

NUEVOS CRITERIOS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE VIAS FERREAS (*)

Por ANDRES LOPEZ PITA

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos
Dirección de Innovación de Renfe

Se revisan los criterios y metodologías actualmente existentes para el dimensionamiento de vías férreas, y se establece a continuación un nuevo método basado en un mejor conocimiento del estado tensodeformacional del sistema balasto-plataforma bajo las acciones del material rodante.

1. Introducción.

Resulta un hecho bien conocido, que el sistema balasto-plataforma desempeña un papel fundamental en el comportamiento tensodeformacional de una vía férrea, frente a las acciones del tráfico en general, y en particular en cuanto a las solicitaciones verticales se refiere, dentro de cuyo ámbito se desarrolla el presente trabajo.

Por otro lado, el incremento de las velocidades de circulación, junto a una tendencia generalizada de disminuir las operaciones de conservación de la vía, obligan, entre otros aspectos, a disponer dicho sistema en forma tal que sea lo más estable posible a modificarse bajo las acciones del tráfico.

Esta situación ha conducido, en los últimos años, a las distintas Administraciones ferroviarias a emprender notables trabajos de investigación, para responder a la cuestión de cómo efectuar un dimensionamiento del citado sistema, es decir, del balasto y la plataforma, que respondiese a las exigencias de la explotación diaria de una vía, algunas de cuyas exigencias acabamos de citar y a otras nos referiremos posteriormente.

La importancia y transcendencia del tema ha hecho que el O. R. E. (Office de Recherches et d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de Fer) haya incluido dentro de su programa de trabajo (Comité D-117) el estudio prioritario del problema, para tratar de establecer, si es posible, una metodología de dimensionamiento del sistema balasto-plataforma que sea aceptada por las distintas redes ferroviarias.

En relación con esta problemática, la Direc-

ción de Innovación de Renfe emprendió a finales de 1973 la tarea de disponer de criterios propios sobre la forma de efectuar el dimensionamiento de la vía tipo Renfe, es decir, vía con traviesas RS separadas 60 cm y carril de 54 kilogramos por metro lineal.

El objeto del presente artículo es la exposición, a través de un rápido recorrido por la evolución del pensamiento científico, desde los orígenes del ferrocarril, hasta nuestros días, del camino seguido en la búsqueda de un mejor conocimiento del comportamiento del sistema balasto-plataforma, para concluir finalmente con la exposición de la investigación efectuada por la Dirección de Innovación de Renfe.

2. Antecedentes.

2.1. Periodo 1867-1940.

Situémonos para ello, inicialmente, en los años finales del siglo pasado y en los primeros del presente; de este modo es posible contemplar con más amplia perspectiva la labor desarrollada en el ámbito de nuestro problema.

En aquella época, el dimensionamiento del sistema balasto-plataforma se planteaba con arreglo a los tres aspectos siguientes:

1.º Conocimiento de la tensión existente en la superficie de la capa de balasto.

2.º Ley de distribución de presiones por el balasto desde su superficie hasta la correspondiente a la plataforma.

3.º Tensión admisible por la infraestructura de la vía.

Para el primer aspecto, la fórmula de Zimmermann completada con la hipótesis de Timoshenko, Saller y Hanker, ofrecía una expresión teórica sencilla para evaluar la presión

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de octubre de 1977.

que actúa en la superficie del balasto; la bondad de dicha formulación sería puesta de manifiesto posteriormente mediante numerosas medidas experimentales, las cuales hacen que sea utilizada actualmente por la mayoría de las Administraciones.

Recordemos que dicha expresión era:

$$\sigma_l = \frac{Qd}{2F} \sqrt[4]{\frac{CF}{4El d}} \eta \quad [1]$$

siendo:

σ_l = Tensión en la superficie del balasto.

Q = Carga dinámica por rueda.

d = Separación entre traviesas.

F = Área de apoyo de la traviesa correspondiente a un carril.

C = Coeficiente de balasto.

El = Rigidez del carril.

$$\eta = e^{-\frac{X}{L}} \left[\cos \frac{X}{L} + \operatorname{sen} \frac{X}{L} \right]$$

X = Distancia del punto de aplicación de la carga Q a la sección considerada.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4El d}{CF}} = \text{Longitud elástica.}$$

La aplicación de la expresión [1] permitía tener en cuenta el efecto de las cargas contiguas a la de cálculo sin más que aplicar el principio de superposición, una vez admitida su validez.

Por lo que se refiere al coeficiente de balasto C , único parámetro desconocido en [1] se utilizaban los valores encontrados por Hantzschel.

Guijarros sobre arcilla ligera	2,6 Kg/cm ²
Guijarros sobre terraplén arenoso.	5,3 a 7,2 Kg/cm ²
Guijarros sobre arcilla compacta.	6,8 a 7,5 Kg/cm ²
Guijarros sobre roca	7,6 a 8,9 Kg/cm ²

Cabe preguntarse, no obstante, cuál era la influencia del espesor de balasto y cuál la correspondiente a la infraestructura en estos valores. Es esta una cuestión que ya a finales del siglo pasado fue objeto de atención por parte de diversos autores: Bauchal, Van Dijk..., y,

sobre todo Wasiutynski, el cual en 1937 llevó a cabo una importante campaña experimental en la línea Viena-Varsovia, con objeto de establecer la relación existente entre el coeficiente de Winkler del sistema balasto-plataforma y el correspondiente a cada uno de estos elementos.

Desde el punto de vista teórico, el citado autor establecía que el hundimiento total (Y_l) del sistema balasto-plataforma era la suma del debido a ambos, Y_h y Y_p , respectivamente, y en consecuencia que:

$$Y_l = Y_h + Y_p$$

De acuerdo con la hipótesis de Winkler:

$$P_h = C_h \cdot Y_h$$

$$P_p = C_p \cdot Y_p$$

luego:

$$Y_l = \frac{P_h}{C_h} + \frac{P_p}{C_p}$$

y dado que:

$$P_h \cdot a_1 = P_p \cdot a_2$$

siendo a_1 la superficie de balasto sobre la que actúa la presión P_h y a_2 la correspondiente a la presión P_p sobre la plataforma.

Resultaba:

$$\frac{1}{C_l} = \frac{1}{C_h} + \frac{1}{n \cdot C_p}$$

siendo:

$$n = a_2/a_1$$

Sin embargo, n es función del ángulo con que el balasto distribuye las presiones que de la traviesa recibe, a su vez dependiente de la infraestructura sobre la que se apoya. En cualquier caso Wasiutynski encontró valores para n del orden de 4.

En relación con el coeficiente de balasto, generalmente atribuido a Winkler, creemos interesante señalar que Volterra (1971) atribuye la formulación de la conocida hipótesis a Euler (1774), mientras que Vlasov y Leontiev, por el contrario, creen que se debe al académico soviético Fuss (1801). En cualquier caso, la idea del coeficiente de balasto ha sido siempre asociada al autor alemán, del que resulta curioso

señalar que unos años antes de establecer la citada hipótesis, afirmaba que la vía no se hundía al paso del material rodante.

Conocida la presión en la superficie de la capa de balasto, la forma en que éste distribuía las tensiones era de especial interés para poder conocer la presión existente en la superficie de la plataforma y, en consecuencia, compararla con la admisible por ésta.

En este sentido, y en la época en la que nos encontramos, finales del siglo XIX, principios del XX, podemos señalar los intentos de Byers en el Congreso de París de 1909 y de Talbot en la década siguiente. El primero trataba de explicar la transmisión de presiones por la capa de balasto mediante la asimilación de las partículas de este elemento a cubos, y el autor americano a través de esferas.

Como consecuencia de ambos intentos aparecieron los denominados criterios prácticos europeo y americano, cuya formulación básica consistía en admitir una distribución de presiones uniforme a cualquier profundidad del balasto y un cierto ángulo de reparto de éstas por el balasto.

En cualquier caso, y dado que no era posible conocer en forma explícita la tensión admisible de una plataforma bajo esfuerzos repetidos, la determinación del espesor de balasto se efectuaba de manera empírica. Primero fueron 20 cm y luego, a partir de la propuesta de Michel en París, a comienzos de siglo, 30 cm, valor que en nuestros días sigue utilizándose o más bien justificándose a base de tradición en muchas Administraciones ferroviarias. Tan sólo y para plataformas arcillosas, Schubert recomendaba una capa de balasto variable de 50 a 80 cm, según los casos, para evitar la subida de dicho material a través de la misma.

2.2. Período 1940-1973.

A partir de la década de los años 40, la investigación se orienta hacia un mejor conocimiento de la ley de distribución de presiones por el balasto, así como de la capacidad portante de la infraestructura, dado que la fórmula de Zimmermann para evaluar la tensión en la superficie del balasto proporcionaba resultados acordes con la experiencia.

En relación con la primera cuestión señalamos la contribución de Clarke (1957) mediante

la consideración de una distribución espacial de tensiones por el balasto, así como la de Schramm, de la misma época, incorporando la influencia de la longitud de la traviesa (fig. 1).

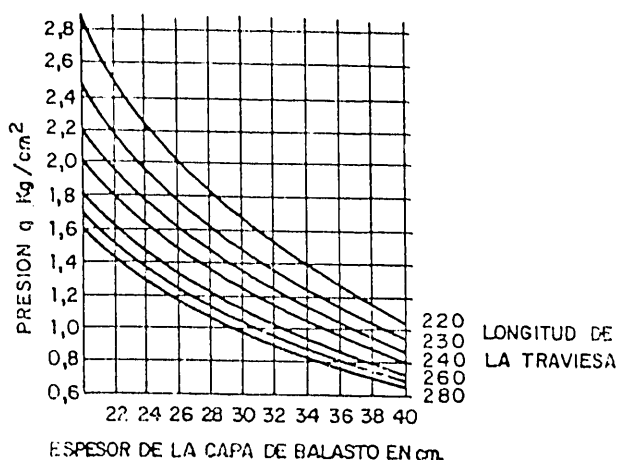


Fig. 1. — Abaco de Schramm sobre distribución de presiones por la capa de balasto.

Nos referiremos finalmente a los estudios desarrollados en la URSS, basados en los trabajos efectuados por Kogler y Scheidig sobre la distribución de tensiones por una zapata de cimentación.

En relación con la evolución de la capacidad portante de la plataforma, los trabajos efectuados en el marco de la carretera, principalmente por el Estado de California sobre el conocidísimo índice del CBR, ofrecían al ferrocarril unas posibilidades que éste no acababa de aceptar.

Llegamos de este modo a la década de los años 60, en la cual el ferrocarril, en el marco de nuestro problema, inicia por exigencias imperativas de la explotación diaria, la labor de disponer de una metodología de dimensionamiento del sistema balasto-plataforma basada en criterios racionales y apoyándose en las posibilidades que otras disciplinas le ofrecen; especialmente por lo que se refiere, desde un punto de vista teórico, a la teoría de la *elasticidad* y desde un punto de vista práctico al marco de la carretera.

El primer paso lo da la SNCF que adapta al ámbito ferroviario el método de dimensionamiento de firmes flexibles del CBR.

Supone para ello asimilable el cimiento de una calzada flexible al balasto y al subsuelo, por un lado, y por otro al impacto de una semi-

traviesa sobre el balasto al de una rueda de camión sobre el firme. Obtiene de este modo, el ábaco de la figura 2 en el que aparecen dos curvas según se trate de tráfico ligero o pesado.

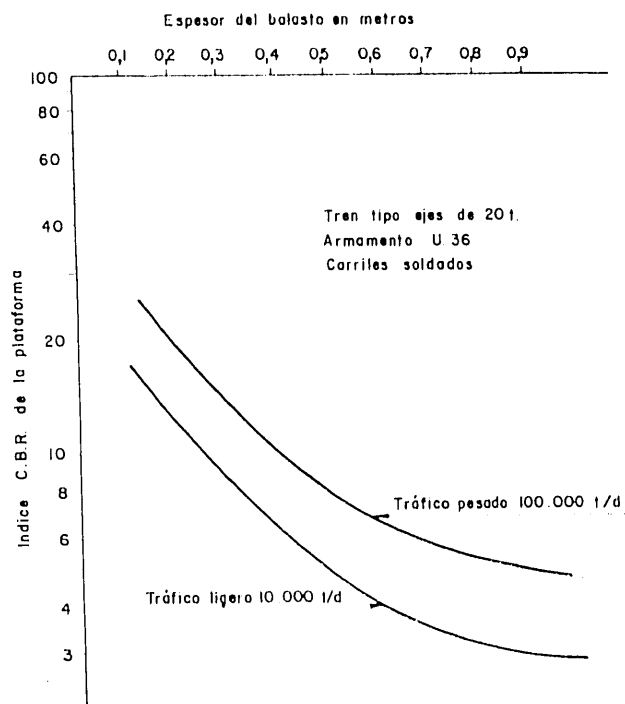


Fig. 2.—Método del CBR (adaptación francesa del original de carreteras).

Para el cálculo de tensiones en el balasto utiliza los resultados de la teoría del semiespacio indefinido de Boussinesq y es precisamente en este punto donde se encuentra una de las principales limitaciones del método pues los resultados de dicha teoría son independientes de las características deformacionales del medio elástico, es decir, en nuestro caso del balasto, lo que no puede considerarse representativo del fenómeno real.

Sin embargo, tal hecho no desanima a los investigadores y en el marco tanto del ORE como de la Universidad Técnica de Munich se llevan a cabo nuevos estudios que utilizan con fundamento teórico los resultados del semiespacio indefinido. De este modo se puede, por otro lado, introducir la influencia de la separación entre traviesas en el estado tensional de la plataforma como hacen Hana, el profesor Eisenmann y Joromov, del Instituto Ferroviario de Moscú.

Se comprende, no obstante, que el conjunto balasto-plataforma constituye un sistema bicapa

y que es necesario, por tanto, utilizar las teorías correspondientes a dicho sistema para cuantificar el estado tensional existente en ambos elementos; dichas teorías consideran no sólo la influencia de las características deformacionales de ambas capas, sino también el espesor de la superior, en nuestro caso del balasto. Es de este modo, cómo a principios de la década presente el profesor Eisenmann efectúa numerosos cálculos teóricos, utilizando un programa de ordenador puesto a punto por la conocida compañía de petróleos Shell.

Un único reparo que oponer a esos resultados, por otro lado de gran importancia e interés: el valor del módulo de elasticidad del balasto introducido como dato no es una característica constante de este elemento, sino que depende del tipo de infraestructura sobre la que se apoya. Por otro lado, el coeficiente de balasto que se considera en la fórmula de Zimmermann, para calcular la presión en la superficie de balasto, tiene un carácter empírico.

Señalemos, finalmente, que con ocasión de estos trabajos el autor alemán introduce en el ámbito ferroviario la expresión encontrada por Heukelom y Klomp, en el marco de la carretera, para evaluar la tensión admisible por la plataforma de la vía, lo que supone un notable avance en las técnicas de dimensionamiento.

3. Estado actual del problema.

Del análisis afectuado precedentemente se deduce que el estado del problema a comienzos de 1973, se presentaba en la forma siguiente en relación con los tres aspectos principales del problema que enunciamos en el apartado anterior.

1.º En relación con la tensión existente en la cara inferior de la traviesa más cargada.

La fórmula de Zimmermann presentaba como única laguna importante, el desconocimiento de la relación existente entre el coeficiente de Winkler, el espesor de balasto (h) y la capacidad portante de la plataforma (E_p), es decir, una relación del tipo:

$$c = f(h, E_p) \quad [2]$$

2.º En cuanto a la distribución de presiones por la capa de balasto.

La utilización de las teorías elásticas bica-

pas necesitaba el conocimiento real del módulo de elasticidad del balasto existente en la vía. En este sentido la tabla 1 resume los valores

TABLA 1.— *Módulo de elasticidad del balasto (Kg/cm²).*

KJELLMAL y JACOBSON:	
$1.200 < E_b < 2.700$	
MELENTIEV:	
Balasto de grava:	$E_b \simeq 3.600$
Balasto de piedra machacada:	$3.300 < E_b < 5.000$
DERBY (BR):	
$2.000 < E_b < 4.000$	
DIRECCION DE INNOVACION (RENFE):	
$3.150 < E_b < 4.500$	

obtenidos para este parámetro por distintos investigadores, de la que se deduce la dispersión existente entre dichos valores.

3.º Por lo que se refiere a la evaluación de la capacidad portante de la plataforma.

La fórmula de Heukelom, ya comentada, cuya expresión matemática es:

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 E d}{1 + 0,7 \log N}$$

siendo:

σ_{adm} = Tensión admisible por la plataforma.

$E d$ = Módulo de elasticidad dinámico de la infraestructura.

N = Número de ciclos de carga; empíricamente se toma $N = 2 \times 10^6$.

proporcionaba por el momento una satisfactoria respuesta a la determinación de la tensión admisible de la plataforma.

En resumen, puede decirse que la investigación debía orientarse hacia el conocimiento explícito de la expresión [2] y a la determinación del módulo de elasticidad del balasto realmente existente en la vía. La cuantificación de ambos aspectos permitiría definir de forma más precisa el espesor de balasto necesario para cada infraestructura.

Por otro lado, las investigaciones efectuadas

por distintos autores Prud'homme (1971), Hirano (1972) y Kuroda (1973), entre otros, habían puesto de manifiesto, en forma explícita, la decisiva influencia de la rigidez vertical de la vía en las sobrecargas dinámicas originadas por el material rodante sobre ésta. En particular, el autor francés obtuvo la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_{QNS} = f(R_v) \quad [3]$$

siendo:

σ_{QNS} = Desviación de las sobrecargas dinámicas debidas a las masas no suspendidas de los vehículos.

R_v = Rigidez vertical de la vía.

De la expresión [3] se deduce el interés de disponer una vía con una rigidez vertical mínima, compatible con que el estado de sollicitaciones en su plataforma no supere la tensión admisible de ésta; dado el papel fundamental desempeñado por el sistema balasto-plataforma en la rigidez vertical de la vía, como se deduce de la tabla 2, se pone de manifiesto el interés

TABLA 2.— *Asiento de la vía. (Resultados de Birmann.)*

Elemento	Vía con travéas de:	
	Madera %	Hormigón %
Placa elástica	5	5
Traviesa	15	0
Balasto	57	70
Plataforma	23	25

de efectuar el dimensionamiento de dicho sistema incluyendo la citada condición.

Conviene señalar, por otro lado, los resultados publicados por el ORE (1972) sobre la influencia del espesor de balasto en la evolución de la calidad de la vía con el tráfico. En este sentido, la figura 3 indica el desfavorable efecto de incrementar la altura del material granular y en consecuencia la necesidad, una vez más, de una definición precisa de dicho espesor.

4. Investigación desarrollada.

Tomando como base las consideraciones efectuadas en el apartado precedente, la investigación efectuada se desarrolló en dos fases, ambas recogidas en la tabla 3.

En la primera, se obtuvo de forma experi-

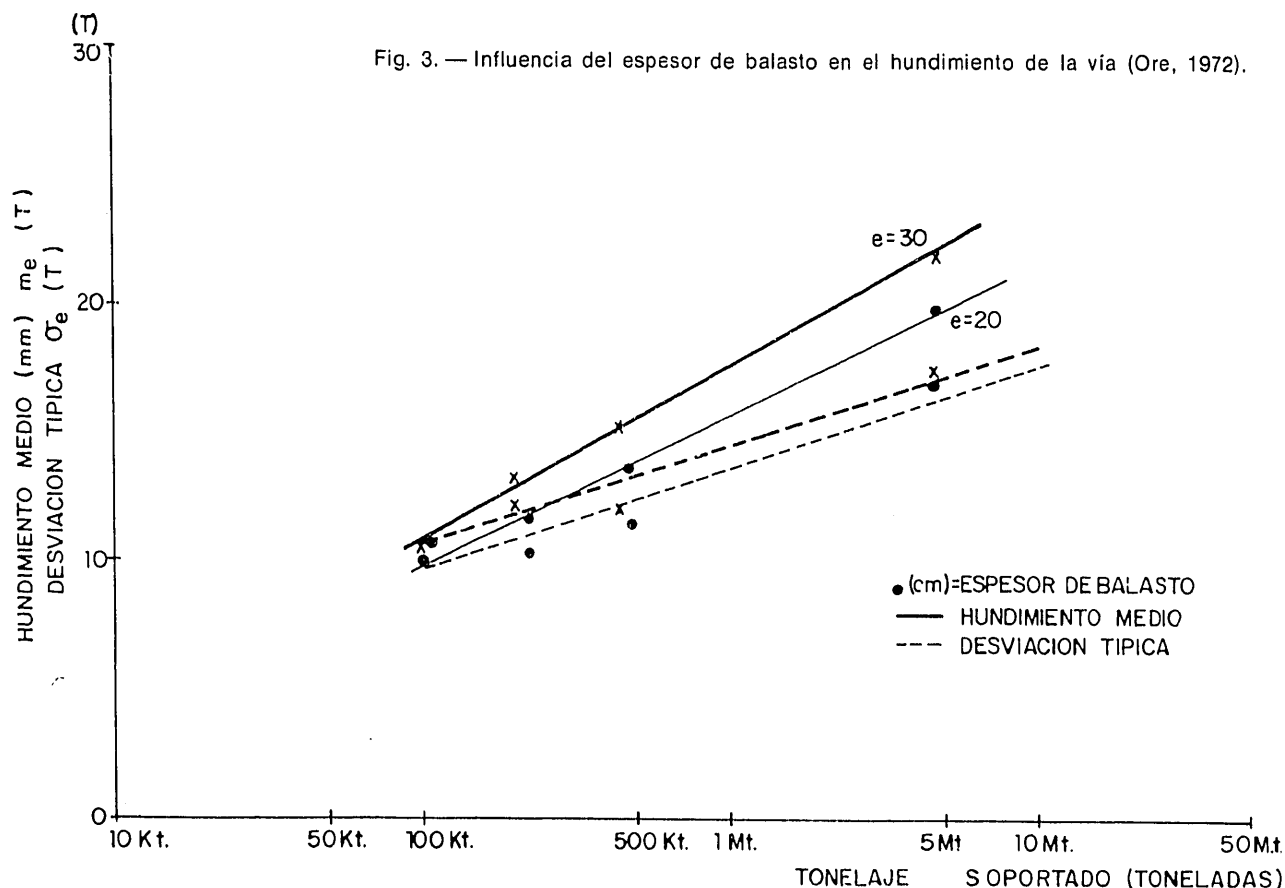
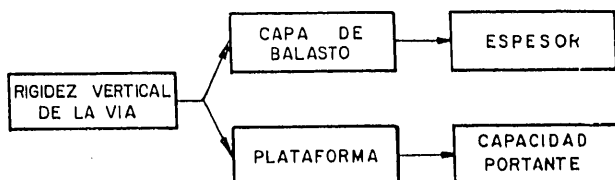


TABLA 3. — Fases a considerar en el estudio de la rigidez vertical de la vía.

1.º DETERMINACION DE LA RELACION EXISTENTE ENTRE:



2.º DETERMINACION DEL ESPESOR DE BALASTO NECESARIO PARA CADA PLATAFORMA CON LAS RESTRICCIONES SIGUIENTES:

RESTRICCION	CAUSA
RIGIDEZ VERTICAL MINIMA	INFLUENCIA DESFAVORABLE EN LOS ESFUERZOS DEL MATERIAL
TENSION EN LA PLATAFORMA INFERIOR A LA ADMISIBLE	EVITAR ASIENTOS Y DEFORMACIONES EN LA VIA
ESPESOR MINIMO	INFLUENCIA DESFAVORABLE EN LA DEGRADACION DE LA VIA CON EL TRAFICO

mental, la relación de dependencia existente entre la rigidez vertical de la vía, el espesor de la capa de balasto y la capacidad portante de la plataforma; en relación con este aspecto no existían, al menos en nuestro conocimiento, antecedentes bibliográficos ferroviarios.

Una vez conocida dicha relación de dependencia, determinamos el espesor necesario de balasto mediante la metodología que posteriormente indicaremos.

4.1. *Determinación experimental de la relación de dependencia existente entre la rigidez vertical de la vía, el espesor de balasto y la capacidad portante de la plataforma.*

En la línea férrea de Pamplona a Castejón se eligieron, después de los correspondientes ensayos geotécnicos, tres tipos de infraestructuras diferentes, las cuales se caracterizaron por su módulo estático de deformación:

Plataforma tipo 1: Módulo de deformación = 130 Kg/cm²

Plataforma tipo 2: Módulo de deformación = 300 Kg/cm²

Plataforma tipo 3: Módulo de deformación = 700 Kg/cm²

Sobre cada una de las plataformas mencionadas se colocaron en forma progresiva, espe-

sores crecientes de balasto, midiéndose en cada caso la rigidez vertical de la vía correspondiente a cada situación. Las características restantes de la vía, que permanecían constantes durante todo el ensayo eran las siguientes:

Carril	54 Kg/m
Traviesa	RS
Sujeción	RN
Distancia entre traviesa ...	60 cm

Dado que la rigidez vertical de la vía está definida como el cociente entre la carga puntual aplicada sobre el carril y el asiento que ella provoca, se adoptó el siguiente proceso para su determinación experimental:

- Elección de un vagón a ejes.
- Construcción de un sistema de referencia fijo para medida del asiento de la vía.

La utilización de un vagón a ejes se debía al hecho de poder aplicar una carga puntual al carril en una sección determinada de la vía, puesto que la distancia existente entre los ejes del vagón permitía no tener en cuenta en la deformación más que la influencia del eje considerado.

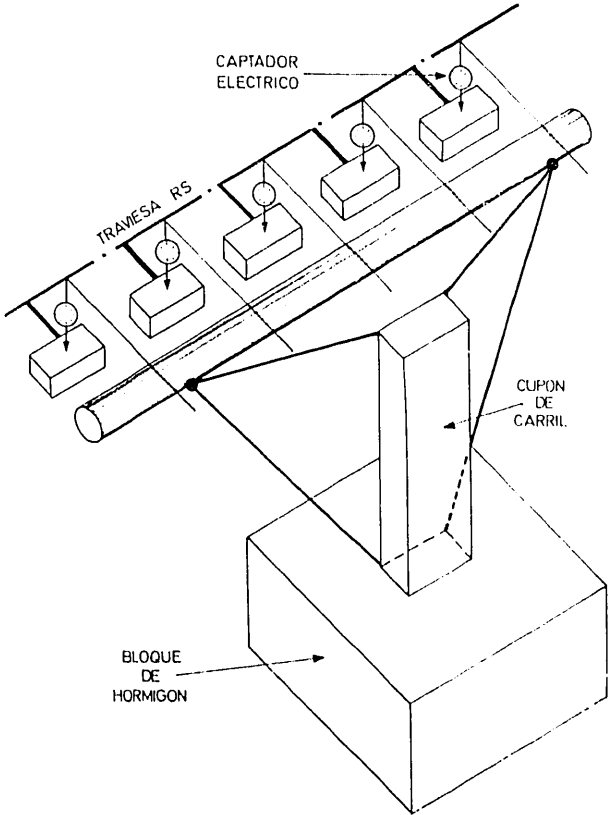


Fig. 4. — Sistema de referencia para la medida de desplazamientos.

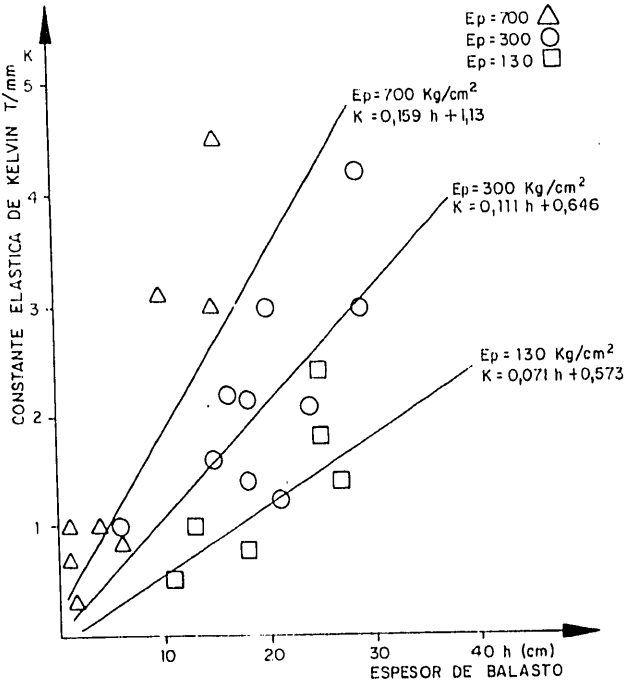
Como sistema de referencia se utilizó la estructura rígida tetraédrica de la figura 4 fijada a cupones verticales de carril, elevados en marcos de hormigón.

Cinco captadores eléctricos potenciómetros lineales permitían la telemedida de los desplazamientos verticales del carril. Un aparato de lectura digital y un conmutador permitían una secuencia rápida de medidas.

Dicha secuencia se efectuaba en la forma siguiente:

Una vez situado el sistema de referencia y tomadas las lecturas origen, se hacía circular el vagón de ensayo en condiciones cuasi-estáticas, sobre las traviesas de registro, anotándose para cada posición del vagón el asiento de cada traviesa, obteniéndose en consecuencia la rigidez vertical de la vía.

Como resultado de este proceso experimental se obtuvo el gráfico de la figura 5 del que se deduce que puede admitirse una variación de tipo lineal entre la rigidez vertical de la vía y el espesor de balasto para una plataforma de capacidad portante dada. El coeficiente de co-



E_p = módulo de elasticidad de la plataforma

Fig. 5. — Variación de la constante elástica de Kelvin (rigidez vertical de la vía) T_n/mm , con el espesor de balasto para distintas infraestructuras (inmediatamente después de batear la vía de balasto calcáreo).

relación obtenido en cada situación fue superior a 0,7.

Recordando la expresión de Zimmermann para el hundimiento y que produce una carga puntual Q en el carril:

$$y = \frac{Q d}{2 C F} \sqrt[4]{\frac{C F}{4 E I d}}$$

se deduce el valor de la rigidez vertical de la vía (R_v):

$$R_v = \frac{Q}{y} = 2 C \frac{F}{d} \sqrt[4]{\frac{4 E I d}{C F}} \quad [4]$$

Expresión que permite deducir la relación existente entre el coeficiente de Winkler, el espesor de balasto y el módulo de elasticidad de la plataforma.

4.2. Determinación del espesor necesario de balasto.

Una vez conocida la variación del coeficiente de balasto, la determinación del espesor de balasto se efectúa en la forma siguiente:

- A partir de la capacidad portante de la infraestructura que se pretende dimensionar, se supone un cierto espesor de balasto y se calcula mediante el gráfico de la figura 5 y la expresión [4] el coeficiente de balasto correspondiente.
- Utilizando la expresión [1] se evalúa la tensión existente en la superficie de la capa de balasto; para las condiciones de tráfico previstas en lo que concierne a cargas por eje y velocidad.
- Conocida esta tensión y utilizando los resultados de las teorías elásticas bicapas, se calcula la presión en la superficie de la plataforma para el espesor de balasto previsto. Si esta tensión es inferior a la admitida por la infraestructura, deducida por la fórmula de Heukelom, el espesor supuesto es válido; en caso contrario, se repite el proceso suponiendo un espesor de balasto diferente, lo que modifica el coeficiente de Winkler y, por tanto, la presión en la superficie del balasto.

La aplicación de la metodología precedente,

que acabamos de exponer, necesita entre otros factores del conocimiento del módulo de elasticidad del balasto que existe realmente en la vía. La cuantificación de este módulo puede efectuarse del modo siguiente:

A partir del conocimiento de la rigidez vertical de la vía (R_v) se calcula el módulo de vía U definido por Talbot y mediante la hipótesis de Timoshenko y los resultados de Wasiutynski, se evalúa el coeficiente de rigidez equivalente del sistema balasto-plataforma. Utilizando ahora el ábaco de Odemark (fig. 6) es posible deducir E_1 , es decir, el módulo de elasticidad del balasto realmente existente en la vía. El cálculo detallado del módulo de elasticidad del balasto puede verse en la referencia (7).

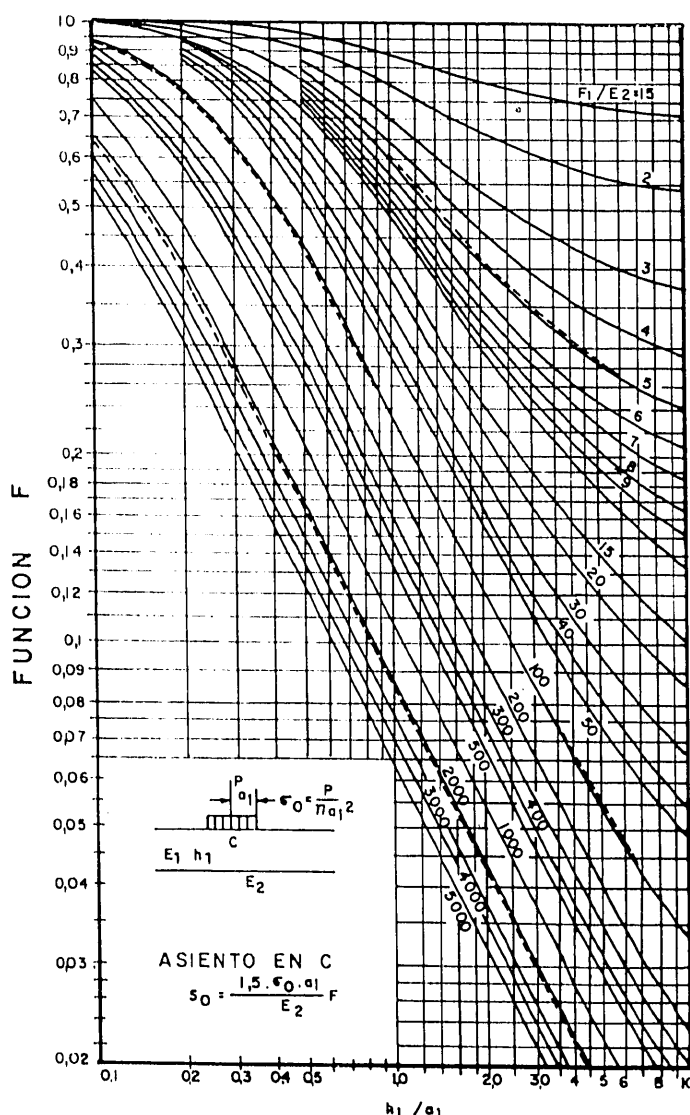


Fig. 6. — Asiento en un sistema bicaapa sometido a carga flexible circular.

Procediendo de este modo se obtienen los valores de dicho módulo recogidos en la tabla 4 que ponen de manifiesto, como para el caso de bases de carreteras, la relación de dependencia

TABLA 4. — Módulo de elasticidad del balasto.

Resultados obtenidos

Módulo de deformación de la plataforma (Kg/cm ²)	Módulo de deformación del balasto (Kg/cm ²)	Coefficiente multiplicador
130	780	6
300	900	3
700	1.330	1,9

Resultados para bases de carreteras

Referencia	Módulo de deformación de la plataforma (Kg/cm ²)				
	210	420	820	1.400	2.100
	Coefficiente multiplicador				
Shell Oil Co.	3,5	2,4	1,9	1,8	1,7
The Asphalt Institute	4,8	2,7	1,8	1,6	1,5

existente entre el módulo de elasticidad del material que se coloca sobre la infraestructura y el correspondiente a este elemento.

El proceso iterativo al que nos hemos referido precedentemente puede efectuarse entonces de forma sencilla. Dicho proceso ha permitido dibujar el ábaco de la figura 7, con lo que resulta posible conocer directamente el espesor de balasto necesario a la infraestructura objeto de dimensionamiento. El ábaco se ha construido en la forma siguiente:

En abscisas, y en la parte derecha del gráfico, se han representado utilizando el cuadro indicado, algunas de las características geotécnicas de los distintos tipos de suelos. Dicho cuadro es ampliamente utilizado en el marco de la carretera (Hicks, 1973).

En ordenadas, y en la parte derecha, se ha dibujado la variación de la tensión admisible en la plataforma con el módulo dinámico de la misma, según Heukelom.

Finalmente, a la izquierda del gráfico se ha representado la variación de la tensión en la plataforma con el espesor de balasto, en función del estado de la vía (siguiendo el criterio de Eisenmann) y de la velocidad máxima permitida por ella.

Para el dibujo de dichas curvas se ha partido de las siguientes hipótesis básicas:

Carga máxima por eje ...	22 Tm
Carril	54 Kg/m l
Traviesa	RS
Distancia entre traviesas .	60 cm

Dichas hipótesis corresponden a las existentes en Renfe para sus líneas principales.

5. Conclusiones.

La investigación desarrollada en este trabajo ha puesto de manifiesto que para una infraestructura de capacidad portante dada, a igualdad de otros factores, puede suponerse una variación de tipo lineal de la rigidez vertical de la vía con el espesor de la capa de balasto.

Este resultado ha permitido definir el espesor de balasto que proporciona a la vía una rigidez vertical mínima, disponiéndose en consecuencia de una nueva metodología para el dimensionamiento del sistema balasto-plataforma.

BIBLIOGRAFIA

1. BAUCHAL, M.: "Ballast". *Bulletin de l'A.I.C.C.F.* Juin 1900.
2. BIRMANN, F.: Neure Messungen an Gleisen mit verschiedenen Unterschwellungen". *E. R.* Juli, Heft 7, 1957.
3. CLARKE, C.: "Track Loading Fundamentals". *The Railway Gazette.* April 1955.
4. EISENMANN, J.: "Beanspruchung der Schiene als Trager". *E. T. R.*, No. 8. 1969.
5. HEUKELOM, W., and KLOMP, A.: "Dynamic Testing as a mean of controlling Pavements during and after Construction". *Proceedings of the First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.* Ann Arbor, Michigan, 1962.
6. HIRANO, M.: "Theoretical Analysis of Variation of Wheel Load". *Quarterly Reports.* Vol. 13. No. 1. 1972.
7. LOPEZ PITA, A.: "Estudio de la deformabilidad del sistema balasto-plataforma en una vía férrea bajo la acción de cargas verticales". Tesis doctoral presentada en la E.T.S.L.C.C. y P. de Madrid. 1976.
8. PACKARD, R.: "Design of Concrete Airport Pavement". *Portland Cement Association.* 1973.
9. PRUD'HOMME, A.: "Forces on and stability of the track at high speeds". *ORE Colloquy High Speed.* 1971.
10. WASIUTYNSKI, A.: "Recherches experimentales sur les déformations élastiques et le travail de la superstructure des Chemins de Fer". *Annales de l'Académie des Sciences Techn'ques à Varsovie,* Tome IV. 1937.