

Modelo dinámico de vía^(*)

Por RAFAEL FERRER TORIO

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*El presente trabajo es continuación del publicado con anterioridad «La deformación dinámica de la vía férrea» (**) y con él finaliza el análisis de la deformación de la vía bajo carga dinámica, tras configurar un modelo de comportamiento. Tras imponer las hipótesis significativas se ejecuta un programa de ordenador a partir del cual se obtiene el catálogo general de resultados que permite establecer conclusiones relativas a conductas dependientes de los parámetros ferroviarios más representativos.*

1. CONFECCION DEL MODELO

1.1 Mayoración de las cargas estáticas

Para expresar el valor del coeficiente mayorador de las cargas estáticas, se parte de la expresión propuesta por Eisenmann, que considera tres estados de geometría diferenciados, además de la dependencia cinemática. La relación es remodelada con el objeto de lograr una expresión más general.

La expresión de partida es la siguiente:

$$\psi = 1 + t(e) \times s(g) \times \left[1 + \frac{V - 60}{140} \right]$$

siendo:

ψ ... coeficiente mayorador de las cargas estáticas.

$t(e)$ coeficiente definidor del grado de confianza estadística.

$s(g)$ coeficiente calificador del estado geométrico de la vía.

V ... velocidad de circulación (km/h).

Considerando un grado de confianza del 99,7 por 100, se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= 1 + 0,3 \times 1 + \left(\frac{V - 60}{140} \right) \\ \psi_2 &= 1 + 0,9 \times 1 + \left(\frac{V - 60}{140} \right) \end{aligned} \right\} \rightarrow \psi - 1 = m(g) \quad (V + 80)$$

para vías en buen y en mal estado geométrico, cuya caracterización gráfica equivale a una familia de rectas, en el plano (V, ψ) , radiadas desde el polo $(-80, 1)$ y con ángulos límites (figura A): arc tangente $2,14285 \cdot 10^{-3}$ y arc tangente $6,42857 \cdot 10^{-3}$.

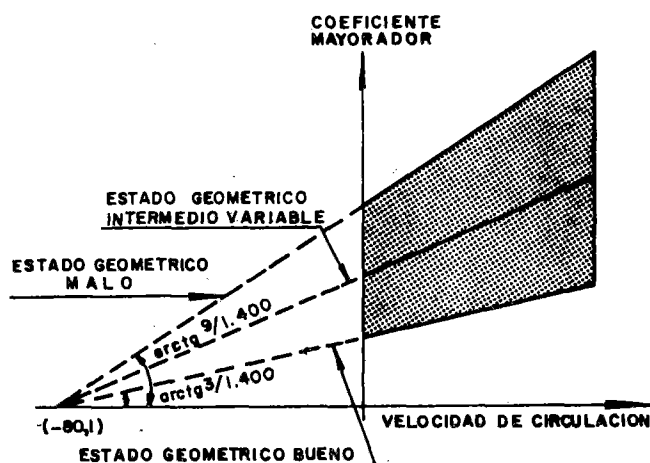


Figura A: Haz de rectas con polo en $(-80, 1)$.

Las ecuaciones particularizadas de las rectas límites, son :

$$9V - 1.400 \psi + 2.120 = 0$$

$$3V - 1.400 \psi + 1.640 = 0$$

que definen el lugar geométrico de todos los puntos susceptibles de evaluar, para una velocidad de circulación y un determinado estado geométrico de la vía, el coeficiente mayorador de las cargas estáticas (figura B).

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

(**) REVISTA DE OBRAS PUBLICAS, Marzo 1987. Págs. 149 a 154.

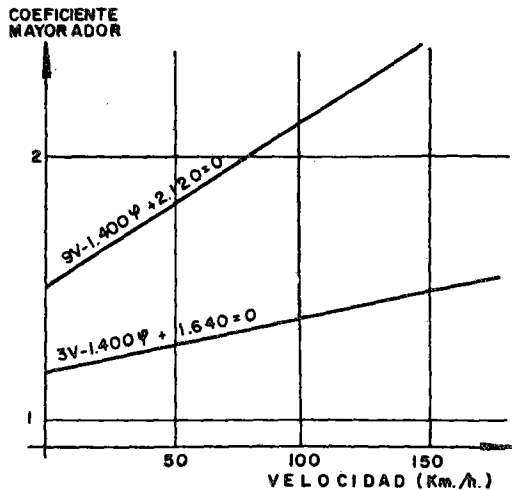


Figura B: Expresión gráfica de las rectas límite acortadoras del coeficiente mayorador.

Con el fin de configurar una relación biunívoca, fácilmente interpretable, se ha dado una variación lineal a la pendiente de las rectas significativas, según la etapa en que se encuentre el análisis global que se realice. Un caso particularizado sería suponer que el período de vida de una vía son ocho etapas, con lo cual para un estado individualizado, la pendiente estaría definida (figura C).

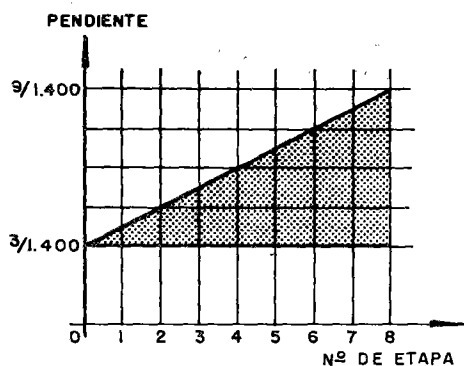


Figura C: Caso particularizado de etapas discretas.

La ecuación de la pendiente queda establecida por la relación:

$$m(g) = \frac{3}{1.400} + \frac{6}{1.400} \left(\frac{x(g)}{n(g)} \right)$$

resultando por lo tanto la expresión general:

$$\psi = 1 + \frac{3}{1.400} \left[1 + 2 \left(\frac{x(g)}{n(g)} \right) \right] (V + 80)$$

que será utilizada en el marco general del modelo.

1.2 Los desplazamientos de las cargas individualizadas

Para introducir la influencia de los efectos, se ha determinado un coeficiente, G , expresado en tanto por uno que reparte el peso total por eje entre las dos ruedas de un marco variacional determinado, atendiendo a las características globales de una línea concreta. De igual forma puede ser utilizado el coeficiente G , ya sea como determinista o como número aleatorio, generado previamente, de manera libre o condicionada.

De esta forma, si una rueda tiene una asignación G , de cualquiera de los tipos mencionados, con la condición $G < 1$, a la otra rueda, se le asigna un valor:

$$G' = G = 2(1 - G) = 2 - G$$

1.3 Hipótesis significativas

A) Conceptos previos

Se denomina *Eje Patrón*, a un eje de vehículo ferroviario caracterizado de la forma siguiente:

- Estado de absoluto reposo.
- Cargado al límite de lo permitido por la vigente reglamentación de cada Administración Ferroviaria.
- Existencia total de reparto equitativo de cargas sobre cada una de las dos ruedas.

De igual forma puede definirse un *estado patrón*, si a las condiciones anteriormente citadas, se añade la de poseer la vía, un compendio determinado de cualidades resistentes o de comportamiento (temperatura de neutralización, tipología del carril, módulo de vía...).

Con estas puntualizaciones, es fácilmente evaluable el «asiento patrón» que vendrá determinado por la expresión:

$$Z_0(p) = \frac{P}{2 \sqrt[4]{EIU^3}}$$

que coincide con la definida en el modelo de Zimmermann y tiene la propiedad de ser fácilmente cuantificable en la realidad.

B) Evaluación y tipología de los asientos

Tras la definición del asiento patrón, pueden ser establecidos tres movimientos verticales característicos: asiento de cada hilo y el asiento medio, que puede considerarse, para ciertos casos, como el asiento «representante», aunque para otros, habrá que tener en cuenta aquel que confiera máxima deformación (figura D).

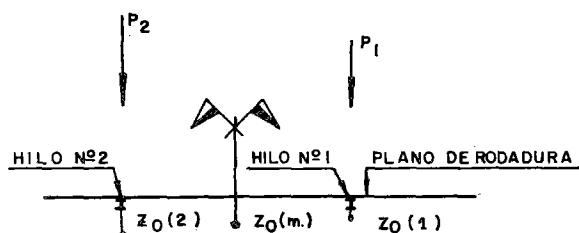


Figura D: Caracterización básica de los tres asientos intervinientes.

En una dovela elemental de vía, al paso de un eje con una determinada velocidad, se pueden considerar tres desplazamientos puntuales bajo carga, que dependerán de todas las variaciones anteriormente apuntadas y que se calculan por las expresiones siguientes:

Movimiento menor:

$$Z_0 \text{ (MIN)} = \frac{P \times \psi \times (2 - G)}{k^*}$$

Movimiento mayor:

$$Z_0 \text{ (C)} = \frac{P \times x \times G}{K^*}$$

Movimiento medio:

$$Z_0 \text{ (E)} = \frac{Z_0 \text{ (C)} + Z_0 \text{ (MIN)}}{2}$$

A partir de los asientos puede establecerse una relación de equivalencia en un sentido deformacional.

C) Concepto deformacional de equivalencia

Con los asientos evaluados en las expresiones anteriores y el concepto de eje-patrón, se puede establecer una equivalencia deformacional en el sentido de considerar que dos cargas son equivalentes si producen el mismo desplazamiento vertical. Este concepto, en realidad de «efecto rueda equivalente» puede ser materializado de las siguientes formas:

- Carga por rueda equivalente para el valor medio considerado:

$$P_E = 2 \sqrt[4]{4EIU^3} \times Z_0 \text{ (E)}$$

- Carga por rueda equivalente para el valor máximo calculado (crítico):

$$P_C = 2 \sqrt[4]{4EIU^3} \times Z_0 \text{ (C)}$$

- Carga por rueda equivalente para el mínimo valor evaluado:

$$P_{\text{MIN}} = 2 \sqrt[4]{4EIU^3} \times Z_0 \text{ (MIN)}$$

De esta forma se dispone de una información referenciada respecto a un mismo origen y pueden establecerse conclusiones de forma sencilla.

2. PROGRAMA DE ORDENADOR Y ELECCION DE DATOS

2.1 Planteamiento general y descripción

El programa de ordenador se ha diseñado en un plano general y determinista, pero susceptible de ser transformado fácilmente de forma total o parcial en bandas aleatorias por generación simple o múltiple de números, dependiendo de los resultados que se quieran obtener.

El programa, creado para recoger todos los estados posibles, es capaz de recibir datos de la estructura integral de la vía.

El programa está caracterizado por su fácil implementación en cualquiera de las situaciones reales que trate de modelizar.

2.2 Los datos de la particularización

La matriz de valores obtenidos responde a una colección de datos soportados, que se caracterizan por ser representantes idóneos en el panorama ferroviario actual.

- Estados geométricos de vía 1/2/3 y 4.
- Excentricidad de la carga 0,5/0,6/0,7/0,8/0,9/1
- Temperatura en el carril ($^{\circ}$ C) 10/30/50 y 70
- Módulo de vía (kg/cm^3) 500/1.000/1.500 y 2.000
- Carga estática por rueda (T) 2/6 y 10
- Velocidad de circulación (km/h) 60/90/120 y 150

El análisis se ha realizado para un caso concreto de carril: UIC-54, con los datos representativos anteriormente citados y siguiendo un ritmo secuencial lógico.

3. CATALOGO GENERAL DE RESULTADOS

3.1 Los listados del caso práctico

Los resultados obtenidos pertenecen al caso analizado y anteriormente descrito, que configura un amplio espectro inmerso íntegramente en el panorama ferroviario anterior. Las velocidades particularizadas (60, 90, 120 y 150 km/h) y fácilmente extrapolables a 180 km/h, colman las actuales velocidades utilizadas en la diaria explotación, en muchas Administraciones Ferroviarias.

3.2 Análisis de bloques significativos

Para extraer las conclusiones significativas, se ha discretizado la matriz general de los resultados, en partes fácilmente separables y susceptibles de pormenorización. De esta forma, se analizan los comportamientos más usuales.

A) Bloque primero

Tiene como objetivo analizar el comportamiento de una carga estática de $P = 6$ t. que se

mueve en el marco de las velocidades usuales en una línea caracterizada por un módulo de vía $U = 1.500 \text{ kg}/\text{cm}^2$, con un coeficiente de desviación global de $G = 0,8$ para dos estados diferenciados de gradiente térmico, $T = 30^{\circ} \text{ C}$ y $T = 70^{\circ} \text{ C}$, en función de los diferentes estados de la geometría de la vía contemplados (4 etapas totales).

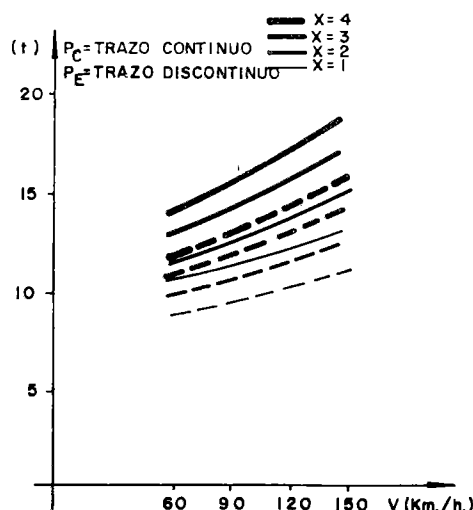


Figura E: Comportamiento de una carga de seis toneladas que se mueve por una vía caracterizada por $U = 1.500 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $G = 0,8$, $T = 30^{\circ} \text{ C}$, para diferentes etapas del estado geométrico de la vía y para distintas velocidades.

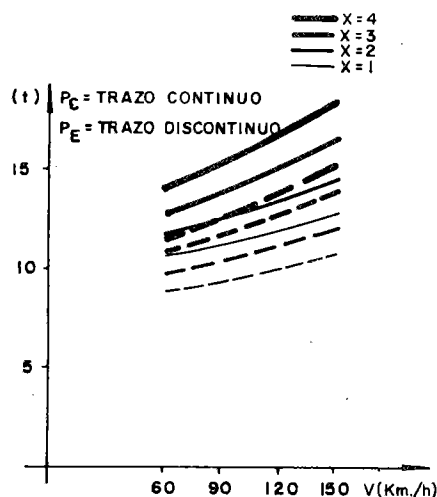


Figura F: Comportamiento de una carga de seis toneladas que se mueve por una vía caracterizada por $U = 1.500 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $G = 0,8$, $T = 70^{\circ} \text{ C}$, para diferentes etapas del estado geométrico de la vía y para distintas velocidades.

MODELO DINAMICO DE VIA

El comportamiento se ha caracterizado por dos valores significativos: P_E y P_C (figuras E y F).

B) Bloque segundo

Tiene como objetivo analizar el comportamiento de una carga estática de 2 y de 10 toneladas que se mueven a una velocidad constante de 120 km/h, en una línea caracterizada por un módulo de vía $U = 1.500 \text{ kg/cm}^2$, con temperatura en el carril de 30° C , para distin-

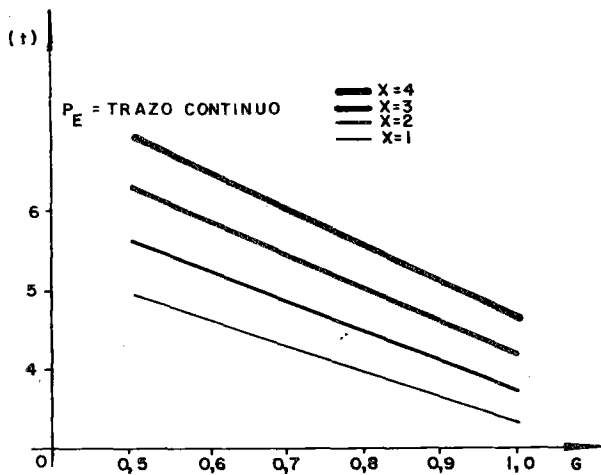


Figura G: Comportamiento de una carga de dos toneladas que se mueve a 120 km/h en una vía caracterizada por $U = 1.500 \text{ kg/cm}^2$, $T = 30^\circ \text{ C}$, para las diferentes etapas del estado geométrico de la vía y para las distintas opciones del coeficiente de excentricidad.

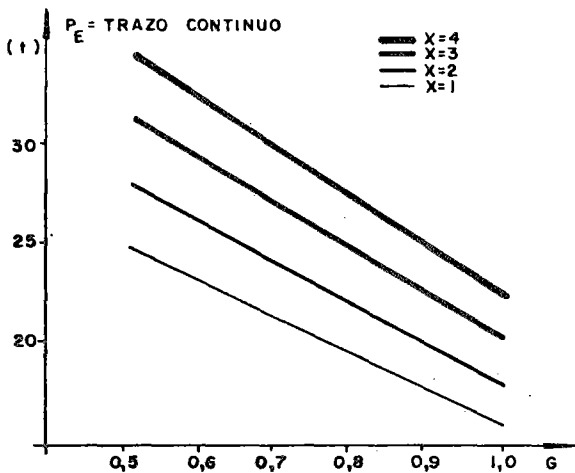


Figura H: Comportamiento de una carga de diez toneladas que se mueve a 120 km/h, en una vía caracterizada por $U = 1.500 \text{ kg/cm}^2$, $T = 30^\circ \text{ C}$, para las diferentes etapas del estado geométrico de la vía y para las distintas opciones del coeficiente de excentricidad.

tas opciones del coeficiente de excentricidad de carga y para las diversas etapas significativas del estado geométrico de la vía.

El comportamiento se ha caracterizado exclusivamente por el valor P_C (figuras G y H).

C) Bloque tercero

Tiene como objetivo analizar el comportamiento de cargas de dos, seis y diez toneladas que se desplazan a 120 km/h, en una línea caracterizada por un módulo de vía $U = 1.500 \text{ kg/cm}^2$, con temperatura en el carril de 10° C , para un coeficiente de excentricidad de carga $G = 0,8$, y para las diversas etapas significativas del estado geométrico de la vía.

El comportamiento se ha caracterizado por los valores significativos P_E y P_C (figura I).

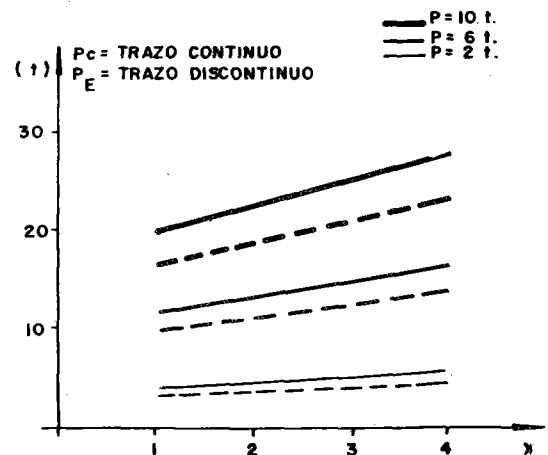


Figura I: Comportamiento de las cargas estáticas de 2, 6 y 10 toneladas, que se mueven a 120 km/h de velocidad, en una vía caracterizada por $U = 1.500 \text{ kg/cm}^2$, $T = 10^\circ \text{ C}$ y el coeficiente de excentricidad de la carga es $G = 0,8$, para los diversos valores del módulo de vía y para los diversos estados posibles de su geometría.

D) Bloque cuarto

Tiene como objetivo analizar el comportamiento de una carga de seis toneladas, que se mueve a una velocidad constante de 120 km/h, en una línea caracterizada por todos los casos posibles del módulo de vía, en el caso concreto de que el coeficiente de excentricidad de la carga sea $G = 0,8$ y la temperatura en el carril

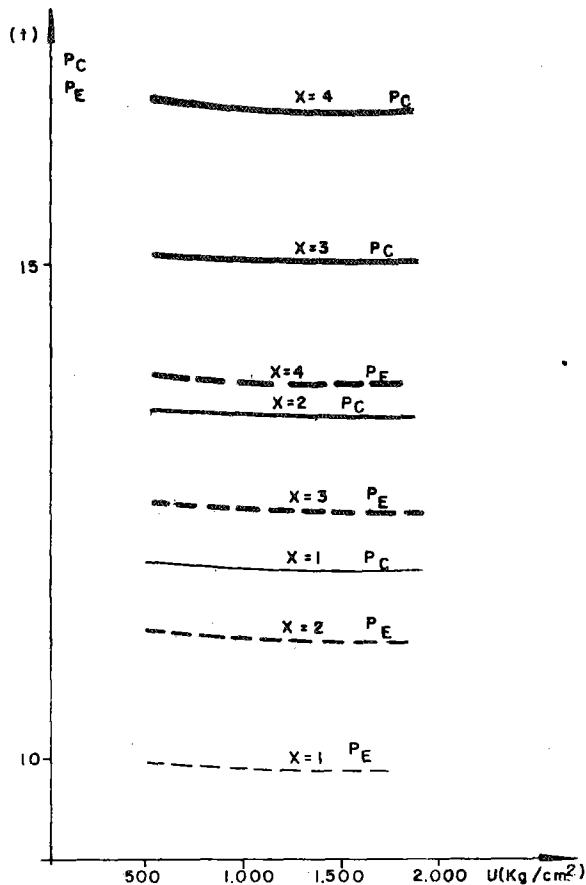


Figura J: Comportamiento de una carga de seis toneladas que se mueve a una velocidad de 120 km/h, en una vía caracterizada por $T = 10^\circ \text{C}$, $G = 0,8$, para los diversos valores del módulo de vía y para los diversos estados posibles de su geometría.

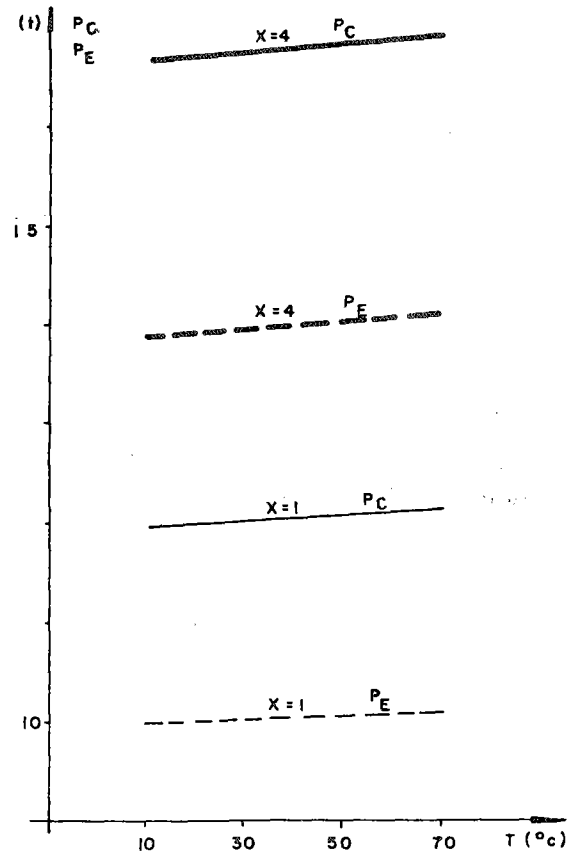


Figura K: Comportamiento de una carga de seis toneladas que se desplaza a una velocidad de 120 km/h, en una vía caracterizada por $G = 0,8$ y $U = 500 \text{ kg/cm}^2$, para los diversos valores de la temperatura del carril y para los estados posibles de su geometría.

sea 10°C , para las etapas significativas del estado geométrico de la vía (figura J).

E) Bloque quinto

Tiene como objetivo analizar el comportamiento de una carga de seis toneladas que se desplaza a una velocidad de 120 km/h, en una línea caracterizada por un coeficiente de excentricidad de las cargas $G = 0,8$ y un módulo de vía $U = 500 \text{ kg/cm}^2$, para diversos valores de la temperatura del carril y para las etapas extremas significativas del estado geométrico de la vía.

El comportamiento se ha caracterizado para los valores significativos P_E y P_C (figura K).

4. CONCLUSIONES

El modelo dinámico de vía introduce de forma racional, no sólo la mayoración de cargas estáticas en función de la etapa en que se encuentra la vida geométrica de la vía y de la velocidad, sino también de la influencia de las cargas por rueda asimétricas, con lo cual, la unidad esencial de sollicitación, deja de ser el «eje» para tomar protagonismo «la rueda en movimiento». De igual forma, el modelo dinámico de vía define el concepto de «eje patrón», «carga patrón» y «estado patrón», y evalúa la carga equivalente (P_E) y la carga crítica o máxima (P_C), en sentido deformacional (en sentido de igual hundimiento), en vez de la anteriormente definida (esfuerzos sollicitantes). De esta forma,

una carga que solicita la sección de vía, informa del efecto en su verdadera magnitud.

La aplicación a casos concretos de contenido realista, ha puesto de manifiesto los aspectos básicos del comportamiento de la rigidez vertical dinámica de la vía:

— aumenta sustancialmente al aumentar el módulo de vía y disminuye al aumentar la velocidad, cuando la temperatura del carril coincide con la temperatura de neutralización.

— Aumenta al aumentar el momento de inercia de la sección de un carril para un módulo de vía concreto, y, como el caso anterior, disminuye de forma somera al aumentar la velocidad de circulación.

— Disminuye de forma poco ostensible con el incremento de la temperatura (compresión en el carril) y con el aumento de velocidad, pero aumenta muy sustancialmente al aumentar el módulo de vía.

De igual forma, al aplicar el modelo genérico a los casos de explotación habitual, se ha puesto de manifiesto un comportamiento que demuestra la importancia de los aspectos propuestos en las hipótesis previas, evaluadas en unidades de cargas equivalentes en sentido deformacional, destacando las siguientes consecuencias:

— Dependencia muy acusada del estado geométrico de la vía férrea, en el valor de la carga por rueda equivalente y crítica.

— Dependencia sensible del valor del módulo de vía, en el valor de la carga por rueda equivalente y crítica.

— Dependencia muy acusada del valor de la velocidad de circulación en el valor de la carga por rueda equivalente y crítica.

— Dependencia muy sensible del valor de la excentricidad de la carga, en el valor de la carga por rueda equivalente y crítica.

— Dependencia poco sensible del valor de la temperatura en el valor de la carga por rueda equivalente y crítica.

— Dependencia sensible del valor de la carga nominal en el valor de la carga por rueda equivalente y crítica.

Se ha demostrado un paralelismo total con los resultados obtenidos en el análisis de la rigidez.

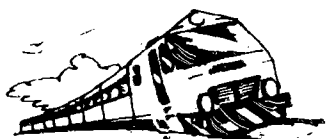
El modelo dinámico de vía ha puesto de manifiesto cómo una carga estática determinada puede variar dependiendo de los factores intervinientes básicos:

- Estrato inferior . . Módulo de vía. Etapa caracterizadora del estado geométrico y armamento de la vía.
- Estrato intermedio . Valor de la carga nominal, excentricidad de la carga y velocidad de circulación.
- Estrato superior . Temperatura.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ORE: Sollicitations de la voie, du ballast et de la plate-forme, 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. Résultats complémentaires. Question D-117. Utrecht, 1975.
5. LOPEZ PITA, A.: Estudio de las deformabilidad del sistema balasto-plataforma en una vía férrea bajo la acción de cargas verticales. Tesis Doctoral. Mayo 1976.
6. HENN, W.: Auswirkungen der Oberbauform und Betriebsbelastung auf die Veränderung der Gleishöhenlage. Archiv Für Eisenbahntechnik. 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 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 Chemins de Fer. Feb. de 1982.
10. JANIN, G.: La maintenance de la géométrie de la voie. Revue Générale des Chemins de Fer. Juin, 1982.

11. ESVELD, C.: Nivellement du rail: type de défauts, mesure et corrections. Rail International. Feb. 1983.
12. LAKATOS, I.: La metodología de los programas de investigación científica, Ed. Hohn Worall y Gregory Currie. Versión esp. Juan Carlos Zapatero. Alianza Editorial, Madrid 1983.
13. FERRER TORIO, R.: La auscultación integral de la estructura de la vía férrea, como base de diagnóstico para programar la conservación de su geometría. Tesis Doctoral. Mayo 1985.



Rafael Ferrer Torío



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. 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 de 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 antes e impartiendo cursos de doctorado y postgrado, en el marco general del Area de Conocimiento.
