

**Investigaciones y Estudios**



**DISEÑO PARA MEJORA DE LA RESISTENCIA DE  
ALMAS ESBELTAS DURANTE EL EMPUJE DE  
GRANDES VIADUCTOS MIXTOS**

Tomás **RIPA ALONSO**<sup>1</sup>

Javier **PASCUAL SANTOS**<sup>2</sup>

Francisco **MILLANES MATO**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, IDEAM S.A.

<sup>2</sup> Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, IDEAM S.A.

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, IDEAM S.A.

## RESUMEN

En el presente artículo se describe el diseño de nervio inferior de rigidez, actuando conjuntamente con la adecuada modulación de rigidizadores verticales, que se ha llevado a cabo en el viaducto de alta velocidad sobre el Arroyo de las Piedras para la mejora sustancial de la resistencia del alma frente a cargas concentradas en su plano, tipo "patch loading", en fase de empuje. Se propone un método de cálculo para la cuantificación de la resistencia, que pone además de manifiesto ciertas inconsistencias normativas referentes a la limitación de la longitud de alma resistente.

## PALABRAS CLAVE

Puentes empujados, Patch Loading, resistencia plástica, abolladura

## 1. INTRODUCCIÓN

La construcción del tablero mediante empuje es un método constructivo ampliamente utilizado tanto en tableros de hormigón como metálicos y mixtos. Es precisamente en estos últimos en los que empuje se demuestra más ventajoso, debido al reducido peso y gran flexibilidad del tablero. En este caso, sin embargo, un aspecto crítico que debe ser tenido en cuenta es la introducción localizada de la reacción en los patines de empuje directamente sobre el alma no rigidizada. Este tipo de aplicación localizada de carga en el plano del alma es generalmente conocido como "patch loading".

Por tanto, resulta de gran importancia evaluar la resistencia frente a cargas localizadas de la forma más afinada posible, dado que el diseño completo del puente, en particular los espesores de alma y la separación entre rigidizadores verticales, puede verse condicionado por la fase de empuje. En este artículo se presenta el diseño llevado a cabo en el Viaducto empujado sobre el Arroyo de las Piedras [1], en la línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga, tendente a la mejora de la resistencia frente a las cargas localizadas en el plano del alma en la fase de empuje mediante la materialización de un nervio inferior de rigidez, capaz de mejorar el reparto longitudinal de la carga en el alma. Se presenta asimismo una metodología de cálculo para la cuantificación de la resistencia, basada en una adaptación de la formulación recogida en el EC-3 [2] y en los

estudios de Lagerqvist [3], y una posterior validación de los resultados con análisis no lineales por elementos finitos. Se muestra en el artículo que la eficiencia del nervio inferior de rigidez está íntimamente relacionada con la separación de rigidizadores adoptada, y se destaca la inconsistencia normativa referente a la limitación de la longitud de alma resistente a la separación entre rigidizadores, lo que conduce a resultados excesivamente conservadores.

## 2. MECANISMO RESISTENTE

Cuando una carga, contenida en el plano del alma, se aplica localizadamente en el ala se produce en aquella una distribución de tensiones no uniforme junto con una flexión en el ala cargada (fig. 1). A medida que la carga se incrementa, la flexión en el ala progresa hasta que se forman cuatro rótulas plásticas, a la vez que las zonas más comprimidas del alma alcanzan tensiones verticales de plastificación que se extienden gradualmente en sentido longitudinal, de forma que la ley no uniforme de tensiones puede idealmente aproximarse a una ley constante de tensiones de límite elástico extendidas a la longitud entre las rótulas plásticas exteriores. En esta situación de colapso la viga ha alcanzado su resistencia máxima frente a cargas localizadas, que designamos como *resistencia plástica*.

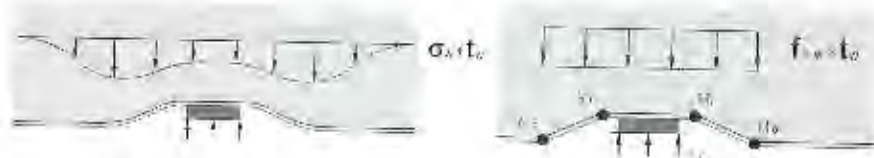


Figura 1.- Evolución hasta colapso de las tensiones en el alma debidas a carga localizada.

Solo las almas muy compactas, sin embargo, alcanzan resistencias próximas a la plástica, dado que la mayoría experimenta previamente algún tipo de inestabilidad lateral que reduce la resistencia frente a cargas localizadas, que puede afectar al canto completo en caso de piezas de esbeltez moderada o únicamente a una zona próxima a la cargada en caso de piezas de gran esbeltez.

## 3. DISEÑO PARA LA MEJORA DE LA RESISTENCIA

La resistencia frente a cargas localizadas puede mejorarse, de una manera que podríamos calificar de "convencional", aumentando el espesor de alma o reduciendo significativamente la separación entre rigidizadores verticales, si bien estas actuaciones pueden tener una repercusión notable en el coste total de acero del tablero. En el viaducto del Arroyo de las Piedras, por el contrario, se diseña un nervio inferior de rigidez, constituido por una célula metálica y un zuncho lateral de hormigón, ejecutado contra el alma, enlazando las prelosas inferiores en la zona de flexión positiva e incorporado a la losa de fondo en la zona de doble acción mixta (fig. 2).

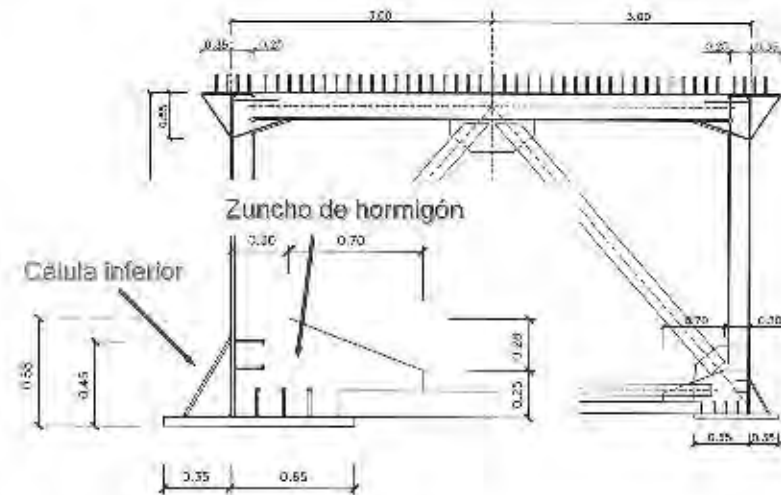


Figura 2.- Sección transversal del viaducto sobre el Arroyo de las Piedras. Detalle de nervio inferior de rigidez.

Desde un punto de vista conceptual, tal diseño favorece la introducción de la carga en el ala, dado que su flexión transversal se ve ayudada por la célula y zuncho. En segundo lugar, la carga crítica de abolladura del alma se ve aumentada, al ser menor la altura libre del panel y arrancar con una rotación transversal impedida en su unión con el nervio, por lo que la reducción resistente por inestabilidades transversales será menor. En tercer lugar, la dispersión longitudinal de la carga en el alma o longitud de alma resistente se incrementa con la rigidez del nervio, rigidez que es además significativamente

superior a la que se alcanzaría aumentando exclusivamente el espesor del ala, dentro del rango de los espesores requeridos por flexión, en secciones doble T. Este incremento sustancial de rigidez del nervio potencia un mecanismo resistente complementario, consistente en la flexión longitudinal tipo viga del nervio inferior de rigidez, capaz de flectar entre rigidizadores verticales, aliviando con ello la carga directamente transmitida al alma. Los rigidizadores verticales se constituyen así en los puntos de apoyo de la luz a salvar por este mecanismo de flexión del nervio, con una contribución relevante a la resistencia a cargas localizadas, insuficientemente contemplada en las normativas y para la que las formulaciones vigentes presentan inconsistencias reseñables.

#### 4. METODOLOGÍA PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA MEJORA RESISTENTE

La metodología empleada para evaluar la resistencia a cargas localizadas considerando el nervio inferior de rigidez está basada en la formulación vigente del EC-3, basada a su vez en el método propuesto por Lagerqvist, y puede consultarse en mayor detalle en [4]. En el EC-3 la formulación se presenta particularizada al caso de vigas doble T, mientras que en el desarrollo siguiente expondremos los desarrollos básicos de la misma que permiten su generalización al caso de nervio longitudinal de rigidez planteado.

Atendiendo a los mecanismos resistentes ya presentados, la resistencia se calcula como la resistencia plástica afectada por un factor de resistencia, función de la esbeltez del ama, que tiene en cuenta la reducción de resistencia debida a la inestabilidad lateral del alma.

$$F_{\alpha} = F_y \cdot \chi(\lambda) \quad (1)$$

La resistencia plástica se calcula con el modelo de colapso de cuatro rótulas plásticas en el ala, que se esquematiza en la fig. 3. La longitud de alma resistente  $l_v$  se obtiene aplicando el principio de los trabajos virtuales: dando un desplazamiento arbitrario  $\delta$  se calcula el trabajo externo, función de la carga aplicada y la tensión de plastificación a lo largo de la longitud de alma resistente. El trabajo interno, por su parte, se obtiene como el producto del momento último plástico de las rótulas interna  $M_i$  (a flexión negativo) y externa  $M_o$  (a flexión positiva) por la rotación que experimentan. Igualando el trabajo

interno y minimizando respecto a  $s_y$  se obtiene la longitud de alma resistente y, con ello, la resistencia plástica acorde a la expresión (2). Como vemos, la resistencia plástica es lineal con el espesor del alma y tensión de plastificación, y se incrementa con la longitud de introducción de la carga y la rigidez del ala o nervio directamente cargado, dada ésta por sus momentos últimos plásticos.

$$F_y = f_{\alpha} \cdot t_w \cdot \left( s_y + 2 \cdot t_f + 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (M_i + M_o)}{f_{yk} \cdot t_w}} \right) \quad (2)$$

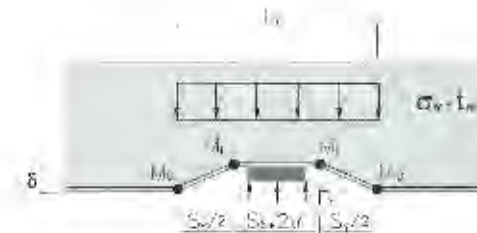


Figura 3.- Modelo de colapso de cuatro rótulas plásticas

La función de resistencia, por su parte, es un factor reductor debido a la inestabilidad transversal del alma. Es, por tanto, una función decreciente con la esbeltez del panel, que se define como la raíz cuadrada del cociente entre la resistencia plástica y la carga crítica de abolladura. Elementos más esbeltos tienen cargas críticas de abolladura más bajas y consecuentemente parámetros de esbeltez mayores. Las funciones de resistencia se calibran empíricamente; las siguientes expresiones son las funciones sugeridas por EC-3 y la formulación de Lagerqvist, cuya única diferencia es que EC-3 adopta una expresión que conduce a valores ligeramente más conservadores:

$$\begin{aligned} \text{Lagerqvist: } \chi(\lambda) &= 0,06 - \frac{0,47}{\lambda} \leq 1 \\ \text{EC-3: } \chi(\lambda) &= \frac{0,50}{\lambda} \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

con  $\lambda = \sqrt{F_y / F_{\alpha}}$

Este modelo de cálculo es el empleado para cuantificar la mejora en la resistencia obtenida con la aportación conjunta de los rigidizadores verticales y

el nervio longitudinal de rigidez. La resistencia plástica se calcula con la expresión (2), considerando como momento último plástico el de la sección formada por el ala, célula, nervio de hormigón y altura de alma hasta borde del nervio, que puede fácilmente obtenerse con un programa de cálculo seccional. En segundo lugar, la esbeltez y función de resistencia se calculan a partir de una carga crítica de abolladura obtenida con un cálculo de pandeo lineal con un modelo de E.F. [4], que se esquematiza en la fig. 4. Los cálculos se realizan para una separación de rigidizadores verticales variable entre 4 y 8 m., variando asimismo el espesor de la célula entre 15 y 35 mm., con objeto de cuantificar la incidencia de la relación entre la rigidez del nervio y la separación entre rigidizadores verticales.

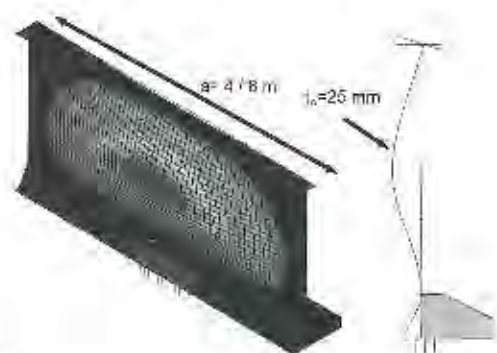


Figura 4.- Modelo de EF para cálculo de la carga crítica de abolladura

En primer lugar, representamos la resistencia total frente al momento último plástico del nervio (fig 5a). Los primeros valores, correspondientes a un momento último prácticamente nulo, corresponden al caso de la viga doble T simple. Observamos que la resistencia mejora a medida que se reduce la separación entre rigidizadores verticales de 8 a 4 m., a la vez que aumenta con la rigidez del nervio. El incremento de rigidez del nervio aumenta la longitud de dispersión de la carga en el alma y consecuentemente la resistencia plástica, como queda de manifiesto en la expresión (2). Reducir la separación entre rigidizadores verticales, por su parte, restringe la tendencia a la inestabilidad transversal del alma, contribuyendo así al incremento de resistencia. Resulta también interesante representar la mejora porcentual de resistencia para cada rigidez del nervio frente al caso de viga doble T simple (fig. 5b), de donde observamos que la mejora media oscila en torno al 65%, tanto si los

rigidizadores se separan 8 ó 4 m. Queda, pues, de manifiesto la mejora significativa en la resistencia a cargas localizadas que aporta el nervio longitudinal, sin que una mayor separación de rigidizadores reste eficacia al mecanismo de reparto de carga por flexión del nervio entre rigidizadores.

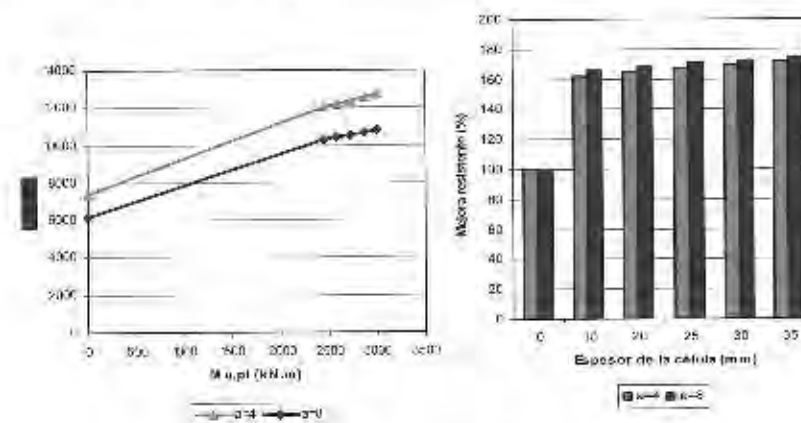


Figura 5a.- Incremento de resistencia en función de la rigidez del nervio

Figura 5b.- Mejora porcentual de resistencia.

## 5. ANÁLISIS CON E.F. NO LINEALES

Se ha llevado a cabo asimismo un análisis con elementos finitos no lineales, considerando tanto la no linealidad constitutiva como geométrica, con objeto de contrastar los resultados de la formulación analítica y de profundizar en el mecanismo resistente de flexión del nervio entre rigidizadores verticales y, en particular, en el análisis de la idoneidad de la limitación expresa del EC-3 de la longitud de alma resistente, que no puede ser mayor que la separación entre rigidizadores. En los análisis realizados se varía la separación entre rigidizadores en 8, 4 y 2 m. Para cada caso se realizan dos cálculos, uno con el ala inferior aislada y un segundo con célula metálica simétrica de 15 mm y resultados obtenidos se comparan con los obtenidos con el modelo analítico descrito en el epígrafe anterior (fig 6).

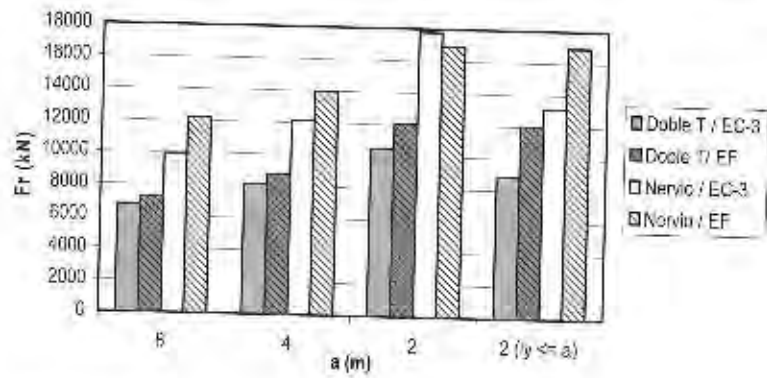


Figura 6.- Comparación de resistencias en viga doble T y con nervio

En la primera serie de resultados del diagrama de barras corresponde a la resistencia total de la viga doble T calculada utilizando el modelo analítico. Se observa que la resistencia se incrementa a medida que se reduce la separación entre rigidizadores desde 8 hasta 2 m. La tercera columna es la resistencia calculada para una separación de rigidizadores de 2 m. sin limitar la longitud de alma resistente, mientras que la cuarta columna aplica la limitación indicada por EC-3, dado que la longitud de alma resistente resulta de 2,7 m., superior a la separación entre rigidizadores. Observamos, no obstante, que la resistencia total limitando la resistencia plástica es solo ligeramente inferior a la total. Cuando calculamos la resistencia con el modelo de E.F. no lineal (segunda serie de resultados) obtenemos una resistencia ligeramente superior a la del modelo analítico; la resistencia para una separación de rigidizadores de 2 m. no evidencia ninguna reducción y es más próxima a la evaluada sin limitar la resistencia plástica.

Si ahora se incluye el nervio longitudinal y se repiten los cálculos con el modelo analítico, se manifiesta el incremento de resistencia ya reseñado, que resulta proporcionalmente más significativo cuando los rigidizadores se disponen a 2 m., salvo si aplicamos la limitación de la resistencia plástica, en cuyo caso se obtiene una resistencia muy inferior, apenas superior a la de la separación de 4 m. Finalmente, con un análisis no lineal completo (cuarta serie de resultados) observamos que la resistencia aumenta como predice el modelo analítico y no parece ser adecuada la limitación de resistencia plástica.

Analizando en detalle los resultados del análisis por E.F., en la fig. 7 se muestran las tensiones verticales transmitidas al alma en el caso de ala aislada y de nervio inferior, para la separación de rigidizadores de 8 y 2 m. En el primer caso se observa una longitud de alma comprimida de 2,65 m, prácticamente coincidente con la longitud calculada analíticamente. Cuando los rigidizadores se aproximan a 2 m. la zona comprimida se limita al panel entre rigidizadores, congruente con la limitación de la longitud de alma resistente.

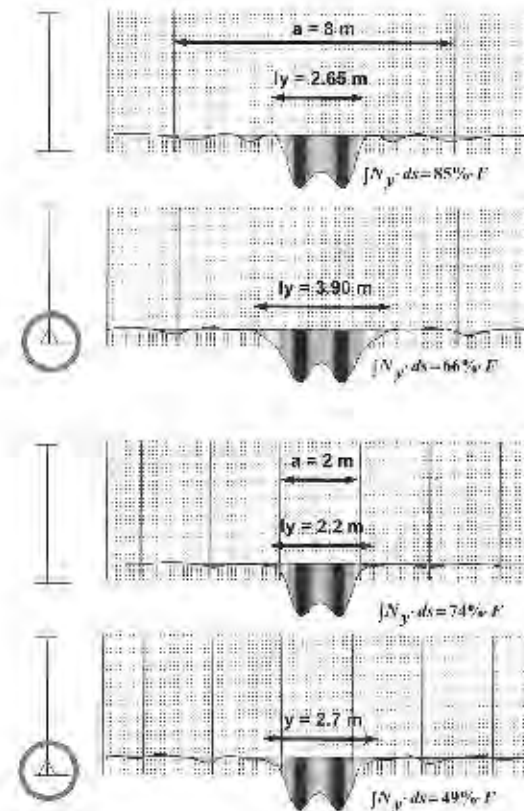


Figura 7.- Tensiones verticales en el alma para ala aislada y nervio de rigidez

Cuando se añade el nervio inferior de rigidez, se obtiene, como era de esperar, una mayor dispersión de la carga en el alma en el caso de la separación de 8 m. entre rigidizadores verticales. La integral de tensiones verticales, por otro lado, se reduce de 85 al 66% de la carga aplicada, lo que indica que la fracción de carga restante es transmitida directamente a los rigidizadores por flexión del

nervio. En el caso de la separación de 2 m., la longitud de alma resistente apenas aumenta al disponer el nervio, mientras que, por el contrario, la carga transmitida al alma se reduce del 75 al 49%, poniendo de manifiesto la relevancia de la flexión del nervio entre rigidizadores en el reparto de carga.

La contribución de los rigidizadores verticales a la resistencia puede visualizarse con un modelo de colapso de cuatro rótulas, similar al planteado en la fig. 3, en el que se incluyen sendos rigidizadores verticales, de rigidez K, situados dentro de la longitud de alma resistente  $l_y$  (fig. 8). Procediendo de forma absolutamente análoga a la descrita en el epígrafe 4 se obtienen las siguientes expresiones alternativas de la longitud de alma resistente y de la resistencia plástica, incluyendo la contribución de los rigidizadores:

$$s_y = \sqrt{\frac{8(M_1 + M_2) - K \cdot b}{f_{yw} \cdot t_w}} \quad (4)$$

$$F_y = \frac{4(M_1 + M_2)}{s_y} + f_{yw} \cdot t_w \cdot \left( s_y + 2l_r + \frac{s_y}{2} \right) + 2 \cdot K \cdot \left( 1 - \frac{2b}{s_y} \right) \quad (5)$$

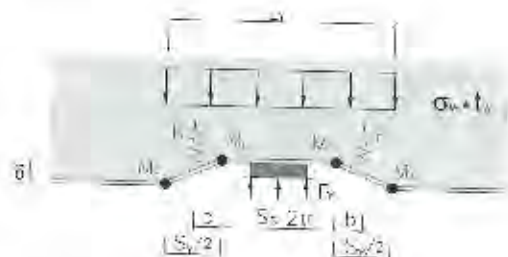


Figura 8.- Modelo de colapso de cuatro rótulas plásticas incluyendo los rigidizadores

En la fig. 9 se representan las expresiones (4) y (5) para una rigidez creciente del rigidizador vertical. Se observa que la longitud de alma resistente es una función decreciente, que tiende, efectivamente, a la separación entre rigidizadores a medida que crece la rigidez de éstos. Sin embargo, la resistencia plástica, toda vez que incorpora la contribución del rigidizador, es una función creciente, por cuanto la aportación de resistencia del rigidizador es superior a la disminución de longitud de alma resistente.

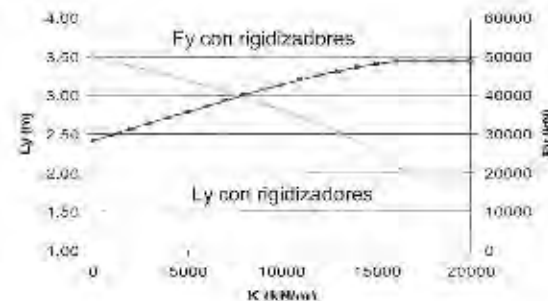


Figura 9.- Resistencia plástica y longitud de alma resistente según (4) y (5)

## 6. CONCLUSIONES

Se ha presentado un diseño de nervio inferior de rigidez, aplicado en el viaducto de alta velocidad sobre el Arroyo de las Piedras en Málaga, que mejora sustancialmente la resistencia de almas a cargas concentradas en su plano, con la evidente repercusión económica en el diseño de puentes empujados que ello conlleva. La mejora se ha cuantificado con un modelo analítico adaptado de la formulación vigente del EC-3 y contrastado con análisis por elementos finitos no lineales. Estos análisis ponen de manifiesto la incidencia conjunta de la separación entre rigidizadores, cuyo tratamiento normativo es insuficiente, siendo además excesivamente conservadora la limitación de la longitud de alma resistente.

## 7. REFERENCIAS

- [1] MILLANES, F., PASCUAL, J., "Arroyo Las Piedras Bridge: an innovative solution for high speed bridges", IABSE Symposium 2003, Amberes, Bélgica.
- [2] Eurocode 3.- prEN 1993 part 1-5. "Plated Structural Elements. Stage 34 Draft". 2003.
- [3] LAGERQVIST, O. "Patch Loading. Resistance of Steel Girders Subjected to Concentrated Forces". Tesis Doctoral. Lulea University of Technology, 1994.
- [4] RIPA, T., PASCUAL, J., "Design Improvements for Patch Loading Resistance in Bridges During Launching", Congreso SteelBridge 2004, Millau, Francia.