

La deformación dinámica de la vía férrea^(*)

Por RAFAEL FERRER TORIO

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El análisis de la formación de la vía férrea bajo carga dinámica es una expresión que aporta conductas de comportamiento de la rigidez vertical en función de parámetros ferroviarios tales como velocidad de circulación, tipo de carril, esfuerzo axil en la BLS, y permite configurar un modelo deformacional más potente que los precedentes cuya formulación será objeto de próximo artículo. En el presente, se enuncia la teoría de la inestabilidad de la vía en el plano vertical desde el punto de vista dinámico, analizando los bloques básicos interdependientes de la rigidez vertical, y apuntando las consecuencias más representativas.

1. INESTABILIDAD DE LA VIA EN EL PLANO VERTICAL

La mayoración de las cargas estáticas siempre se ha considerado al analizar el comportamiento tensional de la vía (Schamm, ORE,...). Pero las sollicitaciones verticales sobre el emparrillado se caracterizan por la asimetría originada principalmente por los desplazamientos generalizados de las cargas, que se deben a multitud de efectos.

Aunque la sobrecarga dinámica ha sido igualmente evaluada en términos discretizados, introduciendo incluso la influencia de la rigidez vertical, existe una componente difícil de cuantificar, que depende del estado geométrico de la vía y de la aleatoriedad que se produzca, en la dovela considerada, en el reparto de las cargas.

Los estudios relativos a la estabilidad de la vía férrea en el plano vertical, han puesto de manifiesto la importancia de la temperatura actuante en la (BLS), susceptible de modificar los estados tensionales propios de la sollicitación exterior.

La problemática de la deformación de la vía, considerada como una viga comprimida que está apoyada sobre una base elástica continua y sometida a un esfuerzo de compresión, fue analizado por Corini, Huber y Engel (Figura A).

Un incremento de temperatura en una sección de vía equipada con (BLS) $(T-T_0)$, no perteneciente a la zona de «respiración», pro-

duce en el carril una compresión de valor: $N = E\alpha (T-T_0) \Omega_c$, siendo:

N .. esfuerzo de compresión.

α ... coeficiente de dilatación lineal del acero.

T ... temperatura en el carril.

T_0 .. temperatura de neutralización.

Ω_c .. sección del carril.

Para estudiar el comportamiento de la viga, fue utilizada la ecuación diferencial:

$$EI \frac{\delta^4 z}{\delta x^4} + N \frac{\delta^2 z}{\delta x^2} + Uz = 0$$

que configura una ecuación lineal de cuarto orden y coeficientes constantes.

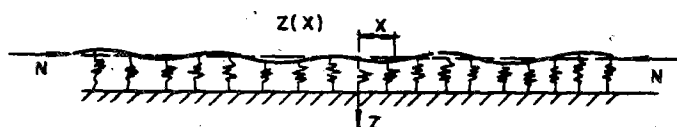


Figura A. — Esquema de la vía reposando sobre una base elástica uniforme, sometida a una compresión uniforme N.

2. ESTUDIO TEORICO SIMPLIFICADO DE LA DEFORMACION DE LA VIA BAJO CARGA DINAMICA

2.1 Definición previa y magnitudes intervinientes

Se denomina rigidez dinámica de una vía férrea, en el plano vertical, y se designa por K^* , a la relación:

$$K^* = \frac{P^*}{Z_0}$$

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1987.

LA DEFORMACION DINAMICA DE LA VIA FERREA

siendo:

P^* ... esfuerzo vertical de la rueda en movimiento.

Z_0 ... deflexión en el punto de aplicación del esfuerzo vertical.

Además del parámetro respuesta que recopila las cualidades elásticas del conjunto, intervienen en el fenómeno los siguientes elementos, con las unidades más utilizadas:

— Carril:

i ... momento de inercia de la sección respecto al eje principal de inercia transversal (cm^4).

E ... módulo de elasticidad del acero (kg/cm^2).

— Conjunto de la vía:

U ... Módulo de la vía (kg/cm^2).

g ... masa unitaria de la vía en movimiento (kg/ml).

— Esfuerzos:

M ... momento flector.

T_1 ... esfuerzo cortante.

N ... esfuerzo axial (de origen térmico).

— Resto:

V ... velocidad de desplazamiento de la rueda.

t ... parámetro tiempo.

X, Y, Z coordenadas cartesianas ejes absolutos.

x, y, z .. coordenadas cartesianas ejes particulares.

2.2 Ecuación reguladora del comportamiento conjunto

La ecuación del movimiento puede ser expresada estableciendo el equilibrio de una dovela elemental de vía. Las fuerzas intervinientes pueden ser discretizadas de la forma (Figura B)

— Dirección \overline{OZ}

Fuerza de inercia:

$$\varphi \cdot \frac{\delta^2 Z}{\delta t^2} \cdot dX$$

Reacción elástica del soporte:

$$U \cdot Z \cdot dX$$

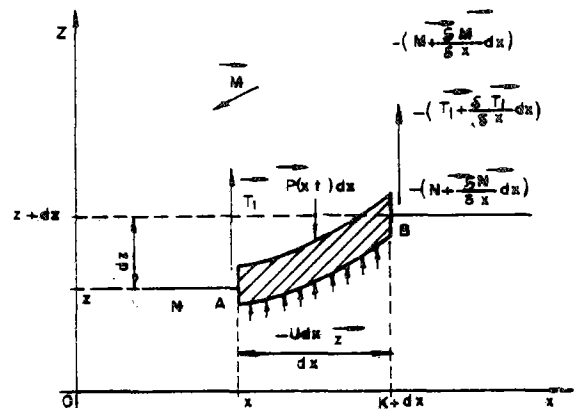


Figura B. — Dovela elemental, protagonista del análisis.

Esfuerzo vertical de la rueda en movimiento:

$$P^*(X, t)$$

— Dirección \overline{OX} :

Fuerza de inercia:

$$\varphi \cdot \frac{\delta^2 Z}{\delta t^2} \cdot dX$$

Esfuerzo térmico:

$$\frac{\delta N}{\delta X} \cdot dX$$

Estableciendo el equilibrio de esfuerzos:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\delta T_1}{\delta X} - \left(\varphi \frac{\delta^2 Z}{\delta t^2} + UZ \right) \cdot dX + P^*(X, t) = 0 \\ -\varphi \frac{\delta^2 X}{\delta t^2} \cdot dX - \frac{\delta N}{\delta X} \cdot dX = 0 \end{array} \right.$$

Considerando constantes los esfuerzos de origen térmico y despreciables las aceleraciones de la vía en su «movimiento» longitudinal, tomando momentos respecto al punto B y teniendo en cuenta que:

$$EI = \frac{\delta^4 Z}{\delta X^4} = -\frac{\delta^2 M}{\delta X^2}$$

se obtiene la ecuación:

$$EI \frac{\delta^4 Z}{\delta X^4} + N \cdot \frac{\delta^2 Z}{\delta X^2} + \varphi \frac{\delta Z}{\delta t^2} + UZ = P^*(X, t)$$

Efectuando el cambio de la variable concierne al paso de ejes absolutos a ejes particulares y simplificando al caso concreto de carga constante y velocidad de desplazamiento constante, resulta la ecuación diferencial final:

$$EI \cdot \frac{\delta^4 Z}{\delta x^4} (\varphi V^2 + N) \frac{\delta^2 z}{\delta X^2} + Uz = 0$$

que tiene una semejanza acusada con la ecuación diferencial obtenida por Zimmermann adecuada al módulo de vía:

$$EI \cdot \frac{\delta^4 z}{\delta x^4} + Uz = 0$$

y con la expresión hallada por Corini, Huber y Engel:

$$EI = \frac{\delta^4 z}{\delta x^4} + N \frac{\delta^2 z}{\delta x^2} + Uz = 0$$

Resolviendo la ecuación diferencial, tanteando soluciones del tipo $z = z_0 e^{\alpha x}$, e imponiendo condiciones adecuadas de contorno, se obtiene el valor de la rigidez dinámica:

$$K^* = 2 \sqrt[4]{4 EI \cdot U^3} \cdot \sqrt{1 - \frac{\varphi V^2 + N}{\sqrt{4 EI U}}}$$

que pone de manifiesto, no sólo su estructura constitucional, sino que coincide con la obtenida mediante el modelo de Zimmermann, para el caso particularizado $V = 0$ y $N = 0$:

$$K = 2 \sqrt[4]{4 EI \cdot U^3}$$

que no tiene en consideración ni la variación de la rigidez vertical con la velocidad, ni los efectos térmicos sobre el carril.

3. ANALISIS PORMENORIZADO DE LA RESPUESTA GLOBAL EN FUNCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUYENTES

3.1 Objetivos terminales y datos iniciales

Antes de establecer un modelo de comportamiento global, se ha efectuado un profundo análisis de la configuración de la expresión obtenida de la rigidez vertical. Para ello, se ha realizado un programa de ordenador susceptible,

no sólo de ofrecer todos los casos que se precisen para estudiar interdependencias, sino también apto para dibujar en plotter los valores de la rigidez vertical definida, en función de los parámetros constituyentes y poner de manifiesto la variada dependencia.

Las curvas características obtenidas, están expresadas en ejes cartesianos, siendo el eje de ordenadas el soporte del valor de la rigidez vertical anteriormente deducida, expresada en toneladas/milímetro y el eje de abscisas, variable, según el objetivo de la serie que se analiza.

Las características esenciales de los elementos individualizados intervinientes en el estudio, se establecen a continuación:

A. CARRILES

Los carriles que entran a formar parte en el estudio son: BH-95, UIC-54, UIC-60, ORE-71, R-75. Se ha tomado para todos ellos un módulo de elasticidad de $2,1 \times 10^6$ kg/cm².

B. MODULO DE VIA

Los valores del módulo de vía que se han adoptado como significativos, barren el amplio espectro de los casos reales. Los valores individualizados que se han considerado son 500, 1.000, 1.500 y 2.000 kg/cm².

C. VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO DE LA CARGA

De igual forma que se ha considerado el pasillo variacional de la actual configuración, estableciendo el intervalo (0-200) km/h como significativo y los valores puntuales (60, 80, 100, 120, 140) km/h como casos concretos de cuantificación.

D. GRADIANTE TERMICO

Se ha introducido en la expresión de análisis en términos absolutos (esfuerzo) y teniendo en consideración el actual comportamiento de la (BLS) para temperaturas reales, se han adoptado valores discretizados de (20, 40, 60, 80 y 100 toneladas).

E. MASA MOVILIZADA UNITARIA

Para el presente análisis pomenorizado, se ha

adoptado una protagonista de la masa movilizada por metro lineal de vía, correspondiente a un hilo (parte proporcional de las traviesas y la parte correspondiente al balasto movilizado). Para todos los casos estudiados, se ha tomado el valor de 800 Kg/ml.

3.2 Series básicas de resultados

Para realizar el correspondiente análisis y contrastar de la mejor forma posible los resultados obtenidos, los datos iniciales se han englobado en cuatro series o familias claramente diferenciadas

LA PRIMERA SERIE tiene como objetivo esencial, analizar la variación de la rigidez vertical para distintas velocidades de circulación (velocidad de avance de la carga vertical), en el caso concreto de cada tipo de carril para distintos estados elásticos de vía, considerando despreciable el efecto térmico (Figura C).

LA SEGUNDA SERIE de resultados, ofrece la variación de la rigidez vertical para distintas velocidades de circulación, en función del esfuerzo axil existente para distintos valores del módulo de vía y un tipo usual de carril, el UIC-54. (Figuras D y E).

LA TERCERA SERIE de resultados, expresa el valor de la rigidez vertical, en función de la velocidad de circulación, para distintos gradientes térmicos, en el caso concreto del carril UIC-54 y dos tipos muy habituales de caracterización elástica: módulo de vía $U = 500$ y $U = 1.000$ (Figuras F y G).

LA CUARTA SERIE de resultados, expresa el valor de la rigidez vertical, en función de la velocidad de circulación, en el caso de gradiente térmico nulo, para los distintos tipos de carril analizados, cuando el módulo de vía es 1.000 kg/cm² ó 1.500 kg/cm². (Figuras H e I).

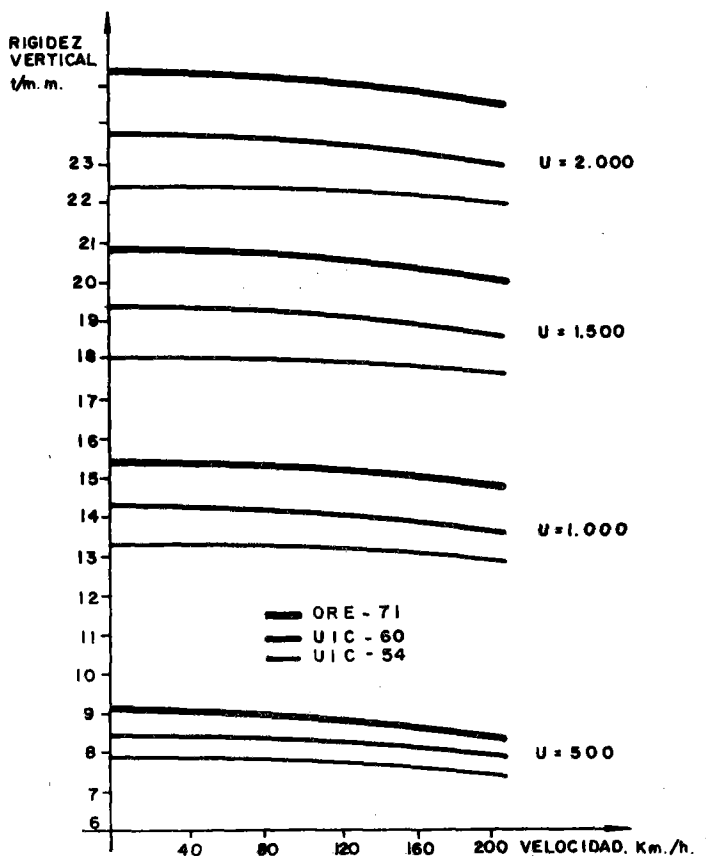


Figura C.—Valor de la rigidez vertical para distintas velocidades de circulación en el caso de tres tipos de carriles para los diversos valores del módulo de vía.

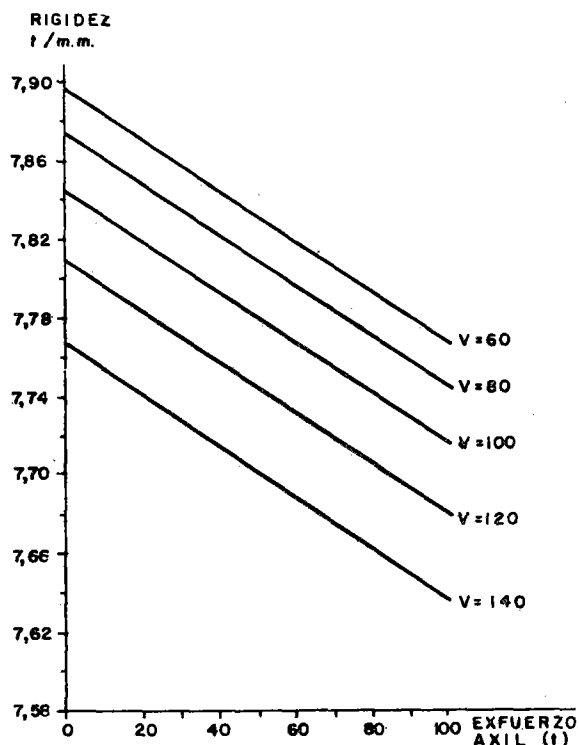


Figura D.—Valor de la rigidez vertical para diversos casos de gradiente térmico y para un carril tipo UIC-54, en los casos de velocidades medias y un módulo de vía de 500 kg/cm².

LA DEFORMACION DINAMICA DE LA VIA FERREA

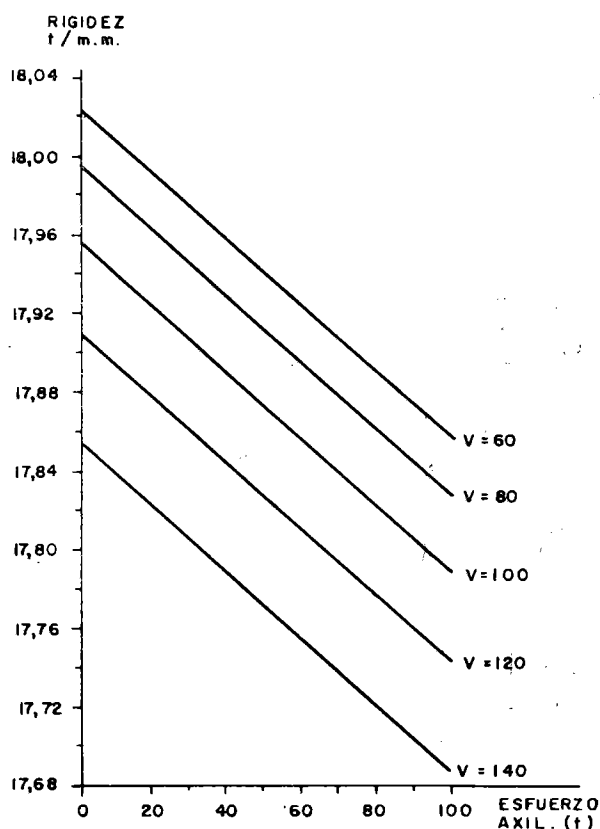


Figura E.—Valor de la rigidez vertical para diversos casos de gradiente térmico y para un carril tipo UIC-54, en los casos de velocidades medias y un módulo de vía de 1.500 kg/cm².

El contraste realizado para las series básicas de resultados, han aportado las siguientes consecuencias significativas:

- La rigidez vertical aumenta sustancialmente al aumentar el módulo de vía y van disminuyendo paulatinamente al aumentar la velocidad.
- La rigidez vertical disminuye de forma insensible con el aumento de temperatura y con el aumento de velocidad.
- la rigidez vertical, para un valor determinado del módulo de vía, aumenta con la rigidez del carril y disminuye con la velocidad de circulación.

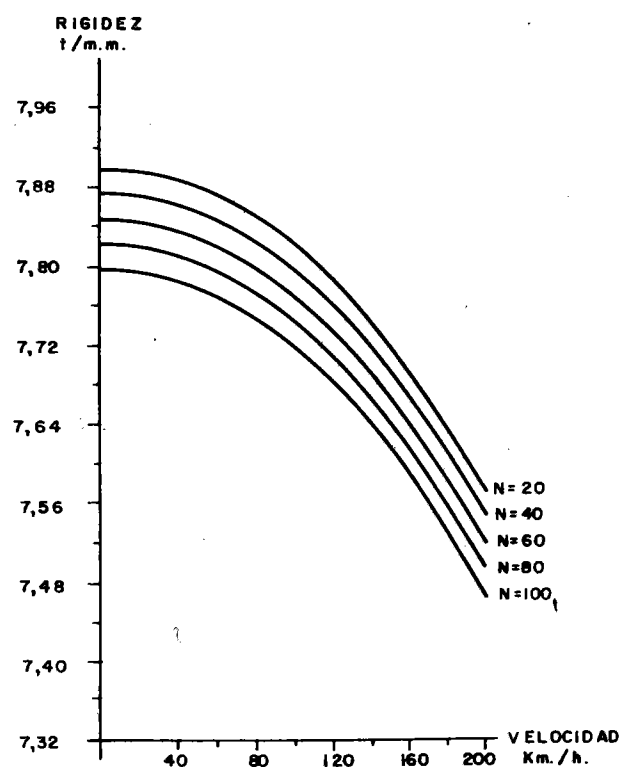


Figura F.—Valor de la rigidez vertical para diversas velocidades de circulación en el caso de un carril tipo UIC-54 y módulo de vía U-500.

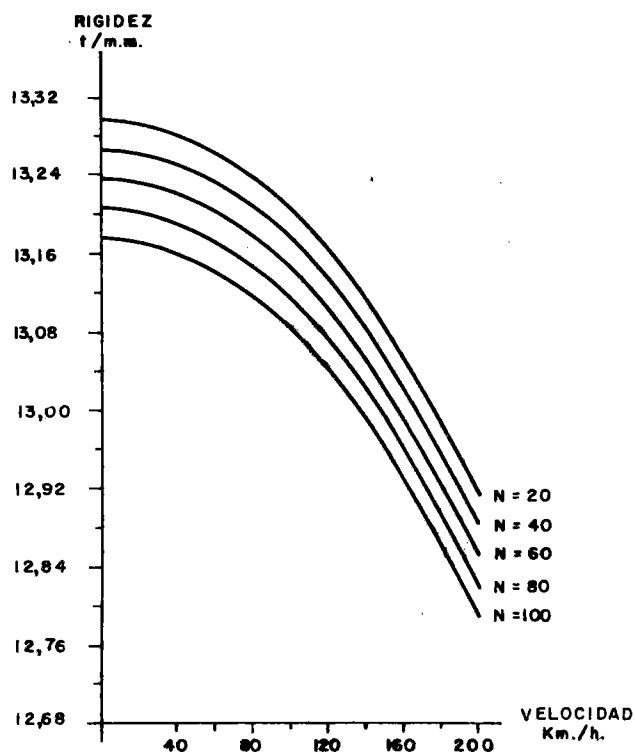


Figura G.—Valor de la rigidez vertical para diversas velocidades de circulación en el caso de un carril tipo UIC-54 y módulo de vía U-1.000

LA DEFORMACION DINAMICA DE LA VIA FERREA

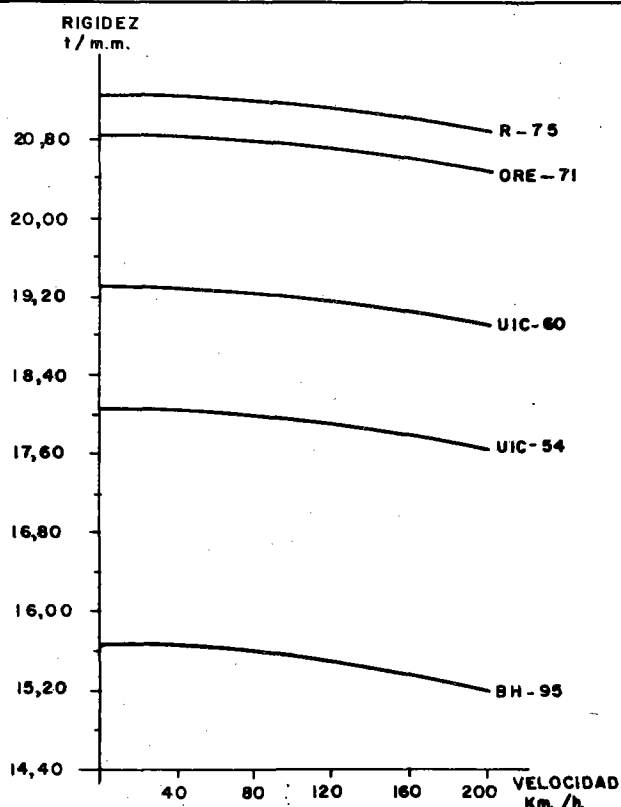


Figura H.—Valor de la rigidez para diversas velocidades de circulación para la gama de carriles objeto del análisis y módulo de vía U-1.500 kg/cm².

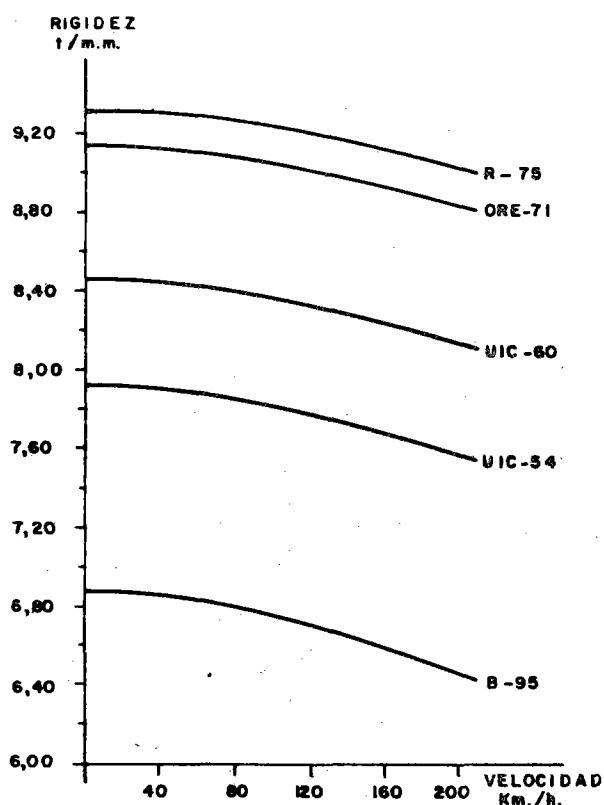
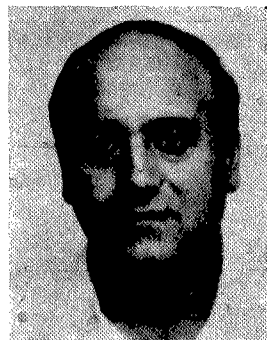


Figura I.—Valor de la rigidez vertical para diversas velocidades de circulación para la gama de carriles objeto de análisis y módulo de vía U-500 kg/cm².

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ORE: «Sollicitations de la voie, du ballast et de la plateforme, sous l'action des charges roulantes». Notas informativas ORE-COMITE D-71. Revue. 1973.
2. ORE: «Etude de l'évolution du nivellement de la voie en fonction du trafic et des paramètres d'armement (premiers résultats des essais en laboratoires et en sites réels)». Rapport ORE D-117/RP/2, Utrecht, avril 1973.
3. KERR, A. D.: «Etude relative a la stabilité de la voie ferrée dans le plan vertical». Rail International. Feb., 1974.
4. ORE: «Etude de l'évolution de la géométrie de la voie en fonction du trafic». Resultats complémentaires. Question D-117. Utrecht, 1975.
5. LOPEZ PITA, A.: «Estudio de la deformabilidad del sistema balasto-plataforma en un vía férrea bajo la acción de cargas verticales». Tesis Doctoral, mayo de 1976.
6. HENN, W.: «Auswirkungen der Oberbauform un Betriebsbelastung auf die Veränderung der Gleishöhenlage». Archiv Für Eisenbanntechnik. Darmstadt, 1978, n.º 33.
7. SAUVAGE, R.: «Definición y puesta en obra de las capas de asiento de la nueva línea GTV». Simposio sobre «Técnicas Avanzadas en Proyecto, Construcción y Conservación de la Vía». AIT, nov. 1981.
8. KERR, A., BASSLER, S.: «Effet du soulèvement du rail sur l'analyse des voies ferrées Rail International». Oct. 1982.
9. FORTIN, J. P.: «Le déformée dynamique de la voie ferrée». Revue Générale des Chemis de Fer. Febrero 1982.

Rafael Ferrer Torio



Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, 1979. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, 1985. En octubre de 1979 ingresa como «Profesor Ayudante de Clases Prácticas» (Ferrocarriles), en el Departamento de Transportes de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria participando en la docencia e investigación del Departamento, durante seis cursos. Interviene en numerosos trabajos profesionales destacando su participación en los de contenido ferroviario, siendo autor, asimismo, de proyectos de infraestructura urbana en la región. Perteneció al equipo redactor que realizó el estudio: «Análisis e inventario de la obra realizada en el tramo Santelices-Bóo del ferrocarril Santander-Mediterráneo» y tiene realizadas publicaciones como «La vía, elemento básico del transporte guiado», «La problemática del dimensionamiento en el estrato inferior de una vía férrea»... En el curso 84-85, la Dirección de la escuela le encomienda la responsabilidad de la docencia de la asignatura Topografía, realizando trabajos en este área como: «Estudio técnico topográfico para los futuros enlaces del Puerto de Raos», «Auscultación Geodésica de la Presa de la Cohilla», etc., publicando apuntes e impartiendo cursos de doctorado y postgrado, en el marco general del Area de Conocimiento.