

Análisis de la respuesta frente a fatiga de las celosías transversales en puentes mixtos de carretera acorde al Eurocódigo EN1993-1-9

Fatigue response of transversal diaphragms of composite road bridges, according to EN1993-1-9

Miguel Ortega Cornejo^a, M^a João Freitas^b, Humberto Agrela Lopes^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de Ingeniería. IDEAM, S.A.

^b Máster en Ingeniería Civil. IDEAM, S.A.

^c Máster en Ingeniería Civil

RESUMEN

El fenómeno de la fatiga es una de las principales causas de fallo en la construcción metálica. El paso de tráfico ferroviario o de carretera sobre un puente, genera sollicitaciones cíclicas que pueden llegar a producir la rotura por fatiga de sus componentes. En este artículo se analiza, en particular, la respuesta frente a fatiga de las celosías transversales de tableros mixtos de puentes de carretera, teniendo como base un estudio paramétrico, en el que se observa la influencia de la variación de un conjunto de parámetros a la hora de comprobar la resistencia a fatiga de los detalles más comunes de las celosías transversales.

ABSTRACT

The fatigue phenomenon is one of the main causes of failure in steel construction. The rail and road traffic over a bridge deck, generates cyclic solicitations that can produce severe damages to its elements. This article studies, in particular, the response of transversal diaphragms of composite road bridges under fatigue loading. Based on a parametric study, this article analyses the influence of the variation of a set of parameters on the fatigue assessment of the most common details of road bridges' transversal diaphragms.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, celosía transversal, puente mixto, soldadura, daño.

KEYWORDS: Fatigue, transversal diaphragm, composite bridge, weld, damage.

1. Introducción

Tradicionalmente, se han asociado los problemas de fatiga a los puentes metálicos o mixtos de ferrocarril, dada la importancia de la carga y del número de ciclos a los que se ven sometidos durante su vida útil. Recientes experiencias han demostrado (en España y países de nuestro entorno) que, si no se presta atención a la concepción, proyecto y control de la ejecución de los detalles en tableros metálicos y mixtos de puentes de carretera, la fatiga puede llegar a generar problemas de durabilidad en las

estructuras. Estas experiencias han motivado al Ministerio de Fomento a la publicación de una “Guía para el proyecto frente a fatiga de puentes metálicos y mixto” [1].

Este artículo resume un estudio que completa el trabajo desarrollado en el análisis de los detalles más condicionantes de las celosías transversales de puentes con sección cajón mixtos de carretera, y propone alternativas o precauciones a adoptar en la concepción,

ejecución y control de ejecución de dichos detalles.

2. Fatiga – conceptos generales

El fallo de un elemento (o detalle) debido a la actuación cíclica de cargas inferiores a la resistencia última del mismo se denomina por fatiga. En puentes de carretera, dichas cargas cíclicas corresponden al paso repetido de vehículos pesados (camiones), que, al generar la propagación de fisuras, puede resultar en la rotura de un elemento. La posibilidad de colapso de una estructura como consecuencia del fallo de un elemento por fatiga, es la razón por la cual la comprobación de seguridad frente a este fenómeno se incluye en las normas como una comprobación de Estado Límite Último.

El fenómeno de la fatiga y correspondientes procedimientos de análisis, están asociados a un conjunto de conceptos descritos a continuación.

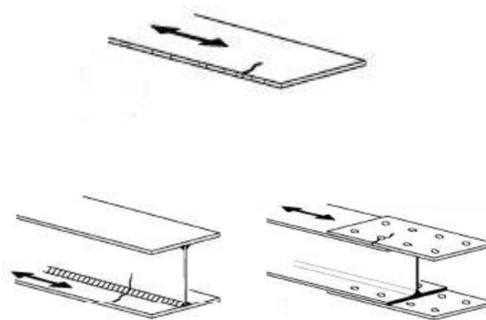
2.1 Vida Útil

El proyecto de una estructura prevé que, durante un periodo de tiempo tras su entrada en funcionamiento, todas las propiedades de la misma se mantengan por encima de un determinado nivel mínimo. Dicho período de tiempo se denomina como *vida útil*.

2.2 Detalle y categoría de detalle

El estudio de fatiga de una estructura tiene como base el análisis de las condiciones bajo las cuales se encuentran los distintos elementos de la misma. Dichos elementos o puntos de análisis se denominan por detalle. A cada detalle se asocia, de manera general, una categoría de detalle, que representa la tensión máxima de amplitud constante que puede solicitar el detalle 2 millones de veces, sin que se produzca el fallo del mismo. Los detalles de una estructura pueden corresponder a elementos continuos (véase la Figura 1 y referencia [2]) o uniones entre dichos

elementos (véase la Figura 2 y referencia [2] - unión soldada o mecánica).



La definición de la categoría de un detalle permite la obtención de la correspondiente curva de fatiga (o Curva de Wöhler) en la que se define el número de ciclos bajo el cual un detalle resiste a una determinada tensión de amplitud constante.

2.3 Daño

El fenómeno de la fatiga puede generar la reducción de la vida útil de un detalle. Dicha reducción de la vida útil se puede contabilizar mediante el concepto de *daño*. En líneas generales, el daño generado en un detalle puede ser interpretado como la ratio entre la acción aplicada y la resistencia del mismo y puede ser tratado como la fracción de la vida útil “gastada” tras la aplicación de una acción [5].

3. Elementos estudiados

El estudio que se describe en este artículo ha tenido como objeto el análisis de la respuesta frente a fatiga de los detalles típicos más condicionantes en celosías transversales de tableros tipo cajón de puentes mixtos de carretera. Se ha realizado un estudio paramétrico, en el que se observa la influencia de la variación de un conjunto de parámetros, a la hora de comprobar la resistencia a fatiga de dichos detalles. Se han estudiado dos tipos de celosías transversales, celosía de tipo W (Figura

3 – las diagonales se unen en el montante superior de la sección transversal) y tipo M (Figura 4 - las diagonales se unen en el montante inferior de la sección), las que se utilizan con más frecuencia en tableros tipo cajón de puentes mixtos de carretera, y para las cuales se analizó la influencia de la variación de la separación longitudinal entre las mismas, inclinación de las almas del cajón y el canto de la sección transversal, a la hora de comprobar la resistencia frente a fatiga de los detalles más condicionantes.

En este tipo de celosías transversales, los detalles más condicionantes bajo acciones de fatiga corresponden a la unión soldada entre diagonales y la cartela del montante superior o inferior en celosías tipo W y M, respectivamente (ver detalle 9 en Figura 4), la unión, mediante presillas, entre los perfiles que componen el montante superior (ver detalle 2 en Figuras 3 y 4) y uniones soldadas de montantes, diagonales y rigidizadores de alma con cartelas (ver detalles 1, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 en Figuras 3 y 4).

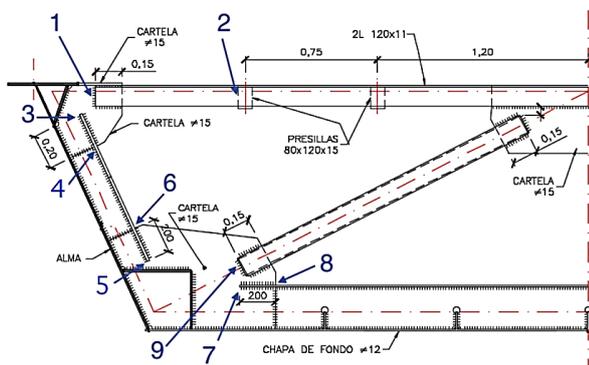


Figura 3. Celosía transversal tipo W – detalles estudiados (1 a 9)

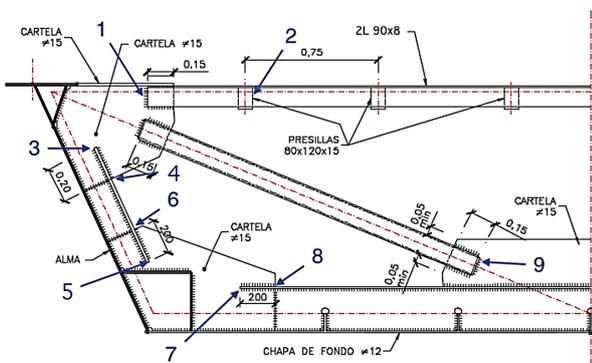


Figura 4. Celosía transversal tipo M – detalles estudiados (1 a 9)

4. Metodología de calculo

Para la obtención del daño generado, en los detalles estudiados, por el paso del tráfico pesado sobre la estructura, se ha tenido en cuenta el modelo de carga de fatiga FLM4 definido en la norma EN1991-2 [4]. Tras la obtención de los esfuerzos generados por dichas cargas, la aplicación del Método del Daño Acumulado ha permitido el análisis del daño generado por cada una de ellas en los detalles analizados. A continuación, se describen con más detalle los análisis efectuados y las consideraciones adoptadas.

4.1 Categorías de tráfico

En este estudio se han tenido en cuenta distintas categorías de tráfico, obtenidas de la combinación entre los distintos vehículos que componen el modelo de carga FLM4 (véase Figura 5 y referencia [4]) y el número de vehículos asociado a cada tipo de carretera (ver Figura 6 y referencia [4]), lo que ha permitido un análisis de los distintos detalles bajo distintas combinaciones de tráfico.

Tabla 4.7 – Conjunto equivalente de camiones

TIPO DE VEHICULO	TIPO DE TRÁFICO						
	1	2	3	4	5	6	7
				Larga distancia	Media distancia	Tráfico local	
Camión	Espacio entre ejes (m)	Cargas equivalentes por eje (kN)	Porcentaje de camiones	Porcentaje de camiones	Porcentaje de camiones	Tipo de rueda	
	4,5	70 130	20,0	40,0	80,0	A	
						B	
	4,20	70	5,0	10,0	5,0	A	
	1,30	120 120				B	
	3,20	70	50,0	30,0	5,0	A	
	5,20	150				B	
	1,30	90				C	
	1,30	90 90				C	
	3,40	70	15,0	15,0	5,0	A	
	6,00	140				B	
	1,80	90 90				B	
	4,80	70	10,0	5,0	5,0	A	
	3,60	130				B	
	4,40	90				C	
	1,30	80 80				C	

Figura 5. FLM4 [4]

La combinación de los varios tipos de vehículos que componen el FLM4 [4] (Figura 5) con las categorías de tráfico indicadas en la

Figura 6 resultó en las siguientes composiciones de tráfico:

- CAT1+ tráfico de Larga Distancia
- CAT2+ tráfico de Larga Distancia
- CAT1+ tráfico de Media Distancia
- CAT2+ tráfico de Media Distancia
- CAT3+ tráfico de Media Distancia
- CAT4+ tráfico Local

Tabla 4.5(n) – Número aproximado de vehículos pesados esperado por año y carril de tráfico lento

Categorías de tráfico	N _{obs} por año y carril de tráfico lento
1 Carreteras y autovías con dos o más carriles por sentido con alto flujo de camiones	2,0 × 10 ⁶
2 Carreteras y autovías con flujo intermedio de camiones	0,5 × 10 ⁶
3 Carreteras principales con bajo flujo de camiones	0,125 × 10 ⁶
4 Carreteras locales con bajo flujo de camiones	0,05 × 10 ⁶

Figura 6. Categorías de tráfico [4]

4.2 Modelo de cálculo – obtención de esfuerzos

Los esfuerzos generados en los detalles debido al paseo de las cargas, se han obtenido mediante la realización de un modelo de placa en el programa de cálculo CEDRUS 6 (véase Figura 7 y referencia [7]) en el que se ha estudiado la forma en la que se distribuye la carga en la losa superior del tablero y su posterior transmisión a las celosías transversales, y modelos de barras en el programa de cálculo SOFISTIK, para la obtención de los esfuerzos en cada uno de los elementos de las celosías.

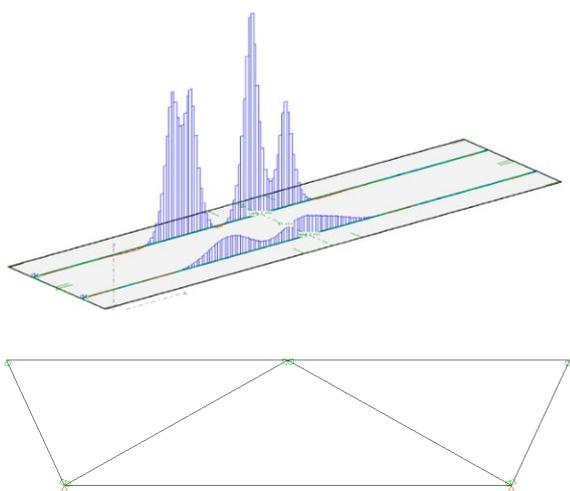


Figura 7. Modelo de placa (CEDRUS 6) y modelo de barras (SOFISTIK)

Respecto a la posición de la carga en la sección transversal, en este estudio se han tenido en cuenta dos hipótesis: por un lado, se ha considerado que los vehículos circulan centrados en el carril real, y, por otro lado, que todos los vehículos circulan con un eje en el borde del carril real, hipótesis conservadora.

4.3 Método del Daño Acumulado

El daño generado en un detalle, tal como se ha indicado anteriormente, puede ser interpretado como la ratio entre la acción aplicada y la resistencia del mismo. La determinación del daño generado en un detalle, mediante el Método del Daño Acumulado, consiste en la suma de las ratios entre el número de veces que una tensión de amplitud constante es aplicada en un detalle (n_i) y el número de veces que ese detalle es capaz de resistir bajo la acción de esa misma tensión (N_i) – ver expresión (1).

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_j}{N_j} \quad (1)$$

Un detalle verifica la seguridad frente a las acciones de fatiga cuando el daño (D) es inferior a la unidad.

4.4 Curvas de Wöhler o curvas S-N

La determinación del daño generado en un detalle solamente es posible tras la definición de la curva de Wöhler del mismo. La curva de Wöhler de un detalle (véase Figura 8 y referencia [2]) permite prever el comportamiento de un elemento (comportamiento elástico) bajo la acción de cargas cíclicas de amplitud de tensión constante. En dichas curvas esta expresada la relación entre la aplicación de una determinada acción en un detalle y el número de ciclos que lleva el mismo a la rotura, es decir, estas curvas definen la resistencia a fatiga de un detalle. [6] La definición de la curva de Wöhler de un detalle exige la previa definición de la categoría del mismo.

5. Resultados del estudio paramétrico

Tal como se ha indicado anteriormente, en este estudio se ha analizado la influencia de la variación de un conjunto de parámetros, a la hora de comprobar la resistencia a fatiga de los detalles más comunes en celosías transversales de puentes tipo cajón mixto de carretera. Para este estudio, se ha partido de una celosía con las siguientes dimensiones (“solución base”): 5.00 y 6.30 metros de ancho inferior y superior de cajón (respectivamente), 1.40 metros de canto de metal y separación de 5.625 metros entre celosías; estas dimensiones corresponden a las dimensiones tipo de una celosía perteneciente a un vano de 45 metros de luz y un tablero de 2 carriles con ancho total de, aproximadamente, 12.50 metros (Figura 9).

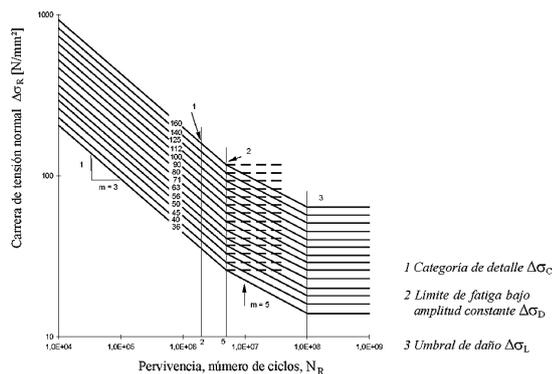


Figura 8 – Curvas de Wöhler [2]

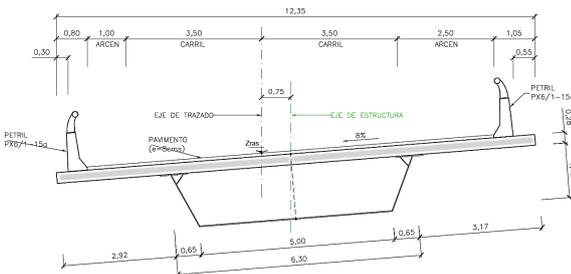


Figura 9. Sección transversal tipo de puente mixto de carretera

Respecto a los perfiles que componen las celosías, el montante superior se ha definido como una composición de dos perfiles L unidos mediante presillas y las diagonales mediante perfiles tubulares (véanse las Figuras 3 y 4).

A partir de la geometría descrita, se ha procedido a la variación de los siguientes parámetros:

- Distancia longitudinal entre celosías: se han estudiado, además de 5.625 metros, distancias de 5.00 m y 6.43 metros entre celosías. Estas distancias corresponden a la disposición, en un vano típico de 45 metros, de 7, 8 y 6 celosías (respectivamente);
- Inclinación de almas: se tiene en cuenta un ancho inferior de cajón de 4.5 metros (almas más inclinadas que las de la “solución base”) y de 6.3 metros (almas verticales);
- Canto de la sección transversal: se considera un canto de metal de 2 metros, lo que corresponde a la solución normalmente adoptada en un vano de unos 60 metros de luz.

Siempre que en el estudio se varia uno de los parámetros, los restantes se mantienen constantes (es decir, se mantienen las características de la “solución base”) y se procede al recalcu de los perfiles mínimos necesarios para cumplir con el Estado Limite Último estático.

Los resultados presentados en los siguientes apartados corresponden a la envolvente de todas las situaciones estudiadas.

5.1 Montante superior en celosías tipo W (detalles 1 y 2)

En el caso del montante superior, una posible solución a adoptar es la de un elemento compuesto por dos perfiles tipo L, conectados mediante presillas. La conexión de los perfiles tipo L mediante presillas, corresponde al detalle 5 de la tabla 8.5 de la EN1993-1-9 [2], al que le corresponde una categoría de detalle 45. En los casos en los que las diagonales se encuentran conectadas al montante superior – celosías tipo W (caso contrario, el montante superior solamente trabaja durante el montaje, celosías tipo M) - se verifica que la utilización de esta

solución conduce a valores de daño elevado en estos elementos, para cualquier situación analizada. Así, la utilización de este tipo de detalle no es recomendable, recomendándose la sustitución de los perfiles L por un perfil en T con detalles correspondientes a categorías iguales o superiores a 63, de acuerdo con la tabla 8.3 de la EN1993-1-9 (Figura 10).

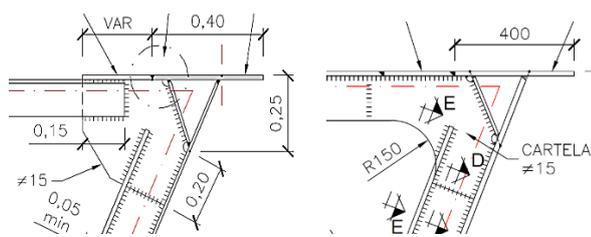


Figura 10 – A la izquierda, montante superior resuelto mediante perfiles L unidos con presillas. A la derecha, montante superior resuelto mediante perfil T

Así, para este detalle, se recomienda el empleo de detalles de categoría mínima 63 de manera que las comprobaciones de fatiga no resulten condicionantes.

5.2 Detalles de unión entre rigidizador de alma y cartela de unión con montantes (detalles 3 a 6)

En el caso del detalle de unión entre el ala del rigidizador de alma y la cartela de unión con montante (Figura 11), la categoría del mismo depende de cómo se realiza la transición entre estos elementos (detalles 1, 2 o 3 de la tabla 8.4 de la EN1993-1-9 – Figura 12).

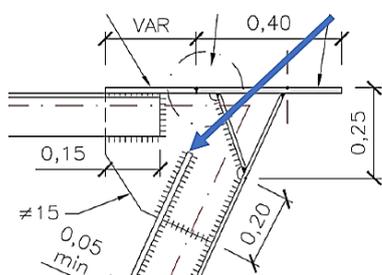


Figura 11 – Unión entre rigidizador de alma y cartela de unión con montante (superior o inferior) – detalles 3 y 5

Categoría de detalle	Detalle constructivo	
80	$L \leq 50 \text{ mm}$	
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$	
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$	
56	$L > 100 \text{ mm}$	
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$	

Figura 12 – Tabla 8.4 de EN1993-1-9 [2]

90	$\frac{r}{\ell} \geq \frac{1}{3}$ $r > 150 \text{ mm}$	
71	$\frac{1}{6} \leq \frac{r}{\ell} \leq \frac{1}{3}$	
50	$\frac{r}{\ell} < \frac{1}{6}$	
40		

Figura 13 – Tabla 8.4 de EN1993-1-9 [2]

Dicho detalle puede corresponder a categorías entre 56 y 80.

En el caso del detalle de unión entre el alma del rigidizador de alma del cajón y la cartela, dependiendo de la transición existente entre dichos elementos, la categoría de detalle puede variar entre 40 y 90 (véanse Figuras 13 y 14).

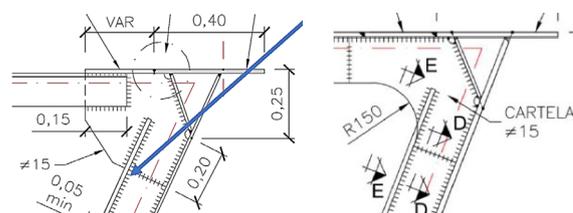


Figura 14 – A la izquierda, detalle de categoría 40. A la derecha, detalle de categoría entre 50 y 90 (detalles 4 y 6).

Si bien en los análisis realizados no se han obtenido resultados desfavorables en las comprobaciones a fatiga de los detalles mencionados, durante su vida útil estos estarán sometidos a cargas cíclicas, por lo que se deben cuidar los detalles a ejecutar. Por ejemplo, en el caso de la transición entre el alma del rigidizador y la cartela, el empleo de una transición redondeada entre los mismos permite el incremento de la categoría de detalle de 40 hasta un máximo de 90.

El detalle de unión de estos perfiles con la cartela corresponde al detalle 2 de la tabla 8.6 de la EN1993-1-9 (Figura 18)

71	$\alpha \leq 45^\circ$	
63	$\alpha > 45^\circ$	

Figura 18 – Tabla 8.6 de EN1993-1-9 [2]

Como se puede ver en la Figura 18, a este detalle puede corresponder una categoría de 63 o 71, dependiendo del ángulo empleado en la transición entre el perfil tubular y la cartela.

Teniendo como base una categoría de detalle de 63 (categoría mínima) se ha verificado que, en las celosías tipo W, las comprobaciones de seguridad frente a fatiga solamente resultan condicionantes para la categoría de tráfico 1 (larga distancia), cuando se tiene en cuenta que el tráfico circula por el borde del carril real, condición bastante conservadora.

No obstante, se ha verificado que, en las celosías tipo M, para una gran variedad de categorías de tráfico, se obtienen daños superiores a la unidad. Se recomienda, en este caso, la adopción de una categoría de detalle de 71 ($\alpha < 45^\circ$) pudiendo existir también, con condiciones de tráfico muy desfavorables (categoría 1 de larga distancia), la necesidad del incremento de los espesores de perfil y cartela [3].

En los casos en los que las diagonales se solucionan mediante perfiles L o UPN, se debería evitar la soldadura por solape del perfil sobre la cartela (Figura 19 y referencia [1]). Este detalle corresponde a los detalles 4 y 5 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 [2], con categorías de fatiga bajas (40/45), por lo que se recomienda, como alternativa, el empleo de perfiles de sección tubular en las diagonales, o bien el empleo de uniones atornilladas con tornillos pretensados trabajando frente a esfuerzos cortantes.

6. Conclusiones

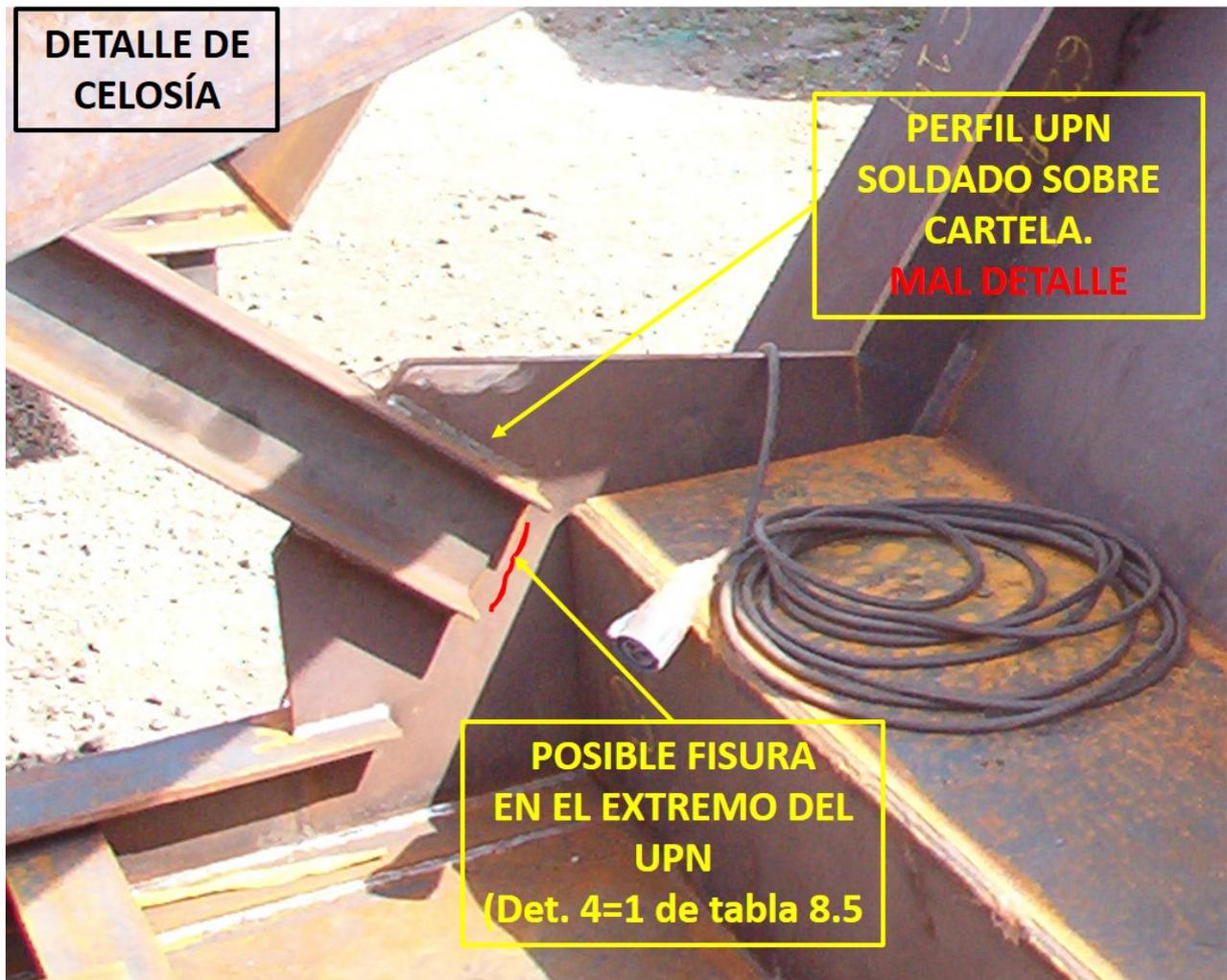
Los problemas de fatiga se asocian, en general, a los puentes metálicos o mixtos de ferrocarril, dada la importancia de la carga y del número de ciclos a los que se ven sometidos durante su vida útil. No obstante, recientes experiencias han demostrado que, si no se presta atención a la concepción, proyecto y control de la ejecución de los detalles en tableros metálicos y mixtos de puentes de carretera, la fatiga puede llegar a generar problemas de durabilidad en dichas estructuras, incluso su rotura antes del fin de su vida útil.

Este artículo resume el análisis de los detalles más condicionantes de las celosías transversales de puentes mixtos de carretera, proponiendo alternativas o precauciones a adoptar en la concepción, ejecución y control de ejecución de dichos detalles.

En el caso de las celosías transversales de puentes mixtos de carretera, los detalles más condicionantes corresponden a la unión entre diagonales y cartelas (apartado 5.4), así como la unión entre el rigidizador de la chapa de fondo de cajón y cartelas de unión (apartado 5.3). Asimismo, en el caso del montante superior en celosías tipo W, no es recomendable el empleo de una solución compuesta por 2 perfiles L unidos con presillas, debido a su reducida categoría de fatiga.

Las categorías de detalle más elevadas corresponden a detalles con transiciones suaves entre chapas en el mismo plano - véase, en la Figura 16, la transición mediante radio de 150mm entre el alma del rigidizador de chapa de fondo y cartela - o en planos perpendiculares - véase la Figura 16, con corte del extremo del ala del rigidizador en pico de flauta.

En líneas generales, en vías con reducido flujo de camiones (categoría de tráfico 4), se pueden emplear categorías mínimas de detalle en las celosías tipo W sin que las comprobaciones de fatiga resulten condicionantes. En el caso de celosías tipo M, lo mismo se puede aplicar para



categorías de tráfico 3 y 4.

Referencias

- [1] Guía para el Proyecto a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera con Eurocódigos. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento, 2019
- [2] European Committee for Standardization (CEN), EN1993-1-9 – Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue Strength of Steel Structures, 2002.
- [3] European Committee for Standardization (CEN), EN1993-2 – Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 2: Steel Bridges, 2002.
- [4] European Committee for Standardization (CEN), EN1991-2 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges, 2003.
- [5] Ribeiro, D., Comportamento Dinâmico de Pontes sob Acção de Tráfego Ferroviário a Alta Velocidade, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.
- [6] Brozzetti, J., Ponts Metalliques et Mixtes – Résistance à la fatigue, Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA), Francia, 1996.
- [7] Agrela, H., Análise Paramétrica de Trelças e Diafragmas Transversais em Pontes Mistas Rodoviarias Tendo em Conta o Fenómeno da Fadiga, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.