

# Guía para el proyecto frente a fatiga de puentes metálicos y mixtos

## *Guide for the fatigue design of steel and composite bridges*

Miguel Ortega Cornejo<sup>a</sup>, Pilar Crespo Rodríguez<sup>b</sup>, Carlos Paradela Sánchez<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Máster Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director de Ingeniería. IDEAM, S.A

<sup>b</sup> ICCP del Estado. Jefe de Área de Estructuras. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento

<sup>c</sup> ICCP del Estado. Jefe de Servicio de Puentes. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento

### RESUMEN

El Ministerio de Fomento ha publicado una serie de Guías de aplicación de los Eurocódigos estructurales para el proyecto de puentes. Este artículo presenta la “Guía para el proyecto frente a fatiga de puentes metálicos y mixtos” aplicada a puentes de carretera. En la Guía se realiza una exposición de las bases teóricas del fenómeno de la fatiga en elementos metálicos y mixtos, se particularizan los métodos de cálculo de los Eurocódigos para su verificación, y se incluyen unas recomendaciones para la concepción, la ejecución y el control de los detalles típicos de puentes metálicos y mixtos de carretera, y un análisis paramétrico de la sensibilidad frente a fatiga de diferentes variables, junto a dos ejemplos completos.

### ABSTRACT

The Spanish Ministry of Public Works has published a series of Guidelines for the application of structural Eurocodes for the design of bridges. This paper presents the "Guide for the fatigue design of steel and composite bridges" applied to road bridges. In the Guide an exposition of the theoretical bases of the phenomenon of fatigue in steel and composite elements is made, it particularizes the methods of calculation of the Eurocodes for its verification, it includes recommendations for the conception, execution and control of the typical details of steel and composite road bridges, and a parametric analysis of the sensitivity to fatigue of different variables, together with two complete examples.

**PALABRAS CLAVE:** Eurocódigos, fatiga, soldadura, estructura metálica, puentes de carretera.

**KEYWORDS:** Eurocodes, fatigue, welding, steel structure, road bridges.

## 1. Introducción

El uso creciente y generalizado de los Eurocódigos en los países de nuestro entorno ha dado lugar a la publicación de manuales, guías y ejemplos de aplicación. En España, desde hace ya unos años, los Eurocódigos se han convertido en textos de referencia en la enseñanza universitaria y han ido apareciendo publicaciones diversas relativas a los mismos,

entre las que cabe citar algunos números monográficos de revistas especializadas [1], [2].

La Dirección General de Carreteras aprobó en marzo de 2019 la Orden Circular 1/2019 [3] sobre aplicación de los Eurocódigos a los proyectos de carreteras, de aplicación a los puentes y estructuras asimilables así como a los terraplenes, desmontes y demás obras

geotécnicas de la red de carreteras del Estado, haciéndola coincidir con la publicación de la serie Guías Eurocódigos, que puede considerarse pionera en nuestro país y más aún, en nuestra lengua, y cuyo objeto es contribuir a que la comunidad técnica española tenga un conocimiento más profundo de los distintos Eurocódigos y, en última instancia, a facilitar su aplicación en los proyectos de la Dirección General de Carreteras.

La serie está planteada como un conjunto abierto de publicaciones que irá creciendo en función de las carencias o inquietudes técnicas que puedan surgir a medida que los Eurocódigos se impongan como código estructural español y se conviertan en textos de uso general.



**Figura 1. Portada de la Guía para el proyecto frente a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera.**

En este artículo se presenta el contenido de la Guía para el proyecto frente a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera [4]. El resto de Guías publicadas hasta la fecha se presentan en otras ponencias del Congreso.

## 2. Contenido de la Guía

El fenómeno de la fatiga es una de las principales causas de patologías en puentes metálicos y mixtos, que puede llegar a producir la rotura de elementos y dar lugar al colapso de la estructura en un periodo inferior a su vida útil. Aunque el fallo por fatiga se produzca en elementos

estructurales no críticos para la estabilidad, su presencia puede requerir el cierre de la infraestructura para acometer su reparación, con la consiguiente repercusión económica y social.

Una concepción estructural adecuada y una ejecución cuidadosa de los detalles, junto con la elección acertada del material y sus espesores, son los aspectos esenciales para asegurar que a lo largo de la vida útil no se produzcan fallos por fatiga y fractura frágil.

Aunque las bases teóricas del estudio de la fatiga tienen sus raíces en el siglo XIX, no es hasta la segunda mitad del siglo XX cuando ese conocimiento empieza a tener un reflejo normativo; y no es hasta los años 80 cuando queda establecido el enfoque que sigue siendo aceptado en la actualidad y que está recogido en los Eurocódigos.

El objeto de esta Guía es servir de ayuda a la comprensión del fenómeno de la fatiga, facilitar el uso e interpretación del tratamiento que hacen los Eurocódigos del estado límite último de fatiga y, en última instancia, contribuir a mejorar la calidad de los proyectos de puentes metálicos y mixtos de carretera en lo que a este fenómeno se refiere. Además de exponer las bases teóricas generales y analizar los procedimientos de cálculo establecidos por los Eurocódigos, la Guía aporta un conjunto de criterios y recomendaciones de gran valor para la concepción, ejecución y control de los detalles más habituales en las tipologías más frecuentes de puentes metálicos y mixtos de carretera, que pueden ser susceptibles de verse condicionados por la fatiga.

Su ámbito de aplicación se circunscribe al proyecto de obra nueva de puentes metálicos y mixtos de carretera dimensionados con los Eurocódigos Estructurales y que se han ejecutado y controlado según la norma UNE-EN 1090-2. En todo caso, la base teórica, la metodología y las recomendaciones con criterios para la concepción, ejecución y el control de ejecución, son extensibles a cualquier proyecto de estructura metálica y mixta susceptible de

fatiga, independientemente de la normativa vigente o del uso de la estructura (puente de carretera, de ferrocarril o pasarela, estructura de edificación, estructura industrial, naval, etc.).

Esta Guía no está pensada para la verificación frente a fatiga de un puente existente que no se haya proyectado dentro del marco de los Eurocódigos Estructurales ni siguiendo los criterios de ejecución y control establecidos en UNE-EN 1090-2, ya que en ese caso no será evidente la asignación de la categoría de fatiga a un detalle que se desconoce cómo se ha ejecutado y cómo se ha controlado. No obstante, en este último supuesto se dan ciertas indicaciones que pueden ayudar a su evaluación.

Aunque es muy frecuente calcular el Estado Límite de Fatiga y adoptar precauciones de diseño y concebir detalles adecuados a fatiga en puentes de ferrocarril, sin embargo, hasta hace poco tiempo no lo era tanto en puentes de carretera. La principal conclusión que se puede extraer de los análisis realizados, es que en determinados casos, no se puede obviar la verificación de fatiga en puentes de carretera y en ocasiones este Estado Límite puede llegar a condicionar el dimensionamiento de algún elemento, pero sobre todo y lo que es más importante, los detalles en puentes de carretera se deben cuidar desde su concepción, estableciendo los controles y condiciones a la ejecución de forma que se logre la mejor categoría de fatiga posible, sobre todo en las zonas que pueden llegar a condicionar su dimensionamiento.

El documento se estructura en seis capítulos. Una vez hecha la introducción, se presentan, en el capítulo 2, las bases teóricas para la comprensión del fenómeno de la fatiga en elementos metálicos.

En los siguientes apartados de este artículo se resumen los capítulos 3 a 6 de la Guía [4].

### 3. Resumen del capítulo 3: Verificaciones de los Eurocódigos para el cálculo a fatiga.

El capítulo 3 de la Guía [4] define las acciones de fatiga en puentes de carretera, acorde al Eurocódigo 1 parte 2 de acciones de tráfico en puentes, describiendo con detalle los 5 tipos de trenes de carga de fatiga (FLM1 a 5).

El modelo de carga que se empleará en las verificaciones del Método Simplificado o del Daño Equivalente, será el FLM3, con 4 ejes de 120 kN (Fig. 2)

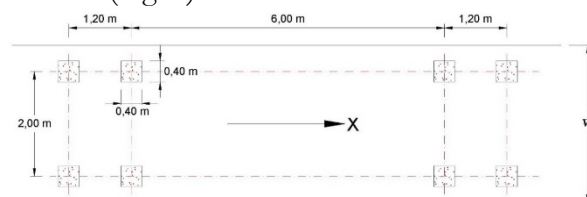


Figura 2 Modelo de carga de fatiga 3 (Figura 4.8 de UNE-EN 1991-2)

A la hora de verificar el comportamiento a fatiga de un elemento o detalle, la resistencia de sus materiales constituyentes debe afectarse por el coeficiente parcial para la resistencia a fatiga  $\gamma_{MF}$ . En el caso del acero estructural  $\gamma_{MF}$  depende del criterio de evaluación para la resistencia a fatiga, así como de la gravedad del fallo del elemento estudiado.

Acorde con el capítulo 3 de UNE-EN 1993-1-9 [5], como criterio de evaluación de la resistencia a fatiga, se puede elegir uno de dos enfoques:

- Tolerancia al daño (en inglés, “damage tolerant”), caracterizado por una menor exigencia en los requisitos si se garantizan una serie de condiciones e inspecciones.
- Integridad asegurada (en inglés, “safe life”), más exigente al no ser necesario hacer revisiones a lo largo de la vida útil.

Atendiendo a la gravedad del daño por fatiga del detalle, se diferencia entre consecuencias de fallo leves y graves. El Anejo Nacional español considera que las consecuencias de fallo son graves cuando el fallo a fatiga del elemento suponga el colapso de la

estructura o de una parte de la misma. Se podrá considerar que las consecuencias de fallo son menores (fallo leve) cuando un fallo a fatiga del elemento no suponga un fallo estructural, existiendo capacidad de redistribución de cargas, aun cuando se produzcan deformaciones importantes.

Los valores recomendados de los coeficientes parciales para la resistencia a fatiga  $\gamma_{Mf}$  en acero estructural, en función del método de análisis y de las consecuencias del fallo, son los de la Tabla 1.

**Tabla 1. Coeficiente parcial para la resistencia a fatiga (Tabla 3.1 UNE-EN 1993-1-9).**

Criterio de evaluación	Consecuencias del fallo leves	Consecuencias del fallo graves
Tolerancia al daño	1,00	1,15
Integridad asegurada	1,15	1,35

El Anejo Nacional de UNE-EN 1993-1-9 sólo permite el criterio de evaluación de la resistencia a fatiga de integridad asegurada y adopta los valores recomendados para el coeficiente parcial  $\gamma_{Mf}$ .

En el caso de los pernos conectadores, y de acuerdo con el Anejo Nacional de UNE-EN 1994-1-1, el valor a adoptar para el coeficiente parcial para la resistencia a fatiga  $\gamma_{Mf,s}$  es 1,00.

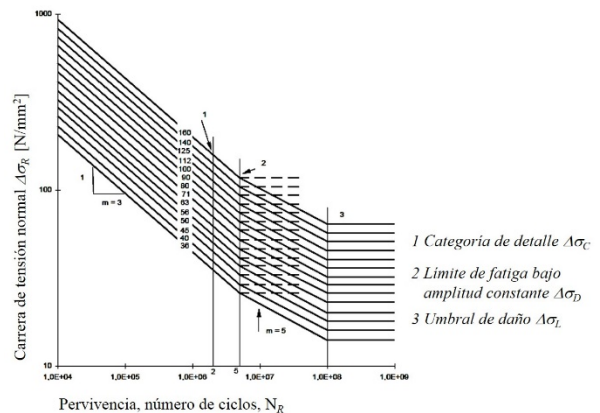
UNE-EN1992-1-1 indica que los coeficientes parciales de seguridad para la resistencia a fatiga a adoptar para el hormigón  $\gamma_{C,fat}$ , y para el acero (pasivo o activo)  $\gamma_{S,fat}$ , son los de la Tabla 2.1N de UNE-EN 1992 1-1:  $\gamma_{C,fat} = 1,50$  y  $\gamma_{S,fat} = 1,15$

En el caso de cables y tirantes los coeficientes parciales para la resistencia a fatiga de cables y tirantes serán los correspondientes a los del acero estructural con el criterio de evaluación de integridad asegurada.

El capítulo 3 de la Guía incluye también las curvas de fatiga normativas para la verificación de la resistencia frente a:

- Tensiones normales en acero estructural (Fig. 3)

- Tensiones tangenciales en acero estructural
- Pernos conectadores
- Acero pasivo y activo
- Elementos en tracción: cables y tirantes



**Figura 3 Curvas S-N para carreras de tensión normal (Figura 7.1 UNE-EN 1993-1-9)**

### 3.1. Métodos para la verificación a Fatiga.

#### 3.1.1. Método del Daño Equivalente

La verificación de la seguridad a fatiga de un detalle mediante el Método Simplificado o del Daño Equivalente se aplica acorde a las ecuaciones siguientes:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \quad ; \quad \gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} \leq \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \quad (1)$$

donde:

$\gamma_{Ff}$  coeficiente parcial de las carreras de tensión equivalentes  $\Delta\sigma_{E,2}$  y  $\Delta\tau_{E,2}$ . El Anejo Nacional de UNE-EN 1993-2 adopta el valor de  $\gamma_{Ff} = 1,00$

$\gamma_{Mf}$  coeficiente parcial para la resistencia a fatiga, con valores 1,15 o 1,35 en función de las consecuencias de fallo: leves o graves respectivamente.

$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}$  valor de cálculo de la carrera de tensión normal equivalente, referida a 2 millones de ciclos

$\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}$  valor de cálculo de la carrera de tensión tangencial equivalente, referida a 2 millones de ciclos

$\Delta\sigma_c$  y  $\Delta\tau_c$  categoría del detalle para tensiones normales y tangenciales según las tablas de referencia 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9;

En el caso de sollicitación simultánea de tensiones normales y tangenciales, su interacción se evalúa mediante la expresión (2) ((8.3) de [5]).

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}}\right)^5 \leq 1 \quad (2)$$

Los valores de cálculo de las carreras de tensión nominal estarán referidos siempre a dos millones de ciclos para que se puedan comparar directamente con la categoría del detalle.

Los valores de cálculo de las carreras de tensión nominal para chapas de acero estructural se determinan según (3):

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \quad (3)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)$$

donde el primer miembro de cada una de las igualdades coincide con el primer miembro de las inecuaciones (1), con el mismo significado de sus términos; los términos restantes, del segundo miembro, son:

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$  carrera de tensión normal en el elemento de estudio bajo la acción de la carga de fatiga de cálculo,  $\gamma_{Ff} Q_k$

$\Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)$  carrera de tensión tangencial en el elemento de estudio bajo la acción de la carga de fatiga de cálculo,  $\gamma_{Ff} Q_k$

$\lambda_i$  coeficientes de daño equivalente, que pretenden convertir la carrera de tensión  $\Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$  o  $\Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)$ , en otra de amplitud constante que, aplicada 2 millones de ciclos, provoque el mismo daño que el tráfico real a lo largo de la vida útil de la estructura.

En puentes metálicos de carretera el coeficiente de daño equivalente  $\lambda$  para acero estructural se calcula según la expresión (4) (expresión 9.9 de UNE-EN 1993-2 [6]):

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4 \quad \lambda \leq \lambda_{\max} \quad (4)$$

donde:

- $\lambda_1$  coeficiente por daño del tráfico en función de la longitud y forma de la línea o superficie de influencia crítica
- $\lambda_2$  coeficiente de intensidad de tráfico
- $\lambda_3$  coeficiente de vida útil
- $\lambda_4$  coeficiente por tráfico en carriles adicionales al carril principal de tráfico pesado
- $\lambda_{\max}$  máximo valor normativo del coeficiente  $\lambda$  teniendo en cuenta el límite de fatiga

En la Guía de Fatiga [4] se describe con detalle cómo obtener en cada caso los valores de los distintos  $\lambda$  y su ámbito de aplicación, acorde a UNE-EN 1993-2 [6].

### 3.1.2. Método del Daño Acumulado

El Método del Daño Acumulado (MDA) es la metodología de análisis a fatiga que permite la obtención de resultados más precisa. Al no utilizar fórmulas de conversión ni simplificaciones, y resultando los espectros de tensiones del paso de cargas que representan lo más fielmente posible el tráfico real de la estructura, este método tiene como mayor ventaja el rigor. El resultado final se obtiene en forma de daño y se basa en la hipótesis acumulativa lineal de Palmgren-Miner [4]. Conforme a este enfoque, un detalle será seguro cuando el daño total causado por el paso del tráfico pesado real a lo largo de la vida útil de la estructura sea inferior a la unidad.

La potencia de este método estriba en diferentes aspectos:

- Es un método más riguroso que el simplificado al basarse estrictamente en las curvas S-N y al prescindir de fórmulas de conversión basadas en hipótesis no declaradas.
- Permite trabajar con oscilaciones tensionales reales superiores no sólo al

CAFL de un detalle, sino también a la propia categoría del detalle.

- Es más general al ser aplicable a cualquier tipología de puente y elemento, ya sea principal o local, independientemente de sus dimensiones o función.
- Es lineal con la IMD y con la vida útil, por lo que resulta fácil determinar cuánto debería variar una u otra para causar el fallo del detalle analizado, o la vida útil remanente conocido el daño al cabo de un periodo de tiempo.

La comprobación a fatiga por el MDA se reduce a la obtención del conjunto de acciones aplicadas sobre el puente y a las correspondientes resistencias, las primeras resultantes de un análisis elástico de las estructuras bajo el paso de vehículos representativos del tráfico real y las segundas de la utilización de las curvas de fatiga.

La metodología concreta se desarrolla en la Figura A.1 incluida en el anexo A de UNE-EN 1993-1-9 [5] y se desarrolla con detalle en la Guía [4]. Definida una composición del tráfico esperable a lo largo de la vida útil y definida una IMD esperable se realiza el paseo de cada vehículo tipo a la velocidad especificada –con cálculo dinámico, si se requiriese y se procede al almacenamiento de la historia de esfuerzos en los elementos de estudio (Fig. 4).

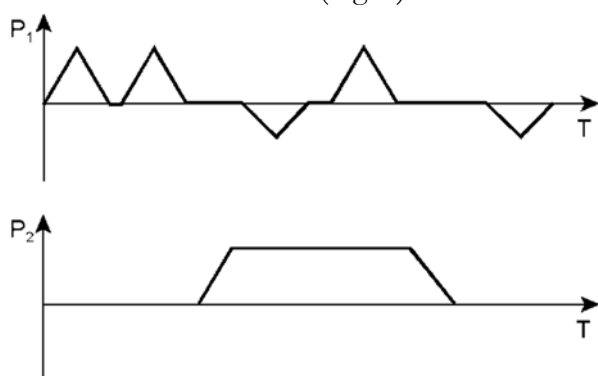


Figura 4 Ejemplos de histórico de esfuerzos en una sección (Figura A.1 a) de UNE-EN 1993-1-9)

A partir del registro de esfuerzos y de las constantes estáticas de cada sección de estudio, se genera la historia de tensiones (Fig. 5), para el paso de todos los vehículos.



Figura 5 Ejemplo de histórico de tensiones en un detalle (Figura A.1 b) de UNE-EN 1993-1-9)

Para el cálculo del daño en un elemento se hace precisa la conversión del histórico de tensiones en un espectro de tensiones (Fig. 6). La Guía [4] describe con detalle en base a la normativa y la bibliografía especializada la metodología para su obtención.

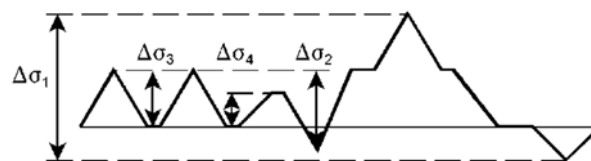


Figura 6 Recuento de carreras de tensión de fatiga (Figura A.1 c) de UNE-EN 1993-1-9)

Conocidas las carreras de tensión dentro de una historia concreta (o sea, para un vehículo, una sección de estudio y un detalle analizado), se construye un histograma por escalones de tensión y se efectúa el recuento del número de carreras reales contenidas en cada escalón. Con este histograma (Fig. 7), asociado a un vehículo concreto, y el número de veces que va a pasar por la estructura en toda la vida útil ( $IMD \cdot 365 \cdot t_{i,d}$ ), se obtiene el número de ciclos de fatiga para cada escalón.

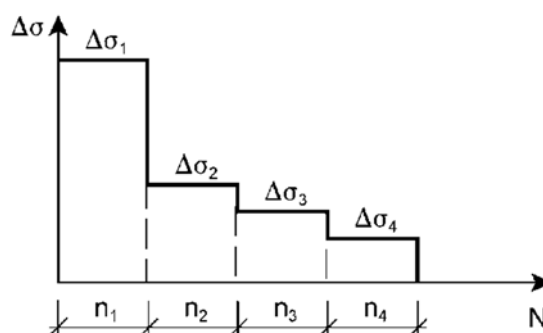


Figura 7 Espectro de carreras de tensión de fatiga (Figura A.1 d) de UNE-EN 1993-1-9)

Existen diferentes métodos de recuento para extraer estas carreras, como el del vaciado del depósito (del depósito, abreviadamente, de la alberca, o en inglés, “reservoir”) o el de la gota de agua (de la recogida de lluvia, de la pagoda, o

en inglés, “rainflow”), que se explican con detalle en la Guía [4].

El cálculo del año se realiza conociendo el espectro de carreras de tensiones (número de ciclos de aplicación correspondiente a cada carrera de tensión –Fig. 7–), queda determinar el correspondiente número de ciclos hasta rotura por fatiga para cada carrera, mediante las curvas S-N del detalle (Fig. 8).

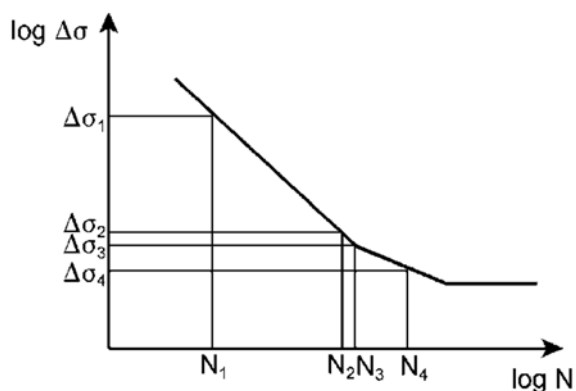


Figura 8 Ciclos resistentes para cada carrera de tensión (Figura A.1 e) de UNE-EN 1993-1-9)

El daño causado por cada carrera de tensión resulta, así, del cociente entre el número de ciclos de fatiga aplicados (según el espectro de carreras de tensiones) y el número de ciclos resistidos (curva S–N), de acuerdo con la expresión (5):

$$D = \frac{n}{N(\Delta\sigma)} \quad (5)$$

De acuerdo con la regla de Palmgren-Miner (ec. 6), al sumarse el daño causado por todas las carreras de tensión generadas por el paso de un vehículo (espectro de carreras de tensión) se obtiene el daño causado por ese vehículo, que es el daño unitario.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \leq D_d \quad (6)$$

Finalmente, y tras la suma (de acuerdo con la regla de Palmgren-Miner) del daño causado por todos los vehículos, se obtiene el daño total por fatiga  $D_d$ , causado en el detalle a lo largo de la vida útil del puente por el paso de todos los vehículos analizados con las intensidades definidas, conforme a la expresión (7).

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (7)$$

Donde:

$n_{Ei}$  es el número de ciclos correspondiente a la  $i$ -ésima carrera de tensiones del espectro

$N_{Ri}$  es la pervivencia (en ciclos) que resulta para el valor  $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{Ei}$  de la  $i$ -ésima carrera de tensiones en la curva de resistencia a fatiga minorada del detalle  $(\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}) - N_R$

Si el daño así evaluado es menor que la unidad, el detalle planteado con su categoría asociada cumple el Estado Límite Último de Fatiga.

#### 4. Resumen del capítulo 4

El capítulo 4 de la Guía [4] incluye las recomendaciones para la concepción, dimensionamiento, ejecución y control de los detalles típicos de puentes metálicos y mixtos de carretera, con objeto de establecer criterios para conseguir detalles con la mayor categoría de fatiga posible en las tipologías más frecuentes de cajones mixtos y tableros con vigas mixtas, bijácena o multijácena.

Se trata de un capítulo eminentemente práctico, de 99 páginas de extensión, en el que se repasan las tablas 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9 [5] y se comentan cada uno de los detalles tipo allí definidos con fotos reales de los detalles más habituales en puentes (97 imágenes).

El capítulo describe con profusión las operaciones de corte y preparación de bordes, el marcado de piezas y las precauciones a adoptar frente a fatiga, los principales detalles de empalmes transversales entre chapas soldadas a tope sin y con chapa de respaldo (Fig. 9), los principales detalles que generan los rigidizadores (Fig. 10), las cartelas y otros elementos soldados a las chapas principales, ya sean con soldaduras longitudinales o transversales, los detalles típicos

de soldaduras de rasante, las soldaduras en elementos perpendiculares esfuerzos, los detalles más habituales de uniones atornilladas, así como los detalles más frecuentes en celosías horizontales y verticales de arriostramiento en secciones cajón y los marcos o diafragmas en secciones bijácena. Muchos de estos detalles se resumieron en la ref. [7] en el congreso de ACHE de 2017.

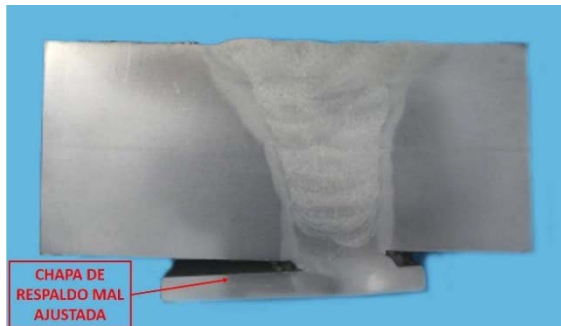


Figura 9 Ejemplo de chapa de respaldo mal ajustada

Adicionalmente, al final del capítulo 4 se incluyen algunas recomendaciones relativas a tableros en celosía y losas ortótropas (Fig. 11), que presentan detalles con particularidades específicas y estos últimos son además en muchas ocasiones las tipologías de puentes metálicos más susceptibles de tener con el tiempo problemas de fatiga. La ref. [8] del congreso de ACHE de 2017 resume gran parte de los detalles específicos tratados por la Guía [4] para losas ortótropas.

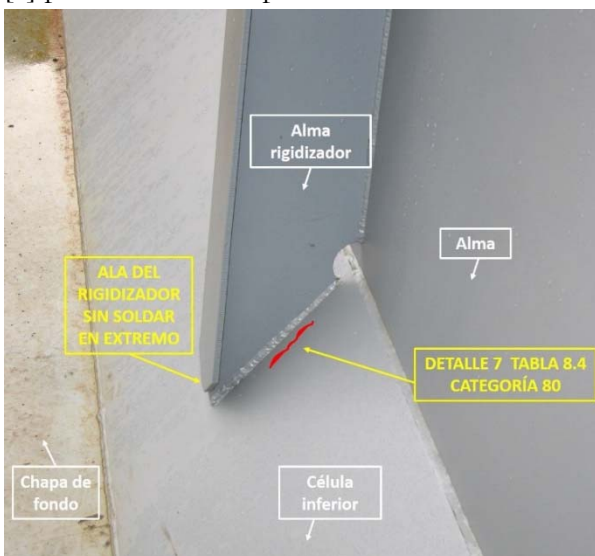


Figura 10 Detalle de rigidizador transversal de alma con el ala sin soldar en su extremo

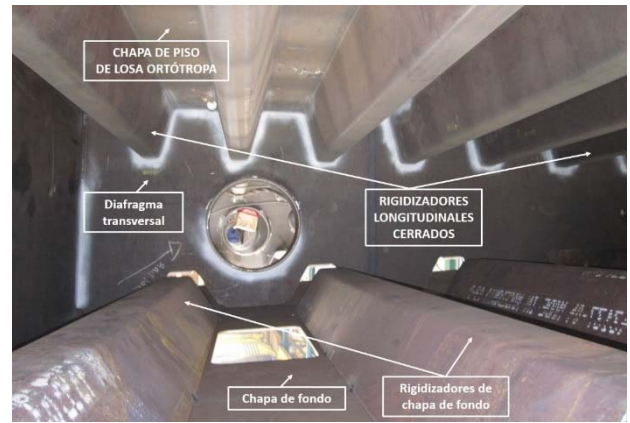


Figura 11 Vista de una losa ortótropa con rigidizadores longitudinales cerrados

## 5. Resumen del capítulo 5: análisis paramétrico de la sensibilidad frente a fatiga en puentes de carretera

El capítulo 5 incluye un análisis paramétrico de la sensibilidad frente a fatiga de diferentes variables en puentes de carretera, exponiendo los casos más habituales en los que, en general, la fatiga no suele dimensionar frente al resto de Estados Límite y los casos de las tipologías, configuraciones estructurales y detalles más frecuentes, en los que el Estado Límite Último de Fatiga es muy probable que condicione el dimensionamiento de algún elemento. Los análisis paramétricos y las conclusiones incluidos en este capítulo deben tomarse como orientaciones y no como normas o criterios absolutamente fijos o cerrados.

Se han analizado los casos siguientes, habituales en puentes de carretera.

Análisis longitudinal de tableros:

- Sección cajón mixta:
  - Tableros isostáticos con luces entre 20 y 60 m.
  - Tableros continuos con tres vanos, y empleo de doble acción mixta en zonas de apoyos, con luces entre 30 y 75 m.
  - Variante del estudio anterior con tableros continuos con muchos vanos tipo con la misma luz.
- Sección bijácena mixta:



- Tableros continuos con tres vanos, y empleo de doble acción mixta en zonas de apoyos, con luces entre 30 y 75 m.

De estos análisis paramétricos se extraen conclusiones comparando la respuesta frente a fatiga de los cajones mixtos y las secciones bijnácena mixtas más frecuentes.

Posteriormente el capítulo 5 incluye el análisis de los elementos transversales que sirven de apoyo a las losas con amplios voladizos:

- Costillas laterales en tableros con voladizos de 4,75 m.
- Jabalcones laterales con costilla y puntal en tableros con voladizos más amplios.

La Guía [4] no profundiza en el análisis de la respuesta frente a fatiga en celosías transversales, trabajo que se ha realizado posteriormente y que se resume en el artículo de la presentación de la ref. [9] de este congreso de ACHE 2020.

Los análisis realizados en el capítulo 5, aunque abarcan un buen número de casos, no cubren cualquier posible configuración que se pueda dar en puentes de carretera, por lo que es posible que en función de las características específicas de cada caso, anchura del tablero, distribución de vigas o cajones, cantos, luces, empleo de simple o doble acción mixta, previsión de tráfico, tipos de detalle, etc., el Estado Límite de Fatiga pueda llegar a condicionar la concepción de un detalle, y sin embargo cambiando sólo alguno de los parámetros del análisis, puede que el mismo detalle no llegue a verse condicionado por la fatiga.

Tras estos análisis, se concluyen las secciones tipo, de los puentes más frecuentes y las zonas que son más susceptibles de condicionar frente a fatiga indicando ciertas recomendaciones para mejorar su respuesta.

## 6. Ejemplos de aplicación

La Guía [4] incluye en el capítulo 6 el desarrollo compuesto de dos ejemplos de aplicación siguiendo los Eurocódigos:

- Un cajón mixto isostático de 45,5 m de luz y 10,6 m de anchura con dos carriles, uno para cada sentido.
- Un tablero continuo de tres vanos formado por una sección bijnácena mixta con doble acción mixta en la zona de negativos sobre pilas. El puente tiene 40+60+40 m de luz y 10,80 m de anchura.

En ambos casos se explica con detalle la verificación a fatiga de las secciones críticas así como de las chapas de acero que pueden condicionar frente a fatiga en función de distintas configuraciones de tráfico posibles, la conexión y la armadura pasiva de la losa en zona de negativos (en el segundo caso).

### *Agradecimientos*

La Guía para el proyecto a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera con Eurocódigos ha sido redactada por IDEAM con la participación de: Francisco Millanes Mato, Miguel Ortega Cornejo, María João dos Santos Freitas, Jorge Nebreda Sánchez y Miguel Pinto de Matos. Por parte de la Dirección General de Carreteras han participado en el desarrollo de la Guía, Pilar Crespo Rodríguez y Carlos Paradela Sánchez.

### *Referencias*

- [1] Hormigón y Acero, enero-marzo 2014, N° 271, Vol 65. ISSN: 0439-5689
- [2] Hormigón y Acero, abril-agosto 2014, N° 272, Vol 65. ISSN: 0439-5689
- [3] Orden circular 1/2019. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. Enlace de descarga:  
[https://www.fomento.gob.es/recursos\\_mfom/comodin/recursos/2019-03-](https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/2019-03-)

- [4] Guía para el proyecto a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera con Eurocódigos. Ministerio de Fomento. 2019. Enlace de descarga:  
<http://apps.fomento.gob.es/CVP/detallepublicacion.aspx?idpub=ICW043>
- [5] UNE-EN 1993-1-9. Eurocódigo3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. AENOR
- [6] UNE-EN 1993-2. Eurocódigo3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 2: Puentes. AENOR
- [7] M. Ortega , F. Millanes. Recomendaciones para la concepción de los detalles frente a fatiga en puentes mixtos de carretera de carretera. Congreso de ACHE 2017. A Coruña.
- [8] M. Ortega , F. Millanes. Recomendaciones para la concepción de los detalles frente a fatiga en losas ortótropas de carretera. Congreso de ACHE 2017. A Coruña.
- [9] M. Ortega, M.J. Freitas, H. Agrela. Análisis de la respuesta frente a fatiga de las celosías transversales en puentes mixtos de carretera acorde al Eurocódigo EN1993-1-9. Congreso de ACHE 2020. Santander.