

ELECTRIFICACIÓN DE FERROCARRILES

Estudios sobre su conveniencia económica ¹

III

Gráficos

Para hacer más expedito nuestro procedimiento podemos reducir las ecuaciones [14], [15], [16] y [17] a su mínima expresión. Entre los parámetros que en ellas entran, hemos escogido como variables independientes: tráfico y pendientes de la línea. Aquí reside, no se olvide, la mayor eficacia de este método. En efecto, tanto el tráfico como la pendiente son las verdaderas características de las líneas férreas. El coste de electrificación variará con el tráfico, y esta variación quedará reflejada en nuestros gráficos por tomar el tráfico como variable independiente. La objeción principal hecha a los procedimientos de Lucia y Parodi, desaparece en absoluto. Así como los gráficos de Lucia y Parodi sólo pueden aplicarse a líneas de un tráfico casi igual, porque fijan un coste de electrificación constante, nuestros gráficos son aplicables a cualquier línea, cualidad que la juzgamos mucho más fundamental que ninguna otra. Las variaciones del precio del kw-h, o del carbón, son insignificantes al lado de lo que las pendientes y el tráfico varían de una línea a otra. No creo necesario insistir más en esto.

Naturalmente, algunas hipótesis restrictivas ha sido preciso introducir para obtener expresiones sólo en función del tráfico y de las pendientes. La principal, ha sido fijar un precio invariable para el kw-h. Pero ningún error produce esto, pues en la realidad el precio del kw-h no varía de una región a otra. Esto precisamente tenemos entendido que ha hecho la Comisión, al fijar 0,08 ptas. el coste del kw-h para sus trabajos. Nuestros gráficos fueron calculados en 1927 justamente tomando el mismo precio, con lo cual nos colocamos dentro de la realidad actual, pudiendo ofrecer, además, estudios preparativos de alguna exactitud.

Para reducir el coste de electrificación a depender del tráfico y de las pendientes, hemos calculado el coste por kilómetro de línea con precios suministrados por las principales casas especialistas (véanse los números citados de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, donde se detalla todo esto), y haciendo pequeñas hipótesis, que en nada alteran la exactitud aproximada que necesitamos.

En una palabra, hemos elegido las variables verdaderas de un ferrocarril para reflejar sus variaciones en los gráficos.

Las fórmulas [14] a [17] quedan así reducidas a:

Líneas de pendiente débil, $I \leq 7$. Electrificación a 1 500 voltios, corriente continua.

Para simple vía:

$$0,00375 Q - 0,000096 QI_m - 7 337,50 = 0 \quad [18]$$

Para doble vía:

$$0,00375 Q - 0,000096 QI_m - 10 962,50 = 0 \quad [19]$$

Líneas de fuertes pendientes, $I > 7$. Simple vía:

$$0,00232 Q + 0,0002087 QI - 0,000096 QI_m - 7 337,50 = 0 \quad [20]$$

Doble vía:

$$0,00232 Q + 0,0002087 QI - 0,000096 QI_m - 10 962,50 = 0 \quad [21]$$

Estas cuatro fórmulas darán los tráficos mínimos económicos, conociendo las pendientes de las líneas. Así se han obtenido los gráficos números 1, 3, 5 y 9.

Fórmulas análogas ¹ se obtienen para la expresión de las economías brutas de los costes de electrificación kilométricos. Rápidamente, para cada línea dada, se obtiene la condición de electrificación económica, obteniendo su trabajo mínimo económico necesario, y, además, las economías probables y el coste de electrificación, es decir, las principales características de una electrificación.

Una consecuencia importante se deduce del examen de las fórmulas [18] y [21]: la condición de mínima economía depende, en último lugar, del tráfico y de la pendiente máxima, *juntamente*. Carece, pues, de todo fundamento el enunciar—como se ha hecho—que la conveniencia de la electrificación de los ferrocarriles españoles depende sólo del tráfico. Nada más lejos de la realidad, pues entonces sólo serían electrificables las grandes líneas. Ambas variables fijan la condición de economía, es decir, será una curva hiperbólica que realmente separará las zonas de propia aplicación del vapor y la electricidad. Y esto está claramente indicado en los gráficos que se adjuntan.

Naturalmente, existe un tráfico *mínimo de los mínimos económicos*; pero es precisamente cuando la pendiente es cero (gráfico núm. 1). Este mismo gráfico demuestra que el tráfico mínimo es variable con la pendiente de la línea.

Para demostrar la aplicación de los gráficos 1 y 9, pongamos varios ejemplos. Antes es necesario hacer la observación de que los resultados de aplicar los gráficos tienen que ser, forzosamente, menos exactos que las fórmulas [14] y [17], por las hipótesis restrictivas hechas al pretender obtener una generalización.

Línea Bobadilla-Málaga.

Datos: Pendiente característica, 8; máxima, 16,60; longitud, 70 kilómetros. Aplicando el gráfico ² núm. 5 se obtiene:

Tráfico mínimo económico = 3 050 000 ton-km/km.

¹ REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 1.º marzo 1927, pág. 92.

² Los gráficos están calculados para un coste de la tonelada de carbón, sobre tender, de 70 pesetas.

¹ Véase el número anterior, página 189.

LÍNEAS FÉRREAS PLANAS O DE DÉBIL INCLINACIÓN: $I < r$. VÍA ÚNICA ○ LÍNEAS FÉRREAS PLANAS O DE DÉBIL INCLINACIÓN: $I < r$. DOBLE VÍA

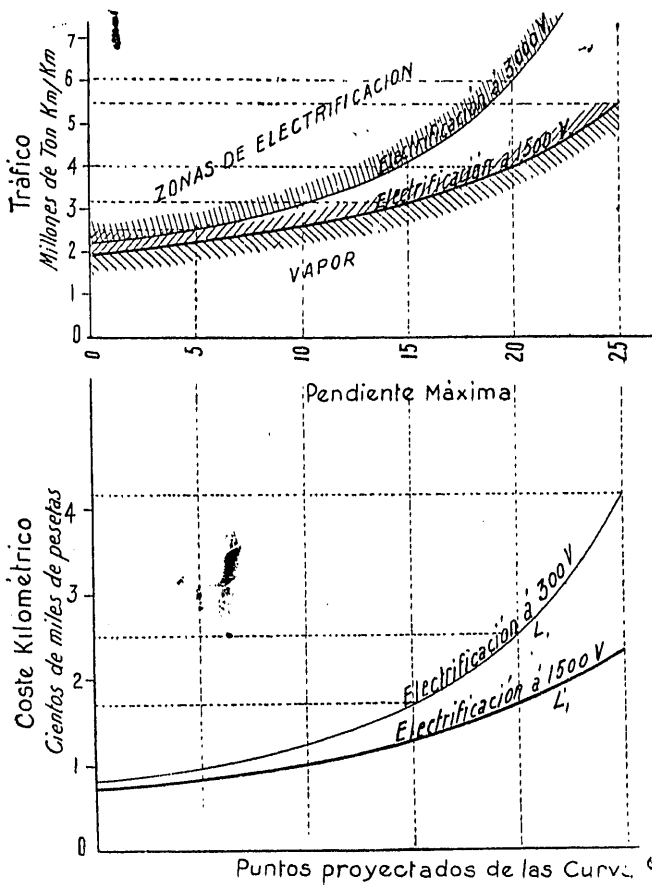


Gráfico núm. 1. Ley de variación de los tráficos mínimos y costes kilométricos correspondientes.

Curvas que dan, para pendientes máximas conocidas, el tráfico mínimo necesario para que la electrificación sea económicamente conveniente y los costos kilométricos de electrificación correspondientes.

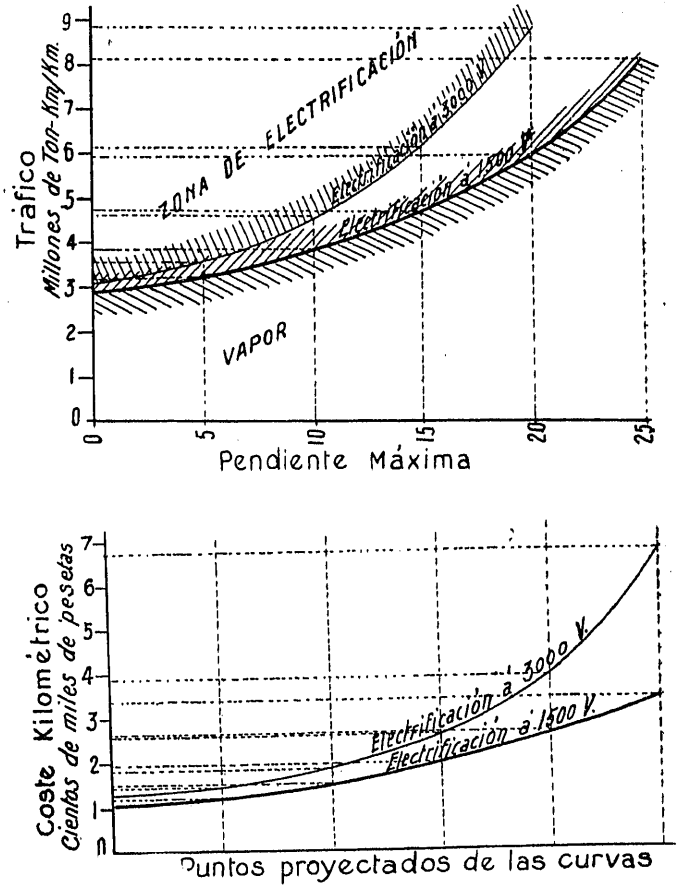


Gráfico núm. 3. Ley de variación de los tráficos mínimos y costes kilométricos correspondientes.

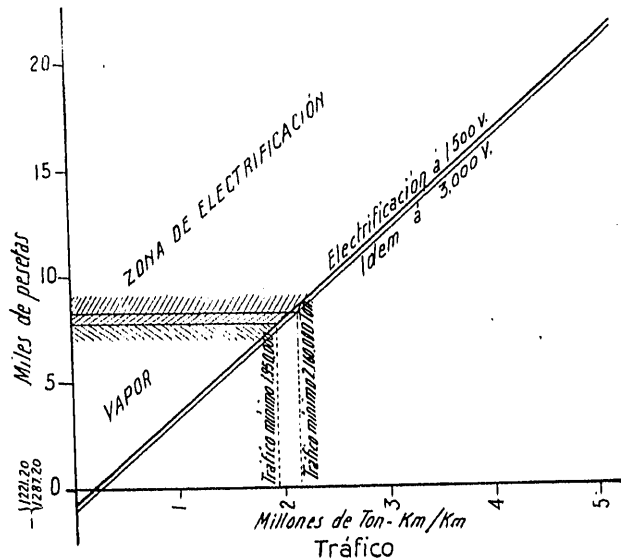


Gráfico núm. 2. Ley de variación de las economías brutas por kilómetro de línea.

Tráficos mínimos.....	1 950 000	2 160 000
Tráficos correspondientes a economías brutas nulas	265 000	275 000
Economías brutas correspondientes a un tráfico nulo.....	1 187	1 221

Es decir, que se pierde anualmente la cantidad necesaria para conservar las instalaciones fijas.

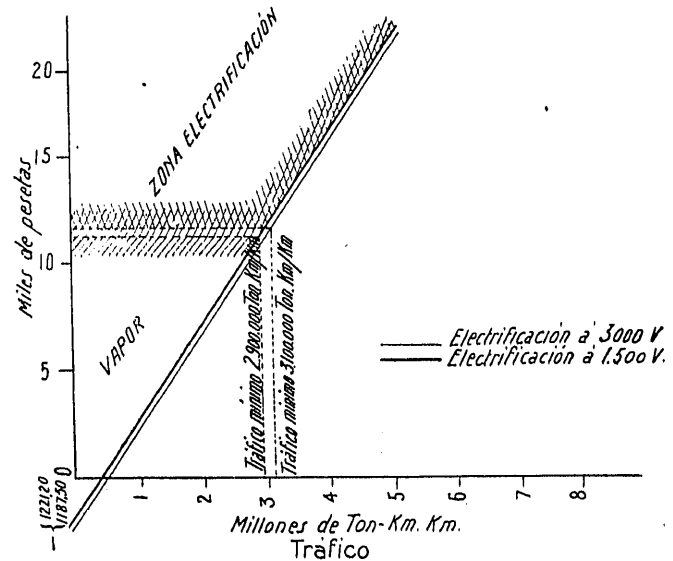


Gráfico núm. 4. Ley de variación de las economías brutas por kilómetro de línea.

Tráficos mínimos	2 900 000	3 100 000
Tráficos correspondientes a economías brutas nulas	431 000	439 000
Economías brutas correspondientes a un tráfico nulo ...	1 912	1 946

Línea Pontevedra-Santiago.

Datos: Pendiente característica, 15,7; ídem máxima, 20. Aplicando el gráfico núm. 5, resulta:

Tráfico mínimo económico = 1 900 000 ton-km/km.

El tráfico actual es algo inferior a éste; pero pue-

Como el tráfico actual es aproximadamente de 1 000 000 de ton-km/km, resulta que la línea no es electrificable, desde el punto de vista económico. Las fórmulas darían un tráfico mínimo algo inferior, pues los gráficos están calculados por exceso.

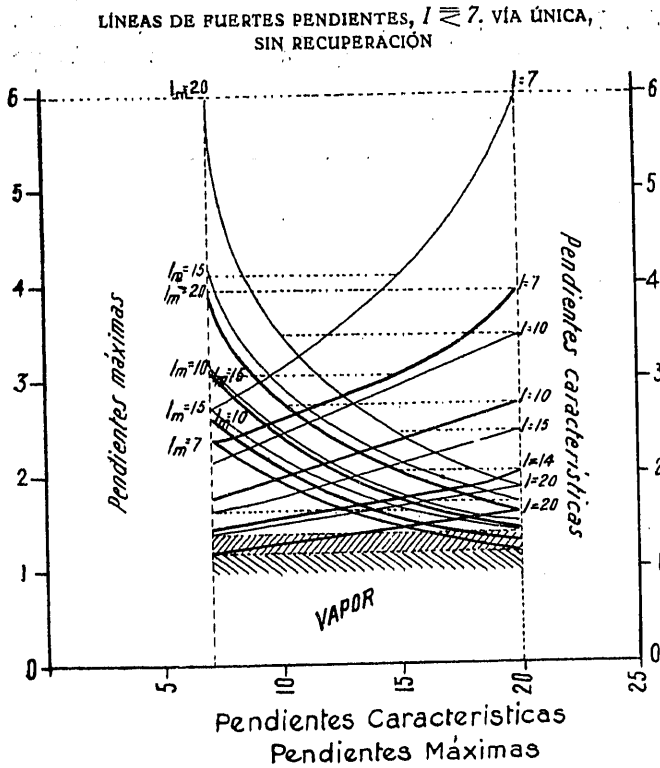


Gráfico núm. 5. Ley de variación de los tráficos mínimos.

Curvas que dan, para una pendiente máxima conocida o pendiente característica, la ley de variación de los tráficos mínimos-económicos, con la pendiente característica o la máxima de la línea.

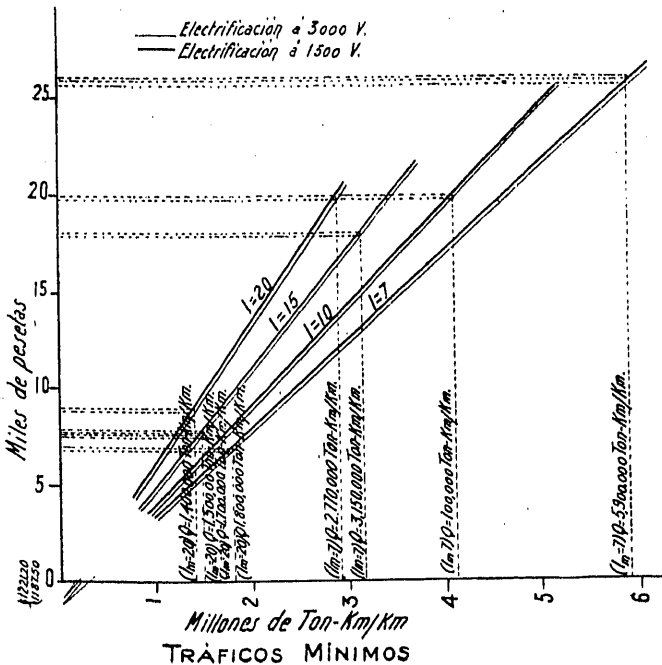


Gráfico núm. 6. Ley de variación de las economías brutas para valores de I, I_m y Q que satisfacen la condición de mínima economía.

Los valores de (I_m) son aquellos que juntamente con los correspondientes de I y Q satisfacen las ecuaciones [36] y [36'] de mínima economía.

de y debe, por las condiciones especiales de la línea, tomarse un tráfico de electrificación superior a 2 000 000 de ton-km/km. La línea es, pues, electrificable. Igual nota que en el ejemplo anterior.

Línea Barcelona-Manresa. (Doble vía).

Datos: Pendiente característica, 8; ídem máxi-

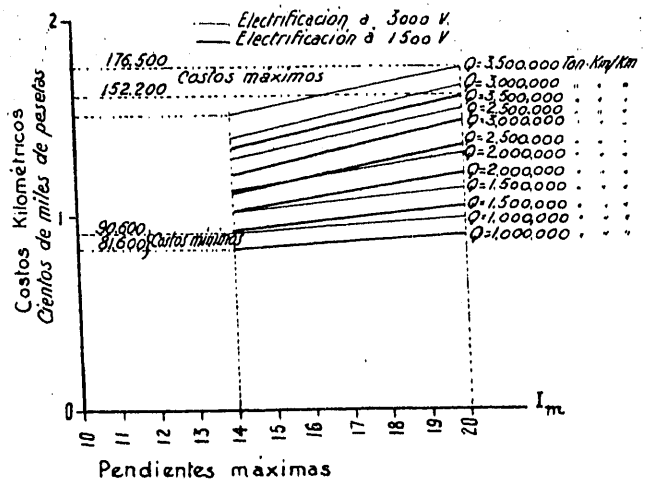


Gráfico núm. 7. Ley de variación de costos kilométricos con las pendientes máximas para valores constantes del tráfico mínimo.

El tráfico máximo entre los mínimos-económicos es = 5 900 000
El tráfico mínimo entre los mínimos-económicos es = 1 080 000
que corresponden a : $l = 7; I_m = 20$ y $l = 20; I_m = 7$, respectivamente.

ma, 16,50. Por el gráfico núm. 7 o fórmula [21] se tiene:

Tráfico mínimo económico = 4 500 000 ton-km/km.

El tráfico actual es aproximadamente de 5 500 000 toneladas kilométricas por kilómetro. La línea es, pues, electrificable. El gráfico núm. 6 da como valor de las economías brutas por km de línea y para el tráfico mínimo, 19 000 pesetas, o sea total anual: $19\ 000 \times 64 = 1\ 216\ 000$ pesetas. Los gráficos no dan directamente las economías netas. La fórmula correspondiente a un tráfico de 5 500 000 toneladas kilométricas por kilómetro, [21], da:

Economías netas, totales anuales = 97 500 ptas. aproxte.,

cantidad importante como expresión de esta clase de economías, y que demuestra el acierto de la Compañía del Norte al electrificar esta línea.

De este modo se procedería para cualquier otra línea en que se desee saber si su electrificación es o no conveniente económicamente. Estos gráficos, de aplicación general, según hemos dicho, unidos a las fórmulas si se quiere mayor precisión, pueden servir para la definición de la conveniencia económica actual de los ferrocarriles españoles. La expedición del procedimiento creemos ha quedado suficientemente demostrada, así como su posición entre los analizados en el artículo anterior.

Una última observación: tanto las fórmulas como los gráficos han sido calculados de un modo pesimista para la tracción eléctrica, porque en todos los supuestos hechos anulamos las ventajas que pudiera haber para la explotación eléctrica de la línea, y que no ha sido posible hacer figurar en las fórmulas ante el deseo de hacer el procedimiento lo más expedito posible. Por tanto, la condición de mínima economía de una electrificación, debe ser en realidad inferior a la señalada por nuestras fórmulas y gráficos. En efecto, no se ha tenido en cuenta, por ejemplo, la relación que hay entre la potencia específica y la energía necesaria para la tracción. Esta relación se traduce en una curva hiperbólica, tomando como

ejes de coordenadas la energía y la potencia específica. Esta curva demuestra que para 40 kgs. (té-

llo. Existe, pues, aquí una gran economía del lado de la tracción eléctrica, que unida a otras más no

LINEAS DE FUERTES PENDIENTES, $I \leq 7$.

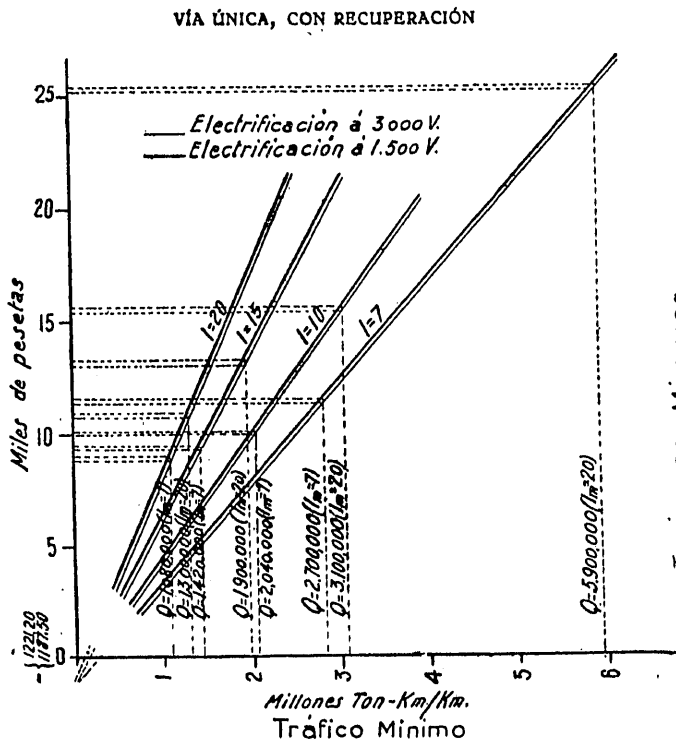


Gráfico núm. 8. Ley de variación de las economías brutas para valores de I , I_m y Q satisfacen la condición de mínima economía.

Los valores de (I_m) son aquellos que juntamente con los correspondientes de I y Q satisfacen las ecuaciones [32] y [32'] de mínima economía.

mino medio de la potencia específica en las modernas locomotoras eléctricas) la energía necesaria para la tracción eléctrica es muy inferior a la necesaria para la tracción por vapor, cuya potencia media específica en las locomotoras es de 60 kgs. por caba-

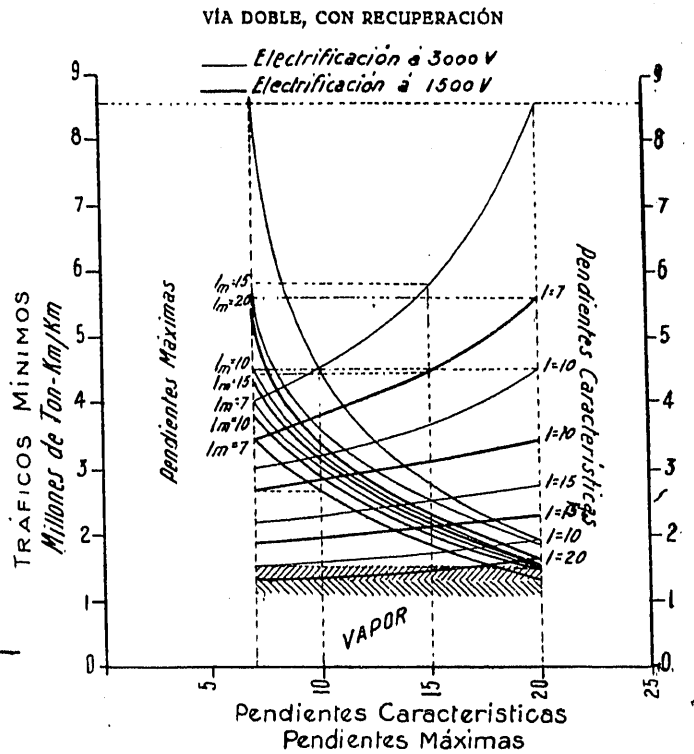


Gráfico núm. 9. Leyes de variación de los tráficos mínimos.

Curvas que dan, para una pendiente máxima conocida o para una pendiente característica conocida, la ley de variación de los tráficos mínimos-económicos, con la pendiente característica o con la máxima, respectivamente.

comprendidas en las fórmulas, indican que es razonable adoptar un criterio benévolo al fijar el programa de electrificación de los ferrocarriles españoles.

Francisco JIMÉNEZ ONTIVEROS
Ingeniero de Caminos

Nota sobre estudios elásticos de la reacción del terreno¹

II

Aplicación de los anteriores resultados.

En el cálculo de las reacciones elásticas del terreno para el dique seco de Cádiz no quisimos adoptar un solo valor del coeficiente elástico (de balasto) del terreno, no ya por ser desconocido en el momento del proyecto, sino por la dificultad que siempre existía de realizarlos en las debidas condiciones de semejanza a las reales de trabajo. En vez de ello preferi-

mos adoptar dos valores límites que nos asegurasen sobradamente que entre ellos ha de encontrarse el valor medio de esta característica en la marga arcillosa que constituía el subsuelo de la obra. Estos fueron 10 kg/cm³ y 100 kg/cm³, equivalentes, respectivamente, a descensos de 0,1 mm y 0,01 mm, para una carga de 1 gr/mm², o sea 1 ton/m².

En cuanto a la rigidez de la sección en los cajones propuestos para la hipótesis de subpresión total vale

$$EI = 0,37 \times 10^7 \text{ (ton/m}^2\text{)}$$

y para la subpresión mitad

$$EI = 0,172 \times 10^7 \text{ (ton/m}^2\text{)}$$

¹ Véase el número anterior, página 95.