

# Interacción Vía-Estructura en puentes ferroviarios. Algoritmos de cálculo paso a paso

## Track-Structure interaction in railway bridges. Step-by-step calculation algorithms

**Manuel Cuadrado Sanguino.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Fundación Caminos de Hierro y CIDI, S.L. mcuadrado@cidi.es

**Pedro González Requejo.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Fundación Caminos de Hierro y CIDI, S.L. pgonzalez@cidi.es

**Resumen:** El artículo describe un método de cálculo basado en modelos numéricos para el análisis del fenómeno de interacción longitudinal vía-estructura en puentes ferroviarios. Se analizan las acciones a considerar en el cálculo y los métodos de combinación. En este sentido los autores presentan un nuevo método de análisis completo de todas las acciones, que simula el paso del tren a lo largo del viaducto, mediante un algoritmo paso a paso.

Se presentan ejemplos de aplicación del nuevo método de cálculo al diseño de viaductos y su comparación con los resultados obtenidos mediante métodos de combinación simplificados.

**Palabras Clave:** Interacción; Puente ferroviario; Algoritmo paso a paso

**Abstract:** The article describes a calculation method based on numerical models for the analysis of longitudinal track-structure interaction in railway bridges. An analysis is made of the stresses to be considered in the calculation and the combination methods. The authors present a new method of complete analysis of all the stresses, simulating the passage of a train throughout a bridge, and employing a step-by-step algorithm. The paper present examples of the application of the new calculation method to the design of bridges and compares these with the results obtained from simplified combination models.

**Keywords:** Interaction; Railway bridge; Step-by-step algorithm

### 1. Introducción

Debido a las variaciones de temperatura, las deformaciones de retracción y fluencia del tablero y a la acción de las cargas ferroviarias, la presencia de puentes de ferrocarril puede introducir sobretensiones en los carriles continuos, y provocar desplazamientos relativos entre la vía y el tablero o la plataforma.

El valor de esas sobretensiones, medidas como el incremento con respecto a las tensiones del carril a una distancia suficientemente alejada del puente, pueden superar los valores máximos admitidos por la normativa existente, especialmente en el caso de

### 1. Introduction

*As a result of temperature fluctuations, shrinkage and creep deformations of the deck and the action of railway loads, railway bridges may cause overstressing in continuous rails and cause relative displacement between the track and the bridge deck or platform.*

*The extent of this overstress, when measured as the increase with respect to the stress in the rail at a distance suitably far away from the bridge, may exceed the maximum admissible levels established in the codes, particularly in the case of large, expandable lengths (continuous deck or large-span simply supported bridges).*

longitudes dilatables grandes (tableros continuos o puentes isostáticos con luces importantes).

Por otra parte, los desplazamientos relativos entre la vía y el tablero o la plataforma pueden modificar las condiciones de estabilidad de la parrilla de vía.

Por tanto es necesario analizar la interacción entre el carril y la estructura con dos objetivos principales:

- determinar las sobretensiones en el carril y la eventual necesidad de disponer uno o varios aparatos de dilatación;
- determinar los desplazamientos absolutos del tablero y relativos entre vía y tablero o plataforma, debiendo limitarse estos últimos con el fin de no alterar la estabilidad general de la parrilla de vía por desconsolidación de la capa de balasto.

La Ficha UIC 774-3 (1), La Instrucción de Acciones a Considerar en Puentes de Ferrocarril (IAPF) (2) y el Eurocódigo EN 1991-2:2003 (3) recogen los principios metodológicos para abordar el análisis de la interacción vía-tablero y establecen las acciones a considerar y las limitaciones que deben respetarse tanto en tensiones en carril como en desplazamientos.

Aunque existen aproximaciones teóricas al fenómeno (5)(6), los tres códigos plantean la posibilidad de realizar los cálculos de interacción mediante la utilización de modelos numéricos que idealizan el comportamiento del conjunto de los elementos y acciones que intervienen en el fenómeno, con la obtención de tensiones y desplazamientos

El modelo numérico (ver esquema en Figura nº 1) está constituido por elementos tipo viga (que idealizan los carriles y el tablero del puente), tipo muelle no lineal (que idealizan la interacción que existe, a través del conjunto fijación-travesía-balasto, entre el carril y la base de la vía, ya sea plataforma o tablero) y tipo muelle lineal (que idealizan el comportamiento de los apoyos del tablero, esto es, en cada caso el conjunto apoyo-estribo o apoyo-pila).

En este modelo será posible introducir las distintas acciones a considerar en la interacción (variaciones de temperatura en los distintos elementos, las deformaciones impuestas en el tablero debidas a retracción y fluencia del hormigón, así como sobrecargas horizontales o verticales), y calcular las sobretensiones y desplazamientos que se inducen.

*Furthermore, the relative displacement between the track and the deck or platform may modify the stability conditions of the track assembly.*

*It is then necessary to examine the interaction between the track and the structure for two main reasons:*

- *to establish the overstress in the track and the ensuing need to place one or more expansion joints;*
- *to establish the absolute displacements of the deck and the relative displacements between track and structure, and restricting these latter to prevent any break up of ballast and an ensuing effect on the general stability of the track assembly.*

*The Code UIC 774-3 (1), the Spanish Guidelines on Actions on Railway Bridges (IAPF) (2) and the Eurocode EN 1991-2:2003 (3) all consider methodological principles for the analysis of track-structure interaction and establish the actions to be taken into account and the limits which must be respected both in terms of stress in the track and displacements.*

*While theoretical approaches to the problem do exist (5) (6), the three codes contemplate the possibility of calculating this interaction by means of numerical models that simulate the behaviour of the assembly and the actions intervening in the process, in order to obtain the implied stresses and displacements.*

*The numerical model (see diagram in figure No. 1) is formed by beam type elements (that model the track and the bridge deck), non-linear springs (that model the interaction existing, as a result of the fixing-sleeper-ballast assembly, between the rail and the base of the track, whether deck or platform) and linear springs (modelling the behaviour of the deck supports, this being the abutment-support or pier-support assembly in each case).*

*In this model it is possible to introduce the different actions to be considered in the interaction (temperature changes in different elements, the strain in the deck as a result of the shrinkage and creep of the concrete, as well as horizontal or vertical overloading) and to calculate the overstress and displacement induced.*

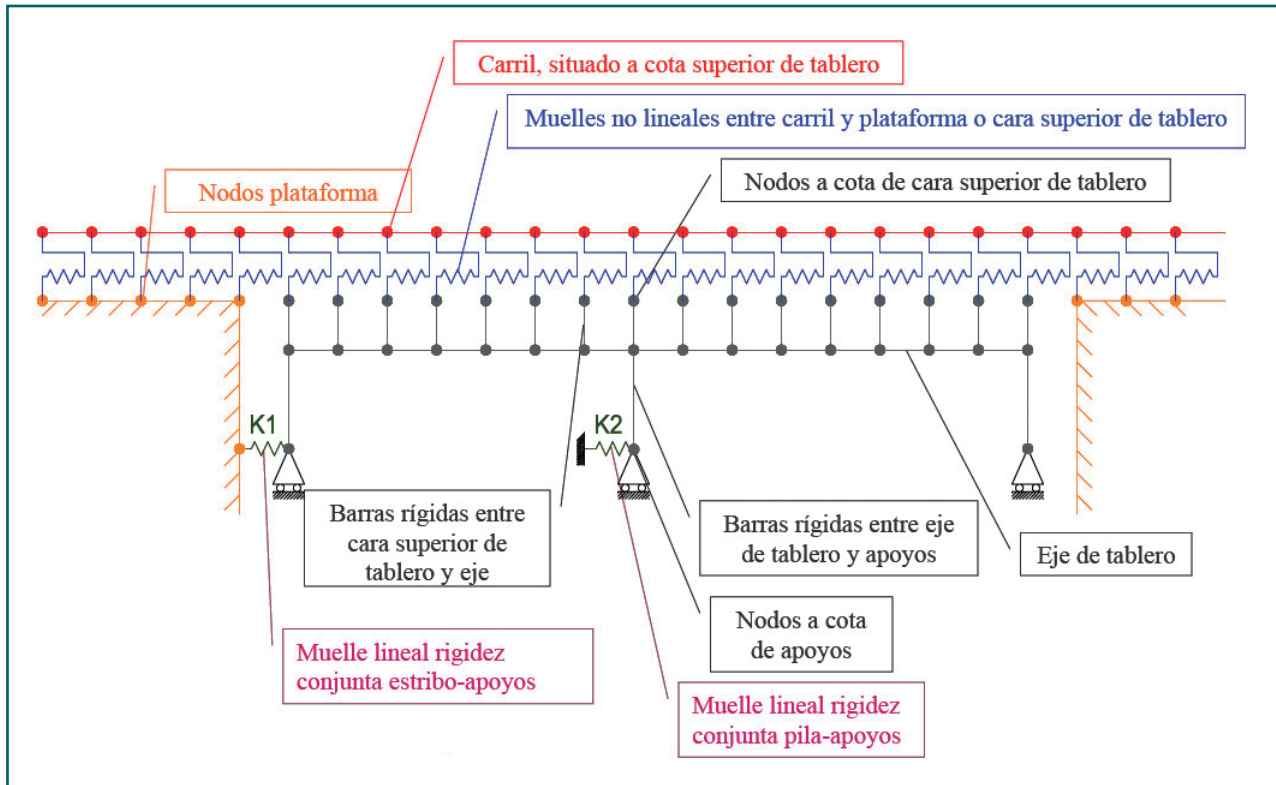


Fig. 1. Esquema de modelo tipo /Standard model arrangement.

La conexión entre la vía y su base (ya sea el tablero o la plataforma) en la dirección longitudinal viene caracterizada por la resistencia de la vía a sufrir desplazamientos relativos con respecto a dicha base. Esta resistencia tiene dos componentes: la del carril a desplazarse con respecto a la traviesa; la de la traviesa a desplazarse sobre el balasto. La resistencia crece con el desplazamiento hasta un punto a partir del cual se puede considerar constante. De este modo, de forma simplificada se puede establecer una relación bilineal entre fuerza y desplazamiento global, que incluya las dos componentes, que vendrá caracterizada por el desplazamiento  $u_0$  y por la resistencia máxima  $k$  (Figura nº 2). El valor de la resistencia máxima depende del estado del balasto y de si se considera vía cargada o vía descargada.

La combinación de acciones a considerar varía en función de cada una de las comprobaciones (en tensiones o en desplazamientos) que es necesario realizar. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la combinación lineal de esfuerzos y deformaciones resultantes del cálculo independiente de cada acción elemental (temperatura, frenado/arranque, flexión, retracción y fluencia) no es correcta ya que el modelo de interacción carril-tablero no es un modelo lineal, debido a

*The connection between track and base (whether the deck or platform) in the longitudinal direction is characterised by the resistance of the track to relative displacement with respect to the base. This resistance has two components: that of the rail on moving with respect to the sleeper; and that of the sleeper on moving over the ballast. The resistance rises with the displacement until reaching a point where it may be considered constant. In this way a simplified bilinear relation may be established between force and global displacement, which includes the two components characterised by the displacement  $u_0$  and by the maximum resistance  $k$  (Figure 2). The value of maximum resistance depends on the state of the ballast and on whether the track is considered as loaded track or unloaded track.*

*The combination of actions to be considered varies in accordance with each of the verifications required (stress or displacement). However, it is necessary to take into account that the lineal combination of stresses and strains resulting from the independent calculation of each basic action (temperature, braking/acceleration, bending, shrinkage and creep) is incorrect as the track-structure interaction is not a lineal model on account of the*

ley de comportamiento de la unión entre la vía y el tablero o plataforma.

La ficha UIC 774-3 (1) admite como simplificación la combinación de los resultados obtenidos en el análisis independiente de cada acción elemental. No obstante, un cálculo completo que incluya todas las acciones y la simulación del paso del tren a lo largo del viaducto dará resultados mucho más precisos.

Existe amplia literatura sobre el método simplificado de combinación de acciones, como son los dos artículos publicados por los autores en la ROP: (9) y (11). En este documento se presenta el algoritmo de cálculo paso a paso que permite realizar una combinación más realista de las acciones.

## 2. Método simplificado de combinación de acciones

En este método simplificado, la introducción, por un lado, de las acciones de larga duración (deformaciones impuestas por variaciones de temperatura, y eventualmente por retracción y fluencia en tableros de hormigón) y, por otro lado, la de las cargas de tráfico, se realiza en procesos diferentes. Es necesario hacerlo así, ya que la introducción de las cargas verticales supone una variación de las características de los elementos que idealizan la conexión entre carril y tablero o plataforma (paso de vía descargada a vía cargada), lo cual requiere un algoritmo paso a paso.

Para la introducción de las acciones de larga duración se buscan las situaciones pésimas, y el cálculo más aproximado posible de las tensiones en carril en esas situaciones, considerando la concomitancia de las variaciones de temperatura con las deformaciones de retracción y fluencia (mediante una variación de temperatura equivalente suma de las dos), habiéndose comprobado que su mera superposición lineal arroja resultados demasiado conservadores (11).

En ausencia de aparato de dilatación, la variación de temperatura en el carril no produce movimientos relativos entre el carril y el tablero o la plataforma, siendo únicamente necesario considerar la variación de la temperatura del tablero ( $\Delta T_t$ ) y la equivalente a la deformación por retracción y fluencia ( $\Delta T_{t,ret,flu}$ ). Así, en este caso, las hipótesis pésimas serían dos:

$$H1) \Delta T_t = \text{Valor máximo y } \Delta T_{t,ret,flu} = 0$$

$$H2) \Delta T_t = \text{Valor mínimo y } \Delta T_{t,ret,flu} = \text{Valor mínimo (siempre es negativo)}$$

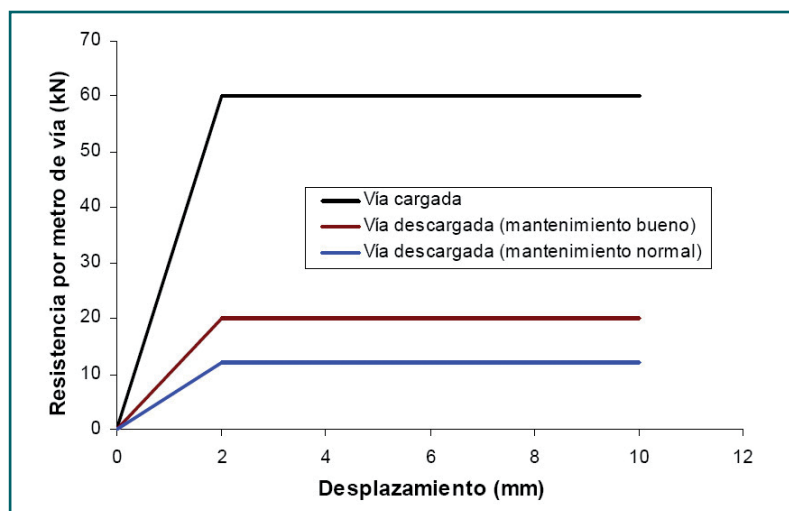


Fig. 2. Resistencia de la vía frente a desplazamientos relativos con respecto al apoyo por unidad de longitud (carriles UIC 54 o 60)  
Track resistance to relative displacements with respect to the support, by unit length (track UIC 54 or 60).

behaviour of the joint between the track and the deck or platform.

Code UIC 774-3 (1) accepts, by way of simplification, the combination of the results obtained from the independent analysis of each basic action. However, a complete calculation including all the actions and the simulation of the passage of the train along the viaduct would give far more accurate results.

There is an abundance of literature on the simplified method of combination of actions, such as the two articles published by the authors in the ROP: (9) and (11). In this article we present a step-by-step calculation algorithm that allows a more realistic combination of the actions.

## 2. Simplified method of combinations of actions

In this simplified method, the introduction of both long term actions (strain imposed by temperature changes and subsequently the shrinkage and creep of concrete decks) and that of traffic loads has to be performed by different processes. These different processes are necessary as the introduction of the vertical loads implies a variation in the characteristics of the elements modelling the connection between the track and the deck or platform (passing from unloaded track to loaded track) which requires a step-by-step algorithm.

In order to introduce the long term actions it is necessary to find the least favourable situations and the most approximate calculation possible of the stresses in the rail under these situations, when considering the

Por su parte, en el caso de existir aparato de dilatación, al considerarse además de las variaciones de temperatura del tablero las del carril, existirán más hipótesis que pueden resultar pésimas. Por ello, será necesario realizar un barrido de posibles combinaciones de variaciones de temperatura de tablero, incluyendo eventualmente las variaciones de temperatura equivalentes a deformación por retracción y fluencia, y variaciones de temperatura de carril para encontrar dichas hipótesis pésimas.

En cuanto a las acciones del tráfico, y como ya se ha comentado, en este método simplificado se introducirán de forma independiente, sobre el modelo original. Los resultados del cálculo (tensiones y movimientos) se combinarán linealmente con los obtenidos para acciones de larga duración.

Finalmente, y dentro de las acciones de tráfico, debe entenderse que las fuerzas horizontales de frenado y arranque sólo pueden producirse como acciones asociadas a las cargas verticales y a la correspondiente deformación por flexión vertical del tablero. Por tanto, parece lógico introducir las cargas de tráfico en dos fases de cálculo: en una primera fase, con la consideración de las cargas verticales y; en una segunda fase, y sobre la situación con el modelo ya deformado por la flexión vertical, con la introducción de las fuerzas horizontales de frenado/arranque.

### **3. Método de cálculo paso a paso**

En primer lugar, para la aplicación del nuevo método de cálculo paso a paso, es necesario definir una ley de comportamiento longitudinal del conjunto fijación-balasto en función de la carga vertical (N). Basándose en las leyes mostradas en la Figura nº 2 para vía cargada y vía descargada, es posible definir una ley como la de la Figura nº 3, en la que la carga máxima longitudinal es función de la carga vertical mediante la aplicación de un coeficiente de rozamiento ficticio  $\mu$ .

El valor de la fuerza máxima vendría determinado por la expresión siguiente:

$$F_N = F_0 + \mu N$$

Con balasto en mal estado:  $F_0 = 12 \text{ kN/m}$   
 $F_{80} = 60 \text{ kN/m}$   
 $\mu = 0.60$

*coincidence between temperature fluctuation and shrinkage and creep strain (by a temperature variation equivalent to the sum of the two), and where it may be verified that its simple lineal superimposition gives excessively conservative results (11).*

*In the absence of expansion joints, the temperature variation in the track will not cause relative movements between the track and the deck or platform and it is only necessary to consider the temperature variation of the deck ( $\Delta T_t$ ) and the equivalent to the shrinkage and creep strain ( $\Delta T_{t, \text{ret,flu}}$ ). As such, in this case the least favourable hypotheses would be:*

$$H1) \Delta T_t = \text{Maximum value and } \Delta T_{t, \text{ret,flu}} = 0$$

$$H2) \Delta T_t = \text{Minimum value and } \Delta T_{t, \text{ret,flu}} = \text{Minimum value (always negative)}$$

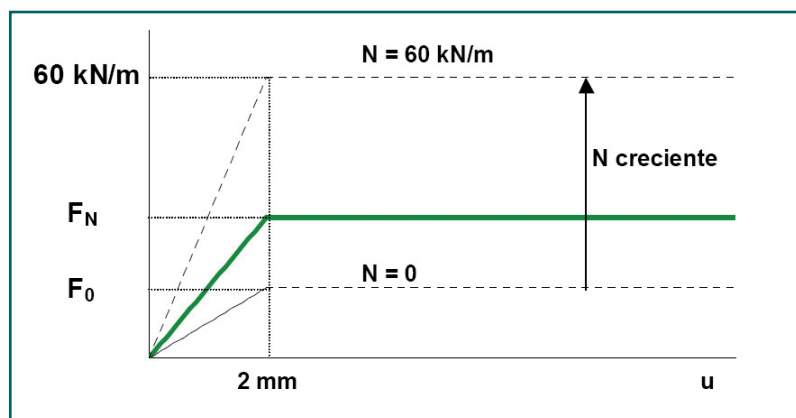
*However, in the case that there are expansion joints, and on considering the temperature variations in the decks as well as in the track, there are then more possibilities of unfavourable hypotheses. It will then be necessary to conduct a sweep of the possible combinations of temperature variations in the deck, which will then include the temperature variations equivalent to the shrinkage and creep strain, and the temperature variations of the track in order to find these least favourable hypotheses.*

*As indicated earlier, in this simplified method the traffic loads are introduced independently on the original model. The results of the calculation (stresses and movements) are lineally combined with those obtained for the long term actions.*

*Finally, and within these traffic loads, it should be taken into account that the horizontal forces of braking and acceleration can only be produced as actions associated with vertical loads and to the corresponding deformation by vertical bending of the deck. As such, it would appear logical to introduce the traffic loads in two stages of the calculation: considering the vertical loads in the first stage and introducing the horizontal braking/acceleration forces in the second stage and on the basis of the model already deformed by vertical bending.*

### **3. Step-by-step calculation method**

*In order to apply the new step-by-step calculation method, it is first necessary to define a law of*



Con balasto en buen estado:  $F_0 = 20 \text{ kN/m}$   
 $F_{80} = 60 \text{ kN/m}$   
 $\mu = 0.50$

Una vez definida esta ley, será posible realizar un análisis completo con la aplicación de las deformaciones impuestas seguidas por las fuerzas del tren desplazándose sobre el modelo en pasos sucesivos.

En primer lugar será necesario analizar las acciones de larga duración. Se parte del hecho de que es posible que estas acciones hayan actuado previamente a las acciones del tráfico, y se buscan las situaciones pésimas, como en el método simplificado.

En cuanto a las acciones del tráfico, estas podrán actuar antes o después de las acciones de larga duración. En general el segundo caso será el más desfavorable.

Como primera diferencia con el método simplificado, el análisis del efecto de las cargas de tráfico no se realiza de forma independiente para su posterior combinación, sino que las cargas de tráfico se introducen sobre el modelo deformado por las acciones de larga duración.

La segunda diferencia con el método simplificado, radica en la forma de introducir las cargas verticales. Éstas actuarán paso a paso, avanzando sobre el modelo de forma que se simule el avance del tren desde la plataforma al tablero y sobre éste. En cada paso de carga será necesario actualizar las características de los muelles no lineales en función de la carga vertical que actúa sobre ellos, mediante la ley definida en la Figura nº 3.

Finalmente, como en el caso del método simplificado, sobre la situación con el modelo ya deformado por la flexión vertical, se introducen las fuerzas horizontales de frenado/arranque.

Fig. 3. Resistencia de la vía frente a desplazamientos relativos con respecto al apoyo, en función de la carga vertical/Track resistance to relative displacements with respect to the support, in accordance with vertical load.

longitudinal behaviour for the fixing-ballast assembly in accordance with the vertical load. On the basis of the laws shown in Figure no. 2 for the loaded and unloaded track, it is possible to define a law such as that shown in Figure No. 3 where the maximum longitudinal load is a function of the vertical load through the application of a fictitious friction coefficient  $\mu$ .

The maximum force shall then be given by the following equation:

$$F_N = F_0 + \mu N$$

With ballast in poor condition:  $F_0 = 12 \text{ kN/m}$   
 $F_{80} = 60 \text{ kN/m}$   
 $\mu = 0.60$

With ballast in good condition:  $F_0 = 20 \text{ kN/m}$   
 $F_{80} = 60 \text{ kN/m}$   
 $\mu = 0.50$

On defining this law it will then be possible to conduct a complete analysis, applying the imposed strains and then the forces of the train moving over the model in successive steps.

It will first be necessary to analyse the long term actions. It is taken that these actions could well have acted prior to the traffic loads and that it is necessary to establish the least favourable situations as in the simplified method.

With regards to the traffic loads, these may act prior to or after the long term actions, though this latter will generally be more unfavourable.

The first difference from the simplified method is that the analysis of the effect of traffic loads is not conducted in an independent manner and then combined as these traffic loads are, instead, introduced on the model deformed by the long-term actions.

The second difference from the simplified method lies in the manner in which the vertical loads are introduced. These shall act step-by-step, progressing in the model in a way which simulates the movement of the train from the platform to the deck and on this latter. In each loading stage it will be necessary to update the characteristics of the non-linear springs in accordance with the vertical load acting on the same, by means of the law defined in Figure No. 3.

Finally, and as in the case of the simplified method, the horizontal forces of braking/acceleration will be introduced on the basis of the model deformed by vertical bending.

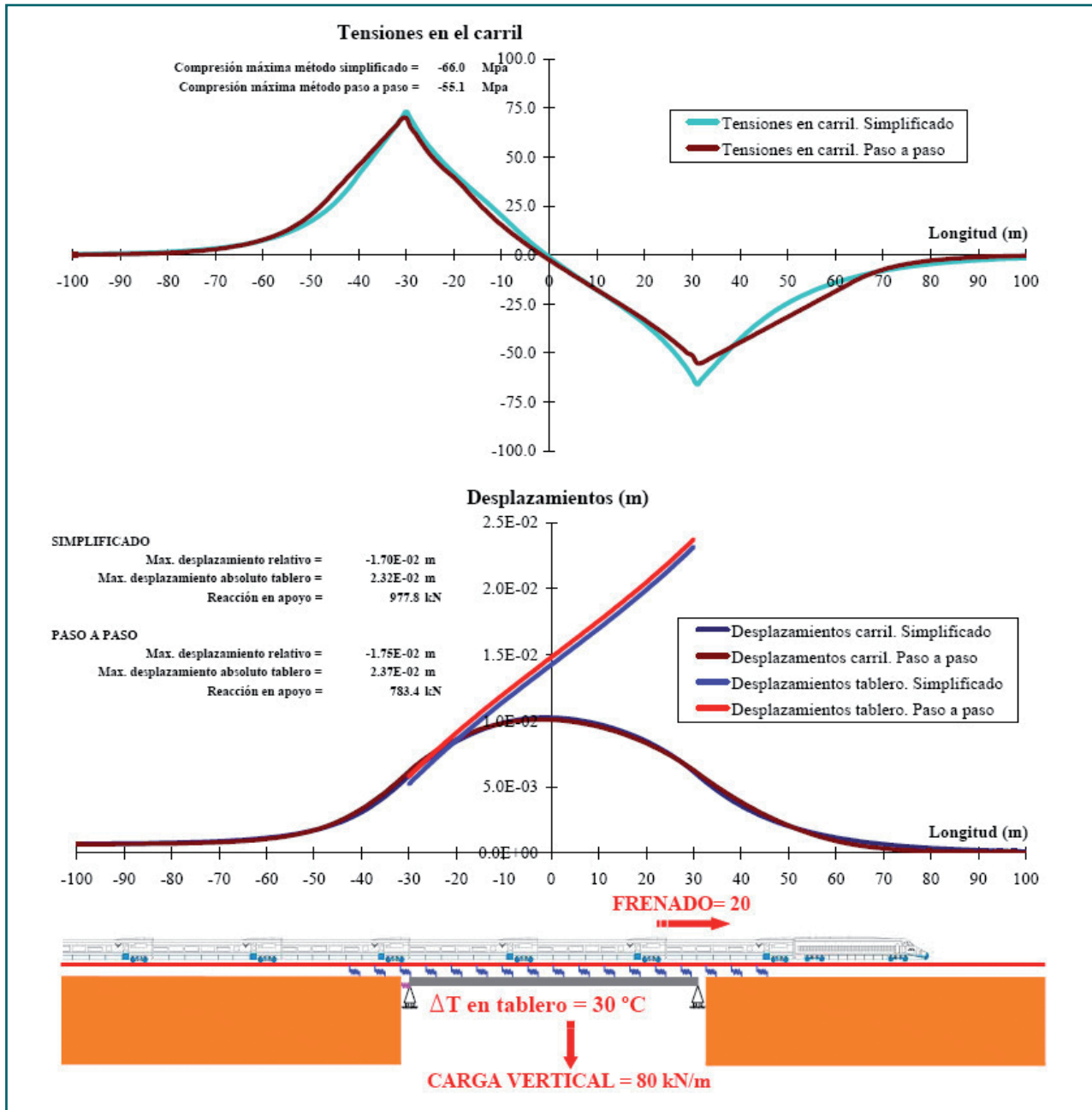


Fig. 4. Comparativa de tensiones en carril método simplificado y paso a paso. Caso E1-3 ficha UIC 774-3 (1) / Comparison of track stress by the simplified method and the step-by-step method. Case E1-3 of the UIC Code 774-3 (1).

#### 4. Comparación de resultados

Se ha realizado un estudio comparativo de los dos métodos de cálculo para una serie de los casos de prueba propuestos por la ficha UIC 774-3 (1) (casos C1-3, D1-3, E1-3 y F1-3).

En la Figura nº 4 se muestran los resultados de tensiones en carril en el caso de prueba E1-3 de la ficha UIC 774-3 (1). Se trata de un puente de un solo vano de 60 m de longitud, con apoyo restringido en el estri-

#### 4. Comparison of results

A comparative study has been made of the two calculation methods for a series of test cases proposed in the UIC Code 774-3 (1) cases C1-3, D1-3, E1-3 and F1-3).

Figure No. 4 shows the results of the track stress in the case of test E1-3 of the UIC Code 774-3 (1). This considers a 60 m long single span bridge with restricted support on abutment 1 and free on





**Tabla/Table 1. Comparativa de resultados/Comparison of results**

Caso	Efecto	Simplificado (1)	Paso a paso (2)	Error 1-(1)/(2)
C 1-3	Comp. Max. (Mpa)	-56.5	-48.0	-18%
	Despl. Rel. (m)	-1.26E-02	-1.35E-02	7%
	Despl. Abs. (m)	1.78E-02	1.85E-02	4%
	Reacción (kN)	956.0	788.6	-21%
D 1-3	Comp. Max. (Mpa)	-45.4	-43.9	-3%
	Despl. Rel. (m)	-1.05E-02	-1.07E-02	2%
	Despl. Abs. (m)	1.45E-02	1.48E-02	2%
	Reacción (kN)	538.4	515.6	-4%
E 1-3	Comp. Max. (Mpa)	-66.0	-55.1	-20%
	Despl. Rel. (m)	-1.70E-02	-1.75E-02	3%
	Despl. Abs. (m)	2.32E-02	2.37E-02	2%
	Reacción (kN)	977.8	783.4	-25%
F 1-3	Comp. Max. (Mpa)	-57.5	-52.4	-10%
	Despl. Rel. (m)	-1.46E-02	-1.47E-02	1%
	Despl. Abs. (m)	1.98E-02	2.05E-02	3%
	Reacción (kN)	631.9	568.4	-11%

bo 1 y libre en el estribo 2. Las acciones consideradas son: incremento de temperatura del tablero + 30°C; carga vertical de tráfico 80 kN/m; carga de frenado 20 kN/m. El cálculo se ha realizado para un tren circulando del estribo 1 al 2, en la situación en la que la cabeza del tren se sitúa sobre el estribo 2, y suponiendo que frena en esa posición. Como puede observarse, el pico de sobrecompresiones que se produce sobre el estribo móvil es inferior en el cálculo mediante el método paso a paso.

En la misma Figura nº 4 se muestran los resultados de desplazamientos de carril y de tablero para el mismo caso de prueba E1-3. Como puede observarse en este caso los resultados del cálculo mediante el método paso a paso son ligeramente superiores.

Esta tendencia se repiten en el resto de casos de prueba. En la Tabla nº 1 se muestra el resumen de resultados, y se puede observar que la superposición lineal de deformaciones impuestas y cargas de tráfico da resultados conservadores tanto en tensiones en carril como en reacciones en apoyo (alrededor del 15% y nunca superior al 25% en los casos estudiados).

Sin embargo, en el cálculo de desplazamientos, tanto absolutos de tablero como relativos entre vía y plataforma o tablero, la superposición lineal no deja del lado de la seguridad. Sin embargo, la diferencia respecto del método paso a paso no es importante, de alrededor del 3% como media y nunca superior al 7% en los casos estudiados.

*abutment 2. The actions considered are: temperature increase in the deck + 30°C; vertical traffic load 80 kN/m; braking load 20 kN/m. The calculation has been conducted for a train passing from abutments 1 to 2, where the head of the train is set over abutment 2, and when the train is taken to brake in this position. As may be seen, the peak over-compression occurring over the moving abutment is lower in the calculation using the step-by-step method.*

*The same Figure no.4 shows the results of track and deck displacements for the same test case E1-3. In this case the calculation results of the step-by-step method are somewhat higher.*

*This tendency is repeated in the other test cases. Table No. 1 gives a summary of the results and it may be seen that the lineal superimposition of imposed strains and traffic loads gives conservative results both in terms of track stress and the reactions at the supports (around 15% and never over 25% in the study cases).*

*However, in the calculation of displacements, both in terms of the absolute displacement in the deck and the relative displacement between the track and the structure, the lineal superimposition errs from the side of safety. However, the difference with respect to the step-by-step method is relatively insignificant, being around 3% on average and never over 7% in the study cases.*

## 5. Conclusiones

Se han presentado los métodos numéricos de análisis de la interacción longitudinal vía-estructura, distinguiendo las dos posibilidades existentes para la combinación de las acciones:

Método de combinación simplificado;  
Método de cálculo "paso a paso".

Se han aplicado los dos métodos a una batería de los casos de prueba de la Ficha UIC 774-3 (1).

De los resultados se desprende que, respecto de un cálculo paso a paso, el método simplificado arroja valores superiores en el cálculo de tensiones en carril y reacciones en apoyos, con diferencias que pueden ser significativas, pero que, al menos en los casos estudiados, dejan del lado de la seguridad.

En el caso de los desplazamientos de carril y de tablero, los resultados del método simplificado difieren mucho menos de los obtenidos con el método paso a paso, pero se da la circunstancia de que no dejan del lado de la seguridad.

Por lo tanto puede concluirse que, en la mayoría de los casos de estudio, el método simplificado será suficiente.

No debe sin embargo descartarse la pertinencia de realizar un análisis más aquilatado del fenómeno de interacción en casos "límite" donde sea necesario ajustar los valores de tensiones o reacciones o comprobar los valores de desplazamientos, mediante un método paso a paso como el que se ha descrito en este artículo. ♦

## 5. Conclusions

*A presentation has been given of the numerical methods of analysis of the longitudinal track-structure interaction, distinguishing between two possible alternatives for the combination of actions:*

*The simplified combination method;  
The "step-by-step" calculation method.*

*The two methods have been applied to the range of test cases described in the UIC code 774-3 (1).*

*From the results it may be taken that the simplified method gives higher values in the calculation of rail stresses and reactions at supports than those given by the step-by-step method and that while these differences may be significant, in the study cases at least, they remain on the side of safety.*

*In the cases of the track and deck displacements, the results of the simplified method vary far less from those obtained by the step-by-step method, yet they err from the side of safety.*

*The simplified method may then be considered to be sufficient in the majority of study cases.*

*However, consideration should be given to the appropriateness of conducting a more proven analysis of the interaction phenomenon in "limit" cases and where the stress or reaction values may be adjusted or the displacement values verified by a step-by-step method such as that described in this article. ♦*

### Referencias:

- (1) Union Internationale des Chemins de fer. Fiche UIC 774-3R. Interaction voie-ouvrages d'art. Recommendations pour les calculs. 1999.
- (2) Comisión redactora IAPF. Borrador de Instrucción de acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril. 2006.
- (3) Eurocódigo EN 1991-2. "Acciones en estructuras. Parte 2: Cargas de tráfico en puentes". 2003.
- (4) RAMONDENC, P. Track/Bridge interaction. World Congress on Railway Research. Firenze, Nov 1997.
- (5) FRYBA, L. Thermal interaction of long welded rails with railway bridges. Rail International (1985), Nº 3, pp. 5-24.

- (6) FRYBA, L. Continuous welded rail on railway bridges. World Congress on Railway Research. Firenze, Nov 1997.
- (7) CUADRADO, M.; GONZÁLEZ, P. Interacción entre carril continuo y tablero de puente. Calibrado del modelo de cálculo según la Ficha UIC 774-3. Marzo 2000.
- (8) GONZÁLEZ, P.; CUADRADO, M. Apoyo a la Dirección de los Proyectos de la Línea de alta velocidad Córdoba y Málaga. Plataforma. Informe sobre trabajos específicos adicionales: Interacción entre carriles continuos y tableros de viaductos ferroviarios o plataforma. Metodología y criterios de dimensionamiento de aparatos de dilatación de vía. 2000.
- (9) GONZÁLEZ, P.; CUADRADO, M.; NASARRE, J.; ROMO, E. Revista de Obras Públicas. Alta veloci-

- dad: fenómeno de interacción vía-tablero en puentes. Febrero 2002.
- (10) GONZÁLEZ, P.; CUADRADO, M.; ROMO, E. IABSE. Congreso puentes de ferrocarril: Proyecto construcción y conservación. Ponencia: Consideración del fenómeno de interacción vía-tablero en el proyecto de puentes ferroviarios. Madrid, Junio 2002.
- (11) CUADRADO, M.; GONZÁLEZ, P. "Consideración de las deformaciones por retracción y fluencia en el estudio del fenómeno de interacción vía-tablero en el proyecto de puentes ferroviarios". Revista de Obras Públicas. Agosto 2004.
- (12) CUADRADO, M.; GONZÁLEZ, P. "Numerical methods for the analysis of longitudinal interaction between track and structure". Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways. Porto 2007.