

CONCEPCIÓN DE LOS DETALLES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL VIADUCTO DEL RÍO ULLA

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IDEAM S.A.
Presidente
general@ideam.es

Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IDEAM, S.A.
Director de Ingeniería
miguel.ortega@ideam.es

Pedro ATANASIO UTRILLA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ingeniero Internacional de Soldadura
IDEAM, S.A.
pedro.atanasio@ideam.es

Juan Luis MANSILLA DOMÍNGUEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ingeniero Internacional de Soldadura
IDEAM, S.A.
juanluis.mansilla@ideam.es

David MOURIÑO CRESPO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
UTE Río Ulla
Coordinador Técnico de la Estructura Metálica
dmourinoc@dragados.com

RESUMEN

El viaducto sobre el río Ulla en la ría de Arosa, tiene una longitud total de 1620 m con una distribución de luces de 50+80+3x120+225+240+225+3x120+80 m. El tablero se proyecta como una celosía mixta de canto variable en los 5 vanos centrales, con 17,90 m de canto sobre apoyos y 9,15 m en centros vanos. Los vanos de acceso mantienen el canto constante mínimo de 9,15 m.

La concepción de los detalles de soldaduras, transiciones y encuentros, así como las uniones entre piezas individuales, y las uniones entre dovelas, se ha diseñado con detalles con categoría de fatiga mínimo 80, y sólo en los casos en los que ha sido necesario realizar soldaduras con acceso por un solo lado y empleo de chapa de respaldo metálica, se han admitido detalles con categoría de fatiga 71, con el adecuado control de ejecución previo al soldeo.

En el artículo se resume la concepción de los principales detalles, así como las precauciones a adoptar en la ejecución y el control, enfocadas a mejorar la durabilidad frente a la fatiga.

PALABRAS CLAVE: Estructura metálica, celosía, fatiga, nudos, soldadura

1. Breve descripción del viaducto

El viaducto sobre el río Ulla en la desembocadura de la ría de Arosa [1], constituye la actuación de mayor alcance, desde el punto de vista estructural, del Eje Atlántico de Alta Velocidad entre Pontevedra y A Coruña. El viaducto está en construcción desde finales de 2008, y está previsto concluirlo a finales de 2014.

El viaducto tiene una longitud total de 1620 m con una distribución de luces de 50+80+3x120+225+240+225+3x120+80 metros (Figs. 1a, 1b y 1c).



Figuras 1a, 1b y 1c. Alzado, fotomontaje y estado actual del Viaducto sobre el río Ulla (dic. 2013)

El tablero se proyecta como una celosía mixta de canto variable en los 5 vanos principales (Fig. 2), con 17,90 m de canto sobre apoyos y 9,15 m en centro vano. Los vanos de los viaductos de acceso se proyectan en celosía mixta con un canto constante de 9,15 m.

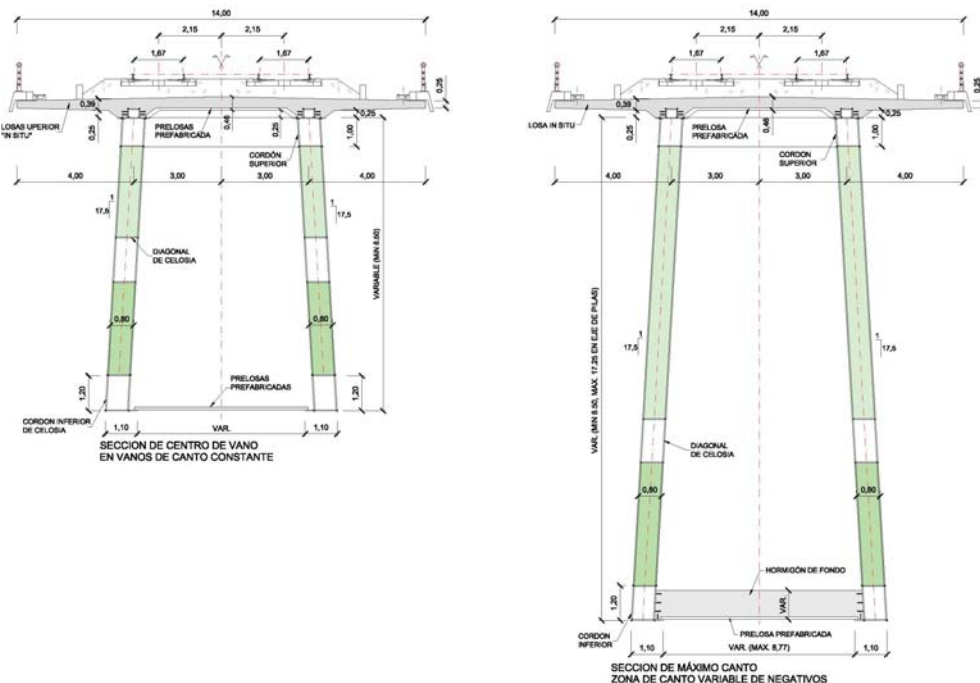


Figura 2. Secciones transversales tipo.

La celosía se modula en segmentos de 15 m con los nudos del cordón superior separados en transversal 6 m y las diagonales inclinadas en la zona de canto constante unos 45° respecto de la horizontal. Los cordones superior e inferior son paralelogramos formados por chapas de acero,

con 0,80 m de ancho y cantos de 1,00 m y 1,20 m, respectivamente. Las diagonales tienen una sección similar a la del cordón superior.

Los cordones superiores presentan, soldada a su ala superior, una cabeza superior cerrada adicional, embebida en la losa de hormigón, a la que se sueldan los conectadores, lo que permite aproximar el eje de transferencia de la conexión al baricentro de la losa superior, reduciendo así las flexiones parásitas por excentricidad en la citada conexión (Fig. 2).

El acero utilizado en los vanos de acceso de canto constante es de calidad S355-J2+N y S355-K2+N (para chapas superiores a 60 mm), mientras que en los tres vanos centrales de canto variable y mayor luz (225+240+225 m) el acero es de calidad termomecánica S-460-M para espesores menores de 65 mm, mientras que para espesores mayores el acero es de calidad S-460-ML.

2. Concepción de la estructura metálica

Con objeto de poder manipular, fabricar y transportar los elementos metálicos a obra, las celosías metálicas del tablero se descomponen en los elementos simples siguientes (Fig. 3): nudos superiores, cordones superiores, diagonales, nudos inferiores, cordones inferiores, montantes horizontales y arriostramientos en cruz.

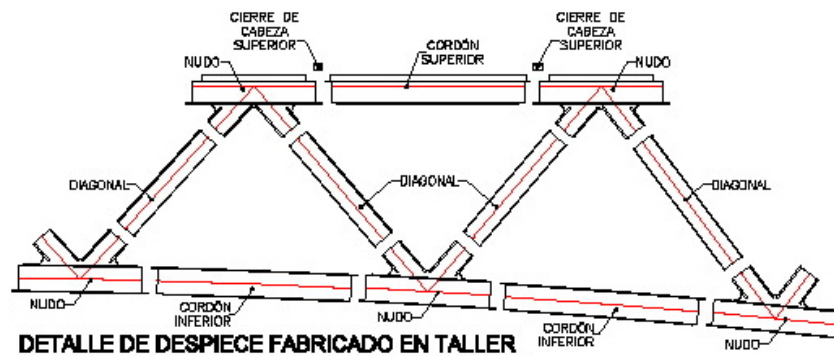


Figura 3. Despiece de elementos simples en la fabricación en taller

Una vez ejecutados estos elementos individuales de cada dovela, en función de cada caso y previamente al transporte a obra, se sueldan en subconjuntos mayores: nudo+cordón, o nudo+cordón+nudo. Estos subconjuntos y el resto de elementos simples (diagonales, montantes horizontales y arriostramientos) se transportan a obra para posteriormente terminar de ejecutar, en los parques de montaje de obra, las dovelas de la celosía.

Para poder controlar la ejecución de un viaducto tan singular como este se ha concebido, desde la fase de proyecto, un complejo sistema de control de calidad que fue objeto de una ponencia específica en el V congreso de ACHE [2]. El proceso constructivo de las cimentaciones del viaducto se describe con detalle en la ref. [3] y los diferentes procesos constructivos empleados para la ejecución de cada tramo del tablero del viaducto serán objeto de la ponencia de la ref. [4].

La concepción de los detalles de soldaduras, transiciones y encuentros, así como las uniones entre piezas individuales, y las uniones entre dovelas, se ha diseñado con detalles con categoría de fatiga mínimo 80 (acorde con [5]), y sólo en los casos en los que ha sido necesario realizar soldaduras con acceso por un solo lado y empleo de chapa de respaldo metálica, se han admitido detalles con categoría de fatiga 71, con el adecuado control de ejecución del perfecto ajuste de las chapas previo al soldeo. En los siguientes apartados se resume la concepción de los principales

detalles, así como las precauciones a adoptar en la ejecución y el control, enfocadas a mejorar la durabilidad frente a la fatiga.

3. Desarrollo de los detalles en los planos de taller de la estructura metálica.

La complejidad de la estructura metálica ha requerido un trabajo muy importante de estudio y desarrollo de una serie de detalles muy repetitivos, de manera que los planos de taller resuelven todos los encuentros, soldaduras, transiciones y detalles específicos, evitando así problemas futuros durante la ejecución.

Los planos de taller del viaducto contienen de forma completa y explícita:

- la subdivisión en piezas individuales de la estructura metálica (nudos, cordones, diagonales, montantes, etc.) por razones de manipulación en taller, transporte y montaje en obra;
- las subdivisiones en conjuntos, dovelas y tramos;
- la acotación de todas las dimensiones que definen completamente todos los elementos y detalles de la estructura, incluyendo las contraflechas y contragiros;
- la definición de las clases de acero, así como la indicación de los pesos y marcas de trazabilidad de cada uno de los elementos de la estructura;
- la forma y geometría de todas las uniones soldadas, incluso de las uniones provisionales para fabricación y montaje, incluyendo;
 - la geometría y dimensiones de las chapas de la unión y sus preparaciones de bordes,
 - la apertura de raíz, y talones tanto para soldaduras a tope como en ángulo,
 - todas las transiciones y detalles específicos de finalización de las soldaduras, suavizados, amolados, etc...
- la posición y radio de todos los ojales para el cruce de soldaduras.
- la definición completa de todos aquellos elementos auxiliares necesarios para la manipulación, fijación, volteo, transporte, izado, etc. de los elementos principales, tanto durante su fabricación en taller, como durante su transporte, ensamblaje o montaje en obra;
- la posición y calidades de los pernos conectadores;
- las zonas con pintura exterior, pintura interior, y las zonas que estarán en contacto con hormigón que no se pintan.

En ningún caso se aceptan detalles tipo, adimensionales o tabulados, que no representen en verdadera magnitud los espesores, geometrías, ángulos de incidencia, separaciones libres, talones y biseles de las chapas en cada uno de los encuentros de soldadura específicos, evitando así un gran número de posibles problemas futuros de ejecución.

Los 131 planos del proyecto, que definían con detalle la estructura metálica, se han desarrollado en más de 6300 planos de taller y unas 31000 hojas de despiece, definiendo con toda exactitud cada una de las chapas, encuentros y soldaduras del puente. Este importante desarrollo de ingeniería es imprescindible para poder garantizar de la correcta concepción de todos los detalles,

que deben cumplir requisitos muy estrictos relativos a la resistencia a fatiga al tratarse de un viaducto mixto de alta velocidad.

4. Empalmes de elementos simples.

Las uniones entre cordones y nudos, se han concebido en general, salvo los empalmes de diagonales con nudos, mediante uniones que evitan 4 soldaduras en la misma sección transversal, decalando las uniones de alas respecto de las almas, materializando una geometría denominada habitualmente como de apoyo a “media madera” o apoyo “en 4”, que facilita la colocación de un elemento apoyado sobre el ya soldado. La figura 3 muestra cómo, en general, los nudos se arman con el ala inferior del arranque del cordón correspondiente (superior o inferior) volada, y con el ala superior retranqueada. Esta geometría se reproduce de forma inversa en los cordones, que tienen el ala inferior retranqueada y el ala superior volada, para permitir un más sencillo ajuste y montaje, y evitar además 4 soldaduras en la misma sección transversal, lo cual es siempre aconsejable.

Esta geometría permite además la realización de despieces con un cupón de ala superior del extremo de los cordones, lo cual facilita la ejecución de tres soldaduras a tope con penetración completa con acceso para sanearlas por dentro de la sección transversal, convirtiendo un detalle tipo de fatiga 71 con chapa de respaldo en uno con categoría mínima de 80 con soldadura a tope y saneo de la raíz.

Es muy recomendable concebir la estructura metálica, siempre que la geometría lo permita, evitando el empleo de soldaduras con acceso sólo por un lado, lo cual obliga de forma irremediable al empleo de chapas de respaldo metálicas. Siempre que sea posible es conveniente ejecutar las soldaduras con acceso por ambos lados con detalles con preparación de bordes en X, o bien ejecutarlas desde un solo lado con penetración en V mediante el empleo de backing de respaldo provisional cerámico pero con el saneo posterior de la soldadura en la raíz, ya que la ejecución de soldaduras a tope con chapa de respaldo y sin posterior acceso a la inspección y control de la raíz, además de ser peor detalle de fatiga, puede generar una serie de problemas que se describen más adelante.

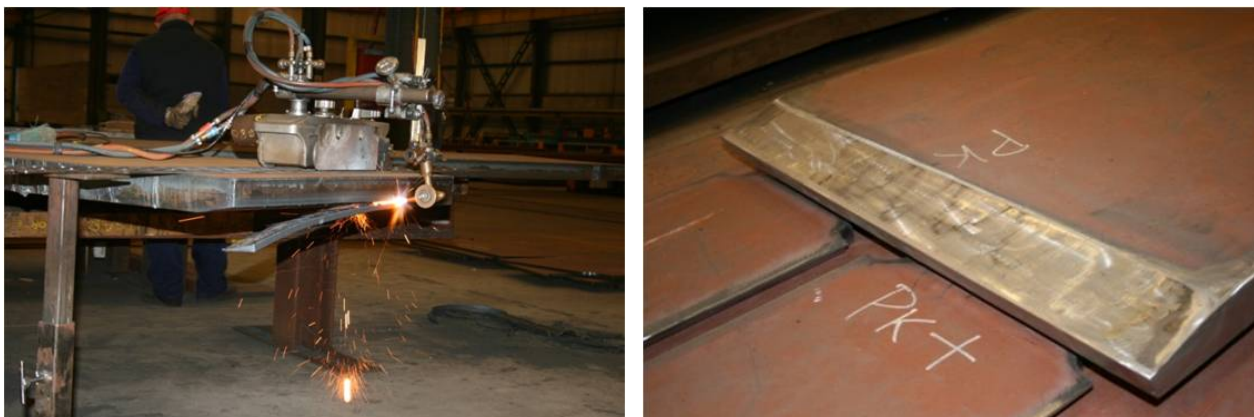
En general, en un puente algo más convencional con sección transversal mediante vigas o cajones mixtos, las soldaduras a tope principales de almas y platabandas, siempre, o casi siempre, son accesibles por ambos lados y, por lo tanto, no es demasiado frecuente tener que recurrir a soldaduras a tope ejecutadas por un solo lado con chapa de respaldo metálica. En cambio, en celosías metálicas sí es muy frecuente la necesidad de recurrir a este tipo de detalle, en las que los empalmes entre nudos y cordones o nudos y diagonales suelen, en la mayoría de los casos, tener sólo acceso desde el exterior y por lo tanto requerir de forma obligada el empleo de chapa de respaldo metálica.

En el Viaducto del río Ulla, aunque siempre que ha sido posible se han intentado minimizar este detalle, quedan muchas uniones, como las del empalme de diagonales con nudos (Fig. 3) o las de cierre de cupones de alas en los empalmes de cordones con nudos, que hacen obligado el empleo del backing metálico.

5. Soldaduras de chapas a tope con penetración total.

Para no penalizar el detalle de fatiga, un empalme de chapas a tope con diferente espesor, requiere la realización de una transición de espesores en la chapa de mayor espesor, con una

pendiente suave de no menos de 1/4 (acorde con [5]). En el Viaducto de Ulla, en general se han prescrito transiciones con pendientes 1/5, como se puede apreciar en la de la figura 4. El acabado de la transición, así como de las preparaciones de bordes se suaviza, eliminando cualquier entalla o defecto producido por el oxicorte de las chapas y biselado.



Figuras 4a y 4b. Ejecución de transición en el extremo de una chapa y acabado final amolado

En el caso empalmes de chapas a tope, ejecutadas desde un solo lado con chapa de respaldo metálica, es importante adoptar las precauciones siguientes:

- La chapa de respaldo debe tener suficiente espesor para que los cordones de la raíz no la fundan y taladren produciendo descuelgues. En el Viaducto del río Ulla, en general se han empleado chapas de respaldo de 10 mm de espesor, verificando que nunca se ha llegado a producir este hecho.
- La anchura de la chapa de respaldo debe ser lo suficientemente amplia 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 raíz teórica prevista se vea en ocasiones superada, pudiendo incluso llegar a requerir la realización de recargues, que deben ser objeto de un procedimiento de homologación específico, por lo que es conveniente prever la disposición de chapas de respaldo con anchura lo suficientemente amplia para evitar que esta pueda quedar demasiado ajustada en uno de los dos lados y pueda llegar a producirse la salida del caldo de la soldadura por un extremo, produciendo descuelgues y posibles entallas en esa zona de la raíz.

En el caso que la chapa de respaldo no apoye correctamente en ambos lados, es necesario reemplazarla por otra que sí lo haga, y no se debe soldar nunca con una chapa de respaldo que permita que las pasadas de raíz produzcan descuelgues por un extremo.

En el Viaducto del río Ulla se han empleado chapas de respaldo de 30 mm de anchura.

- 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. Los punteos se deben hacer siempre por el lado interior de la soldadura en la zona de la raíz, y nunca por el lado externo de la soldadura. Los punteos 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 la ref. [5].

Antes del inicio de la soldadura de la primera pasada de raíz, se debe verificar que los punteos están exentos de fisuras o defectos, para poder englobarlos en la soldadura definitiva, acorde con el apdo. 7.5.7 de la ref. [6].

- 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 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.

Es importante además, en el caso de las uniones 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 metálica doblada, se fije a la chapa que lleva la transición de espesor, y no a la que no la lleva, para permitir un mejor ajuste, evitando separaciones excesivas entre la chapa de respaldo y las chapas a unir (Fig. 5).

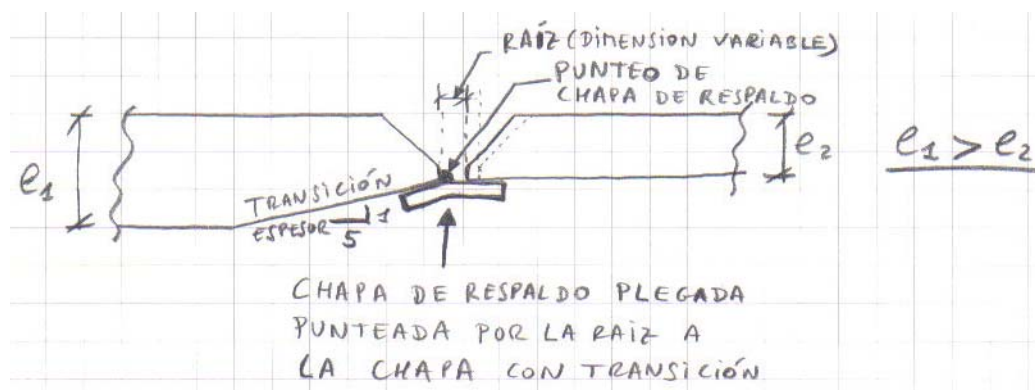


Figura 5. Detalle de chapa de respaldo en unión de dos chapas con diferente espesor

- Es fundamental que, previo al inicio de la soldadura, quede perfectamente documentado el correcto ajuste (fit-up) de las dos chapas a unir y del perfecto ajuste de la chapa de respaldo, de forma que se eviten los posibles problemas descritos en los guiones previos.

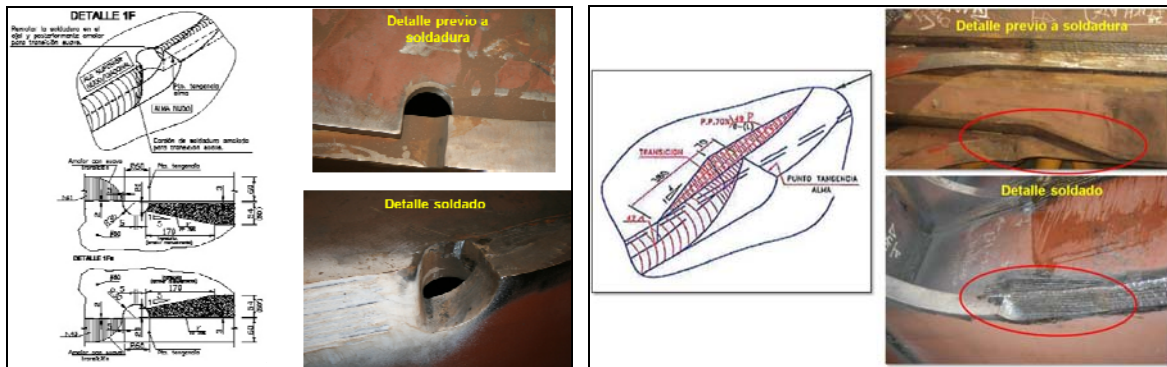
6. Detalles de encuentros y transiciones.

Con una estructura en celosía con nudos cada 15 m, los detalles de encuentros son muy repetitivos, con ligeros cambios en las dimensiones de las chapas a unir y en las soldaduras, por lo que es muy importante hacer una adecuada concepción con un diseño pensado en detalles con una adecuada categoría de fatiga.

Un claro ejemplo del desarrollo de los principales detalles muy repetitivos son los que se describen a continuación, detalles que están todos completamente definidos desde el origen en los planos de taller para cada nudo.

- La figura 6a muestra el detalle de transición de la soldadura en ángulo entre el ala y alma de una diagonal o un cordón en su confluencia con el nudo de la celosía donde el ala de la diagonal o del cordón pasa a soldarse con el alma del nudo a penetración parcial, y aparece un doble ojal en planta y alzado, que se resuelve con transiciones y amolados suaves de los extremos de las soldaduras. Este detalle, adecuado frente a fatiga, obligaba al sellado de 12 ojales en cada nudo. Para evitar tal cantidad de chapas de sellado, que pueden convertirse en un punto débil frente a la durabilidad, se decidió hacer una transición suave con pendientes de 1/5 entre la soldadura en ángulo fuera de la parte

central de un nudo y la soldadura con penetración parcial en la zona central del nudo, como se puede apreciar en la figura 6b.



Figuras 6a y 6b. Transición en la zona de inserción de las alas de diagonales o cordones en los nudos. Detalle original con doble ojal (Fig. 6a) y detalle con transición sin ojales (Fig. 6)

- El detalle de la transición del alma central en los nudos, requiere pasar de dos soldaduras con penetración parcial y biseles solo en el ala desmembrada a dos penetraciones parciales con biseles en el ala desmembrada y en el extremo del alma central, lo cual requiere ejecutar con transiciones suaves con pendiente 1/5 el cambio del bisel, tal y como se define con detalle en cada caso en los planos de taller (Fig. 7).

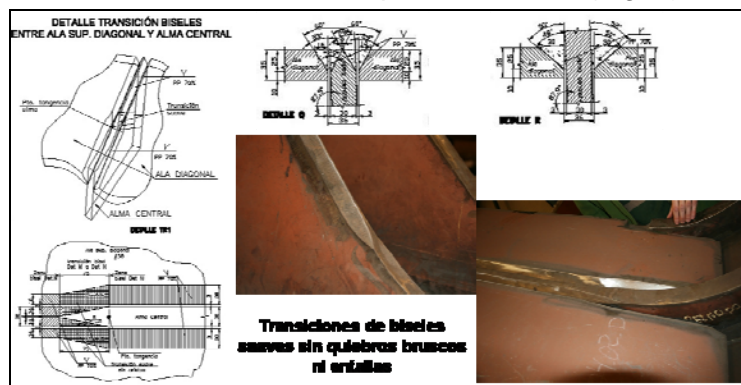


Figura 7. Detalle de transiciones de biseles suavizados en confluencia de alma central en nudos

- El extremo de las almas centrales de los nudos, debe ejecutarse con un acabado suavizado redondeado con radio superior a 150 mm, y con soldadura amolada tangente, acorde con el detalle 3 de la tabla 8.4 de la ref. [5] con categoría de fatiga 80 (Fig. 8).

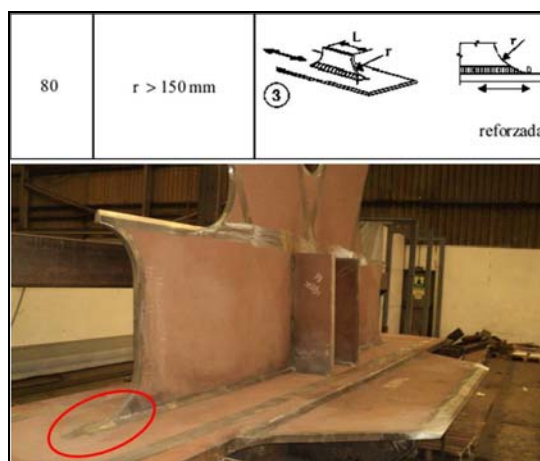


Figura 8. Detalle del extremo del alma central con acabado tangente amolado

- La figura 9 muestra el detalle del extremo de soldadura del alma central con el ala superior del nudo inferior, o con el ala inferior del nudo superior, donde la soldadura a penetración parcial del ala con el alma central desmembrada se remata con una transición suavizada con una pendiente 1/5 en un ojal dispuesto al final del alma. El ojal se sella posteriormente con una chapa que garantiza la estanqueidad de los nudos.

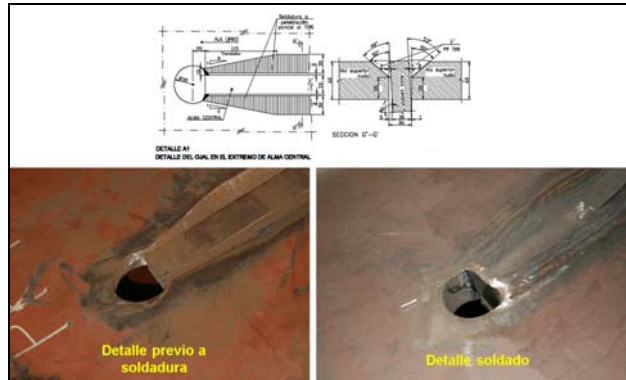
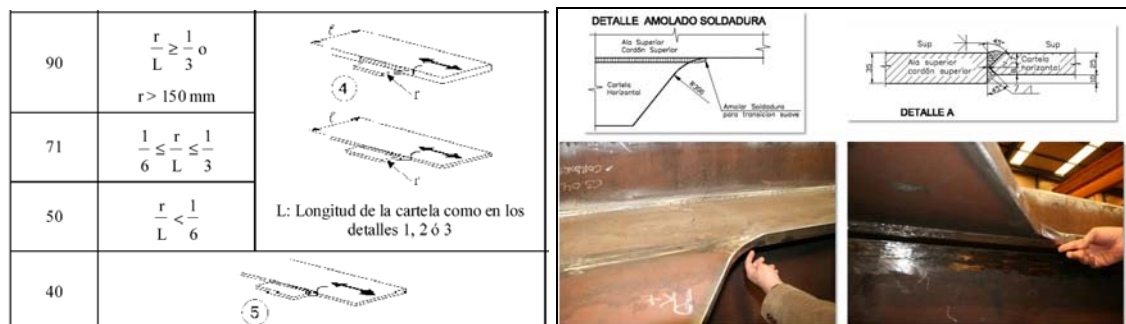


Figura 9. Extremo de alma central en nudos, con ojal en el extremo y transiciones de soldaduras

- Para arriostrar los cordones superiores de la celosía en todo el tablero y también los cordones inferiores en la zona de los vanos de canto variable, es necesario materializar un plano de arriostramiento, mediante unas cruces de San Andrés mediante perfiles tubulares, que se sueldan a unas cartelas soldadas a los nudos en prolongación de un ala.

Esta solución, más o menos convencional en tableros metálicos y mixtos requiere adoptar las precauciones siguientes para no generar un detalle poco adecuado muy repetitivo:

- La geometría de las cartelas debe acabar con geometría redondeada tangente con radio superior a 150 mm y soldadura amolada en su extremo, acorde con el detalle 4 de la tabla 8.4 de la ref. [5] para mantener una categoría de fatiga de 90 (Fig. 10a).
- En general la cartela suele tener siempre un espesor menor que el de las platabandas principales del puente, en este caso de los nudos, y por lo tanto recurrir a la solución más convencional de hacer una transición de espesor en la chapa de mayor espesor, no es la mejor solución, ya que se debilitaría la sección principal resistente longitudinal. En este caso, es más conveniente soldar a tope la cartela contra el espesor del ala y suavizar con una soldadura adicional en ángulo que permita una transición más suave de las tensiones de la cartela a la platabanda (Fig. 10b).



Figuras 10a y 10b. Detalle 4 de la tabla 8.4 de la ref. [5] y vista del extremo de la cartela soldada tangente a la platabanda de un nudo.

7. Principales participantes en el proyecto y obra

Propiedad: Dirección General de Ferrocarriles. Ministerio de Fomento / ADIF

Dirección de Obra: Dirección General de Ferrocarriles. Ministerio de Fomento / ADIF

D. Rubén Estévez (Director de Obra)

Constructora: UTE río Ulla. Dragados-TECSA.

Entidad de Control del Contratista: AMT

Talleres Metálicos: Ascamón-Joama / Martifer / Emesa / Dizmar

Proyecto de la Estructura: IDEAM S.A.: Francisco Millanes, Luis Matute, Miguel Ortega, Carlos Gordo.

Asesoría especializada en estructuras a la D.O.: IDEAM S.A.: Francisco Millanes, Miguel Ortega, Pedro Atanasio, Adrián Sanchez, Juan L. Mansilla, Jokin Ugarte, Carlos Gordo.

Asistencia Técnica a la Dirección de Obra: TYPESA.

Entidad de Control de la Dirección de Obra: Applus.

Apoyo Técnico a la Constructora: Servicios Técnicos de Dragados y Fhecor.

8. Referencias

- [1] MILLANES F., MATUTE L., ORTEGA M., GORDO C. "El viaducto sobre el río Ulla en el eje Atlántico de Alta Velocidad: una celosía mixta de 240 m de luz". *V Congreso ACHE*. Barcelona. Oct- 2011.
- [2] ESTÉVEZ R.A., MILLANES F., ORTEGA M., FERRANDIS A. "Nuevos planteamientos en el control de la ejecución de puentes metálicos: el viaducto mixto sobre el río Ulla". *V Congreso ACHE*. Barcelona. Oct- 2011.
- [3] LÓPEZ S., MUÑOZ I., TARQUIS F., MILLANES F., ORTEGA M., ESTÉVEZ R., BURBANO G. "Ejecución de las cimentaciones del viaducto del río Ulla en la ría de Arosa". *V Congreso ACHE*. Barcelona. Oct- 2011.
- [4] ESTÉVEZ R.A., MILLANES F., ORTEGA M., LÓPEZ S. "Descripción general del proceso constructivo del tablero del viaducto sobre el río Ulla". *VI Congreso ACHE*. Madrid. Jun-2014.
- [5] UNE-EN 1993-1-9. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. AENOR. 2008.
- [6] UNE-EN 1090-2. Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero. AENOR. 2011.