

La doble célula triangular: mejora sustancial de la resistencia a carga concentrada transversal en puentes empujados

The bottom triangular cell: A significant improvement for patch loading resistance in launched bridges

Tomás Ripa Alonso

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, LRA Infrastructures Consulting, Socio Director, Madrid, España

Recibido el 12 de junio de 2017; aceptado el 15 de junio de 2017

RESUMEN

Este artículo presenta la mejora resistente frente a carga concentrada transversal que aporta una célula triangular acoplada al ala inferior, a modo de nervio de rigidez. Los análisis con un modelo híbrido de elementos finitos permiten identificar el mecanismo de resistencia local y el mecanismo adicional de contribución de los rigidizadores por flexión del nervio. Se propone un modelo de cálculo que cuantifica esta mejora, solventando la insuficiencia que presenta la vigente formulación normativa. Las conclusiones se aplican a un caso real, consistente en diseñar el empuje del viaducto del río Sava en Croacia, suprimiendo toda la rigidización longitudinal.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Carga concentrada transversal; Puentes empujados; Célula triangular

ABSTRACT

This paper deals with the improvement in patch loading resistance achieved by a bottom triangular cell attached to a T-shaped girder flange. The analyses performed with hybrid non-linear finite element models reveal two resistant mechanisms: web resistance and an additional contribution of vertical stiffeners induced by the bottom cell stiffness. A numerical model is proposed for evaluating the contribution of vertical stiffeners to patch loading resistance, in order to improve present formulation deficiency. The conclusions are applied to a real case design of a launched bridge, the viaduct across river Sava in Croatia, eliminating all longitudinal web stiffeners.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Patch loading; Launched bridges; Bottom triangular cell

I INTRODUCCIÓN

La construcción del tablero mediante empuje es un método constructivo ampliamente utilizado tanto en tableros de hormigón como, en especial, metálicos y mixtos, dado el reducido peso y flexibilidad de la subsección metálica. En este caso, sin embargo, un aspecto crítico que debe ser tenido en cuenta es la introducción localizada de la reacción de los patines de empuje directamente sobre el alma. Este tipo de aplicación de carga se denomina «carga concentrada transversal» y es un estado límite último específico de las estructuras con almas metálicas.

Por tanto, resulta de gran importancia evaluar la resistencia frente a carga concentrada transversal 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 Europa y Estados Unidos es frecuente el diseño de puentes metálicos y mixtos con abundante rigidización longitudinal en el alma. En contraposición con este diseño, las secciones bijnávena buscan la simplicidad de diseño que se aprecia en la [figura 1](#), que corresponde a la subsección metálica del viaducto mixto de Alta Velocidad sobre el Arroyo de las Piedras, carente de toda rigidización longitudinal, con células triangulares inferior y superior para incrementar la resistencia a flexión

Correo electrónico: tomasripa@lraingenieria.es

<http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2017.06.002>

0439-5689/© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

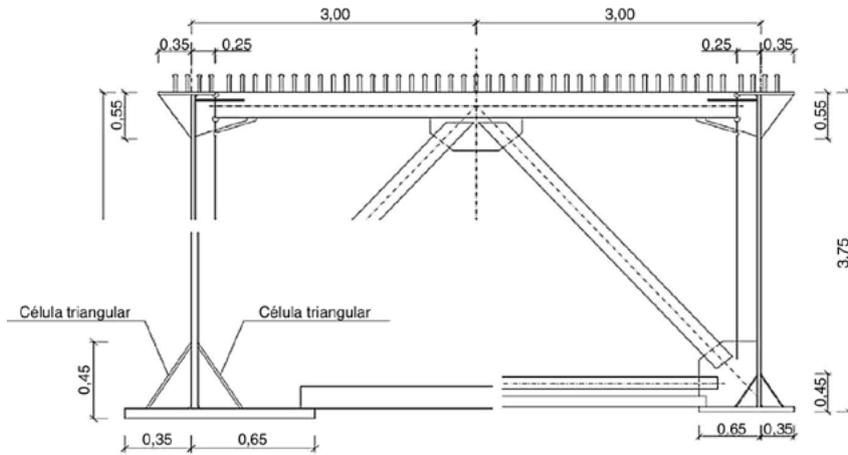


Figura 1. Viaducto mixto de Alta Velocidad sobre el Arroyo de las Piedras. Sección bijácena.

de la sección. En este artículo se analiza la mejora resistente frente a carga concentrada transversal que aporta una célula triangular acoplada al ala inferior, a modo de nervio de rigidez.

2 FORMULACIÓN NORMATIVA PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A CARGA CONCENTRADA TRANSVERSAL

La vigente norma española de acero estructural EA-E [1] y el Eurocódigo 3 EN1993-1-5 [2] utilizan una formulación basada en el modelo de cálculo propuesto por Lagerqvist [3]. La resistencia a carga concentrada transversal se calcula como la resistencia plástica reducida por una función de resistencia, que depende del parámetro de esbeltez del panel y que tiene en cuenta la reducción en la resistencia debida a la inestabilidad transversal del alma.

$$F_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{M1}} F_y \chi(\bar{\lambda}) = \frac{1}{\gamma_{M1}} f_{yw} t_w l_y \chi(\bar{\lambda}) \quad (1)$$

La resistencia plástica se calcula según el modelo de colapso de cuatro rótulas plásticas en el ala propuesto por Lagerqvist (fig. 2):

$$F_y = f_{yw} t_w l_y \quad \text{donde} \quad l_y = \left(ss' + 2 \sqrt{\frac{2(M_t + M_o)}{f_{yw} t_w}} \right) \leq a \quad (2)$$

La resistencia plástica F_y es el producto de la tensión de plasticación del alma f_{yw} por el espesor del alma t_w y por la longitud de alma resistente l_y (limitada a la separación entre rigidizadores a). l_y es proporcional a la longitud de introducción de la carga (patín más difusión en el ala, es decir, $ss' = ss + 2t_f$) y a la rigidez del ala cargada, dada por sus momentos plásticos. La formulación de EA-E y de Eurocódigo 3 particularizan los momentos plásticos a los de una sección rectangular, correspondiente a la chapa del ala, pero en nuestro caso utilizaremos la expresión general (2).

La función de resistencia, por su parte, tiene en cuenta la reducción de la resistencia plástica debido a la inestabilidad

transversal del alma. Es, por tanto, una función decreciente de la esbeltez del panel, dada por el parámetro de esbeltez $\bar{\lambda} = \sqrt{F_y/F_{cr}}$, raíz cuadrada del cociente entre la resistencia plástica y la carga crítica de inestabilidad del panel cargado. Las funciones de resistencia se calibran empíricamente con los resultados experimentales en vigas doble T. La expresión propuesta por EA-E y Eurocódigo 3 es la dada en la ecuación (3).

$$\chi(\bar{\lambda}) = \frac{0.5}{\bar{\lambda}} \leq 1.0 \quad (3)$$

En cuanto a la carga crítica de inestabilidad, EA-E y Eurocódigo 3 proponen una expresión general dada por la ecuación (4); en nuestro caso, la obtendremos de forma «exacta» mediante un análisis de pandeo lineal con un modelo de elementos finitos.

$$F_{cr} = k_F \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^3}{h_w} \quad \text{donde} \quad k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \quad (4)$$

El parámetro k_F se calibra con resultados de análisis de carga crítica de abolladura de modelos de elementos finitos de paneles de vigas doble T, siendo h_w la altura del alma y a la separación entre rigidizadores verticales que delimitan el panel cargado.

3 DISEÑO CON UN NERVIO DE RIGIDEZ. CUANTIFICACIÓN DE LA MEJORA RESISTENTE

Desde un punto de vista conceptual, la disposición de un nervio de rigidez mejora la resistencia frente a cargas concentradas de una viga metálica en varios aspectos. Además de permitir patines de mayor anchura sin que la flexión del ala resulte condicionante y de mejorar la introducción de la carga en el alma, al aumentar su dispersión en el canto del nervio (fig. 3), la disposición del nervio de rigidez reduce la tendencia a la inestabilidad transversal del alma. Por un lado, se reduce la esbeltez geométrica del alma al reducirse el canto del subpanel «exento» (h'_w); por otro, se incrementa sustancialmente la rigidez torsional del ala cargada, con lo queda impedido el

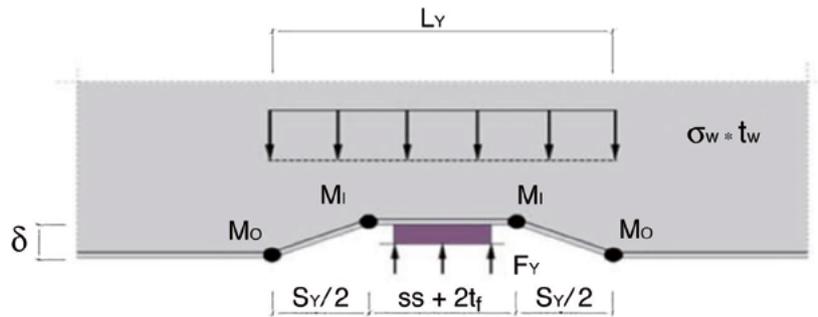


Figura 2. Mecanismo de colapso de cuatro rótulas plásticas.

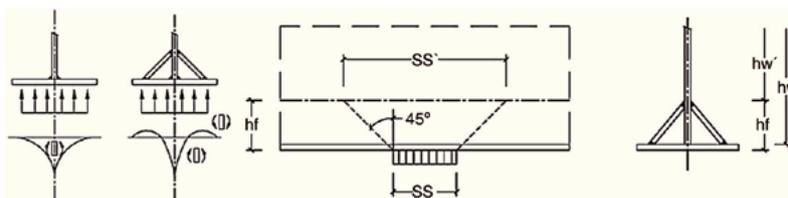


Figura 3. Mejora en la introducción de la carga que aporta un diseño con nervio de rigidez.

giro del alma fuera de su plano en la unión con el nervio. Estos dos efectos contribuyen conjuntamente a incrementar la carga crítica de abolladura transversal del alma. Además, la rigidez a flexión del nervio contribuye a aumentar dicha dispersión longitudinal de carga y, consecuentemente, la resistencia a carga concentrada.

Hasta este punto, las mejoras en la resistencia derivadas de la disposición de un nervio de rigidez cabría calificarlas de incrementos de magnitud de factores conocidos del mecanismo resistente de vigas doble T. Sin que estas mejoras resulten en absoluto desdeñables, cabría señalar como principal aportación de un nervio de rigidez la generación de un mecanismo resistente adicional, complementario a la resistencia intrínseca del alma a cargas localizadas. Puede enunciarse como el mecanismo de flexión longitudinal del nervio entre rigidizadores verticales. El nervio de rigidez, como elemento en flexión longitudinal, trabaja como viga continua apoyada sobre los rigidizadores verticales y, de esta forma, parte de la carga localizada no llega nunca a solicitar al alma, sino que es transmitida directamente a los rigidizadores verticales a través del mecanismo de flexión tipo viga del nervio. La resistencia frente a carga concentrada deja de ser un efecto eminentemente localizado, en el que los rigidizadores verticales son una mera condición de contorno que limita la esbeltez del panel, sin una influencia más directa en la magnitud de la resistencia a cargas localizadas. Los rigidizadores verticales adquieren ahora una notable relevancia ya que, en función de la relación entre la rigidez del nervio y la separación entre rigidizadores, contribuirán a resistir una fracción significativa de la carga aplicada.

3.1. Cuantificación de la mejora resistente

Para cuantificar la mejora resistente que aporta un nervio de rigidez se realizan análisis mediante un modelo de elementos finitos, incluyendo no linealidad constitutiva y geométrica, comparando la resistencia de una viga con sección doble T con la equivalente añadiéndole un nervio de rigidez constituido por una célula triangular inferior. Se utiliza para los análisis

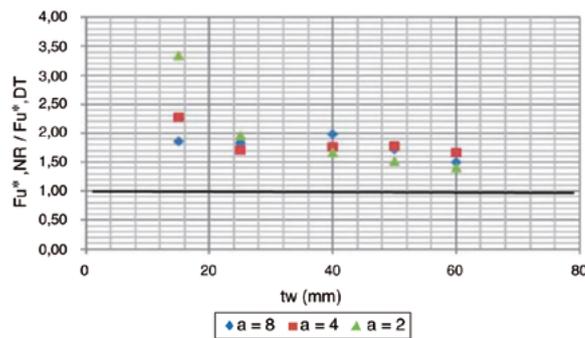


Figura 4. Mejora en la introducción de la carga que aporta un diseño con nervio de rigidez.

un caso real de viga de puente, correspondiente al viaducto mixto sobre el Arroyo de las Piedras (fig. 1). Se realiza una batería de análisis en los que se varía el espesor de alma desde 15 hasta 60 mm y separación de rigidizadores de 8, 4 y 2 m. El ala de la viga doble T y el nervio de rigidez se modelizan con elementos tipo viga no lineales, con una modelización híbrida de elementos placa y elementos viga ya empleada por Granath [4]. Los rigidizadores verticales se modelizan como vinculaciones cinemáticas rígidas en el grado de libertad «vertical», correspondiente a la rigidez axial del rigidizador.

En la figura 4 se representa la ganancia de resistencia, dada por el cociente de resistencias últimas de la viga con nervio de rigidez ($F_{u,NR}^*$) frente a la viga doble T ($F_{u,DT}^*$), para todos los casos analizados. El asterisco en la resistencia última indica que esta se ha corregido mediante la fórmula de interacción entre carga concentrada transversal y flexión propuesta por el Eurocódigo 3 para descontar el efecto de la flexión concomitante.

Al incorporar el nervio, el incremento de resistencia es muy importante, mayor cuanto más esbelta es el alma y más se aproximan los rigidizadores. La ganancia resistente oscila entre incrementos del orden del 50% en las almas más compactas

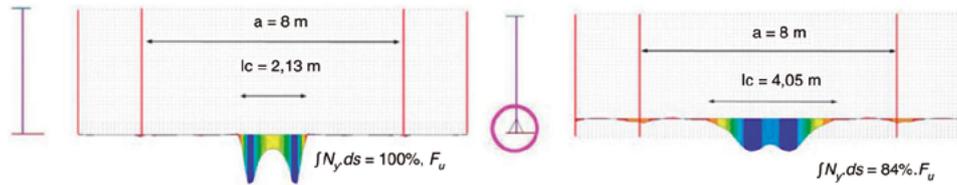


Figura 5. Comparación de las compresiones transmitidas al alma en la viga doble T y con nervio de rigidez.

hasta incrementos superiores al 100% en las más esbeltas. Esta conclusión es muy relevante. En las líneas de investigación más recientes de resistencia con rigidizadores longitudinales se alcanzan mejoras resistentes de hasta el 20% si el rigidizador se sitúa en su ordenada óptima, tan próxima al ala que puede no ser factible su ejecución. Con un diseño tan simple de ejecución como un nervio de rigidez alcanzamos una mejora resistente que llega a duplicar la de la viga doble T.

La comparación de la distribución de compresiones verticales en el alma (fig. 5) demuestra que la inclusión del nervio de rigidez incrementa la dispersión longitudinal de la carga. La integral de compresiones equivale al 100% de la carga aplicada en el caso de la viga doble T, pero en el caso de la viga con nervio de rigidez parte de la carga aplicada se traslada por flexión en el nervio hasta los rigidizadores verticales sin llegar a solicitar a compresión el alma.

La modelización del ala y nervio con elementos tipo viga permite obtener las leyes de esfuerzos flectores y cortantes en estos elementos por el mecanismo de resistencia a carga concentrada transversal, una vez descontados los esfuerzos parciales elásticos en la subsección ala o nervio debidos a la flexión general de la viga. Observando la distribución de momentos flectores (tanto la representada para viga con nervio de rigidez [fig. 6] como la que resulta para la viga doble T), aparecen sendos extremos negativos en los bordes del patín de introducción de la carga y sendos extremos próximos a flexión positiva, en clara correspondencia con el mecanismo de colapso de cuatro rótulas plásticas propuesto por Lagerqvist.

La observación conjunta de las compresiones en el alma y de la ley de esfuerzos cortantes en el nervio demuestra claramente la contribución de este a la resistencia. Con rigidizadores muy separados, la resistencia se debe, fundamentalmente, a compresiones en el alma. Cuando los rigidizadores se aproximan a 4 m se aprecia un incremento de la contribución del mecanismo de flexión del nervio, puenteando más fracción de carga directamente a los rigidizadores, observable en el cambio de pendiente de la ley de compresiones y el mayor salto de la ley de cortantes en el rigidizador; por último, cuando los rigidizadores se aproximan hasta 2 m, la longitud de alma comprimida queda claramente limitada a la separación entre rigidizadores. Se observa un salto acusado de la ley de cortantes, que evidencia que los rigidizadores se llevan una parte importante de la carga por el hecho de que la longitud de alma comprimida se encaje entre los rigidizadores

4 MODELO PROPUESTO

Así pues, se identifican claramente dos componentes en la resistencia que denominamos *resistencia local o del alma y contri-*

bución de los rigidizadores. La componente de resistencia local se debe a las compresiones verticales en el alma, cuya integral equilibra parte de la carga aplicada. La contribución de los rigidizadores se debe o bien a la flexión longitudinal del nervio, que es capaz de trasladar directamente hasta ellos parte de la carga aplicada, o bien al hecho de que los rigidizadores se sitúan más próximos que la longitud de alma comprimida, interactuando directamente en el mecanismo de resistencia local.

Se comprueba también que las vigas doble T presentan únicamente la componente de resistencia local. La rigidez del ala exenta es muy inferior a la del nervio y no es significativa la carga que es capaz de trasladar, como elemento en flexión, hasta los rigidizadores. No es frecuente que los rigidizadores se dispongan tan próximos como para situarse dentro de la longitud de alma comprimida, por lo que la contribución de estos por interacción con el mecanismo local, aunque pudiera darse en vigas doble T, es ciertamente un caso excepcional.

La formulación vigente de EA-E y Eurocódigo 3 predice adecuadamente la componente de resistencia del alma (única que presentan las vigas doble T), pero no contempla la componente que aportan los rigidizadores en las vigas con nervio de rigidez, lo cual minusvalora las resistencias calculadas e induce a resultados anómalos en los casos en que los rigidizadores se sitúan más próximos que la longitud de alma resistente [5]. Proponemos entonces la mejora de la formulación vigente añadiendo la componente de contribución de los rigidizadores [6].

4.1. Caso $l_y \geq a$

La resistencia plástica para el caso $l_y \geq a$ se calcula como suma de la resistencia plástica del alma con la limitación $l_y = a$, más la contribución de resistencia plástica de los rigidizadores necesaria para encajar la longitud de alma resistente en la separación entre rigidizadores $F_{ys|l_y=a}$:

$$F_{y|l_y \geq a} = f_{yw} t_w a + 2 F_{ys|l_y=a} \quad (5)$$

La contribución de los rigidizadores en el caso $l_y \geq a$ se modeliza mediante un mecanismo de colapso de cuatro rótulas plásticas que incluye la resistencia plástica del rigidizador (fig. 7). La formulación derivada de este mecanismo de colapso resulta en una expresión de la longitud de alma resistente que tiende a la separación entre rigidizadores a medida que aumenta la resistencia plástica del rigidizador y que, tras la debida manipulación matemática, resulta:

$$F_{ys|l_y=a} = \frac{M_{pi} + M_{po}}{b} - \frac{f_{yw} t_w b}{2} - 15 t_w \sqrt{\frac{235 \cdot 10^3}{f_{yw}}} f_{yw} t_w \quad (6)$$

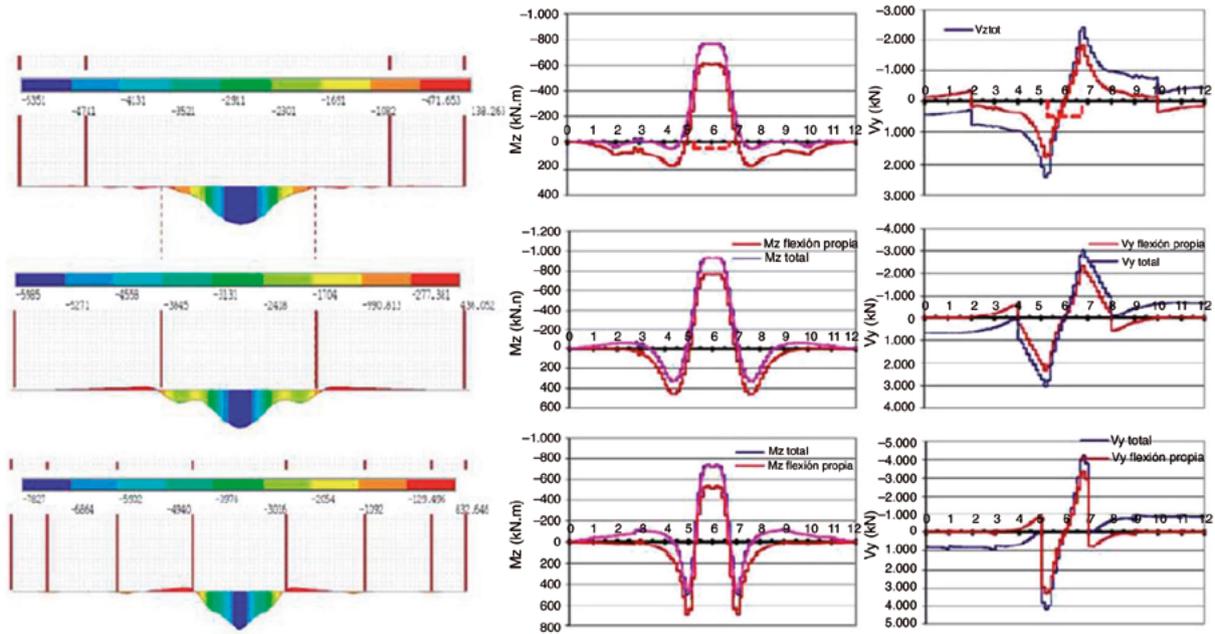


Figura 6. Esfuerzos flector y cortante en el nervio de rigidez para alma de 25 mm y separación de rigidizadores de 8, 4 y 2 m.

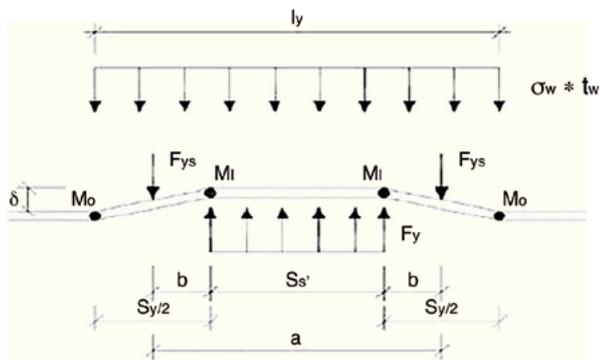


Figura 7. Modelo mecánico de colapso para el caso $l_y > a$, considerando la contribución a la resistencia plástica del rigidizador F_{ys} .

Por último, la resistencia calculada se obtiene con la función de resistencia propuesta por la EA-E:

$$F_{Rd} = \chi(\bar{\lambda}) F_{yI_y} \geq a \quad (7)$$

4.2. Caso $l_y < a$

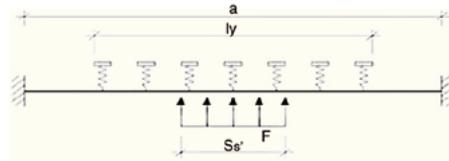
Cuando los rigidizadores están más separados que la longitud de alma resistente ($l_y < a$) reciben carga a través del mecanismo de flexión longitudinal del nervio. Para que este mecanismo sea eficaz es necesario que el nervio tenga una rigidez suficiente en relación con la rigidez tipo membrana del alma como lecho que lo sustenta. El ala aislada tiene una rigidez insuficiente, por lo que la contribución de este mecanismo a la resistencia en las vigas doble T es despreciable, mientras que en el caso de viga con nervio de rigidez la contribución solo se produce para las almas más delgadas y con una separación de rigidizadores razonable.

La contribución de los rigidizadores a través del mecanismo de flexión longitudinal del nervio puede analizarse mediante un modelo mecánico de viga sobre lecho elástico como el que se muestra en la figura 8. El nervio de rigidez se asimila a una viga biempotrada entre rigidizadores, de luz a , sobre un lecho elástico cuya rigidez es el coeficiente de reacción del alma (equivalente al coeficiente de balasto de Winkler) por el espesor del alma. El coeficiente de reacción elástica del alma ($C_w t_w$)_{ap} se calcula asimilando la distribución de compresiones en el alma a una ley lineal en una altura igual a medio canto del alma, reducido por la función de resistencia, para tener en cuenta la pérdida de rigidez por abolladura. La longitud a la que se extiende el lecho elástico es igual a la longitud de alma resistente ($l_{cw} = l_y$).

Este modelo permite obtener la fracción de carga aplicada V_y/F que se transmite al empotramiento del modelo de viga sobre lecho elástico, y que sirve para evaluar la componente de carga aplicada que se transmite a los rigidizadores por flexión longitudinal del nervio. La resistencia total a carga concentrada se evalúa entonces como suma de la resistencia del alma, que puede aproximarse a la resistencia total calculada con la vigente formulación de EA-E, más la contribución de los rigidizadores a través de la flexión longitudinal del nervio y del cortante parcial que traslada el nervio en la flexión general de tipo viga. Se proponen así las siguientes ecuaciones para evaluar la resistencia, considerando la contribución de los rigidizadores en el caso $l_y < a$:

$$F_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \left(F_{Rd,w} + F_{Rd,s} + \sum V_1 \right) \quad (8)$$

$$\begin{cases} F_{Rd,w} = \chi(\bar{\lambda}) f_{yw} l_y t_w \\ F_{Rd,s} = \left(\frac{V_y}{F} \right) F_{Rd} \\ \sum V_1 = \left(\frac{I_1}{I} + \frac{B_1 \gamma_{sup,1}}{I} \right) F_{Rd} \end{cases} \quad (9)$$



$$(C_w t_w)_{op} = \left(\frac{4 \cdot E}{h_w} \cdot t_w \right) \chi(\bar{\lambda})$$

Figura 8. Modelo mecánico para la contribución de los rigidizadores. Caso $l_y < a$.

que da lugar a la siguiente expresión cerrada para la resistencia:

$$F_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1}{1 - \frac{1}{\gamma_{M1}} \left(\frac{V_y}{F} \right) - \frac{1}{\gamma_{M1}} \left(\frac{I_1}{I} + \frac{B_{1,y_{sup.1}}}{I} \right)} \chi(\bar{\lambda}) f_{yw} l_y t_w \quad (10)$$

5. APLICACIÓN AL DISEÑO DE PUENTES

El modelo de cálculo propuesto se aplica a la comprobación del empuje del viaducto sobre el río Sava, con chapas principales muy esbeltas y abundante rigidización longitudinal, y nos planteamos suprimir toda esta rigidización (fig. 9), incluyendo una célula triangular como nervio de rigidez. Obviamente, el dimensionamiento a cortante de las almas a cortante resulta en un incremento de espesores frente a las almas originales rigidizadas. Cuando analizamos la resistencia frente a carga concentrada transversal de la sección de cuartos de luz en un vano lateral de 85 m, como viga doble T, con un espesor de alma de 18 mm y una separación de 5 m entre rigidizadores verticales, se requiere incrementar el espesor de alma a 20 mm (tabla 1). La resistencia se evalúa con la formulación vigente de EA-E ecuación [1].

Si añadimos un nervio de rigidez formado por una célula triangular metálica (fig. 9), la longitud de alma resistente se incrementa notablemente ($l_y = 4.89$ m) gracias a la rigidez que aporta el nervio. Como resulta inferior a la separación entre

rigidizadores verticales ($a = 5$ m), la resistencia se calcula con la expresión (10). Los resultados se muestran en la tabla 2.

Vemos la gran eficacia del nervio de rigidez para incrementar la resistencia sobre la de viga doble T. La simple disposición del nervio aumenta la contribución a la resistencia del alma por la mayor longitud de alma resistente que es capaz de movilizar la rigidez del nervio. La resistencia total asciende a 6896 kN con alma de 18 mm, el doble de la resistencia alcanzada por la viga doble T con ala exenta y alma de 20 mm. Con el nervio de rigidez no es necesario incrementar el espesor del alma por la situación constructiva de empuje.

Cuando pasamos a analizar el vano central de 130 m de luz, la sección a cuartos de la luz, con alma de 22 mm y separación de 4 m entre rigidizadores verticales, tiene una resistencia a carga concentrada insuficiente durante el empuje. Con la formulación vigente aplicada a la viga doble T, ni el incremento de la longitud de patín desde 1.5 hasta 2.5 m ni la aproximación de rigidizadores a 3 y 2 m son suficientes para la resistencia requerida. Solo el incremento de espesor del alma se demuestra la forma más eficaz y, de hecho, la única capaz de incrementar la resistencia hasta la requerida. Recalquemos, no obstante, lo que ello implica en el dimensionamiento, puesto que es preciso incrementar de forma general todo el espesor de alma de las secciones centrales del vano, a partir de las secciones de cuarto de luz, desde los 22 mm requeridos por la resistencia a cortante hasta los 26 mm requeridos por la resistencia a carga concentrada transversal, es decir, un incremento en peso de acero principal del 18%.

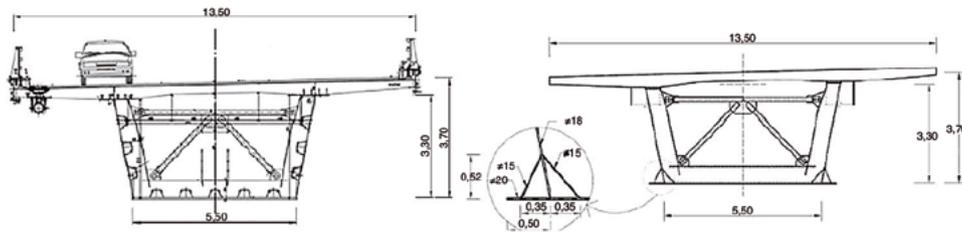


Figura 9. Sección transversal del viaducto sobre el río Sava. Sección inicial con rigidización longitudinal y sección rediseñada, sin rigidizadores longitudinales.

TABLA 1

Resultados de resistencia a carga concentrada de la sección doble T

Vano	Sección	a (m)	h_w (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	ss (m)	l_y (m)	F_{Rd} (kN)	F_{Ed} (kN)
L = 85 m	L/4	5	3.300	18	20	1.5	2.48	2743	3227
L = 85 m	L/4	5	3.300	20	20	1.5	2.48	3387	3227

TABLA 2

Resultados de resistencia a carga concentrada de la sección con nervio de rigidez. $l_y < a$						
t_w (mm)	l_y (m)	a (m)	$F_{Rd,w}$ (kN)	V_y/F (-)	$\frac{I_1+B_1y_{sup,1}}{I}$ (-)	F_{Rd} (kN)
18	4.89	5.0	6165	0.100	0.106	6896

TABLA 3

Resultados de resistencia a carga concentrada de la sección con nervio de rigidez. $l_y \geq a$					
t_w (mm)	l_y (m)	a (m)	$F_{y l_y \geq a}$ (kN)	$\chi(\bar{\lambda})$ (-)	F_{Rd} (kN)
22	4.66	4.0	33416	0.268	8141

Si, por el contrario, optamos por añadir un nervio de rigidez debemos evaluar la resistencia teniendo en cuenta la contribución de los rigidizadores. La longitud de alma resistente, de 4.66 m, es mayor que la separación entre rigidizadores. Así pues, empleamos la formulación propuesta para el caso $l_y \geq a$ (ecuación [5]), añadiendo la contribución de los rigidizadores a la resistencia plástica (tabla 3). La resistencia obtenida, del orden de 8000 kN con alma de 22 mm, superior a la sollicitación de cálculo, es del orden del doble de la que se obtiene en la viga doble T exenta para ese espesor de alma. De nuevo, el nervio de rigidez permite una resistencia suficiente a carga concentrada transversal sin incrementar el espesor de alma dimensionado por cortante.

6. CONCLUSIONES

Podemos concluir entonces que un nervio de rigidez mejora sustancialmente la resistencia a carga concentrada transversal. La mejora se debe a la mejora de los mecanismos resistentes convencionales de la viga doble T, el mecanismo de resistencia local o contribución del alma, y a la aparición de un mecanismo resistente adicional que es de flexión del nervio entre rigidizadores.

Queda patente que la limitación de la longitud de alma resistente no superior a la separación entre rigidizadores es, por sí sola, incorrecta, si no se añade la contribución directa de los rigidizadores a la resistencia. Para solventarlo se ha propuesto

una formulación que complementa y mejora la vigente, teniendo en cuenta la contribución de los rigidizadores a la resistencia plástica cuando se sitúan más próximos que la longitud de alma resistente, o su contribución por flexión longitudinal del nervio, evaluada a través de un modelo de viga sobre lecho elástico, cuando los rigidizadores están más separados que la longitud de alma resistente.

En definitiva, la inclusión de un nervio de rigidez y la formulación propuesta abren una línea de diseño diametralmente opuesta a la que nos conduce la formulación vigente. Según esta, para mejorar la resistencia a carga concentrada transversal es preciso incrementar el espesor del alma; según nuestras conclusiones, para mejorar la resistencia se potencia el nervio, no el alma.

Bibliografía

- [1] Comisión Permanente de Estructuras de Acero, Instrucción de Acero Estructural EA-E, Ministerio de Fomento, Madrid, 2012.
- [2] EN1993-1-5. Design of steel structures-Part 1-5: Plated structural elements, European Committee for Standardization, Brussels, 2006.
- [3] O. Lagerqvist, Patch Loading. resistance of steel girders subjected to concentrated forces, Tesis Doctoral, Lulea University of Technology, Suecia, 1994.
- [4] P. Granath, Serviceability limit state of I-shaped steel girders subjected to patch loading, *J Constr Steel Res.* 54 (2000) 387–408.
- [5] R. Chacón, Resistance of transversally stiffened hybrid steel plate girders to concentrated loads, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [6] T. Ripa, Resistencia a carga concentrada transversal considerando la contribución conjunta de un nervio de rigidez y de los rigidizadores verticales, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.