ciclos produce un asiento permanente cuya distribución (no uniforme) supone una degradación de la nivelación de la plataforma. Pues bien, para  $i = 1; 2$ , se provocan degradaciones iguales si, y solo si, se verifica (ley de Dormon):

$$\frac{\sigma_j}{\sigma_2} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^L \quad (1)$$

Para las cargas ferroviarias, puede tomarse:

$$L = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (2)$$

Esta ley permite relacionar el tráfico con las exigencias de mantenimiento de la nivelación de vía, como se verá más adelante.

### 3. CONSECUENCIAS DE LA LEY DE DORMON, TRÁFICOS EQUIVALENTES

- A) Un tráfico T estará definido por una sucesión de ejes de carga  $P_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), circulando a la velocidad  $V_j$

Si es P la carga de un eje de referencia que circula a velocidad V y  $\sigma$  y  $\sigma_j$  son las tensiones que P y  $P_j$ , respectivamente, inducen en la plataforma, se puede hacer:

$$r_j = \frac{\sigma_j}{\sigma}$$

El número  $N_j$  de ejes de referencia P equivalente a la acción de un eje  $P_j$  será:

$$N_j = r_j^{(1/L)}$$

Admitiendo una hipótesis de acumulación de daños, se podrá poner:

$$N_e = \Sigma N_j = \Sigma \left[ r_j^{(1/L)} \right] \quad (3)$$

$N_e$  es el número de ejes de carga P que origina la misma degradación de plataforma que el tráfico considerado.

Así se obtiene un tráfico  $Te = N_e \cdot P$ , equivalente al T.



- B) Si la estructura del tráfico es periódica (es decir, si se repite al cabo de un período de tiempo - día, semana, año, etc. - ), pueden mantenerse todas las fórmulas y conceptos anteriores, aplicados al tráfico periódico.

#### 4. RELACIÓN ENTRE INTERVENCIONES DE CONSERVACIÓN Y SOLICITACIÓN DE PLATAFORMA

Sea  $I$  el número de intervenciones anuales de conservación de nivelación para una vía, una estructura de tráfico, una estrategia de mantenimiento y una plataforma de características dadas; se define el coeficiente de conservación de asientos  $k$  (véase el anejo I de la ficha UIC 719) por la expresión:

$$k = \frac{I}{I_m} \quad (4)$$

$I_m$  es el número de intervenciones considerado admisible, técnica y económicamente.

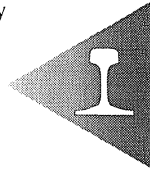
Considérese una plataforma y sobre ella supónganse 2 vías que exigen  $I$  e  $I^*$  intervenciones anuales de nivelación (que se realizan cuando se ha alcanzado un umbral de degradación incompatible con la seguridad o la comodidad), por las que circulan tráficos anuales  $T$  y  $T^*$ , con número anual de ejes equivalentes  $N_e$  y  $N_e^*$ , respectivamente, de la misma carga  $P$ . El número correspondiente de ejes equivalentes  $n$  y  $n^*$  entre 2 intervenciones consecutivas de nivelación será:

$$n = \frac{N_e}{I} \quad (5)$$

$$n^* = \frac{N_e^*}{I^*} \quad (6)$$

Si las tensiones transmitidas a la plataforma por la carga  $P$  son  $\sigma$  y  $\sigma^*$ , respectivamente, se verificará:

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} = \left( \frac{n^*}{n} \right)^L = \left[ \frac{\left( \frac{N_e^*}{I^*} \right)}{\left( \frac{N_e}{I} \right)} \right]^L \quad (7)$$



Por tanto, será:

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} = \left[ \frac{\left( \frac{T_c^*}{I^*} \right)}{\left( \frac{T_c}{I} \right)} \right]^L = \left( \frac{T^*}{T} \right)^L \cdot \left( \frac{I}{I^*} \right)^L \quad (8)$$

## 5. OBTENCIÓN DE LAS TENSIONES TRANSMITIDAS A LA PLATAFORMA

La mecánica de los medios continuos, aplicada a suelos, permitirá obtener las tensiones y asentamientos a que está sometida la plataforma y cada una de las capas de asiento, la traviesa y el carril.

Los modelos de cálculo a utilizar serán suficientemente representativos de la realidad por lo que deberán aplicar el método de elementos finitos tridimensional y serán capaces de tratar capas de características diferentes que sigan leyes elastoplásticas adecuadas (por ejemplo: Drucker - Coulomb).

Las características mecánicas de los materiales a introducir en los modelos son: **E** (módulo de elasticidad o deformación), **m** (coeficiente de Poisson), **c** (cohesión), **f** (ángulo de rozamiento interno) y **d** (densidad), que deben obtenerse por métodos experimentales.

Los parámetros de caracterización de materiales se pueden considerar invariables para cargas estáticas y dinámicas.

## 6. RIGIDEZ GLOBAL DEL CARRIL

Se define la rigidez global (estática o dinámica) del carril como el cociente  $Q/z$ , siendo  $Q$  la carga (estática o dinámica) de una rueda que actúa sobre el carril y  $z$  el desplazamiento correspondiente en el sentido de la carga.

Se puede considerar, con suficiente aproximación, que la rigidez global estática del carril, sobre cualquier plataforma, coincide con la dinámica y esto queda corroborado por los resultados de los cálculos.



## 7. ACCIONES DINÁMICAS

Como consecuencia del movimiento de los vehículos, se produce una oscilación de las masas suspendidas y no suspendidas. La frecuencia propia de oscilación de aquéllas es del orden de 1 Hz y la de éstas (masas no suspendidas) de 30 Hz a 40 Hz. Esta diferencia notable permite considerarlas como fenómenos independientes.

Considerando que  $M_{ns}$  y  $M_s$  son, respectivamente, masas no suspendidas y suspendidas correspondientes a una rueda, en kg, resulta:

$$\begin{aligned}
 Q_0 &= (M_{ns} + M_s) \cdot g \\
 \theta_{ns} &= \left( \frac{A}{1000} \right) \cdot V \cdot \left[ M_{ns} \cdot \left( \frac{Q_0}{z_0} \right) \right]^{0.5} \\
 \theta_s &= B \cdot \left( \frac{M_s}{1000} \right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Siendo:

- $B = B^* \cdot (V/100)$
- $g$ : Aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $\theta_{ns}$ : Desviación típica de la carga dinámica debida a la masa no suspendida, en kN
- $A$ : Parámetro obtenido del espectro continuo de defectos de nivelación de la vía;  $A = 0,42 \cdot b$  (mm), siendo  $b$  (mm) la suma de los valores absolutos de la máxima flecha positiva y de la máxima negativa de la superficie de rodadura de un carril en un tramo de vía, relativas a una cuerda deslizante de 3 m (descontado el efecto de curvatura vertical si la vía está en curva de acuerdo vertical); según Prud'homme en el caso de una vía antigua pero de buena calidad, puede tomarse  $b = 1,08$  mm
- $V$ : Velocidad, en km/h
- $Q_0/z_0$ : Rigidez global estática del carril, en kN/mm
- $\theta_s$ : Desviación típica de la carga dinámica debida a la masa suspendida, en kN

- B\*: Valor de la aceleración vertical máxima de la caja (masa suspendida) en  $m/s^2$ , circulando a 100 km/h. Suele tomarse:

$$B^* = 0,1 \cdot g \cong 1 \frac{m}{s^2} \quad (10)$$

Según el proyecto de ficha UIC 518 (febrero de 1998), el valor de B no será superior a  $2,5 m/s^2$  ( $5 m/s^2$  para vagones)

Las sobrecargas dinámicas correspondientes a masas no suspendidas y suspendidas son estadísticamente independientes, por lo que la desviación típica de la sobrecarga dinámica de la suma de ambas,  $\theta$ , verificará:

$$\theta = (\theta_{ns}^2 + \theta_s^2)^{0,5} \quad (11)$$

El valor dinámico máximo esperado de carga por rueda será, según el proyecto de ficha UIC 518 anteriormente mencionado:

$$Q_{max} = Q_0 + \delta(Q_0) \quad (12)$$

Siendo:

$$\delta(Q_0) = \min(Q_0; 2,2 \cdot \theta) \quad (13)$$

De acuerdo con el citado proyecto de ficha UIC 518:

A) Si  $P_0 = 2 \cdot Q_0 \leq 225 kN$

$$Q_{lim1} = Q_0 + C$$

Siendo  $C = 90 kN$

$Q_{lim2}$  (en función de la velocidad)

V (km/h)	$Q_{lim2}$ (kN)
$V \leq 160$	200
$160 < V \leq 200$	190
$200 < V \leq 250$	180
$250 < V \leq 300$	170
$300 < V$	160



Se tomará como valor de carga dinámica por rueda:

$$Q_{din} = \min(Q_{max}, Q_{lim1}, Q_{lim2}) \quad (14)$$

B) Si  $P > 225$  kN se tomará

$$Q_{din} = Q_{max} \quad (15)$$

Nota: En un eje representativo de las cargas de vehículos clásicos puede considerarse que el valor de  $M_{ns}$  es del orden de magnitud de  $0,15 \cdot (M_{ns} + M_s)$ . Para vehículos de alta velocidad, este valor pasa a ser del orden de  $0,1 \cdot (M_{ns} + M_s)$

Las tensiones dinámicas, que son las realmente actuantes sobre la plataforma, capas de asiento o terreno, se determinarán introduciendo en el programa de cálculo el valor  $Q_{din}$  obtenido y son las que ha de tenerse en cuenta para aplicar la ley de Dormon.

## 8. DETERMINACIÓN DE ESPESORES DE SUBBALASTO Y CAPAS DE ASIENTO

- A) Se determinarán los valores de referencia ( $I_0$ ,  $T_0$ ), estando  $I_0$  definido por las necesidades de mantenimiento de la nivelación en los últimos 5 años, al menos, y siendo  $T_0$  el tráfico equivalente diario, calculado según la ficha UIC 714 (ver punto 9).
- B) Se fijarán unos valores objetivo ( $I$ ,  $T$ ) para un horizonte temporal de 25 a 50 años.
- C) Se determina el valor  $\lambda = \left[ \frac{T_0 \cdot I}{T \cdot I_0} \right]^{0,2}$ . Si  $\lambda \geq 1$  no es necesario actuar en la plataforma.
- D) Si  $\lambda < 1$ , se calcula la tensión máxima  $\sigma_0$  (estática) en superficie de plataforma como se ha indicado en el punto 6, con las características de armamento y espesor de balasto de la vía existente.
- E) Introduciendo las características del armamento y el espesor de balasto de la nueva vía, se calculan las tensiones  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  correspondientes a 3 espesores de subbalasto a introducir entre balasto y plataforma; por ejemplo, pueden considerarse espesores de 0,2 m y 0,4 m de subbalasto.

- F) En un diagrama  $(\sigma, e_{sb})$  - figura 1, obtenida de la Cuestión ERRI D117 - ( $\sigma$ : tensión dinámica máxima en plataforma,  $e_{sb}$ : espesor de subbalasto) se sitúan los puntos determinados en E) y se determina la curva  $\sigma = \sigma(e_{sb})$ .

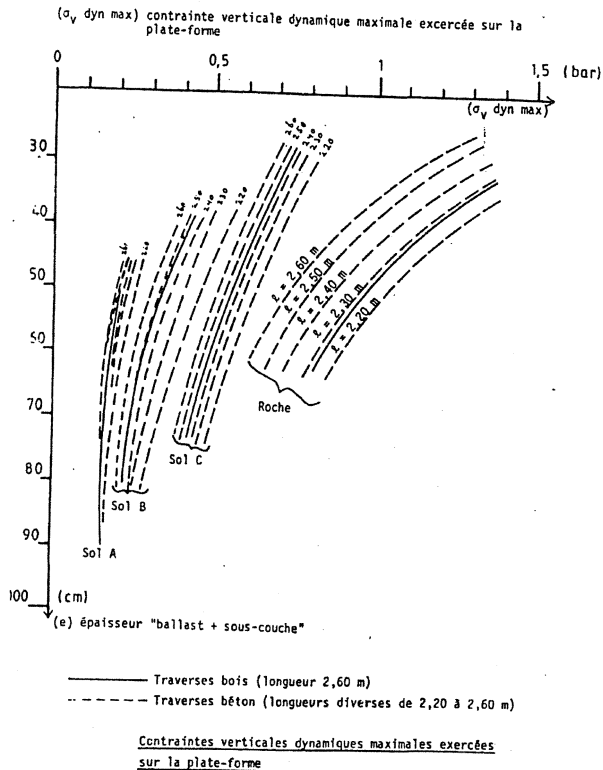


Figura 1

- G) Entrando en esta curva con la tensión  $\lambda \cdot \sigma_0$  se determina el espesor de subbalasto para obtener esa tensión en la plataforma. Este espesor puede redondearse a múltiplos de 0,05 m.

## 9. OBSERVACIONES

- 1) I (número de intervenciones necesarias para la conservación de la nivelación) es una medida indirecta de las deformaciones irreversibles acumuladas de la pla-





taforma y, por tanto, de su degradación. Es una función creciente del tráfico total acumulado.

- 2) Si el espesor de subbalasto correspondiente a la tensión  $\lambda \cdot \sigma_0$  no es razonable desde el punto de vista constructivo, la conclusión es que la plataforma no es adecuada para soportar el tráfico y con I intervenciones anuales de mantenimiento de la nivelación..
- 3) Esta metodología se refiere exclusivamente a la capacidad portante, no a otras características de durabilidad, drenaje, permeabilidad, granulometría, compatibilidad, compactación, etc. que deben presentar los materiales constitutivos de las diferentes capas de asiento y plataforma, que están suficientemente definidas en la ya mencionada ficha UIC 719.
- 4) El **tráfico equivalente** (Te) se puede calcular, a efectos prácticos, de acuerdo con la ficha UIC 714, según la fórmula de origen teórico y experimental:

$$Te = Sv \cdot (Tv + 1,4 \cdot Ttv) + Sm \cdot (Km \cdot Tm + 1,4 \cdot Ttm)$$

Siendo:

Te: Tráfico medio diario equivalente (t)

Tv: Tonelaje medio diario de viajeros (TBR)

Tm: Tonelaje medio diario de mercancías (TBR)

Ttv: Tonelaje medio diario de tracción viajeros (t)

Ttm: Tonelaje medio diario de tracción mercancías (t)

Km = 1,15 (valor normal)

Km = 1,30 (tráfico superior al 50% de ejes de 20 t o al 25% de ejes de 22,5 t)

Km = 1,45 (tráfico superior al 75% de ejes de 20 t o más o bien al 50% de ejes de 22,5 t)

Sv: Se determina, de acuerdo con la tabla siguiente, por la velocidad del tren de viajeros más rápido.

Sm: Se determina, de acuerdo con la tabla siguiente, por la velocidad de los trenes de mercancías ordinarios



V (km/h)	Sv (Sm)
$V \leq 60$	1,00
$60 < V \leq 80$	1,05
$80 < V \leq 100$	1,15
$100 < V \leq 130$	1,25
$130 < V \leq 160$	1,35
$160 < V \leq 200$	1,40
$200 < V \leq 250$	1,45
$250 < V$	1,50

[1]

- [1] Nota. Se incluye en Ttv el tonelaje correspondiente a automotores de viajeros cuya carga por eje es superior a 17t y en Tv si la carga por eje es, a lo sumo, 17t.

## 10. CONCLUSIÓN

El método que se propone puede suponer **ahorros económicos importantes** ya que permite ajustar los tratamientos de plataforma a los necesarios (y suficientes) para que la conservación de vía se mantenga en niveles económicos aceptables. Supone, también, disminuir hasta lo imprescindible las perturbaciones de la explotación por efecto de las obras. Permite relacionar las intervenciones de mantenimiento de la nivelación con el tráfico que soporta una línea. Puede ser aplicada a vías de cualquier ancho (Renfe, Internacional, métrico...).

## BIBLIOGRAFÍA

- Fichas UIC 518, 714 y 719
- Cuestión ERRI D117
- A. Prud'homme. "La voie". Revue Générale des Chemins de Fer, enero 1970
- Sauvage, R. y Richez, G. "Les couches d'assise de la voie ferrée". Revue Générale des Chemins de Fer, diciembre 1978
- Profillidis, V.A. "La voie ferrée et sa fondation. Modelisation mathématique". Thèse Doctorale, ENPC, 1983
- Alias, J. "La voie ferrée". Eyrolles, 1994
- Profillidis, V.A. "Railway Engineering". Avebury Technical, 1995

