

## Análisis de una vía con traviesas cuadro

### *Analysis of a track with frame sleepers*

Fernando Romero Zaragüeta (\*)

Universitat Politècnica de Catalunya

#### Resumen

En los últimos años ha surgido la necesidad de mejorar la infraestructura de vía frente a las crecientes cargas de tráfico que tiene que soportar. Uno de los objetivos para conseguir esta mejora es reducir los esfuerzos y las tensiones que llegan a la capa de balasto. Por este motivo, a finales de los años 90 del siglo XX apareció un nuevo tipo de traviesas, las traviesas cuadro, compuestas por dos traviesas situadas longitudinalmente bajo los carriles y que son unidas, a cada extremo, por una traviesa transversal, adoptando así la forma de un rectángulo o doble H. Con esta disposición se consigue una mayor superficie de apoyo de las traviesas, con lo que las cargas se reparten mejor y el nivel de tensiones que deben soportar el balasto y la plataforma es menor. Además, la propia configuración de las traviesas cuadro confiere a la vía una rigidez más alta que con las traviesas estándares. Actualmente, algunos tramos de líneas austriacas, suizas e italianas están equipados con traviesas cuadro para realizar estudios experimentales, tanto de carácter técnico como económico.

Palabras clave: traviesas cuadro, balasto, tensiones, asientos, momentos flectores.

\* [f.romero.217@gmail.com](mailto:f.romero.217@gmail.com)

#### Abstract

*Over the last years, the need to improve the railway infrastructure has appeared in order to face the growing traffic loads that have to be supported. One of the objectives to obtain this improvement is to reduce the stress and pressure on the ballast layer. This is why a new type of sleepers was created by the end of 1990s, the frame sleepers. They consist of two sleepers placed longitudinally under the rails and joined to one another by two sleepers across them, thus adopting a rectangle or double H form. With this layout, a larger support area for the sleepers is gained, the loads are therefore better spread and the pressure level on the ballast and the platform is lower. Moreover, the configuration of the frame sleepers provides the track with a higher stiffness compared to tracks with standard sleepers. Nowadays, some sections in Austrian, Swiss and Italian rail lines are equipped with frame sleepers so as to carry out technical and economic investigation.*

*keywords: frame sleepers, ballast, stresses, deflection, bending moment.*

## **Resumen**

En los últimos años ha surgido la necesidad de mejorar la infraestructura de vía frente a las crecientes cargas de tráfico que tiene que soportar. Uno de los objetivos para conseguir esta mejora es reducir los esfuerzos y las tensiones que llegan a la capa de balasto. Por este motivo, a finales de los años 90 del siglo XX apareció un nuevo tipo de traviesas, las traviesas cuadro, compuestas por dos traviesas situadas longitudinalmente bajo los carriles y que son unidas, a cada extremo, por una traviesa transversal, adoptando así la forma de un rectángulo o doble H. Con esta disposición se consigue una mayor superficie de apoyo de las traviesas, con lo que las cargas se reparten mejor y el nivel de tensiones que deben soportar el balasto y la plataforma es menor. Además, la propia configuración de las traviesas cuadro confiere a la vía una rigidez más alta que con las traviesas estándares. Actualmente, algunos tramos de líneas austriacas, suizas e italianas están equipados con traviesas cuadro para realizar estudios experimentales, tanto de carácter técnico como económico.

En el presente estudio se realiza un modelo de cálculo de una vía dotada con traviesas cuadro, al que se le aplican dos casos de carga representativos. De esta manera, se puede ver el comportamiento que tiene este tipo de traviesas, así como el conjunto de la vía. Para ello, se analizan ciertos parámetros, como los asientos, los momentos flectores y las tensiones a que se ven sometidos los diferentes elementos de la vía. Estos resultados son comparados con los obtenidos en una vía con traviesas convencionales, considerando los mismos casos de carga. De esta forma, se puede cuantificar la reducción de los parámetros antes mencionados en una vía con traviesas cuadro, una disminución que era intuitiva pero que hasta ahora carecía de valores numéricos. De hecho, tanto los asientos, los momentos flectores, las tensiones y la onda de levante se reducen notablemente, así como la longitud de vía afectada por estos parámetros. Esto implica que la vía es más resistente y soporta mejor las cargas, aumentando su durabilidad.

Por otra parte, también se intenta adaptar el método de Zimmermann empleado para el cálculo de una vía con traviesas convencionales para poder usarlo en vías con traviesas cuadro. Para ello, se parte de los resultados obtenidos con el modelo de cálculo y se intentan ajustar las fórmulas modificando los parámetros necesarios, proporcionando porcentajes de error del ajuste en relación a los valores del modelo.

Las traviesas cuadro tienen un coste de inversión superior al de las traviesas estándares, debido, principalmente, a la existencia de traviesas longitudinales además de las transversales. Sin embargo, la frecuencia de mantenimiento de la vía es más baja, gracias al menor deterioro de la vía, con lo que los costes de mantenimiento son inferiores. No obstante, habría que ver si se compensan con los costes iniciales de inversión o no. En este estudio también se comenta este aspecto económico, dando una visión de lo que se conoce hoy en día al respecto.

## **Abstract**

Over the last years, the need to improve the railway infrastructure has appeared in order to face the growing traffic loads that have to be supported. One of the objectives to obtain this improvement is to reduce the stress and pressure on the ballast layer. This is why a new type of sleepers was created by the end of 1990s, the frame sleepers. They consist of two sleepers placed longitudinally under the rails and joined to one another by two sleepers across them, thus adopting a rectangle or double H form. With this layout, a larger support area for the sleepers is gained, the loads are therefore better spread and the pressure level on the ballast and the platform is lower. Moreover, the configuration of the frame sleepers provides the track with a higher stiffness compared to tracks with standard sleepers. Nowadays, some sections in Austrian, Swiss and Italian rail lines are equipped with frame sleepers so as to carry out technical and economic investigation.

In this project, a computing model of a frame-sleeper track is developed and then run considering two representative load cases. Thereby the behaviour of this type of sleepers can be examined, as well as that of the whole track. To do so, certain parameters are analysed, such as the deflection, the bending moment and the pressure acting on the track elements. These results are compared to those obtained for a track with standard sleepers, considering the same load cases. Thus, it is possible to quantify the reduction of the aforementioned parameters in a track with frame sleepers; this decrease was intuitive but had no numerical values so far. In fact, the deflection, the bending moment, the pressures and the uprising wave of the rail are significantly reduced, as well as the length of track affected by these parameters. This means the track is more resilient and supports better the loads, resulting in higher durability.

Furthermore, an attempt is made to adapt the Zimmermann's method, which is used to calculate a track with standard sleepers, to use it in a frame-sleeper track. To do so, the results obtained by means of the computing model are taken as reference and the equations are modified by tweaking the proper parameters, providing error percentages of the adjustment compared to the model values.

The frame sleepers have a higher investment cost than the standard sleepers. This is due, primarily, to the existence of longitudinal sleepers apart from the across ones. Nonetheless, the maintenance frequency is lower, thanks to the fact that the track does not deteriorate as much, and it results in lower maintenance costs. Therefore it would be worth determining whether this is equal to the investment cost or not. The economic aspect is also covered in this study, giving a view of the current knowledge about it.

## **1. Introducción y objetivos**

En los últimos años ha surgido la necesidad de mejorar la infraestructura de vía frente a las crecientes cargas de tráfico. Uno de los objetivos para conseguir esta mejora es reducir los esfuerzos y las tensiones que llegan a la capa de balasto. Por este motivo, a finales de los años 90 del siglo XX apareció un nuevo tipo de traviesas, las traviesas cuadro. Éstas tienen la particularidad de tener dos traviesas situadas longitudinalmente bajo los carriles y que son unidas, a cada extremo, por una traviesa dispuesta transversalmente en el sentido de la vía. De esta manera adopta la forma de un rectángulo o doble H. Con esta disposición se consigue una mayor superficie de apoyo de las traviesas, con lo que las cargas se reparten mejor y el nivel de tensiones que deben soportar el balasto y la plataforma es menor. Además, la propia configuración de las traviesas cuadro confiere a la vía una rigidez más alta que con las traviesas estándares. Actualmente, algunos tramos de prueba en líneas austriacas, suizas e italianas se han equipado con traviesas cuadro, a fin de realizar estudios experimentales, tanto de carácter técnico como económico.

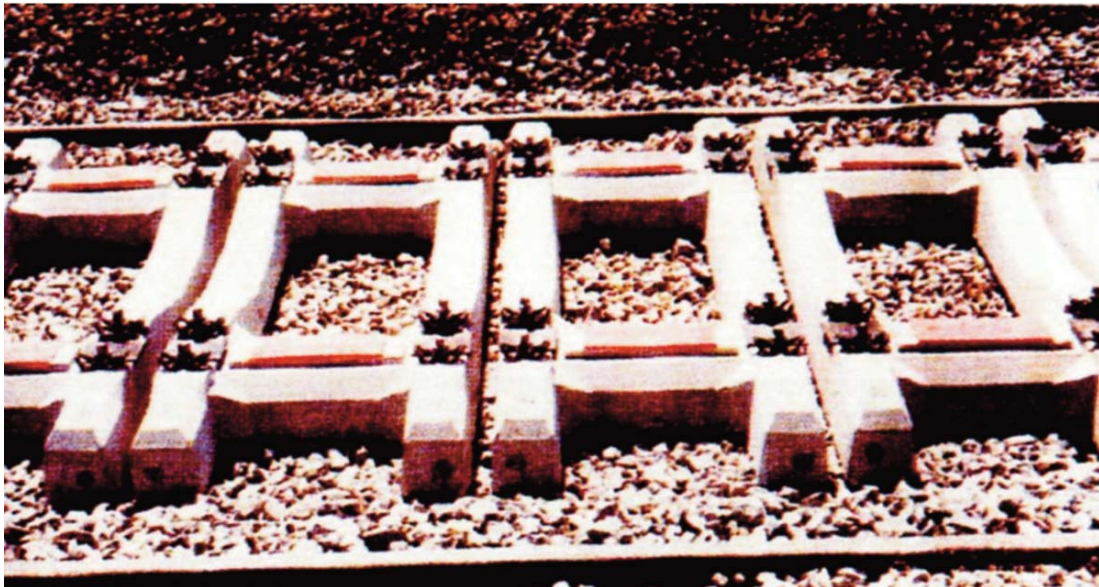
Los objetivos del presente estudio son los siguientes:

- Ofrecer una visión general del estado actual del conocimiento de las traviesas cuadro, explicando en qué consisten, su construcción y mantenimiento y los costes asociados.
- Analizar el comportamiento de una vía con traviesas convencionales frente a esfuerzos verticales, para luego compararlo con el de una vía con traviesas cuadro. Para ello, se partirán de las hipótesis de cálculo conocidas que se emplean para obtener deflexiones, esfuerzos y tensiones en una vía con traviesas estándares.
- Realizar un modelo de cálculo de una vía con traviesas cuadro y ejecutar este modelo con un programa de cálculo apropiado.

- Analizar los resultados obtenidos con el programa de cálculo, valorando varios parámetros, como las deflexiones que se producen en la vía, los esfuerzos y las tensiones.
- Comparar los resultados obtenidos en el cálculo de ambas vías (traviesas cuadro y traviesas convencionales) y establecer relaciones que permitan cuantificar el grado de mejora de un tipo de traviesa respecto del otro.
- Analizar la posible aplicación al cálculo de una vía con traviesas cuadro de las hipótesis empleadas en las traviesas estándares.

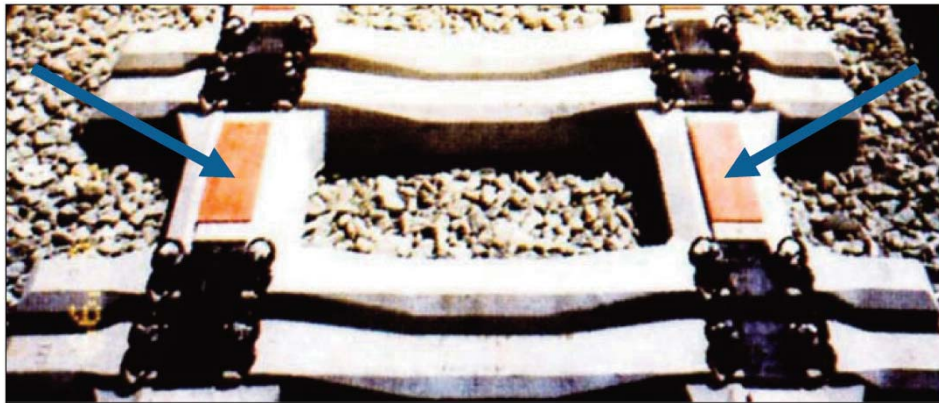
## **2. Estado del conocimiento de las traviesas cuadro**

Las traviesas cuadro tratan de sustituir el tradicional sistema de transmisión de cargas con traviesas cada cierta distancia por un emparrillado, combinando así vigas longitudinales con otras de transversales. El hecho de que también haya traviesas longitudinales implica que la carga se transmite de manera continua en el balasto, reduciendo notablemente el nivel de presiones bajo las traviesas y evitando muchos de los gradientes de presión. En los puntos de intersección de los elementos del cuadro están dispuestos cuatro puntos de fijación de los carriles; entonces cada carril reposa sobre dos apoyos en una traviesa (uno en cada extremo), coincidiendo con los puntos de fijación.



**Figura 1.** Disposición de las traviesas cuadro (Fuente: López Pita (2006))

El carril puede ser sostenido sólo por estos dos puntos de fijación. Pero también podemos asegurarle un apoyo continuo sobre la traviesa. De momento, se han dispuesto entre uno y dos apoyos intermedios elásticos sobre la viga longitudinal de la traviesa cuadro. Estos apoyos elásticos consisten en placas de asiento como las que se ponen en vías convencionales, pero en este caso dispuestas no sólo en los puntos de sujeción del carril, sino también en puntos intermedios. Este aspecto es importante de cara a disminuir las emisiones acústicas debidas a las vibraciones del carril por las circulaciones ferroviarias.



**Figura 2.** Apoyos del carril sobre la traviesa cuadro (Fuente: López Pita (2006))

## 2.1. Construcción y mantenimiento

Hasta ahora, en todos los tramos de ensayo equipados con traviesas cuadro, éstas se han colocado con la ayuda de grúas pórtico que ponen de 9 a 20 traviesas a la vez, según el tipo de grúa utilizada. Para obtener una geometría correcta de la vía, generalmente se utilizan máquinas que combinan la nivelación, la alineación y el bateo de la vía. Sin embargo, dado que las traviesas cuadro presentan un apoyo longitudinal casi continuo bajo el carril, es imposible utilizar los conjuntos de bateo-nivelación estándares, ya que la existencia de las traviesas longitudinales impide el acceso de los bates de la bateadora al balasto que hay debajo de las traviesas. Sin embargo, las máquinas split-head son perfectamente adaptables a esta tarea porque sus bates pueden acometer el trabajo en ambos lados del carril.

El bateo rápido debajo de los pares de traviesas formados por las traviesas transversales permite obtener una nivelación geométrica excelente procediendo de manera habitual. De hecho, el balasto bajo las dos traviesas transversales contiguas se batea como si hubiese traviesas dobles, dotando con una gran apertura a los instrumentos de bateo y procediendo a la alineación lateral, es decir, asegurar que la traviesa esté en su correcta posición y no esté desplazada transversalmente.

La Sociedad BBW (Bahnbau, Wels) equipó una pequeña máquina de conjuntos de bateo situados transversalmente. Esta máquina, que realizó el bateo transversal en los tramos de ensayo de Timelkam y Mels (Suiza), no dispone de ningún dispositivo de nivelación particular. No obstante, la posibilidad que ofrece la bateadora-niveladora transversal de desarrollar la presión total de bateo, incluido en la dirección transversal, permitió una compactación óptima del balasto en esta zona, pero tenía también el inconveniente de influir sobre la nivelación longitudinal. Aunque estos efectos hayan quedado por debajo de las tolerancias admisibles, conviene concluir que esta operación debe ser realizada con una presión de bateo más débil, lo cual ya se ha tomado en consideración sobre el tramo de ensayo en Cetraro (Italia). No obstante, es posible que, en el caso de una amplia utilización de las traviesas cuadro, en un futuro sea posible desarrollar una máquina adaptada para el bateo y nivelación de la vía, tanto en la dirección longitudinal como transversal.

El tratamiento final estándar de una vía normalmente se efectúa con un estabilizador dinámico, que hunde por vibraciones el bastidor de vía en la cama de balasto comprimiéndolo lo mejor posible. En el caso de las traviesas cuadro, esta operación también se realiza de la misma forma y contribuye al buen comportamiento de la vía frente a esfuerzos transversales a largo plazo.

## 2.2. Costes

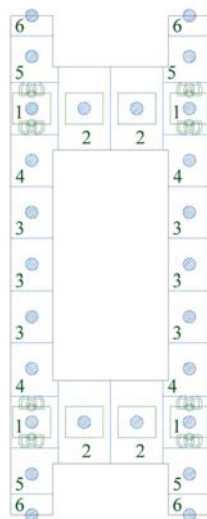
El desarrollo de las traviesas cuadro principalmente pretendía proponer una mejora sustancial a un coste razonable. Si se entiende por “coste” la totalidad de los costes de vida útil, haría falta que el aumento de los costes de inversión fuera compensado, al menos, por la disminución de los costes de mantenimiento. Hoy en día, todavía no es posible prever con toda certeza la evolución de los costes de mantenimiento. Habría que elaborar, pues, una previsión económica a partir de modelos de cálculo.

En términos generales, la ventaja financiera de la vía en traviesas cuadro aumenta con la carga de tráfico. Además, el alargamiento previsible de las duraciones en el uso de este tipo de traviesas aporta notables ventajas económicas en términos de costes de ciclo de vida, aunque los prototipos producidos actualmente son más caros a la hora de comprar que los productos de traviesas estándares. No obstante, las reducciones de costes progresan paralelamente a las cantidades producidas.

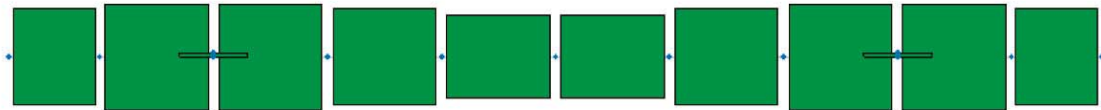
## 3. Modelización de una vía con traviesas cuadro

Para poder comparar el comportamiento mecánico de una vía con traviesas cuadro con el de una vía con traviesas convencionales, se realizó un modelo de un tramo de vía con traviesas cuadro mediante el programa SAP2000. Este programa permite determinar leyes de esfuerzos y deformaciones de una estructura formada por vigas, empleando matrices de rigidez y resolviendo sus correspondientes ecuaciones. En este caso, la estructura consta de un emparrillado compuesto por los carriles y las traviesas cuadro, las cuales tienen apoyos elásticos que simbolizan el lecho de balasto.

Dado que en el programa no es posible proporcionar un apoyo elástico continuo, se elaboró un modelo de apoyo discreto. Entonces, para modelizar el apoyo continuo que ofrece el balasto se dispusieron una serie de apoyos muy seguidos bajo las traviesas, concretamente separados una distancia de 25 cm entre ellos (excepto los apoyos de los extremos de las traviesas transversales, que distan 20 cm de sus apoyos contiguos debido a que la traviesa termina en aquellos puntos). Esta distancia es suficiente para aproximarnos a un apoyo continuo. A su vez, cada apoyo tiene un coeficiente de rigidez obtenido a partir de la capacidad portante asumida para la plataforma y el área de apoyo que ofrecen las traviesas en el apoyo en cuestión. Además, en el modelo la traviesa es un conjunto de vigas consecutivas de longitud muy pequeña, y en cada tramo de traviesa se adopta el valor medio del canto en aquel tramo.



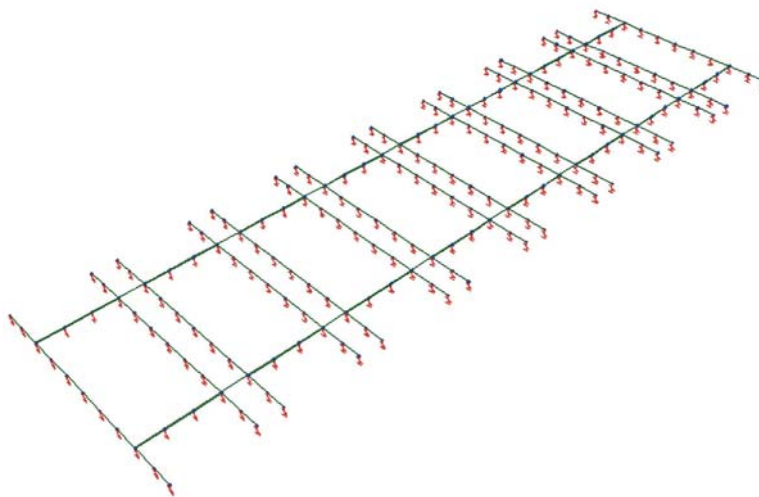
**Figura 3.** Discretización de los apoyos de las traviesas sobre el balasto.



**Figura 3.** Vista en alzado de una traviesa transversal en el modelo de cálculo.

Por su parte, las placas de asiento se modelizaron como una viga de longitud muy corta (7 mm), ya que en el programa no es posible poner un apoyo encima de otra viga. Para que las vigas que simbolizan las placas elásticas de asiento tuvieran el mismo efecto que las mismas, se les dio un módulo de elasticidad correspondiente al valor que suelen tener las placas de asiento. En referencia al carril, el modelo incluye el carril UIC60, el mismo usado en los ejemplos de cálculo de una vía con traviesas convencionales, y se modeliza mediante dos vigas, una para cada hilo de carril, las cuales se dividen en diversos tramos por los puntos de apoyo en las placas de asiento.

El modelo consiste en un tramo de vía con 8 traviesas o, lo que es lo mismo, de 8 metros de longitud, pues cada traviesa tiene 0,95m de longitud y la distancia entre dos traviesas consecutivas es de 0,05m.



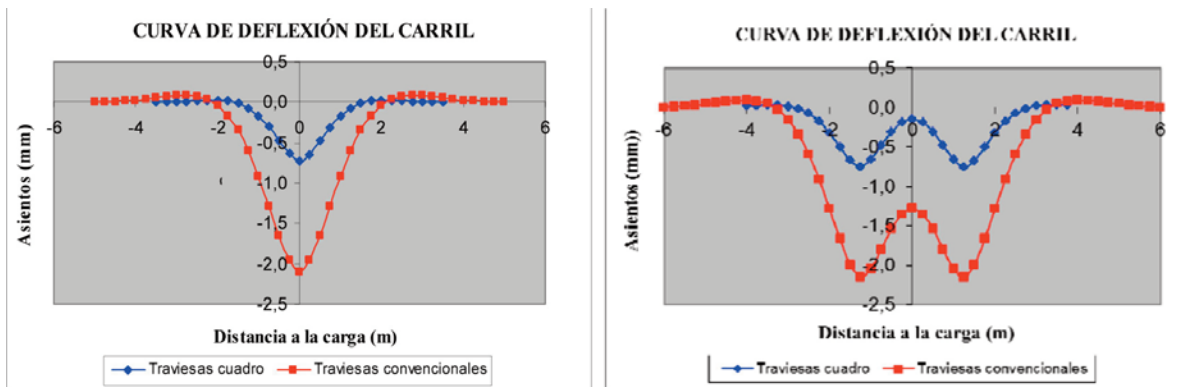
**Figura 4.** Esquema del conjunto de los carriles, las placas de asiento, las traviesas cuadro y sus apoyos sobre el balasto.

#### 4. Análisis comparativo de una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

Una vez ejecutado el modelo de una vía con traviesas cuadro, se comparan los resultados con los obtenidos para una vía con traviesas convencionales, donde se aplicó el método de Zimmermann. Se realizan las comparaciones para los asientos, momentos flectores y tensiones, así como para la onda de levante y la rigidez total de la vía.

#### 4.1. Asientos

La deflexión máxima del carril que se produce en una vía con traviesas cuadro representa el 35% de la que se produce en una vía con traviesas convencionales (0,73mm y 2,10mm, respectivamente), considerando los mismos casos de carga. Por otra parte, si se consideran todos los movimientos descendentes que sufre el carril, en el caso de traviesas convencionales la longitud de vía afectada por dichos desplazamientos es de 4,22 metros, mientras que en traviesas cuadro es de 3,25 metros. Por tanto, en vías con traviesas cuadro, prácticamente se reduce 1 metro la longitud de vía afectada por los asientos.



**Figura 5.** Curvas de deflexiones de una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales bajo la acción de la carga de un eje y de un bogie de dos ejes.

En el caso de carga de un bogie de dos ejes, la relación de deflexiones es la misma, y la reducción de la longitud afectada por los asientos también es de 1 metro.

**Tabla 1.** Valores máximos de los asientos en una vía con traviesas convencionales y una vía con traviesas cuadro y relación entre ellos.

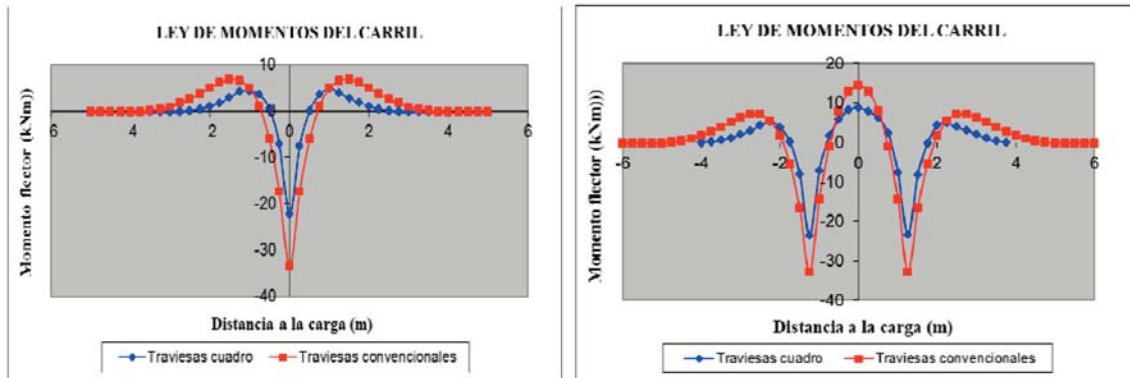
Asientos máximos del carril	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)	Carga dinámica de un bogie (2 ejes, 160 kN/rueda)
$w_{trav.convencionales} (mm)$	2,10	2,15
$w_{trav.cuadro} (mm)$	0,73	0,76
$\frac{w_{trav.cuadro}}{w_{trav.convencionales}}$	0,35	0,35

#### 4.2. Momentos flectores

En cuanto a los momentos flectores, en el punto de aplicación de la carga el momento positivo es máximo y tiene un valor de 33,56 kNm con traviesas convencionales, mientras que el valor es de 22,16 kNm con



traviesas cuadro. Esto significa que la relación entre ambos valores es del 66%. Por su parte, la relación entre momentos flectores negativos de una vía con traviesas cuadro y una vía convencional es del 72%. Además, la longitud de vía afectada por los momentos se reduce en 1,75m en una vía con traviesas cuadro (5,25m frente a 7m).



**Figura 6.** Leyes de momentos flectores de una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales bajo la acción de la carga de un eje y de un bogie de dos ejes (Fuente: autor)

En el caso de carga de un bogie de dos ejes, los momentos flectores positivos máximos se reducen del 32,99 kNm a 23,68 kNm, con lo que el valor en traviesas cuadro representa el 72% del obtenido en traviesas convencionales. A su vez, la relación entre momentos máximos negativos es del 61%. La longitud de vía afectada también se reduce en 1,75m.

**Tabla 6.3** Valores máximos de los momentos flectores en una vía con traviesas convencionales y una vía con traviesas cuadro y relación entre ellos.

Momentos flectores máximos del carril	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)	Carga dinámica de un bogie (2 ejes, 160 kN/rueda)
$M_{trav.convencionales}^+ (kNm)$	33,56	32,99
$M_{trav.cuadro}^+ (kNm)$	22,16	23,68
$\frac{M_{trav.cuadro}^+}{M_{trav.convencionales}^+}$	0,66	0,72
$M_{trav.convencionales}^- (kNm)$	6,90	14,38
$M_{trav.cuadro}^- (kNm)$	4,95	8,78
$\frac{M_{trav.cuadro}^-}{M_{trav.convencionales}^-}$	0,72	0,61

### 4.3. Tensiones

En referencia a las tensiones, para una vía con traviesas convencionales, el valor de la tensión vertical que llega a la capa de balasto es de 0,210 MPa, mientras que en una vía con traviesas cuadro el valor máximo es de 0,055 MPa. Sin embargo, en este último caso el valor máximo no se alcanza en el punto de aplicación de la carga, sino en los extremos de las traviesas transversales. En las traviesas longitudinales, bajo la carga, la tensión es de 0,051 MPa, por tanto se toma este valor por tratarse del mismo punto, lo que es mejor para comparar. Entonces, la relación entre tensiones en los dos tipos de vía es del 24%. En el caso de carga de un bogie la relación es prácticamente la misma, un 25%.

**Tabla 6.5** Valores máximos de las tensiones en los puntos de aplicación de las cargas y relación de tensiones entre una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

Tensiones máximas (puntos de aplicación de las cargas)	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)	Carga dinámica de un bogie (2 ejes, 160 kN/rueda)
$\sigma_{trav.convencionales}$	0,210	0,215
$\sigma_{trav.cuadro}$	0,051	0,053
$\frac{\sigma_{trav.cuadro}}{\sigma_{trav.convencionales}}$	0,24	0,25

### 4.4. Onda de levante

El levantamiento máximo en una vía con traviesas cuadro representa el 27% del que se produce en una vía con traviesas convencionales (0,024mm frente a 0,090mm), para el caso de una carga de un eje. Además, este levantamiento se sitúa más cerca de la carga en traviesas cuadro, ya que la longitud de vía afectada por los asientos es menor. Entonces, se puede constatar que, en una vía con traviesas cuadro, la onda de levante está mucho más amortiguada que en una vía con traviesas convencionales, y los levantamientos se reducen casi a la cuarta parte. Además, la distancia que hay entre el punto donde se da el levantamiento máximo y el punto de ubicación de la carga se reduce de 2,8 metros en vías con traviesas convencionales a 2,0 metros en vías con traviesas cuadro.

**Tabla 6.6** Valores máximos de los levantamientos y relación de los mismos entre una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

	Carga dinámica de un eje (150 kN/rueda)
$w_{levante,trav.convencionales} (mm)$	0,090
$w_{levante,trav.cuadro} (mm)$	0,024
$\frac{w_{levante,trav.cuadro}}{w_{levante,trav.convencionales}}$	0,27

#### 4.5. Rigidez total de la vía

En una vía con traviesas convencionales la rigidez total obtenida era de 71,4 kN/mm, mientras que en una vía con traviesas cuadro era de 205,5 kN/mm. Por lo tanto, el incremento es del 188%.

**Tabla 1.** Valores de la rigidez total de la vía en una vía con traviesas cuadro y una vía con traviesas convencionales

	Vía con traviesas convencionales	Vía con traviesas cuadro
Rigidez total de la vía (kN/mm)	71,4	205,5

#### 5. Adaptación del método de Zimmermann para el cálculo de vías con traviesas cuadro

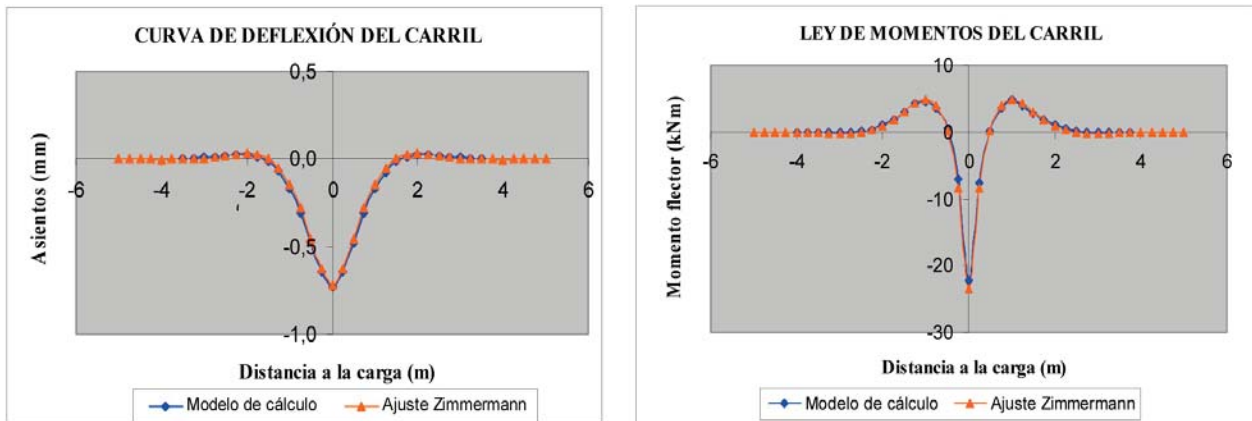
Una vez obtenidos los resultados del cálculo del modelo de una vía con traviesas cuadro, se intenta realizar una adaptación del método de Zimmermann, empleado para el cálculo de una vía con traviesas convencionales, al cálculo de una vía con traviesas cuadro. Las fórmulas de Zimmermann utilizadas para calcular asientos y momentos flectores en una vía con traviesas convencionales son las siguientes:

$$w(x) = \frac{Q}{2k} \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \cdot \eta(x) \qquad M(x) = \frac{Q}{4} \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \cdot \mu(x)$$

Como se ha podido observar en los gráficos de las curvas de deflexiones y momentos flectores obtenidas con el modelo para el caso de una vía con traviesas cuadro, éstas tienen prácticamente la misma forma que en el caso de una vía con traviesas convencionales. Por lo tanto, las expresiones  $\eta(x)$  y  $\mu(x)$  que son las que determinan la forma de las curvas, deben permanecer iguales. Los parámetros E, I, correspondientes al módulo de elasticidad y el momento de inercia del carril, tampoco pueden cambiarse, ya que son las propiedades intrínsecas del carril. En consecuencia, el único parámetro que puede modificarse para llegar a obtener las mismas curvas que las obtenidas en el modelo de vía con traviesas cuadro es la rigidez por metro lineal de los distintos apoyos. Si se realizan diversos tanteos, probando distintos valores de k, al final se obtiene un valor con el cual las curvas de Zimmermann se ajustan muy bien a las curvas obtenidas con el modelo de cálculo. Este valor es el siguiente:

$$k = 1,67 \cdot 10^8 \text{ N / m / m} = 167 \text{ kN / mm / m}$$

En las siguientes ilustraciones se puede apreciar cómo, efectivamente, se ha logrado un buen ajuste de las curvas de Zimmermann en relación a las curvas del modelo.



**Figura 7.** Curvas de deflexiones y ley de momentos flectores obtenidas mediante el modelo de cálculo y con el ajuste de las fórmulas de Zimmermann bajo la acción de la carga de un eje Esquema del conjunto de los carriles, las placas de asiento, las traviesas cuadro y sus apoyos sobre el balasto.

Efectivamente, sólo hay un 1% de diferencia entre el valor calculado y el valor ajustado en el caso de las deflexiones máximas, mientras que la diferencia es del 6% para los momentos flectores máximos.

Por otro lado, la rigidez por unidad de longitud es un parámetro que depende del coeficiente de balasto, del área de apoyo de las traviesas y de la distancia entre apoyos. Entonces, si el coeficiente de Winkler es un parámetro variable en función del estado del balasto y la plataforma, la relación entre el área de apoyo de las traviesas y la distancia entre apoyos es la siguiente.

$$\frac{F}{d} = \frac{k}{c} = \frac{1,67 \cdot 10^8 \text{ N/m/m}}{10^8 \text{ N/m}^3} = 1,67 \text{ m}$$

Por lo tanto, para una vía con traviesas cuadro se puede escribir la rigidez media de los apoyos por unidad de longitud en función del coeficiente de balasto, de la siguiente forma:

$$k = 1,67 \cdot c$$

De esta manera se puede aplicar el método de Zimmermann en vías con traviesas cuadro modificando únicamente el valor de la rigidez media de los apoyos por unidad de longitud. Los resultados obtenidos se aproximan satisfactoriamente a los obtenidos con el modelo de cálculo, luego las fórmulas de Zimmermann son perfectamente aplicables en caso de que no se disponga de ningún modelo, pero con la restricción de que solamente se pueden obtener los asientos y momentos en el carril, y no en las traviesas.

## 6. Conclusiones

Una vez realizado el estudio de una vía con traviesas cuadro analizando su comportamiento mecánico frente a esfuerzos verticales, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- En general, una vía con este tipo de traviesas admite una capacidad más grande de carga que una vía con traviesas convencionales, al reducirse los asientos, esfuerzos y tensiones. Asimismo, ofrece una mejor estabilidad al ser el conjunto de la vía más rígido. Estas ventajas resultan del aumento

sustancial de la superficie de contacto traviesa-balasto. Como consecuencia, disminuye la velocidad de degradación de la geometría de la vía, lo que implica una reducción sustancial de las necesidades de mantenimiento. Las traviesas cuadro podrán ofrecer de ahora en adelante una alternativa para la realización de una vía sobre balasto reforzada capaz de acoger cargas por eje y velocidades más elevadas.

- El alargamiento previsible de las duraciones en el uso de este tipo de traviesas aporta notables ventajas económicas en términos de costes de ciclo de vida, aunque los prototipos producidos actualmente son más caros que los productos de traviesas estándares.

- En una vía con traviesas cuadro los elementos sometidos a flexión son el carril y la parte longitudinal de las traviesas, a diferencia de una vía con traviesas convencionales, donde el carril es el único elemento considerado a efectos de cálculo de esfuerzos y deflexiones.

- Tanto para la aplicación de carga de un eje como de un bogie, el asiento máximo del carril en una vía con traviesas cuadro representa el 35% del valor del asiento en una vía con traviesas convencionales. Es decir, los asientos se reducen un 65%. La longitud de vía afectada por los asientos en una vía con traviesas cuadro es 1 metro inferior respecto de una vía equipada con traviesas convencionales.

- El momento flector positivo máximo del carril en una vía con traviesas cuadro representa el 66% del valor obtenido con traviesas convencionales para el caso de carga de un eje, lo cual significa una reducción del 34%. Si se considera el momento flector negativo máximo en valor absoluto, la relación entre ambos valores es del 72%, es decir, la reducción es del 28%. Los valores para el caso de carga un bogie de dos ejes son similares. Además, la longitud de vía sometida a las leyes de momentos flectores disminuye 1,75 metros con traviesas cuadro respecto de las traviesas estándares.

- Las tensiones máximas que llegan a la capa de balasto en una vía con traviesas cuadro se reducen a la cuarta parte en relación con una vía con traviesas convencionales. En concreto, las tensiones disminuyen de 0,210 a 0,051 MPa para el caso analizado de carga de un eje de 150 kN por rueda, mientras que para la carga de un bogie de dos ejes con 160 kN por rueda las tensiones pasan de 0,215 a 0,053 MPa.

- En una vía con traviesas cuadro, la onda de levante está mucho más amortiguada que en una vía con traviesas convencionales, y los levantamientos se reducen casi a la cuarta parte. Además, la distancia que hay entre el punto donde se da el levantamiento máximo y el punto de ubicación de la carga se reduce de 2,8 metros en vías con traviesas convencionales a 2,0 metros en vías con traviesas cuadro.

- La rigidez total de una vía con traviesas cuadro es notablemente mayor que la de una vía con traviesas convencionales. En el primer tipo de vía, la rigidez es de 205,5 kN/mm, mientras que en el segundo es de 71,4 kN/mm. Por lo tanto, el incremento es del 188%.

- En caso de no disponer de ningún modelo de cálculo de una vía con traviesas cuadro se pueden emplear las fórmulas de Zimmermann modificando únicamente el valor de la rigidez media de los apoyos por unidad de longitud, adoptando  $k = 1,67 \cdot c$  ( $c$  debe estar en N/m<sup>3</sup> y  $k$  en N/m/m). De esta manera se le proporciona a los apoyos una mayor rigidez. A pesar de que el modelo de cálculo se aproxima mejor a la realidad, el método de Zimmermann adaptado a vías con traviesas cuadro se ajusta muy bien al modelo, siendo las diferencias en los parámetros calculados inferiores al 6%.

## 7. Referencias bibliográficas

- [1] BACHMANN, H. et al. (2003). *Wide-Sleeper Track-Gains Official Approval*. International Railway Journal, May, 45-47.
- [2] BALUCH, H. (1979). *Evaluations of the durability of rail fastenings to sleepers using a model of extremes*. Rail International / Schienen der Welt.
- [3] BOS, J.A. (1999). *Low Noise Track*. Rail International / Schienen der Welt. Vol.30, nº1, pp. 17-22.
- [4] BOS, J.A. *Deck Track: Foundation for the railways of the future*. Holland Rail Consult.
- [5] CARRASCAL, I. A. (et. al.) (2005). *Comportamiento dinámico de placas de asiento de sujeción de vía de ferrocarril*. Vol.22. “Anales de mecánica de la fractura”. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria.
- [6] CEN: European Committee for Standardization. (1998). *Railway applications – Track – Concrete sleepers and bearers prEN13146*. Draft version.
- [7] CEN: European Committee for Standardization. (1999). *Railway applications – Track – Performance requirements for fastenings systems prEN13481*. Draft version.
- [8] CICCPC: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (1991). *Symposium internacional de traviesas ferroviarias prefabricadas de hormigón*. Monografías
- [9] COLLARDEY, B. (1998). *L’itinéraire du Semmering aura son tunnel de base*. Rail Passion. Août-Septembre, nº 22, 30-32.
- [10] *Cost and Risk Optimisation of Track Maintenance and Renewal*. Track MR 2001 Conference, London, UK. 2001.
- [11] DEAN, F.E., et al. (1982). *Effect of the tie pad stiffness on the impact loading of concrete ties*. Heavy Haul Conference.
- [12] DIETERMAN, H. and METRIKINE, A.V. (1997). *Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load*. European Journal of Mechanics A/Solids. Volume 16, pp. 295-306.
- [13] EBERSOHN W. and RUPPERT S.C. *Implementing a railway infrastructure maintenance system*.
- [14] ESVELD, C. (2001). *Modern Railway Track*. Second Edition. MRT Productions. ISBN 90-800324-3-3. TU Delft.
- [15] FORTÍN, J.P. (1982). *La déformée dynamique de la voie*. Revue Générale des Chemins de Fer, Février, 93-102.
- [16] FURUKAWA, A. (2004). *A method to predict track geometry-induced vertical vehicle motion*. QR of RTRI, Vol. 45, nº 3, 142-148.

- [17] GETZNER. *Designed Elasticity for Railway Superstructures*.
- [18] GUIDAT, A. (2005). *La maintenance du rail: une nécessité*. Revue Générale des Chemins de Fer, novembre, 17-33.
- [19] HÉTENYI, M. (1971). *Beams on elastic foundations*. University of Michigan.
- [20] KERR, A.D. (1975). *RailTrack Mechanics and Technology* (Proceedings of a Symposium Held at Princetown University). ISBN: 0-08-021923-3.
- [21] KERR, A.D. (2003). *Fundamentals of Railway Track Engineering*. Simmons-Boardman Books, ISBN 0-911382-40-2.
- [22] LEYKAUF, G. et al. (2004). *Investigaciones y experiencias con traviesas provistas de almohadillas*. (Traducción española de la F. Ferrocarriles del original alemán). Eisenbahn Ingenieur, 6.
- [23] LÓPEZ PITA, A. y OTEO C. (1977). *Análisis de la deformabilidad vertical de una vía férrea mediante el método de elementos finitos*. Revista AIT, Abril, 33-40.
- [24] LÓPEZ PITA, A. (1984). *Parámetros fundamentales en el asiento de la vía: su influencia relativa*. Revista AIT, enero/febrero, 40-57.
- [25] LÓPEZ PITA, A. (1984). *Interacción vía-vehículo*. Curso de Ferrocarriles. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Tomo VIII. ISBN 84-7493-09.
- [26] LÓPEZ PITA, A. (2006). *Infraestructuras ferroviarias*. Ediciones UPC. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [27] MULLER, F.H. et al. (2001). *Traviesas de hormigón con suela elástica. Experiencias y conocimientos con un nuevo componente*. ETR, marzo, 90-98 (Traducción española TE 004/05).
- [28] RIESSBERGER, K. (1997). *New Transition Geometry*. In: "High speed track course". PAO Delft. The Netherlands.
- [29] RIESSBERGER, K. (2000). *Frame sleepers adapt ballasted track to modern needs*. Railway Gazette International 2.
- [30] RIESSBERGER, K. (2000). *La voie sur traverses-cadres: une voie sur ballast innovante*. Eisenbahn Technische Rundschau.
- [31] RIESSBERGER, K. (2000). *Das Rahmen-Schwellen-Gleis*. ÖVG-Oberbaufachtagung Salzburg, ÖVG-Spezial Volume 46.
- [32] RIESSBERGER, K., et al. (2000). *La voie sur traverses-cadres: état de développement*. ZEV-DET Glassers Annalen 6.
- [33] RIESBERGER, K. (2001). *Frame sleeper upgrade ballast track*. WCRR Cologne.

[34] RIESSBERGER, K. (2002). *Frame-sleeper track promises a longer life*. Railway Gazette International. July, 369-372.

[35] RIESSBERGER, K. (2003). *Les traverses-cadres: un perfectionnement de la voie sur ballast*. Rail International. Vol. 34. Décembre, 10-19.

[36] RIESSBERGER, K. (2005). *The project "Frame Sleeper Track"*. ZEV Rail Glassers Annals, 56-60. February. Special edition ÖVG.

[37] ZIMMERMANN, H. (1941). *Die Berechnung des Eisenbahnberbaues*. 3<sup>a</sup> edición. Wilhelm Ernst und Sohn.

[38] UNBEHAUN, O. (2000). *Breitschwellengleis – erset Testergebnisse*. Eisenbahningenieur.

[39] WAKUI, H. and MATSUMOTO, N. (1999). *La traverse-échelle posée sur ballast et ses perspectives*. ETR 48.