

Recomendaciones para la concepción de los detalles frente a fatiga en puentes mixtos de carretera

Guidelines for the design of fatigue details in composite steel and concrete road bridges

Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Director de Ingeniería

miguel.ortega@ideam.es

Francisco MILANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

RESUMEN

La fatiga es una de las principales causas de patología e incluso de rotura en puentes metálicos o mixtos tanto de carretera como de ferrocarril. En este artículo se describen las principales precauciones a adoptar a la hora de la concepción, el proyecto, y la ejecución de los principales detalles de empalmes de chapas a tope, soldaduras de elementos longitudinales a chapas principales, elementos soldados en el canto de chapas principales y soldaduras de elementos transversales a chapas principales, que suponen gran parte de los detalles más habituales en puentes cajón o bijnácena mixtos.

ABSTRACT

Fatigue is one of the main causes of pathology and even of collapse of steel or composite (steel & concrete) bridges of both road and rail. This article describes the main precautions to be taken when conceiving, designing and executing the main details of butt joints, welds of longitudinal elements to main plates, welded elements in the main plate edge, and welds of transverse elements to main plates, that suppose great part of the more usual details in composite box girder bridges or twin girder composite bridges.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, soldadura, estructura metálica, cajón mixto, celosía

KEYWORDS: Fatigue, welding, steel structure, composite box girder, truss

1. Introducción

Tradicionalmente se han asociado los problemas de fatiga a los puentes metálicos o mixtos de ferrocarril, debido al importante número de ciclos a los que se ven sometidos durante su vida útil con el paso constante de los ejes de los trenes con cargas importantes.

Recientes experiencias han demostrado en España y países de nuestro entorno que, si no se presta atención a la concepción, el proyecto, la ejecución y el control de la ejecución de los detalles en los tableros metálicos o mixtos en puentes de carretera, la fatiga puede llegar a convertirse en un problema para la durabilidad de las estructuras.

En este artículo se hace una breve descripción de los principales detalles de fatiga más habituales que se dan en puentes cajón mixtos, en las soluciones más convencionales, remarcando aquellos puntos que son más susceptibles de condicionar frente a fatiga. En cada caso se propondrán los detalles que permitan alcanzar la mayor categoría posible, acorde con el Eurocódigo 3 parte 1-9 (UNE-EN 1993-1-9 [1]).

2. Empalmes transversales de chapas mediante soldadura

En este apartado se analizan los detalles más habituales de empalmes de chapas mediante soldaduras transversales a la dirección del esfuerzo solicitante, que son las uniones, en general, de mayor responsabilidad en los puentes, siendo su diseño y ejecución crítico para conseguir un adecuado nivel de seguridad frente a fatiga.

Es muy recomendable concebir todos los empalmes transversales con soldaduras a tope con penetración completa, y siempre que la geometría lo permita, evitando las uniones con acceso por un solo lado, lo cual obliga de forma irremediable al empleo de chapas de respaldo metálicas.

En puentes no se deberían emplear nunca soldaduras a tope con penetración completa ejecutadas por un solo lado sin el empleo de respaldo (“backing”) cerámico y el posterior saneo de la raíz, o sin el empleo de chapas de respaldo metálicas, ya que la categoría de fatiga de una soldadura ejecutada así por solo un lado sería 36 (detalle 13 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]).

Es cierto que el detalle 13 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1] (Tabla 1) permite considerar a una soldadura a tope con penetración completa ejecutada por un solo lado con una categoría 71 (corregida si fuera necesario por el efecto del tamaño de las chapas mediante el coeficiente k_s), siempre que la soldadura se ejecute respetando las tolerancias de ejecución establecidas en UNE-EN 1090-2 [2] y se controle mediante técnicas de Ensayos No Destructivos (END) apropiadas. El principal problema es saber qué significa ese control mediante técnicas de END apropiadas.

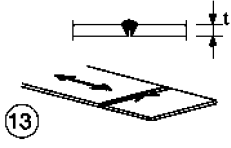
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
36		13) Soldaduras a tope ejecutadas desde un solo lado.	13) Sin chapa de respaldo.
71		Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$	

Tabla 1 Detalle 13 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]. Soldaduras con penetración completa ejecutadas por un solo lado sin “backing”

Aunque en UNE-EN 1993-1-9 [1] no se aclare nada a este respecto, la realización de un ensayo por Ultrasonidos desde el exterior no puede considerarse suficiente para calificar el detalle con una categoría 71, ya que la tolerancia y fiabilidad del propio ensayo, independientemente de la pericia del operador, no permite asegurar la ausencia de inicios de entallas o microfisuras en la zona de la raíz. Para poder dar por bueno el resultado favorable del ensayo de Ultrasonidos ejecutado por un solo lado, sería necesario completar la inspección del lado de la raíz al menos con una inspección visual y, en caso de dudas, haber podido realizar ensayos adicionales mediante líquidos penetrantes o partículas magnéticas de esa zona. Estas inspecciones y ensayos adicionales de la raíz no se pueden hacer si no hay acceso a la misma y por lo tanto impiden que un empalme a tope ejecutado por un solo lado pueda considerarse, en general, con una categoría de detalle superior a 36.

En consecuencia, siempre que sea posible es conveniente concebir los empalmes a tope con penetración completa con acceso por ambos lados con detalles con preparación de bordes en X, o bien ejecutarlos desde un solo lado con penetración en V mediante el empleo de respaldo provisional cerámico en la raíz de la soldadura, pero siempre retirando el respaldo y realizando el posterior saneo de la raíz. Este saneo puede incluso requerir la realización de algún cordón de cierre posterior en la raíz.

En ambos casos, ya se haga una soldadura a tope con penetración completa en X o en V con saneo de la raíz, la categoría del detalle será, en general como mínimo de 80, acorde con los detalles 1 a 11 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1] (Tabla 2).

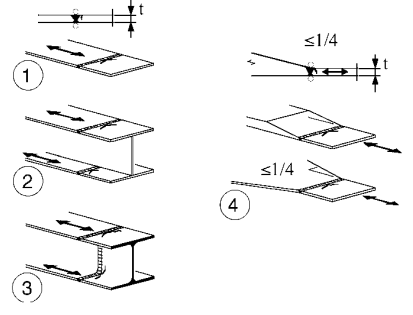
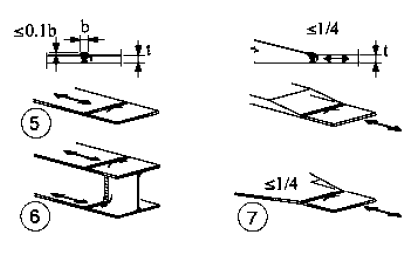
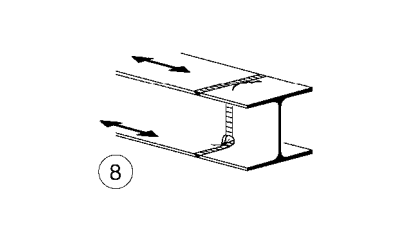
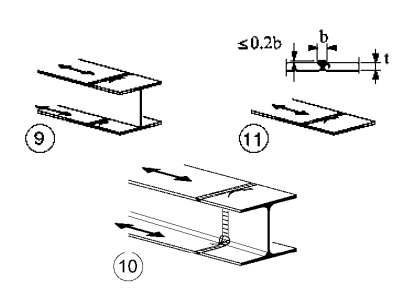
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
112	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>Sin chapa de respaldo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos. 2) Empalmes en prolongación de alas y almas antes del armado de la viga. 3) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas sin ojales. 4) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\le 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Todas las soldaduras enrasadas mediante muela con la superficie de las chapas paralela a la dirección de la flecha. - Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, bordes de chapa enrasados con muela según dirección de la tensión - Soldeo desde ambos lados y verificación por ensayos no destructivos (END). <p><u>Detalle 3):</u> Sólo para uniones de perfiles laminados, cortadas y soldadas.</p>
90	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		<ol style="list-style-type: none"> 5) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos. 6) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas sin ojales. 7) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\le 1/4$. <p>Eliminación de entallas en soldaduras por mecanizado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sobreespesor de cordones inferior al 10% de la anchura con transición gradual hasta el plano de las superficies empalmadas. - Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, bordes de chapa enrasados con muela según dirección de la tensión - Soldeo desde ambos lados y verificación por ensayos no destructivos (END). <p><u>Detalles 5 y 7):</u> Soldaduras ejecutadas en posición horizontal.</p>
90	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>8) Como el detalle 3) pero con ojales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Todas las soldaduras enrasadas mediante muela con la superficie de las chapas paralela a la dirección de la flecha. - Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, bordes de chapa enrasados con muela según dirección de la tensión - Soldeo desde ambos lados y verificación por ensayos no destructivos (END). - Perfiles laminados de iguales dimensiones y tolerancias.
80	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		<ol style="list-style-type: none"> 9) Empalmes en prolongación de vigas armadas sin ojales. 10) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas con ojales. 11) Empalmes en prolongación de chapas, productos planos, perfiles laminados y chapas de vigas armadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobreespesor de cordones inferiores al 20% de la anchura con transición gradual al plano de las superficies empalmadas. - Soldadura sin enrase con muela. - Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, bordes de chapa enrasados con muela según dirección de la tensión - Soldeo desde ambos lados y verificación por ensayos no destructivos (END). <p><u>Detalle 10):</u> Sobreespesor de cordones inferiores al 10% de la anchura con transición gradual al plano de las superficies empalmadas.</p>

Tabla 2 Detalles 1 a 11 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]. Soldaduras a tope con penetración completa

La ejecución de soldaduras a tope con chapa metálica de respaldo y sin el posterior acceso para la inspección y el control de la raíz, es un detalle que también hay que evitar siempre que sea posible, ya que aunque la soldadura se ejecute con plenas garantías y con un riguroso control de las tolerancias y ajustes geométricos previos, la categoría del detalle no puede nunca ser mejor de 71 (acorde con los detalles 14 a 16 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]).

En puentes cajón o puentes de vigas metálicas, hay muy pocas soldaduras que requieran el empleo de soldaduras con chapas de respaldo, ya que tanto las almas, las platabandas superiores o inferiores, o las chapas de fondo en secciones cajón, suelen siempre ser accesible por ambos lados.

Solamente algunos casos de chapas de menor importancia como pueden ser las soldaduras de las células (Figura 1), o algunas zonas rigidizadas en mamparos de apoyo que dejan zonas pequeñas cerradas e inaccesibles, pueden llegar a obligar al empleo de chapas de respaldo.



Figura 1 Chapas de respaldo en soldadura de una célula sin acceso al interior de la raíz

2.1. Empalmes de chapas a tope con acceso por los dos lados, con continuidad de una de las caras

Para no penalizar la categoría del detalle, una soldadura ejecutada a tope con chapas de diferente espesor, requiere la realización de una transición de espesores en la chapa de mayor espesor, con una pendiente suave de no mayor de $1/4$ (acorde a los detalles 4 y 7 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]).

En todos los casos (detalles 1 a 11 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]), para la realización de la soldadura, se debe emplear chapas laterales de derrame provisionales (Figura 2), que permitan soldar la unión sobrepasando la dimensión estricta de la pieza. Concluida la soldadura las chapas auxiliares se deben retirar y amolar el canto de la soldadura. Así mismo es necesario que la soldadura se realice desde ambos lados con la posterior verificación por ensayos no destructivos, habitualmente ultrasonidos y eventualmente radiografías.



Figura 2 Chapas de derrame provisionales



Figura 3 Soldadura amolada sin sobreespesor

Hay dos maneras de mejorar la categoría de un detalle de una soldadura a tope ejecutada por los dos lados, amolar la superficie o reducir el sobreespesor de la soldadura:

- Si el sobreespesor de la soldadura se amuela completamente (Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) en la dirección paralela al esfuerzo enrasando la soldadura con las chapas a unir, la categoría del detalle puede llegar a ser 112 (detalles 1 a 4 de tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]).
- Si el sobreespesor de la soldadura se limita a un máximo del 10% de la anchura de la soldadura, la categoría del detalle puede llegar a ser 90 (detalles 5 a 7 de tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]).
- Si en cambio el sobreespesor de la soldadura se encuentra entre el 10% y el 20% de la anchura de la soldadura, la categoría del detalle puede llegar a ser 80 (detalles 5 a 7 de tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]).

En cualquier caso, el valor máximo del sobreespesor admitido sería del 20%.

En todos estos casos la categoría del detalle se debe corregir multiplicándolo por el factor $k_s=(25/t)^{0,2}$ siendo t el menor espesor de las dos chapas a unir (ya que la de mayor espesor tendrá el espesor de la pequeña al haber hecho previamente la transición de espesores), siempre que t sea superior a 25 mm. Así para $t=40$ mm $k_s=0,91$, para $t=60$ mm $k_s=0,84$ y para $t=80$ mm $k_s=0,79$.

Cuando las dos chapas a unir no tienen el mismo ancho, se debe hacer una transición en el ancho de la chapa mayor, con una pendiente del acuerdo no mayor de 1/4, acorde con el detalle 4 y 7 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1] (Tabla 2).

Como se puede apreciar comparando los detalles de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, si se realiza la soldadura con ciertos controles y precauciones soldando desde ambos lados, la categoría mínima obtenida es de 80, que siempre será mejor que la obtenida con el empalme empelando chapa de respaldo con acceso para soldar desde un solo lado, detalle que nunca puede ser superior a 71.

2.2. Empalmes de chapas a tope con chapa de respaldo

Como ya se ha expuesto, siempre es conveniente realizar soldaduras con acceso por los dos lados (acorde con alguno de los detalles 1 a 11 de la tabla 8.3 de [1]) y no tener que recurrir al empleo de chapas de respaldo, que reduce la categoría de fatiga del detalle, que como máximo puede llegar a 71, acorde con los detalles 14 a 16 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1] (Tabla 3).

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
71		<p>Con chapa de respaldo:</p> <p>14) Empalmes en prolongación.</p> <p>15) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos o curvos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$.</p>	<p>Detalles 14 y 15):</p> <p>Soldaduras en ángulo de unión de la chapa de respaldo con extremos distantes más de 10 mm de la chapa cargada.</p> <p>Puntos de soldadura aplicados en la zona a ocupar por las soldaduras a tope.</p>
50		<p>16) Empalmes en prolongación con chapa de respaldo permanente y anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$.</p> <p>También válido para chapas curvadas.</p>	<p>16) Si los extremos de las soldaduras en ángulo de la chapa de respaldo distan menos de 10 mm de los bordes de la chapa, o si no es posible garantizar un buen ajuste.</p>

Tabla 3 Detalles de soldaduras 14 a 16 (tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1]) con chapas de respaldo

Cuando sea necesario recurrir a empalmes a tope con penetración competa ejecutadas desde un solo lado con chapa de respaldo metálica, es muy importante adoptar las precauciones siguientes:

- La chapa de respaldo debe tener suficiente espesor para que los cordones de la raíz no la fundan y perforen produciendo descuelgues.
- La anchura de la chapa de respaldo debe tener la dimensión suficiente para absorber la separación libre entre chapas en la raíz, y apoyar al menos unos 4 mm en cada una de las dos chapas a unir. En los empalmes de obra, no es infrecuente que la dimensión de la apertura en la raíz real sea superior que la teórica prevista, pudiendo incluso llegar a requerir la realización de recargues en la soldadura, recargues que deben ser objeto de un procedimiento de homologación específico, por lo que es conveniente prever la disposición de chapas de respaldo con suficiente anchura para evitar que pueda quedar demasiado ajustada en uno o en los dos lados y pueda llegar a producirse la salida de la soldadura por alguno de ellos, produciendo descuelgues y posibles entallas en esa zona de la raíz.
- La chapa de respaldo debe ajustarse con una holgura no mayor de 1 mm con las chapas a unir y se debe puntear empleando procedimientos homologados por soldadores cualificados. La Figura 4 muestran soldaduras con chapas de respaldo mal ajustadas.

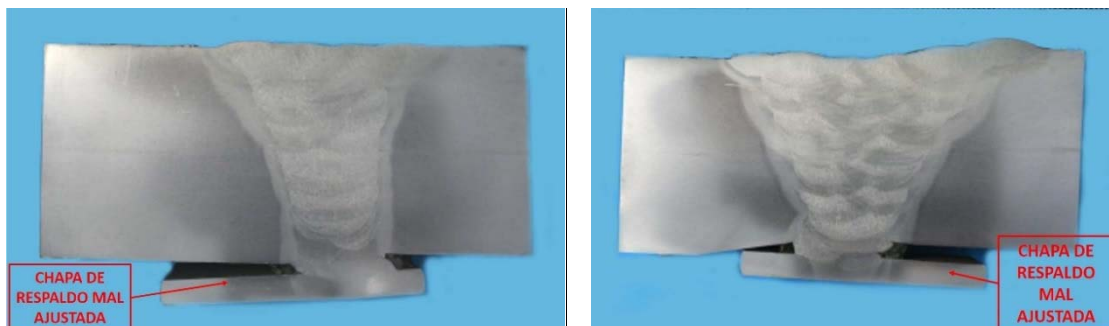


Figura 4 Chapas de respaldo mal ajustadas. Detalles mal ejecutados

Los punteos de fijación provisional de la chapa de respaldo a las chapas a unir se deben hacer siempre por el lado interior en la zona de la raíz, y nunca por el lado externo de la soldadura. Estos pueden ser continuos, o lo que es más habitual, discontinuos, pero con una longitud mínima de 50 mm, y verificando que se dejan al menos sin puntear los 10 mm extremos de la chapa de respaldo en cada extremo, acorde con los detalles 14 y 15 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1], para que la categoría del detalle no baje de 71. Si no se cumple este requisito la categoría del detalle baja a 50, lo cual es siempre desaconsejable.

- En el caso habitual de empalmes de soldaduras a tope de chapas principales con diferentes espesores, la chapa de mayor espesor debe llevar la transición de espesor (con pendiente no mayor de 1/4 siendo recomendable emplear al menos una pendiente de 1/5), y por lo tanto la chapa de respaldo deberá prepararse con un quiebro de forma que permita el perfecto ajuste con las dos chapas a unir (Figura 5 y Figura 6).

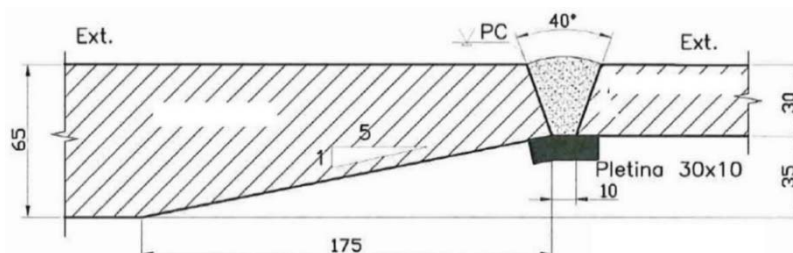


Figura 5 Chapa de respaldo plegada en soldadura de chapas con diferente espesor

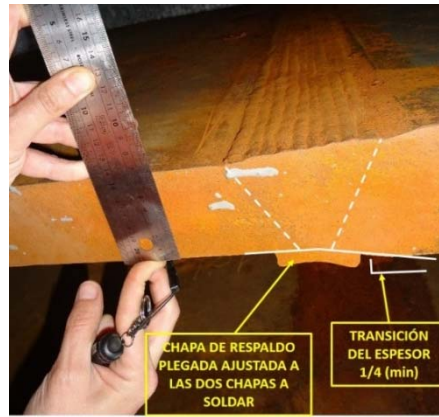


Figura 6 Chapa de respaldo plegada en soldadura de chapas con diferente espesor

- Es importante además, en el caso de las uniones con transición de espesores a ejecutar en obra, en las que existe mayor incertidumbre sobre la dimensión libre real que existirá en la raíz, que la chapa de respaldo plegada se fije a la chapa que lleva la transición de espesor (la de mayor espesor), y no a la que no la lleva (la de menor espesor), para permitir un mejor ajuste, evitando separaciones excesivas entre la chapa de respaldo y las chapas a unir.
- Es fundamental que, previo al inicio de la soldadura, quede perfectamente documentado el correcto ajuste (fit-up) de las dos chapas a unir y el perfecto ajuste de la chapa de respaldo y sus punteos de fijación provisionales, para no reducir la categoría del detalle a fatiga.

3. Elementos soldados en la dirección paralela al esfuerzo principal

La tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1] incluye los detalles de fatiga en chapas principales con elementos longitudinales soldados.

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$L \leq 50 \text{ mm}$		Cartelas longitudinales: 1) La categoría del detalle es función de la longitud L de la cartela.	El espesor de la cartela debe ser inferior a su altura. En caso contrario, véase la tabla 8.5, detalles 5 o 6.
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$			
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$			
56	$L > 100 \text{ mm}$			
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$		2) Cartelas longitudinales soldadas a chapas o tubos.	
80	$r > 150 \text{ mm}$		3) Cartela con acuerdo de transición soldada en ángulo a una chapa o tubo; extremo del cordón de soldadura reforzado (penetración total); longitud del cordón reforzado $> r$.	Detalles 3) y 4): Acuerdo de transición ejecutado mediante mecanizado u oxicorte de la cartela antes de ser soldada, y posterior desbaste del cordón de soldadura en la dirección de la flecha hasta eliminar por completo el pie del cordón.

Tabla 4 Detalles 1 a 3 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1] con elementos soldados de forma paralela a la dirección de la variación de tensiones de la chapa principal

Cuando los elementos se sueldan de forma paralela a la dirección de la variación de tensiones, se aplican los criterios establecidos en los detalles 1 a 3 (Tabla 4). Este caso sería de aplicación para: almas que nacen o mueren en un punto determinado, rigidizadores longitudinales de almas o de alas, cartelas u orejetas soldadas longitudinalmente a alas o almas principales, etc...

En general, las almas discontinuas o los rigidizadores longitudinales, suele ser elementos largos, con una longitud superior a 100 mm, y por lo tanto, para lograr un detalle con una categoría alta se deben ejecutar como los detalles 2 o 3 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1].

El detalle 2 con categoría 71 requiere un ángulo de incidencia menor de 45° y rebordeo de soldadura en el extremo del elemento. Para mejorar este detalle hasta una categoría de 80, es necesario lograr un acabado con acuerdo con transición curva con un radio mayor de 150 mm (detalle 3), con la soldadura reforzada con penetración completa en su extremo en una longitud superior a la longitud del acuerdo circular y el rebordeo de la soldadura en su extremo, para posteriormente realizar el amolado hasta lograr un acabado tangente a la chapa base (ver Figura 7).



Figura 7 Detalle con categoría 80 con acabado amolado tangente (detalle 3 de la tabla 8.4 [1])

4. Cartelas o chapas soldadas en el canto de una chapa principal

La tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1] define en los detalles 4 y 5 las distintas categorías de fatiga de una posible prolongación de una fisura en la chapa principal cuando se le suelda otra chapa en su canto (Tabla 5). El detalle de fatiga de una posible fisura en la chapa soldada a la principal se rige por los detalle 18 o 19 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 [1].

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
90	$\frac{r}{l} \geq \frac{1}{3}$ o $r > 150 \text{ mm}$		<u>Detalles 3) y 4):</u> Acuerdo de transición ejecutado mediante mecanizado u oxicorte de la cartela antes de ser soldada, y posterior desbaste del cordón de soldadura en la dirección de la flecha hasta eliminar por completo el pie del cordón.
71	$\frac{1}{6} \leq \frac{r}{l} \leq \frac{1}{3}$		
50	$\frac{r}{l} < \frac{1}{6}$		
40		5) Unión soldada sin acuerdo de transición.	

Tabla 5 Detalles 4 y 5 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1]. Chapas soldadas en el canto de otra

Este detalle es muy frecuente en puentes, y el ejemplo más claro es el caso de la soldadura de las cartelas de los arriostramientos horizontales de platabandas superiores (o inferiores en puentes bijácena), o en las uniones de perfiles o elementos de arriostramiento contra platabandas o chapas de fondo.



Figura 8 Detalles con categoría 40 (detalle 5 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1])

Como se puede apreciar en el detalle 5, si la cartela a soldar se realiza sin ningún tipo de acuerdo o transición (Figura 8), la categoría de fatiga del detalle se reduce hasta 40 (Tabla 5) y, en general, se deben diseñar detalles del extremo de las cartelas con acuerdos circulares que mejoren este mal detalle.

En la medida de lo posible, siempre es recomendable buscar el detalle con mejor categoría de fatiga, que en este caso podría llegar hasta 90 (detalle 4 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9), haciendo que el acuerdo del radio del extremo de la cartela cumpla las condiciones siguientes:

- La relación entre el radio del acuerdo (r) y el ancho de la chapa principal a la que se suelda la cartela (ℓ) debe cumplir que $r/\ell \geq 1/3$, o bien que el radio sea mayor de 150 mm ($r > 150$ mm).
- La soldadura del extremo de la cartela debe rebasar el extremo y se debe amolar hasta lograr un acabado tangente al canto de la chapa principal tal y como se aprecia en las imágenes de la Figura 9.

En el caso que el radio del acuerdo no cumpla la primera condición, la categoría de fatiga se irá reduciendo hasta 71 si el radio está entre $1/6 \leq r/\ell \leq 1/3$, ó hasta 50 si el radio del acuerdo está por debajo de $r/\ell < 1/6$.

Una vez que en la fase de proyecto se decide realizar un acuerdo, la dimensión del radio no debería ser un problema para lograr el mejor detalle, por lo que siempre se debería buscar el radio que cumpla con la categoría de fatiga 90 (Figura 9).



Figura 9 Cartela soldada en el canto de una chapa principal con extremos redondeados y soldaduras amoladas con acabado tangente.

5. Rigidizadores o chapas soldados transversalmente a la chapa principal

Los detalles de cartelas, rigidizadores o chapas con una soldadura perpendicular a una chapa principal se incluyen en los detalles 6 a 8 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1] (Tabla 6)

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$t \leq 50$ mm		<p><u>Cartelas o rigidizadores transversales:</u></p> <p>6) Cartelas soldadas a chapa.</p> <p>7) Rigidizadores verticales de vigas unidos por soldadura.</p> <p>8) Diafragmas de vigas cajón soldados a las alas o a las almas. Para secciones huecas pequeñas pueden no ser viables.</p> <p>Las categorías de detalle son también válidas para rigidizadores anulares.</p>	<p><u>Detalles 6) y 7):</u></p> <p>Los extremos de los cordones deben ser cuidadosamente desbastados para eliminar mordeduras.</p> <p>7) Si el rigidizador termina en el alma (parte izquierda de la figura), $\Delta\sigma$ debe calcularse empleando las tensiones principales.</p>
71	$50 < t \leq 80$ mm			

Tabla 6 Soldaduras de cartelas o rigidizadores. Detalles 6 a 8 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1]

Este será el caso de rigidizadores transversales de almas, soldados a las almas y a las alas, rigidizadores transversales de chapas de fondo, mamparos o diafragmas de apoyo, y cualquier otro elemento soldado transversalmente a una chapa principal.

La categoría del detalle dependerá del espesor del elemento soldado a la chapa principal (definido como "t" en la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 [1]). Con espesores menores de 50 mm, que suele ser lo más habitual, la categoría del detalle sería de 80, y sólo si el espesor está entre 50 y 80 mm, la categoría del detalle se reduce hasta 71.

A la hora de la ejecución de estas soldaduras hay que tener la precaución de rebordear las soldaduras en los extremos de las chapas, y sobre todo en los ojales, desbastando el extremo del cordón en caso de no continuidad.

Agradecimientos

Este artículo es un resumen de uno de los apartados del documento "Guía metodológica para el proyecto a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera con Eurocódigos", que está pendiente de publicación y que los autores han redactado para la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, bajo la dirección y coordinación de Pilar Crespo y Carlos Paradela.

En la citada Guía se describen con más profusión otros detalles típicos de secciones cajón o bijnácena adicionales a los incluidos en este artículo, explicando la manera de lograr la mejor categoría de fatiga posible en cada caso.

Referencias

- [1] UNE-EN 1993-1-9 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 2: Fatiga. AENOR
- [2] UNE-EN 1090-2. Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero.