

Experiencias en la evaluación de puentes metálicos de carretera que no fueron diseñados frente a fatiga.

Experiences in the assessment of metallic road bridges that were not designed against fatigue.

Sebastián Zambrano Alcalá^a, Miguel Ángel Liebana Ramos^b, Eduardo Díaz-Pavón

Cuaresma^c, Raúl Rubén Rodríguez Escribano^d,

^a Ingeniero Civil. INTEMAC. Departamento de Rehabilitación. szambrano@intemac.es

^b Ingeniero Industrial. INTEMAC. Jefe del Departamento de Estructuras Especiales. maliebana@intemac.es

^c Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. Director del Área de Evaluación y Patología de Estructuras.

ediazpavon@intemac.es

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. Director de la División de Estudios. rrodriguez@intemac.es

RESUMEN

Las comprobaciones a fatiga forman parte de los análisis contemplados en el diseño de cualquier estructura metálica actual. No ha existido, sin embargo, normas de obligado cumplimiento relativas a esta sollicitación hasta fechas recientes en puentes de carretera. Esto hace que la situación a fatiga de muchas estructuras metálicas no hubiera sido valorada, lo que conduce a detalles de mal comportamiento de acuerdo con los criterios actuales, e incluso a otros que ni siquiera permiten su valoración. En la presente comunicación se exponen ejemplos que ponen de manifiesto que, si este estado límite no fue considerado en proyecto, es muy difícil garantizar la seguridad futura frente a dicho estado límite.

ABSTRACT

Fatigue checks are part of the analyses contemplated in the design of any metallic structure today. However, until recently, there have been no mandatory standards for this type of stress in road bridges. This means that the fatigue situation of many steel structures has not been evaluated, which leads to details of poor performance according to current criteria, and even to others that do not even allow their evaluation. This communication presents examples that show that, if this limit state was not considered in the design, it is very difficult to guarantee future safety against this limit state.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, estructura metálica, inestabilidad, ingeniería forense, curvas S-N

KEYWORDS: Fatigue, steel structure, instability, forensic engineering, S-N curves

1. Introducción. Evolución del estado normativo relativo a fatiga.

A inicios del siglo XIX, el auge del acero como material de construcción se extendió hasta el campo de transporte al hacer posible el proyectar estructuras más livianas, con un menor tiempo de ejecución respecto a las de fábrica. No obstante, a mediados del siglo XX, ya era evidente como se limitaba la vida útil de estos puentes por fallos debidos a fatiga.

En respuesta a esta problemática, en 1973 la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) publicó la primera normativa específica de fatiga donde se categorizaban algunos detalles estructurales en términos de tensiones máximas y curvas S-N. Estas relacionaban las tensiones con los números de ciclos máximos que soportaría cada detalle. Este método seguía el criterio común de la época de los esfuerzos admisibles (ASD por sus siglas en inglés) sin tener en cuenta la

naturaleza probabilista de las acciones. No obstante, la AASTHO la implementó en 1990 como Estado Límite Ultimo (ELU) de diseño.

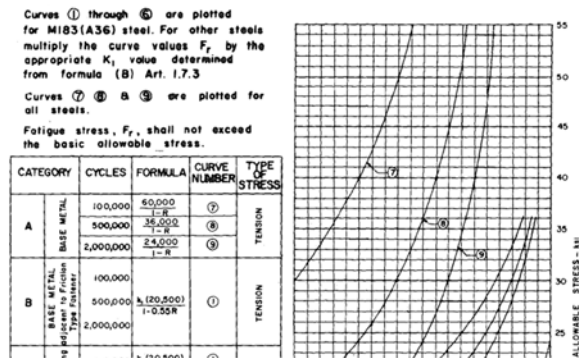


Figura 1. Extracto de la AASTHO 1973.

En España, dicha normativa sirvió como documento de consulta, pero no como requerimiento de obligado cumplimiento. Incluso como documento de consulta, no fue hasta 1995 cuando se publicaron las primeras *Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos de carreteras* (RPM-95) que recogía en esencia las instrucciones de la AASTHO. Si bien la biblioteca de detalles se extendió con respecto a la primera publicación de la normativa estadounidense, aun no se adoptaba como un Estado Límite Ultimo (ELU) de diseño.

Tabla 8.4.b) DETALLES CONSTRUCTIVOS CON ELEMENTOS SOLDADOS Hoja 1 de 2

CATEGORÍA DEL DETALLE	DETALLES CONSTRUCTIVOS	DESCRIPCIÓN	REQUISITOS
80	$L \leq 50$ mm	SOLDADURAS LONGITUDINALES [1] Canto.	[1] La categoría del detalle varía de acuerdo con la longitud L , de l : soldadura.
71	$50 \leq L \leq 100$ mm		
50	$L \geq 100$ mm		

Figura 2. Ejemplo de detalles de la RPM-95

Paralelamente, en las *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos de carreteras* se estaba enfocando, además de la tipología mixta, la naturaleza dinámica propia de estos puentes donde la interacción entre materiales influye en la respuesta.

No fue hasta la víspera del inicio del siglo XXI que el estudio de la fatiga se convirtió una prioridad en términos normativos a nivel nacional. Así, en la *Instrucción sobre las Acciones a considerar en Puentes de Carretera* de 1998 (IAP-98), de obligado cumplimiento, se introdujo por primera vez el tratamiento de fatiga como ELU. No obstante, se seguía en el proceso de adopción de normas internacionales que ya contemplaban

un concepto fundamental, la vida útil a largo plazo.

Dentro del ámbito comunitario, en concreto en el *Eurocódigo 1* del 2003 (EN 1991-2), ya se establecían factores de amplificación de cargas con relación a un periodo de vida de 100 años. En este sentido, el *Eurocódigo 3* del 2005 (EN 1993-9) logró relacionar los ciclos de las curvas S-N con dicha vida útil. Sin embargo, estas referencias seguían siendo meramente documentos de consulta en el ámbito nacional.

En la década siguiente, con la revisión y publicación de la Norma IAP, vigente desde el 2011, se adoptaron los criterios de los Eurocódigos en cuanto a la vida útil, así como modelos de cargas que representan mejor el tráfico carretero de España. En paralelo, el Ministerio de Fomento publicó una serie de guías de diseño frente a fatiga que recogían los aspectos tratados en los Eurocódigos 2, 3 y 4. En todo caso, seguían teniendo carácter normativo y no de ley.

Desde 2019, la Orden Circular 1/2019 integra plenamente (acompañado de los anexos nacionales) la totalidad de los Eurocódigos para el desarrollo de proyectos de Puentes Carreteros, siendo ya su aplicación de obligado cumplimiento para el diseño de nuevos puentes. Sin embargo, el recorrido realizado pone de manifiesto que la mayoría de los puentes actualmente en servicio en nuestras carreteras no fueron concebidos frente a fatiga.

2. Casuística común en puentes metálicos de carretera. Posibles criterios de evaluación.

En el estado actual, nos encontramos, con una casuística diversa a lo largo del territorio español, pero que, en el caso de puentes metálicos anteriores, aproximadamente, a 1995 (fecha de publicación de la RPM-95), coinciden en algo común: no fueron diseñados a fatiga.

Sin embargo, la solicitud de fatiga supone en puentes metálicos la progresiva e inevitable pérdida de seguridad a lo largo del tiempo de

servicio, lo que obliga a evaluar el estado de dichos puentes existentes.

De cara a llevar a cabo esta evaluación frente a fatiga, partiendo de los planteamientos de la normativa vigente (por ejemplo UNE EN 1993-9), cabe diferenciar dos criterios: *Integridad Asegurada* y *Tolerancia al daño*. Ambos parten de la base común de que la seguridad inicial de la estructura se va degradando con el tiempo, sin que esa degradación implique en ningún caso, rebasar los límites de fiabilidad correspondientes a la estructura, pero se diferencian en otros aspectos que se tratan esquemáticamente en la Figura 3:

- *Integridad Asegurada*. Conforme a este criterio la estructura debe ser capaz de llegar al final de su vida útil de proyecto sin que la degradación de su resistencia a la fatiga conduzca a valores de fiabilidad inferiores a los normativos.
- *Tolerancia al daño*. La degradación de su resistencia a la fatiga puede ser tal que alcance valores límite de fiabilidad en un plazo inferior a su vida útil, lo que exige que las posibles fisuras de fatiga sean detectables con los procedimientos habituales de inspección antes de alcanzar su tamaño crítico. La estructura ha de ser inspeccionada a intervalos siempre inferiores a los plazos de crecimiento de grieta y como resultado de la inspección se pueden reparar las posibles fisuras y detener su crecimiento.

Además, la estructura debería contar con la redundancia suficiente como para permitir el fallo de elementos aislados.

En el caso de los puentes de carretera existentes, lo habitual es que no se haya tenido en cuenta en proyecto ninguno de los dos criterios (simplemente porque no existía normativa vigente que lo contemplara).

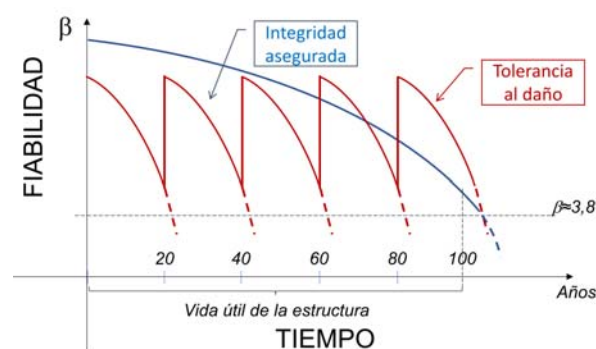


Figura 3. Criterios de comprobación a fatiga

De cara a su evaluación, lo ideal sería poder utilizar el criterio de *Integridad Asegurada*, ya que permitiría, mediante cálculo, anticipar una vida útil de la estructura. La aplicación de dicho criterio pasa por su comprobación “analítica” frente a solicitaciones de fatiga.

Sin embargo, en esta comprobación de la estructura existe una componente fundamental, la que se expresa en términos de resistencia, de carácter puramente experimental. Efectivamente, mientras que en lo que se refiere a la sollicitación y a sus efectos se ha avanzado mucho en los últimos años gracias al progreso de los métodos estadísticos (acciones) y numéricos (tensiones en cada punto), en lo que se refiere a la resistencia de cada detalle soldado el procedimiento empleado es el mismo que se utilizaba muchos años atrás: la comparación directa con lo que resisten esos mismos detalles cuando se ensayan en laboratorio. Es por ello que todos los detalles de proyecto de un puente reproducen, en la actualidad, el catálogo normativo de detalles de fatiga¹.

Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones muchos de los detalles de la estructura no responden a los de dichos catálogos, y ni siquiera otros aspectos básicos como la calidad de la ejecución permitirían aplicar dichos criterios de comprobación.

En estas condiciones sólo queda la posibilidad de adoptar el criterio de *tolerancia al daño*², esto es,

¹ El anejo B de UNE EN 1993:1-9 recoge la evaluación de la resistencia a fatiga utilizando métodos de tensiones geométricas (punto caliente), que podría aplicarse a algunos detalles no categorizados, a partir del cual se podrían obtener las curvas de resistencia a fatiga de este tipo de detalles.

² Así se deduce, por ejemplo, de los ejemplos recogidos en *Reliability background of the Eurocodes*, publicado por JRC, en donde se contempla la realización de inspecciones en combinación con procedimientos de análisis de mecánica de la fractura para evaluar la seguridad a fatiga de una estructura existente.

inspeccionar periódicamente la estructura de cara a descartar que existan defectos indicativos de un anómalo comportamiento a fatiga. Esto requiere, no obstante, cumplir aspectos básicos como los mencionados anteriormente, que muy habitualmente no se cumplen: que haya redundancia (simplemente porque muchos puentes son isostáticos) y accesibilidad a todos los nudos de la estructura, lo que inhabilita cualquier inspección. Sobre estas dificultades con ambos criterios se incide a continuación con algunos ejemplos.

3. Criterio de *integridad asegurada*. Detalles donde sí es posible analizar su idoneidad a fatiga con comprobaciones de cálculo

En la Figura 4 se muestra el caso de un puente que si bien no fue diseñado en origen a fatiga algunos de sus detalles sí estaban catalogados por normas más recientes y podían realizarse comprobaciones de cálculo específicas.



Figura 4. Fotografía de un puente no diseñado en origen a fatiga

Presenta dos tableros con una configuración mixta, compuesta por celosías metálicas tipo Warren con una configuración tradicional, diferenciando nítidamente entre nudos y barras. Se trata de una configuración simple, fácil de fabricar, pero poco adecuada frente a la sollicitación de fatiga que exige unas formas mucho más suaves, caracterizadas por encuentros curvos y transiciones continuas entre elementos, nudos y barras.

Esta distribución formal, se configuraba constructivamente mediante dos tipos de

cartelas (ver la Figura 5). Las tipo A, son simples chapones que se sueldan en prolongación de las alas que forman la sección en cajón de los cordones. Las tipo B, sin embargo, interrumpen los cordones ocupando todo su canto.



Figura 5. Cartelas tipo A y B de un puente no diseñado a fatiga en origen

En la documentación de proyecto del puente no se indicaba ninguna consideración ante los efectos de fatiga. Como ya se ha indicado, la normativa nacional de la época, primeros años 90, no obligaba al proyecto de los puentes de carretera frente a esta sollicitación y, de hecho, la propia configuración de la estructura metálica parecía reflejar esta carencia con detalles poco adecuados frente a fatiga. Así, por ejemplo, uno de los más repetidos en la estructura para la configuración de los nudos, las cartelas tipo A referidas anteriormente, se sueldan sin ningún acuerdo al cordón principal con un detalle de muy baja categoría (Figura 6).

40		5) Unión soldada sin acuerdo de transición.
----	---	---

Figura 6. Detalle asociado a la cartela tipo A

Con base en estas configuraciones, de cara a valorar el comportamiento de dicho detalle, se realizaron comprobaciones de cálculo específicas para valorar su comportamiento a fatiga, determinando las variaciones de tensión en el cordón inferior por el paso de diferentes tipologías de vehículos, obteniendo carreras de tensión como las reflejadas en la Figura 7, donde los máximos coinciden las secciones del cordón en las que se han soldado las cartelas tipo A referidas anteriormente.

Tal y como la baja categoría de los detalles hacía prever, los resultados obtenidos resultaron muy desfavorables. Las carreras de tensión en las secciones del cordón inferior alcanzaron valores elevados, que al entrar en el detalle

correspondiente daban lugar a un número de ciclos muy inferior al previsto para la vida útil del puente, resultando relaciones entre resistencia y sollicitación superiores a la unidad (es el límite que la normativa exige) en servicio, alcanzando valores de daño acumulado de hasta 8,5.

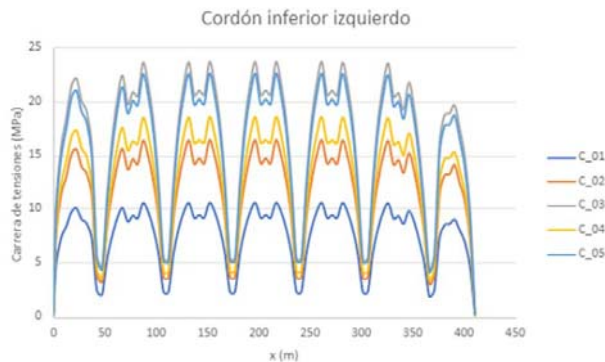


Figura 7. Carreras de tensión en cada sección del cordón inferior y para diferentes tipos de camión.

El significado de estos números, tan extremos, es claro: no es posible justificar mediante cálculo el comportamiento a fatiga de un puente que no ha sido proyectado frente a esta sollicitación con una configuración de los nudos, ajena por completo a la que se adoptaría algún tiempo después para el mismo nudo (Figura 8) en puentes semejantes.



Figura 8. Nudo de la celosía estudiada, no diseñado a fatiga y ejemplo de nudo sí diseñado a fatiga

4. Criterio de *tolerancia al daño*. Puentes donde no es posible determinar su idoneidad a fatiga con comprobaciones de cálculo específicas

Que no se cumplan los detalles normativos recogidos por ejemplo en UNE-EN 1993-1-9, no implica necesariamente que el

comportamiento de un puente no haya sido satisfactorio. De hecho, en la inspección de detalle del puente referido en el apartado anterior no se detectaron daños asociados a un problema de fatiga. A continuación, se muestra otro ejemplo en donde los nudos principales del puente no respondían a ningún detalle del catálogo (Figura 9).



Figura 9. Vista general del puente

En este caso, todos los nudos eran accesibles para la inspección, aunque para ello fue necesario recurrir a medios de acceso muy singulares (grúas de gran alcance y plataformas específicas como se muestra en la Figura 10) y ensayos específicos (especialmente en las soldaduras).



Figura 10. Vista de los medios de acceso necesarios

Como ya se ha adelantado, muchos de los detalles de los nudos ejecutados no correspondían a los del catálogo normativo. Era el caso del chapón dispuesto en los nudos de desdoblamiento del cordón inferior (ver Figura 11), donde no se encontró la groera que caracteriza el detalle y la ejecución de un sellado, lo que impide catalogar el detalle.

En todo caso, los resultados de la inspección y ensayos realizados (en las uniones soldadas mediante inspección directa, líquidos penetrantes, ultrasonidos, etc.) fueron favorables, no arrojando problemas asociados a fatiga en el momento de las inspecciones. Aun

así, sí se identificaron numerosos aspectos que condicionaban el comportamiento a fatiga a futuro. De hecho, algunos están prohibidos explícitamente por la legislación:

- La ausencia de groera en los extremos del chapón ya comentado (Figura 11).
- La diferencia de tamaño o asimetría entre los cordones situados a ambos lados de las cartelas (Figura 12).
- Existencia de chapas de ajuste y montaje no retiradas que pueden provocar concentración de tensiones (Figura 13).
- Degradación de la pintura de protección, dejando a la vista síntomas de corrosión que pueden condicionar a futuro el comportamiento a fatiga (Figura 14).
- Indicaciones de pequeños defectos superficiales probablemente originados en el proceso de laminación (Figura 15).
- Faltas de fusión en soldaduras (Figura 16).



Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción
71	$\alpha \leq 45^\circ$	2. Uniones tubo-chapa soldadas a lo largo de ranuras de inserción de la chapa en el tubo rematadas con taladros.
63	$\alpha > 45^\circ$	

Figura 11. Detalle y categoría equivalente (Instrucción EAE)



Figura 12. Asimetría de las costuras



Figura 13. Restos de chapas de montaje



Figura 14. Degradación de la pintura



Figura 15. Defectos superficiales de laminación

Por lo tanto, si bien como resultado fundamental de los trabajos de inspección se pudo concluir que no se detectaron daños de fatiga dicha conclusión únicamente se podía referir a la situación de la estructura en el momento de la investigación y no prejuzga su comportamiento futuro, esto es, su progresiva e inevitable pérdida de seguridad a lo largo del tiempo de servicio.



Figura 16. Falta de fusión en soldadura

La pregunta obvia en este punto se refiere a la velocidad con la que se produce esa pérdida de

seguridad inevitable, cuando los detalles fundamentales de ejecución no suelen coincidir con los relacionados en la normativa (por lo que no es posible evaluar su resistencia o, lo que es equivalente, la velocidad de degradación) o existen aspectos como los descritos que condicionan dicho comportamiento.

Este aspecto fundamental condiciona cualquier actuación, determinada no por su comportamiento hasta el momento de la evaluación, que puede ser totalmente correcto, sino por la evolución a futuro, desconocida, de ese comportamiento.

En estas condiciones, la inspección periódica de toda la estructura es imprescindible, y hace necesario definir un protocolo de inspección que tenga en cuenta las dificultades de acceso a los distintos nudos, la configuración de los cordones (en ocasiones muchas costuras son interiores, como el caso del cajón que se mostraba en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), el mantenimiento de la estructura, etc. En todo caso dicha inspección podría no ser tampoco garantía suficiente de la seguridad del puente, por los aspectos ya comentados en relación con el tamaño crítico de la fisura, su crecimiento o la redundancia que debería tener el puente para garantizar su seguridad si se produjera el fallo en el tiempo transcurrido entre inspecciones, etc., por lo que complementariamente a la inspección, podría ser recomendable -en algunos casos necesario- plantear otras acciones:

- En primer lugar, establecer una auscultación de la estructura que permita valorar el comportamiento de esta en tanto se adoptan las acciones oportunas para garantizar su seguridad.
- En segundo lugar, intentar mejorar la situación de cada detalle, utilizando técnicas de carácter generalista (repaso de los cordones para mejorar su perfil, granallado para introducir tensiones residuales de compresión, taladrado de groetas de alivio de tensiones, etc.).
- En tercer lugar, cuidar el mantenimiento de la estructura, tanto para evitar su deterioro por

procesos de corrosión como garantizando un adecuado estado de los apoyos y juntas de dilatación, de manera que no se introduzcan esfuerzos espurios sobre la estructura.

5. Ejemplo de fallo a fatiga

A modo de ejemplo, se expone a continuación el caso de un puente situado en la Avda. Thumamah de Riad (Arabia Saudí), en el que su evaluación puso de manifiesto que los fallos por fatiga eran generalizados.

5.1. Descripción general de la estructura

El puente, todo en estructura metálica, fue construido en la década de los 90 del pasado siglo. Su longitud total es de 476 m, distribuida en 18 vanos isostáticos. El tablero es doble, uno para cada sentido de circulación. Cada uno constaba de un total de seis vigas metálicas de canto constante (ver en la Figura 17 una vista general).



Figura 17. Vista general del puente

La organización del puente respondía a la premisa de evitar la ejecución de soldaduras in situ, limitando el montaje del puente al ensamblado, mediante uniones atornilladas de secciones prefabricadas. Así, las vigas longitudinales quedaban formadas por tramos inferiores a 12 m que se ensamblaban mediante tapajuntas en el ala inferior y alma (Figura 18). Para mantener la continuidad de la deformación transversal de la sección se contaba con travesaños, formados por perfiles laminados UPN280. En la Figura 19 se representan estos

travesaños en trazo azul y en la 20 se muestran dos de ellos



Figura 18. Vista del ensamble de las vigas transversales

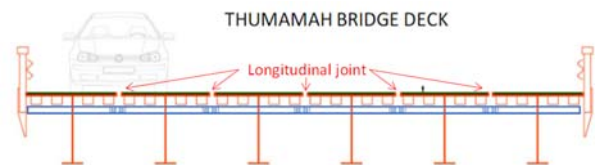


Figura 19. Sección transversal de uno de los tableros

En cada uno de estos tramos de viga, además, el ala superior y los nervios longitudinales constituían un componente de taller que se unía en obra mediante una costura continúa atornillada (Figura 20), también mediante platabandas a cada lado.

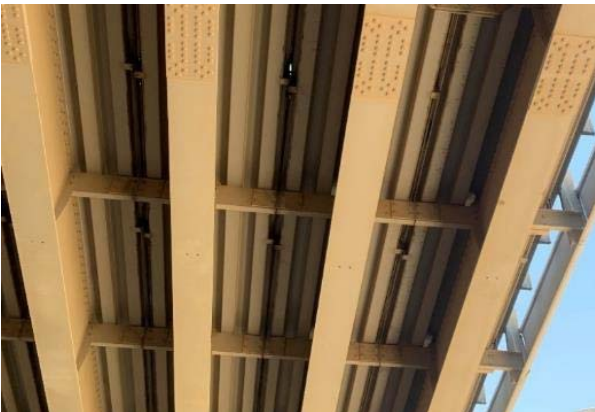


Figura 20. Vista de la configuración estructural de uno de los tableros

Las vigas transversales mantenían la organización modular y se soldaban en taller a los nervios longitudinales, empalmándose in situ mediante uniones atornilladas (disposición que se aprecia en las figuras 18, 19 y 20).

5.2. Configuración del tablero

El estudio del puente abarcó diversas actividades (inspecciones de detalle, identificación de daños, comprobaciones resistentes globales y locales, análisis modales, etc.), pero ya las más básicas permitieron detectar configuraciones inadecuadas frente a fatiga. La más evidente era la configuración de la losa del tablero, en la que la unión de los nervios longitudinales a las chapas frontales de empalme de tramos se efectuaba mediante la soldadura de todo el contorno del nervio sobre la chapa (Figura 21), detalle que favorece la aparición de fisuras por fatiga que se propagan por la garganta del cordón a partir del borde inferior del nervio. De hecho, el detalle utilizado correspondía con el de menor resistencia a fatiga de EN 1993-1-9 (Figura 22).

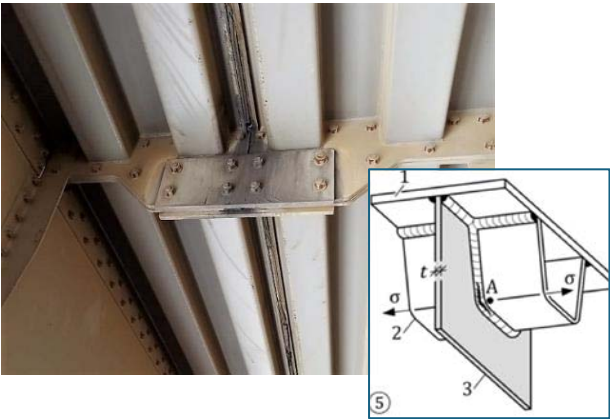


Figura 21. Detalle de ensamblado entre partes

Categoría de detalle		Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		1) Larguero continuo longitudinal con groeras en las viguetas.	1) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensión directa del larguero longitudinal.
71	$t > 12 \text{ mm}$			
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		2) Larguero continuo longitudinal sin groeras en las viguetas.	2) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensiones normales del larguero.
71	$t > 12 \text{ mm}$			
36			3) Larguero longitudinal discontinuo, interrumpido por las viguetas.	3) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensión directa del larguero.

Figura 22. Extracto de EN 1993-1-9

5.3. Resultados de las inspecciones desarrolladas

Durante una de las primeras inspecciones efectuadas en el puente, de carácter general, se encontraron en el suelo dos pernos de gran tamaño (24 mm de diámetro) que se habían caído desde el tablero (Figura 23). La superficie de fractura de ambos pernos mostraba la apariencia inequívoca de una rotura por fatiga y, de hecho, fue este hallazgo el que alertó sobre la naturaleza de los daños más graves del puente identificados en las inspecciones y que pusieron de manifiesto el problema del viaducto: la existencia de daños generalizados de fatiga.



Figura 23. Vista de uno de los pernos caídos

Estos daños se confirmaron en varios de los detalles del puente y en un gran número de localizaciones. A modo de ejemplo, el encuentro entre los nervios del ala superior y las chapas de testa en el empalme, detalle ya mostrado en la anterior Figura 21

Figura 21 y que responde al pésimo de entre los recogidos por la normativa (Figura 22) mostraba fisuraciones evidentes a simple vista (Figura 24) en numerosas localizaciones.



Figura 24. Fisura inicial



Figura 25. Propagación

Algunas de estas fisuras se desarrollaban únicamente en la zona de transición (la curva del cordón de soldadura) indicada en la propia referencia normativa, pero otras habían evolucionado de forma que afectaban a toda la longitud del cordón perimetral (Figura 25).

En muchas ocasiones el daño se extendía a la unión entre el nervio y el ala superior, en forma de fisuras rompiendo el cordón de soldadura en longitudes notables (Figura 26). Por último, en algún caso (como el recogido en la propia Figura 26), la fisuración afectaba incluso a la soldadura entre la chapa de testa y el ala superior.

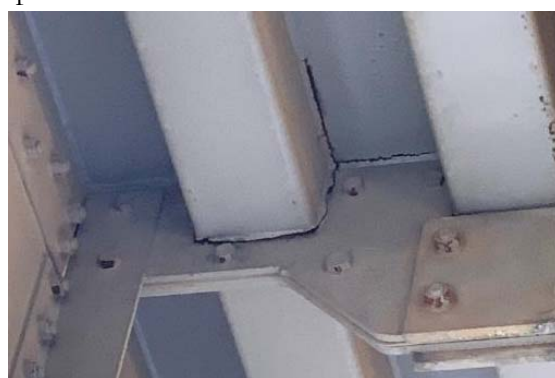


Figura 26. Rotura de los cordones

Otro detalle en el que se observaron daños es la soldadura entre los nervios longitudinales y el travesaño, detalle recogido en la Figura 27 que aparecía fisurada en gran número de ocasiones. Si se tiene en cuenta la gran cantidad de veces que se reproducía este detalle en todo el puente es fácil entender la extensión del problema.

En resumen, resultaba evidente que en el proyecto no se habrían tenido en cuenta los criterios normativos de diseño frente a fatiga.



Figura 27. Soldadura entre nervio y travesaño

6. Conclusiones

En el presente artículo se han expuesto diferentes casos de puentes de carretera contruidos en estructura metálica y que no fueron proyectados frente a fatiga. Todos ellos tienen en común que fueron contruidos con detalles cuya premisa era fabricar de una forma sencilla y mecanizada, lo que da lugar generalmente a detalles que no pueden garantizar un comportamiento adecuado frente a dicha sollicitación.

Aunque esta es la premisa, la casuística de estos puentes (contruidos antes de que el análisis de este efecto fuera obligatorio) puede plantear escenarios diferentes de cara a su evaluación:

- a) Casos donde el comportamiento ha sido adecuado frente a esta sollicitación, pero en donde su evaluación futura no puede determinarse analíticamente debido a que los detalles no están catalogados.
- b) Casos con detalles de muy baja categoría donde pueden realizarse comprobaciones y que permiten justificar el incumplimiento de este estado límite.
- c) Los casos más extremos, con detalles claramente desfavorables y que ya presentan síntomas de un anómalo comportamiento a frente a esta sollicitación, exigiendo una acción inmediata.

Aunque la casuística es diferente, el análisis de todos ellos nos lleva a establecer la misma conclusión: no es posible justificar la seguridad a fatiga de un puente que no ha sido proyectado frente a esta sollicitación.

Lo anterior no es óbice para intentar anticipar, en la medida de lo posible, fallos por esta causa, programándose e intensificándose las inspecciones, trabajos de auscultación y mantenimiento que cada vez están más justificados.

Referencias

- [1]. Comité Européen de Normalisation (CEN). TC 250/SC 3 Eurocode 3- Design of steel structures. Final Draft of EN 1993-1-9. Eurocode 3-Design of Steel Structures- Part 1-9 Fatigue. Berlín 2020.
- [2]. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Guía para el proyecto frente a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera. Serie guías Eurocódigos. 2019.
- [3]. Asociación Española de Normalización (AENOR). UNE-EN 1993-1-9. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación. 2013.
- [4]. Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Instrucción de Acero Estructural (EAE). 2012
- [5]. A. Nussbaumer, L. Borges, L. Davaine. Fatigue Design of Steel and Composite Structures. ECCS Eurocode Design Manuals. Ernst&Sohn. 2011.
- [6]. L. Viñuela, J. M. Salcedo. Proyecto y Construcción de Puentes Metálicos y Mixtos. Asociación para la Promoción Técnica del Acero (APTA). 2009.
- [7]. X.-L. Zhao, S. Herion, J.A. Packer, R.S. Puthli, G. Sedlacek, J. Wardenier, K. Weynand, A.M. van Wingerde, N.F. Yeomans. Guía de diseño para nudos soldados de perfiles tubulares circulares y rectangulares sometidos a sollicitaciones de fatiga. TÜV- Ver-lag. 2003.