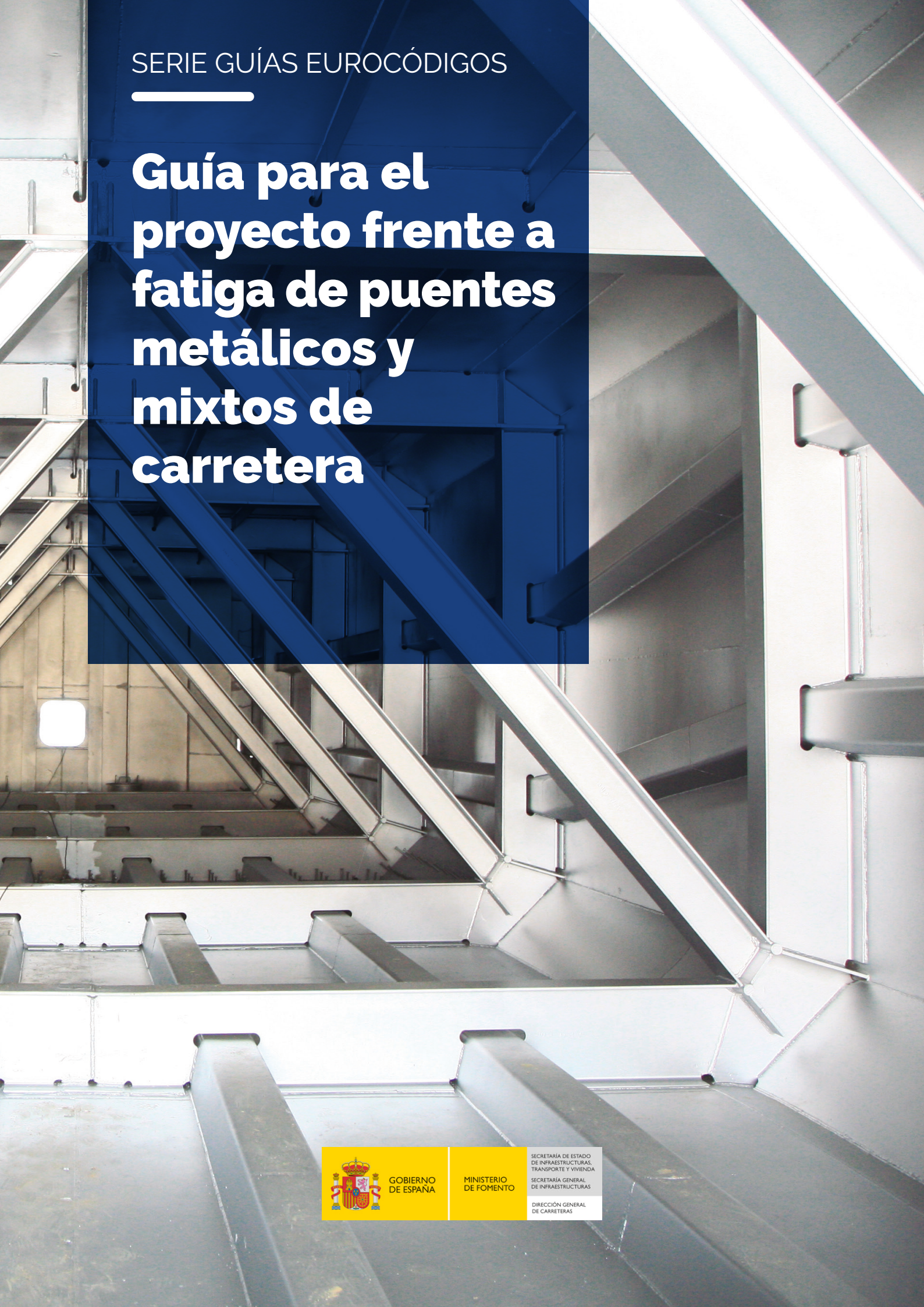
SERIE GUÍAS EUROCÓDIGOS

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



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE FOMENTO
SECRETARÍA DE ESTADO DE INFRAESTRUCTURAS, TRANSPORTE Y VIVIENDA
SECRETARÍA GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS
DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS

Página generada
intencionalmente
en blanco

SERIE GUÍAS EUROCÓDIGOS

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

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE FOMENTO
SECRETARÍA DE ESTADO DE INFRAESTRUCTURAS, TRANSPORTE Y VIVIENDA
SECRETARÍA GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS
DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS

2019

Centro virtual de publicaciones del Ministerio de Fomento:
https://apps.fomento.gob.es/CVP/

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
https://cpage.mpr.gob.es

Título de la obra: Guía para el proyecto frente a fatiga de puentes metálicos y mixtos de carretera

- SERIE GUÍAS EUROCÓDIGOS-

Autor: Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras

Año de edición: 2019

Características edición digital:
1ª edición electrónica: agosto 2019
Formato: PDF
Tamaño: 95 MB

Edita:
© Ministerio de Fomento
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones

NIPO: 161-18-250-2

Foto de portada: Viaducto de Regueirón (Asturias). Cortesía de Vicente Puchol de Celis

Aviso Legal: Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, ni registrada, ni transmitida por un sistema de recuperación de información en ninguna forma ni en ningún medio, salvo en aquellos casos especificamente permitidos por la Ley.

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE FOMENTO

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.

Esta guía ha sido redactada por Francisco Millanes Mato y Miguel Ortega Cornejo (IDEAM). Por parte de la Dirección General de Carreteras han participado en el desarrollo de la guía, Pilar Crespo Rodríguez y Carlos Paradela Sánchez.

Octubre de 2018

EL DIRECTOR GENERAL DE CARRETERAS

Javier Herrero Lizano

Página generada
intencionalmente
en blanco

PREÁMBULO

Los Eurocódigos estructurales

La Comisión Europea puso en marcha en 1981 la redacción de un código estructural europeo que culminó con la aparición en 1984 de los primeros Eurocódigos. En las dos décadas transcurridas entre la publicación de esos primeros textos y los actuales, se ha producido una evolución muy significativa, no sólo en su contenido, sino en el grado de aceptación y reconocimiento por parte de la comunidad técnica europea y mundial.

En la década de los 90, hizo su aparición una segunda generación de Eurocódigos, elaborados en el seno del Comité Europeo de Normalización (CEN) por mandato de la Comisión Europea. Estos textos, conocidos como normas ENV, se publicaron con carácter experimental. Fue entre los años 2002 y 2007, cuando tuvo lugar la publicación de los EUROCÓDIGOS ESTRUCTURALES como normas EN. Desde entonces, AENOR ha traducido paulatinamente estos textos al español, publicándolos como normas UNE-EN.

Estas normas tienen carácter voluntario por su propia naturaleza, salvo que una disposición reglamentaria las declare obligatorias. Hay que destacar que sucesivas directivas y recomendaciones de la Unión Europea han hecho referencia expresa a los Eurocódigos y a la importancia de su adopción por los Estados miembro como forma de *"facilitar la provisión de servicios en el campo de la construcción creando un sistema armonizado de reglas generales"*, lo que ha dado lugar a que en los últimos años la gran mayoría de los países europeos los hayan adoptado como código estructural único.

En el caso concreto de las obras públicas, la *Directiva de contratación pública*, traspuesta al ordenamiento jurídico español por la *Ley de contratos del sector público*, establece la preeminencia de las normas nacionales que incorporen normas europeas (UNE-EN, en el caso español) sobre cualquier otra especificación nacional a la hora de fijar las condiciones técnicas en los pliegos de contratación para la redacción del proyecto de dichas obras, sin perjuicio de la reglamentación obligatoria.

Además, existe reglamentación europea, de obligado cumplimiento de forma directa en los Estados miembro, que declara los Eurocódigos como normas de proyecto. Este es el caso, por ejemplo, del Reglamento (UE) 1299/2014 de la Comisión Europea, relativo a *Especificaciones*

técnicas de interoperabilidad ferroviaria, de obligado cumplimiento para el proyecto de puentes de ferrocarril.

La serie Guías Eurocódigos

El uso creciente y generalizado de los Eurocódigos en los países de nuestro entorno ha dado lugar a la publicación de numerosos manuales, guías y ejemplos de aplicación de estas normas. En España, desde hace ya algunos 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 en revistas especializadas.

La serie denominada *Guías Eurocódigos*, que aquí se presenta, puede considerarse sin embargo pionera en nuestro país. Su 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.

En su elaboración se ha supuesto que el lector está familiarizado con los Eurocódigos correspondientes y es conocedor de los conceptos ingenieriles en los que se sustentan. Para evitar en lo posible la repetición de cláusulas, las guías necesitarán ser leídas junto con los propios Eurocódigos y con sus respectivos anejos nacionales españoles.

Las normas UNE están sujetas a derecho de propiedad intelectual por parte de la Asociación Española de Normalización, UNE. Esta guía reproduce parcialmente el contenido de algunas normas UNE-EN por acuerdo con dicha asociación.

La fatiga en los Eurocódigos

El Eurocódigo 3 (UNE-EN 1993) se divide en 20 partes, en las que se definen los criterios para el proyecto de las estructuras de acero. La parte 1-9 (UNE-EN 1993-1-9) establece los criterios para el proyecto de las estructuras de acero frente al Estado Límite Último de Fatiga, y la parte 1-10 (UNE-EN 1993-1-10) dedicada a la tenacidad de fractura y la resistencia transversal a través del espesor del material, establece los criterios para la elección del material para evitar la rotura frágil.

La ejecución y el control de estructuras de acero se rige por UNE-EN 1090-2, norma que complementa a las 20 partes del Eurocódigo 3 dedicado al proyecto de estructuras de acero.

El Eurocódigo de Fatiga (UNE-EN 1993-1-9), aplicado para el proyecto de puentes de carretera, debe necesariamente tener en cuenta su relación con la Parte 2 del Eurocódigo 3 (UNE-EN 1993-2), dedicada al proyecto de puentes de acero.

Del mismo modo, será necesario tener en cuenta el Eurocódigo 1, Parte 2, de cargas de tráfico en puentes (UNE-EN 1991-2), así como en el Eurocódigo de bases de cálculo de estructuras y su anejo A2 de aplicación a puentes (UNE-EN 1990/A1).

En el caso de puentes mixtos, para realizar las verificaciones de fatiga, será necesario considerar también la Parte 2, puentes, del Eurocódigo 4, dedicado al proyecto de estructuras mixtas (acero-hormigón) UNE-EN 1994-2. A su vez, para realizar las verificaciones de fatiga del acero pasivo de las losas armadas en tableros mixtos, será necesario aplicar las Partes 1 y 2 del Eurocódigo 2 (UNE-EN 1992-1 y UNE-EN 1992-2).

Para el proyecto frente a fatiga de algunos elementos sometidos a tracción en puentes, como tirantes o péndolas, es necesario acudir además al Eurocódigo 3, Parte 1-11 (UNE-EN 1993 1-11), relativa al proyecto de estructuras con elementos en tracción (cables y tirantes).

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

Esta guía se ha desarrollado con el objeto de facilitar la comprensión del fenómeno de la fatiga en los puentes, así como de ayudar en la interpretación del tratamiento que hacen los Eurocódigos del Estado Límite Último de Fatiga. En última instancia, el objetivo es 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.

Página generada
intencionalmente
en blanco

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 17

1.1. Objeto y ámbito de aplicación 17

1.2. Contenido de la guía 18

2 BASES TEÓRICAS DEL ELU DE FATIGA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS 21

2.1. Breve reseña histórica 22

2.2. Fundamento científico 24

2.2.1 Conceptos básicos 24

2.2.2 Conceptos relacionados con la Mecánica de Fractura 25

2.2.2.1 Propagación de fisuras 26

2.2.2.2 La placa de Griffith-Irwin 27

2.2.3 Ley de Paris 30

2.2.4 Las curvas S–N o de Wöhler 31

2.3. Curvas de fatiga en elementos metálicos 33

2.3.1 El concepto de categoría de detalle 37

2.4. Métodos de análisis a fatiga 37

2.4.1 Método del Daño Acumulado 38

2.4.2 Método de la Tensión Equivalente de Daño 39

3 VERIFICACIONES DE LOS EUROCÓDIGOS PARA EL CÁLCULO A FATIGA 41

3.1. La fatiga en los Eurocódigos 41

3.1.1 Campo de aplicación de UNE-EN 1993-1-9 42

3.1.2 Exigencia del análisis a fatiga en puentes metálicos 42

3.2. Acciones de fatiga en puentes de carretera según el Eurocódigo 1-2 43

3.2.1 Modelo de carga de fatiga FLM1 43

3.2.2 Modelo de carga de fatiga FLM2 43

3.2.3 Modelo de carga de fatiga FLM3 45

3.2.4 Modelo de carga de fatiga FLM4 46

3.2.5 Modelo de carga de fatiga FLM5 47

3.2.6 Comentarios adicionales a los modelos de fatiga (FLM) 47

3.3. Verificaciones a fatiga en Eurocódigos 2, 3 y 4 51

3.3.1 Criterios de evaluación y coeficiente parcial para la comprobación de la resistencia a fatiga 52

3.3.2 Resistencia a fatiga 55

3.3.2.1 Curvas de fatiga normativas para acero estructural 56

3.3.2.2 Curvas de fatiga normativas para pernos conectadores 59

3.3.2.3 Curvas de fatiga normativas para acero de armadura pasiva y activa 60
3.3.2.4 Curvas de fatiga normativas para cables 61
3.3.3 Cálculo de tensiones bajo cargas de fatiga 62
3.4. Método Simplificado 65
3.4.1 Método Simplificado aplicado al acero estructural 65
3.4.1.1 Comprobación a fatiga 65
3.4.1.2 Cálculo de carreras de tensión 67
3.4.1.3 Coeficientes de daño equivalente λ 70
3.4.1.4 Coeficiente λ_1 71
3.4.1.5 Coeficiente λ_2 72
3.4.1.6 Coeficiente λ_3 74
3.4.1.7 Coeficiente λ_4 74
3.4.1.8 Coeficiente λ_{max} 76
3.4.2 Método Simplificado aplicado a pernos de soldadura automática 77
3.4.2.1 Comprobación a fatiga 77
3.4.2.2 Carreras de tensión 78
3.4.2.3 Coeficientes de daño equivalente λ_v 78
3.4.3 Método Simplificado aplicado a armaduras activas o pasivas 81
3.4.3.1 Comprobación a fatiga 81
3.4.3.2 Carreras de tensión 82
3.4.3.3 Coeficientes de daño equivalente S 84
3.4.4 Método Simplificado aplicado a cables y tirantes 88
3.5. Método del Daño Acumulado 88
3.5.1 Definición de la composicion de tráfico 89
3.5.2 Histórico de tensiones 89
3.5.3 Espectro de carreras de tensiones 90
3.5.3.1 Método del depósito 91
3.5.3.2 Método de la gota de agua 92
3.5.4 Cálculo del daño 95
3.6. Análisis de los dos métodos 97
3.6.1 Conversión de daño a carrera de tensión equivalente 97
3.6.2 Dimensionamiento de secciones 98
3.7. Breve descripción de las verificaciones a fatiga en la RPM-95 y RPX-95 100

4 RECOMENDACIONES PARA LA CONCEPCIÓN, DIMENSIONAMIENTO, EJECUCIÓN Y CONTROL DE LOS DETALLES TÍPICOS DE PUENTES METÁLICOS Y MIXTOS DE CARRETERA 105

4.1. Categorías de detalles tipo acorde con UNE-EN 1993-1-9 106

4.2. Clases de ejecución 108

4.3. Corte y preparación de bordes de chapas 110

4.4. Marcado de piezas 117

4.5. Empalmes transversales de chapas mediante soldadura a tope 118

4.5.1 Empalmes de chapas a tope con acceso por los dos lados 123

4.5.1.1 Empalmes de chapas con continuidad de una de las caras 123

4.5.1.2 Empalmes de chapas a tope con continuidad del plano medio 126

4.5.2 Empalmes de chapas a tope con chapa de respaldo 127

4.6. Rigidizadores, cartelas, y otros elementos soldados a chapas principales 132

4.6.1 Elementos soldados en la dirección paralela a las chapas principales 132

4.6.2 Problemática de la soldadura de elementos auxiliares en la dirección paralela a las chapas principales 136

4.6.3 Cartelas o chapas soldadas en el canto de una chapa principal 138

4.6.4 Rigidizadores o chapas soldados transversalmente a las chapas principales 144

4.7. Soldaduras de rasante en piezas armadas y soldaduras entre alas y almas 146

4.8. Uniones soldadas transmisoras de esfuerzos 157

4.8.1 Empleo de refuerzos de chapas principales con uniones soldadas por solape 157

4.8.2 Uniones soldadas perpendiculares transmisoras de esfuerzos 160

4.8.3 Uniones soldadas por solape transmisoras de esfuerzos 164

4.9. Conexión 165

4.10. Recomendaciones relativas al empleo de uniones atornilladas 166

4.11. Celosías y arriostramientos 170

4.11.1 Celosías horizontales 173

4.11.2 Celosías verticales 176

4.11.3 Diafragmas transversales en secciones bijácena 184

4.12. Otras tipologías de tableros menos habituales 185

4.12.1 Tableros en celosía 185

4.12.1.1 Celosías con perfiles con sección tubular circular 186

4.12.2 Losas ortótropas 191

4.12.2.1 Losas ortótropas con rigidizadores longitudinales cerrados 192

4.12.2.2 Losas ortótropas con rigidizadores longitudinales abiertos 203

4.13. Tratamientos de mejora de la resistencia a fatiga de soldaduras 204

5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LA SENSIBILIDAD FRENTE A FATIGA EN PUENTES DE CARRETERA 205

5.1. Descripción de los estudios realizados 205

5.2. Zonas analizadas 206

5.2.1 Centros de vanos 207

5.2.2 Apoyos intermedios 207

5.2.3 Apoyos extremos 208

5.2.4 Zona de puntos de inflexión 209

5.2.5 Armadura pasiva y dispositivos de empalme 209

5.3. Análisis longitudinal 210

5.3.1 Metodología 210

5.3.1.1 Metodología de análisis por el Método del Daño Acumulado 211

5.3.1.2 Metodología de análisis por el Método Simplificado 212

5.3.2 Tableros cajón mixtos 213

5.3.2.1 Discusión conceptual 213

5.3.2.2 Uso de la doble acción mixta 213

5.3.2.3 Tableros cajón isostáticos 214

5.3.2.3.1 Características básicas 214

5.3.2.3.2 Sensibilidad a fatiga de las soldaduras transversales en las chapas de fondo 216

5.3.2.3.3 Exposición de resultados 219

5.3.2.3.4 Análisis de la seguridad a fatiga 222

5.3.2.4 Tableros cajón continuos de tres vanos 223

5.3.2.4.1 Características básicas 223

5.3.2.4.2 Vano principal de 30 m 224

5.3.2.4.3 Vano principal de 45 m 230

5.3.2.4.4 Vano principal de 60 m 236

5.3.2.4.5 Vano principal de 75 m 241

5.3.2.4.6 Análisis de la seguridad a fatiga 246

5.3.2.5 Tableros cajón continuos de múltiples vanos 247

5.3.2.5.1 Características básicas 247

5.3.2.5.2 Vano tipo de 30 m 247

5.3.2.5.3 Vano tipo de 45 m 248

5.3.2.5.4 Vano tipo de 60 m 248

5.3.2.5.5 Vano tipo de 75 m 249

5.3.2.5.6 Análisis de la seguridad a fatiga 250

5.3.3 Tableros bijácena mixtos 250

5.3.3.1 Discusión conceptual 250

5.3.3.2 Uso de la doble acción mixta 251
5.3.3.3 Tableros bijácena continuos de tres vanos 251
5.3.3.3.1 Características básicas 251
5.3.3.3.2 Vano principal de 30 m 252
5.3.3.3.3 Vano principal de 45 m 258
5.3.3.3.4 Vano principal de 60 m 263
5.3.3.3.5 Vano principal de 75 m 268
5.3.3.3.6 Análisis de la seguridad a fatiga 273
5.3.4 Comparación entre sección cajón y bijácena. Conclusiones finales 274
5.4. Análisis transversal 275
5.4.1 Metodología 275
5.4.2 Secciones transversales con costillas 276
5.4.2.1 Sección tipo analizada 276
5.4.2.2 Modelo de cálculo 277
5.4.2.3 Dimensionamiento de la sección 278
5.4.2.4 Secciones críticas para fatiga 278
5.4.2.5 Comprobaciones a fatiga 280
5.4.3 Secciones con costillas y puntales 284
5.4.3.1 Sección tipo analizada 284
5.4.3.2 Modelo de cálculo 285
5.4.3.3 Dimensionamiento de las secciones tipo 286
5.4.3.4 Secciones críticas para fatiga 287
5.4.3.5 Comprobaciones a fatiga 288

6 EJEMPLOS 295
6.1. Puente isostático mixto con sección cajón 295
6.1.1 Definición geométrica 295
6.1.1.1 Alzado y sección transversal 295
6.1.1.2 Estructura metálica principal 296
6.1.2 Acciones consideradas 298
6.1.3 Resumen de esfuerzos 300
6.1.4 Verificaciones seccionales básicas 302
6.1.4.1 Sección de centro de vano 302
6.1.4.2 Sección de apoyos 303
6.1.4.3 Conexión 304
6.1.5 Análisis longitudinal a fatiga por el Método Simplificado 304
6.1.5.1 Sección de centro de vano 305
6.1.5.2 Generalización de la verificación en todo el vano 308
6.1.5.3 Sección de apoyo: tensiones tangenciales 310

6.1.5.4 Sección de apoyo: conexión 311
6.1.6 Análisis longitudinal a fatiga por el Método del Daño Acumulado 314
6.1.6.1 Sección de centro de vano 314
6.1.6.2 Sección de apoyo: conexión 318
6.2. Puente bijácena continuo de tres vanos 321
6.2.1 Definición geométrica 321
6.2.1.1 Alzado y sección transversal 321
6.2.1.2 Estructura metálica principal 322
6.2.2 Acciones consideradas 324
6.2.3 Resumen de esfuerzos 328
6.2.4 Verificaciones seccionales básicas 332
6.2.4.1 Centro de vano principal 332
6.2.4.2 Centro de vano lateral 333
6.2.4.3 Apoyo extremo 334
6.2.4.4 Apoyo intermedio 334
6.2.4.5 Conexión 335
6.2.5 Análisis longitudinal a fatiga por el Método Simplificado 336
6.2.5.1 Sección de centro de vano principal 337
6.2.5.2 Sección de centro de vano lateral 340
6.2.5.3 Sección de apoyo intermedio: tensiones normales 343
6.2.5.4 Sección de apoyo intermedio: tensiones tangenciales 345
6.2.5.5 Sección de apoyo intermedio: interacción σ-τ 347
6.2.5.6 Sección de apoyo intermedio: conexión 348
6.2.5.7 Sección de apoyo intermedio: interacción entre platabanda y pernos 349
6.2.5.8 Sección de apoyo intermedio: armaduras pasivas de losa superior 350
6.2.6 Análisis longitudinal a fatiga por el Método del Daño Acumulado 353
6.2.6.1 Sección de centro de vano principal 354
6.2.6.2 Sección de centro de vano lateral 359
6.2.6.3 Sección de apoyo intermedio: tensiones normales 363
6.2.6.4 Sección de apoyo intermedio: conexión 366

Anejo A
CATEGORÍA DE DETALLES DE FATIGA SEGÚN UNE-EN 1993-1-9 369

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto y ámbito de aplicación

Esta guía se enmarca dentro de una idea más general que persigue promover en España el uso del conjunto de normas europeas conocidas como Eurocódigos, en vigor desde 2010.

Los Eurocódigos, cuyo ámbito de aplicación se restringe a aspectos de cálculo, suponen una clara mejora de la consistencia de los métodos de proyecto al dotar al conjunto de las estructuras, construidas con distintos materiales, y con usos variados (puentes, edificios, instalaciones industriales, obras hidráulicas, etc.), de unas bases de cálculo comunes. Esto supone un claro avance respecto de la situación previa, en la que convivían (o aún conviven) normativas nacionales desarrolladas por organismos diferentes para ámbitos de aplicación restringidos y en ocasiones con insuficiente coordinación.

Los Eurocódigos suponen por ello una ventaja competitiva para Europa en general y para los países europeos en particular, mejorando la eficacia del mercado único y eliminando la duplicidad de esfuerzos en formación y desarrollo.

Sin embargo, para conseguir que España se beneficie plenamente del marco creado por los Eurocódigos, con todas sus ventajas, es necesario su adopción por la comunidad técnica a nivel de práctica cotidiana y ello requiere un esfuerzo de adaptación. Esta guía tiene como objetivo facilitar esta adaptación ayudando a comprender el tratamiento del Estado Límite Último de Fatiga por los Eurocódigos, además de ayudar a comprender el fenómeno y sus bases teóricas. Asimismo, se analizan los procedimientos de cálculo y se aportan una serie de criterios y recomendaciones para la concepción, la ejecución y el control de ejecución de los detalles más habituales de las tipologías más frecuentes de puentes metálicos y mixtos de carretera, que puedan 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.

1.2 Contenido de la guía

Este 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.

El capítulo 3 describe los criterios y métodos establecidos en los Eurocódigos Estructurales para realizar la verificación frente al Estado Límite Último de Fatiga en puentes de acero y puentes mixtos, aplicando el Método Simplificado y el Método del Daño Acumulado.

Tras exponer las bases generales teóricas y el tratamiento normativo en los Eurocódigos del fenómeno de fatiga, el capítulo 4 se centra en dar recomendaciones para la concepción, el dimensionamiento, la ejecución y el control de la ejecución 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). Adicionalmente, se incluyen al final del capítulo algunas recomendaciones relativas a tableros en celosía y losas ortótropas, que presentan detalles con particularidades específicas.

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. Los análisis realizados, 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.

Finalmente, el capítulo 6 incluye el desarrollo detallado de dos ejemplos de aplicación, un cajón mixto isostático y un tablero continuo de tres vanos formado por una sección bijácena con doble acción mixta, en los que se explica pormenorizadamente la verificación a fatiga.

Página generada
intencionalmente
en blanco

2

BASES TEÓRICAS DEL ELU DE FATIGA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

La fatiga es un fenómeno por el cual los materiales pueden llegar a alcanzar la rotura cuando han sido sometidos a una serie de solicitaciones cíclicas, de valor inferior al que produciría la rotura estática.

Solicitaciones repetitivas como las causadas por el paso de tráfico de carretera (o ferroviario) en un puente, el funcionamiento de máquinas en instalaciones industriales, la acción del oleaje en buques o plataformas marinas, o las turbulencias o los cambios de presión con la altitud en aviones pueden llegar a causar la propagación de las microfisuras que siempre existen en los elementos metálicos, no sólo por la presencia de entallas originadas por singularidades geométricas, como desalineaciones, cortes, perforaciones o soldaduras, sino también en el material base (debido al propio proceso de laminación).

En la actualidad, la fatiga es una de las principales causas de patologías en las construcciones metálicas, pudiendo producir la rotura de elementos y llegar al colapso completo de una estructura en un periodo inferior a su vida útil. Algunos estudios revelan que el fenómeno de la fatiga es una de las causas más comunes de roturas en puentes metálicos y mixtos de carretera y ferrocarril, suponiendo hasta más del 80% de las incidencias registradas.

Asimismo, el fallo por fatiga de elementos no críticos puede suponer el cierre de la estructura para acometer su reparación, con la consiguiente repercusión económica y social. En el proyecto de una estructura se deben cuidar la concepción y la ejecución de los detalles de modo que a lo largo de la vida útil no se produzcan fallos por rotura frágil, hecho en el que también influye una elección adecuada del material (con materiales tenaces) y sus espesores.

Para el estudio de la fatiga, se han desarrollado distintos procedimientos tales como el Método del Daño Acumulado o la Mecánica de Fractura, que han permitido la aparición de métodos de cálculo simplificados propuestos por las distintas normativas que abordan el

tema y que permiten un análisis más rápido y sencillo del problema. La posibilidad de colapso por propagación de fisuras hace que la fatiga quede encuadrada entre los Estados Límite Últimos en todos los códigos estructurales.

El Eurocódigo 3 parte 2 (UNE-EN 1993-2), dedicado al proyecto de estructuras de acero en puentes, aborda el cálculo de la capacidad resistente de los elementos por plastificación o inestabilidad, mientras que la fatiga se trata en el Eurocódigo 3 parte 1-9 (UNE-EN 1993-1-9) y la elección del material para evitar la rotura frágil (tenacidad de fractura) se analiza en el Eurocódigo 3 parte 1-10 (UNE-EN 1993-1-10).

2.1 Breve reseña histórica

Aunque se trata de un fenómeno conocido desde la antigüedad, el análisis de la fatiga no fue de interés hasta la Revolución Industrial, cuando a mediados del siglo XIX comenzaron los primeros estudios encaminados a la obtención de piezas fiables. Para entenderlo conviene prestar atención a tres frentes diferenciados; uno relacionado con el mecanismo de la propagación de la fisura, la mecánica de fractura, y dos relacionados con las propiedades del material, la tenacidad y la resiliencia.

El fenómeno de la mecánica de fractura fue descubierto a comienzos del siglo XIX con el desarrollo de la maquinaria industrial y de los sistemas de transporte. Los primeros trabajos relacionados con la fatiga son obra del ingeniero de minas alemán Wilhelm Albert, quien en 1829 realizó una serie de ensayos sometiendo a cargas y descargas sucesivas a eslabones de cadenas de elevadores en las minas de Clausthal, en la Baja Sajonia alemana. Sin embargo, el término *fatiga* para denominar a este fenómeno fue acuñado por Jean-Victor Poncelet en 1839.

El interés en el estudio de la fatiga crece con la proliferación de las estructuras férreas, especialmente los puentes de ferrocarril. El primer estudio de fatiga de metales se inicia en 1842 a consecuencia del accidente de ferrocarril acontecido en Versalles (Francia), cuando un tren sobrecargado de pasajeros descarriló. En 1843, W. J. M. Rankine, ingeniero británico, examinó los ejes del tren siniestrado y reconoció las características distintivas de la fractura por fatiga. Destacó el peligro para las máquinas de la concentración de tensiones en puntos como cambios de sección, ángulos pronunciados, ranuras de taladros, etc.

La British Institution of Mechanical Engineers desarrolló como teoría justificativa de la fractura por fatiga la cristalización de los metales causada por las vibraciones de las máquinas.

Los primeros estudios sistemáticos de la fatiga se deben a August Wöhler, ingeniero de ferrocarriles alemán, quien entre 1852 y 1870 realizó gran cantidad de ensayos de flexión repetitiva sobre ejes de ferrocarril. Observó que la resistencia de los ejes de aleaciones de hierro sometidos a cargas cíclicas era apreciablemente menor que su resistencia bajo carga estática. Su trabajo permitió la caracterización del comportamiento a fatiga de los materiales mediante las curvas S-N, denominadas curvas de Wöhler en su honor, base del tratamiento actual de la fatiga. Asimismo, Wöhler estableció el concepto de límite de fatiga al comprobar que las aleaciones de hierro parecían tener un umbral por debajo del cual no se producía la fractura por muy grande que fuera el número de ciclos aplicados.

H. Gerber (1874), Goodman (1899) y Soderberg (1930) comenzaron a desarrollar métodos con base científica para el diseño a fatiga. Por su parte, Bauschinger (1886) planteó la propiedad de que el límite elástico de los metales sometidos a cargas y descargas podía ser mayor que el correspondiente a una carga monótona creciente, además de confirmar los resultados obtenidos por Wöhler.

A principios del siglo XX, el acero se convierte en un material competitivo y ampliamente utilizado en la construcción industrial y de puentes. En esta misma época, la ingeniería estructural experimenta grandes avances científicos y tecnológicos.

Durante la primera mitad del siglo se obtuvo una gran cantidad de datos experimentales relacionando la resistencia a fatiga con factores tales como la geometría y tamaño de las piezas, condiciones ambientales, acabado superficial, estructura metalográfica, etc. Las investigaciones en este periodo permitieron el desarrollo de los modelos de daño acumulado para predecir el fallo por fatiga (Palmgren, 1924; Miner, 1945).

A pesar de que desde principios de siglo se conocía que el fenómeno se debía a la formación y propagación de microfisuras, la herramienta matemática necesaria para cuantificar el daño por fatiga no estaba suficientemente desarrollada. El análisis de tensiones de Inglis (1913) y el concepto energético de Griffith (1921) aportaron el tratamiento cuantitativo de la fractura frágil.

Con los estudios de Irwin (1957) se demostró que la amplitud de la singularidad en tensiones en el labio de una fisura podía ser expresada en términos de un parámetro conocido como factor de concentración de tensiones K.

Paris y Erdogan fueron los primeros en sugerir que el incremento del tamaño de la fisura, es decir, su velocidad de propagación con el número de ciclos de amplitud constante aplicado, estaba relacionada con el factor de concentración de tensiones K.

A mediados del siglo XX la soldadura se convierte en un procedimiento de fabricación extendido, apareciendo los primeros incidentes de repercusión internacional atribuidos a problemas de fractura frágil. Debe tenerse en cuenta que hasta la aparición de las soldaduras las uniones se ejecutaban remachadas, no manifestándose en ellas la rotura frágil debido a las bajas tensiones de trabajo y a las menores tensiones residuales asociadas al proceso de unión. Sin embargo, la soldadura introduce una serie de factores que propician que las estructuras sean más sensibles a la rotura frágil; por un lado, permite aprovechar mejor las características resistentes de los aceros reduciendo la redundancia de los sistemas resistentes de las uniones roblonadas, y por otro, origina en la unión concentraciones de tensiones, coacciones y tensiones residuales que hacen las soldaduras más propensas al desarrollo de microfisuras.

El auge de la soldadura pone de manifiesto la necesidad de controlar la fractura frágil, impulsando el desarrollo de los conocimientos teóricos relacionados con las propiedades del material de manera paralela al estudio de la mecánica de fractura.

A medida que se incrementan los conocimientos sobre las causas de la rotura frágil, estos se van trasladando a la normativa. En 1960 la norma BS-153 comienza limitando los espesores

máximos en las chapas soldadas traccionadas en función de la calidad de los aceros, estrechamente relacionada con la resiliencia del material obtenida a partir del ensayo Charpy ISO V.

Los requisitos en tenacidad se hacen más precisos, distinguiéndose las distintas zonas de la unión soldada: material base, material de aportación y zona de afectación térmica (zona del metal base próxima a la unión y afectada por el proceso de soldeo, comúnmente conocida como ZAT). En 1982 la norma de puentes BS-5400, que sustituye a la BS-153, continúa con el mismo enfoque normativo limitando el espesor del material en función de la temperatura de servicio y de la calidad del acero (resiliencia). En esta nueva versión se tiene en cuenta también el nivel tensional, la concentración de tensiones y las tensiones residuales de la soldadura.

Sin embargo, en estos primeros desarrollos normativos no parece existir relación entre la selección del material, el fenómeno de la fatiga y los criterios de aceptación de defectos. No fue hasta 1980, en que se publicó la norma PD-6493, y que posteriormente dio lugar a la BS-7910, cuando comenzaron a establecerse los criterios de aceptación de fisuras basados en la mecánica de fractura.

Las primeras versiones del Eurocódigo tienen un enfoque similar; el procedimiento adoptado por la BS-7910 fue finalmente introducido en la versión experimental de 1997 del Eurocódigo 3 parte 2 (ENV 1993-2:1997), dedicado al proyecto de puentes metálicos, permitiendo así un análisis cuantitativo para la prevención de la rotura frágil gracias a la mecánica de fractura.

2.2 Fundamento científico

2.2.1 Conceptos básicos

Las estructuras se proyectan para que puedan prestar un servicio durante un determinado periodo de tiempo. En el caso de los puentes, estos se proyectan para soportar, junto al resto de acciones, el paso de un determinado tráfico durante un periodo de tiempo tras su entrada en funcionamiento, previendo su mantenimiento, pero sin necesidad de ninguna reparación sustancial. Este periodo se designa como *vida útil*.

El paso de cargas móviles sobre un puente genera ciclos de tensión cuya diferencia entre el valor máximo y mínimo se define como *rango de tensiones*. La elevada frecuencia de paso de grandes cargas (vehículos pesados) en el puente puede generar en los elementos, o en las uniones, el inicio y la propagación de fisuras. Este fenómeno se designa como *fatiga* y, en algunos casos, puede llevar a una reducción de la vida útil prevista para la estructura.

La reducción de la vida útil por fatiga se puede contabilizar a través del concepto de *daño*. Siendo el daño, de forma general, el cociente entre la solicitación aplicada y la resistencia del elemento, éste se puede definir también como una fracción de la vida útil consumida por la aplicación de una serie de pasos cíclicos de cargas. De esta manera, si el resultado del análisis de un elemento o unión lleva a un daño unitario significa que justo en ese momento se agota la vida útil por fatiga. El objetivo, a la hora del proyecto, será lograr que esa vida útil

por fatiga no sea inferior a la vida útil de proyecto, que en España para puentes de carretera es de 100 años.

Los puntos de una estructura que se consideran más susceptibles de verse afectados por el fenómeno de la fatiga y, por tanto, donde será necesario incidir en el análisis (en general las uniones entre elementos, atornilladas o soldadas) se designan como *detalles*. Cada detalle tiene asociada una categoría, la *categoría de detalle*, que define su resistencia a fatiga, teniendo en cuenta determinadas condiciones (máxima carrera de tensión de amplitud constante que, al ser aplicada 2 millones de ciclos, provoca el fallo del detalle). En el apartado 2.4.1 se describe con más detenimiento el concepto de la *categoría de detalle*.

2.2.2 Conceptos relacionados con la Mecánica de Fractura

La Mecánica de Fractura analiza la respuesta de un elemento con una fisura inicial estudiando su crecimiento de forma elástica y lineal hasta que se alcanza la rotura del elemento.

Por el propio proceso de fabricación de las estructuras metálicas, resulta inevitable que existan microfisuras en determinadas zonas. Este hecho provoca que en las estructuras sometidas a ciclos de carga variables se pueda producir el eventual crecimiento de las microfisuras existentes hasta que la fisura alcanza un tamaño crítico llegando a la rotura de la pieza.

La velocidad de crecimiento de la fisura está estrechamente relacionada con la concentración de tensiones en las inmediaciones del extremo (o vértice) de la misma debido a la discontinuidad que introduce la fisura sobre el flujo de tensiones original. El factor que se emplea para cuantificar esta distribución de tensiones recibe el nombre de *factor de concentración de tensiones* K. Por otro lado, el material ofrece una oposición a la propagación de estas fisuras. Esta oposición viene determinada por la *tenacidad de fractura* del material K_c y se define como el máximo valor del factor de concentración de tensiones que el material es capaz de soportar antes de romper de manera frágil (desgarro inestable de la fisura). Es decir la rotura frágil se produce cuando se cumple la condición de la expresión (1).

$$K\left(\sigma, a, geometría\right) = K_c\left(material, T, \varepsilon\right) \tag{1}$$

De esta manera se produce la posibilidad de fallo por rotura frágil que se añade al fallo por rotura plástica.

Así, la resistencia a fatiga de un elemento depende principalmente de los siguientes parámetros:

- El rango de tensiones
- La geometría y posición del detalle
- Las características del material
- La influencia del ambiente

2.2.2.1 Propagación de fisuras

La Mecánica de Fractura aplicada a la fatiga estudia la amplificación de tensiones en el labio de una fisura y la velocidad de propagación de la misma en función de la oscilación tensional, del tamaño de la propia fisura y de la geometría y condiciones de contorno del elemento estudiado.

Se distinguen las siguientes fases de crecimiento en función del tamaño de la fisura (Figura 1):

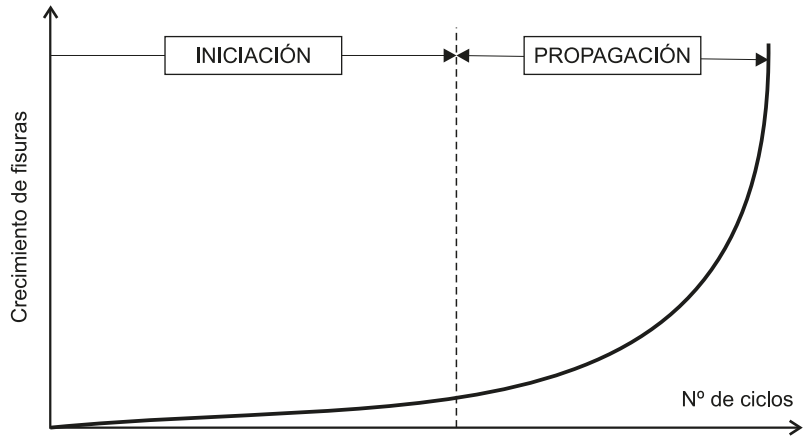


Figura 1 **Fases de propagación de fisuras**

La fase de iniciación se caracteriza por la producción de cambios microestructurales, como el incremento de las dislocaciones y la formación de microfisuras.

- La fase de propagación se inicia cuando se rebasa un cierto umbral. Empiezan a darse importantes concentraciones de tensiones en el labio de la fisura que se traducen en plastificaciones muy localizadas y en una propagación apreciable pero controlada de la fisura. Se trata de la zona en la que las hipótesis de cálculo elástico macroscópico y las formulaciones clásicas de fatiga son válidas
- A partir de un cierto tamaño de fisura, se considera que la propagación es tan acelerada que el daño conduce al fallo brusco del elemento; en ese momento se produce la rotura

La propagación del daño por fatiga puede apreciarse al examinar microscópicamente los elementos fracturados; se detecta un patrón a modo de frentes de onda paralelos (con forma de *concha de playa*) o estratos que parten del punto de iniciación (Figura 2). La plastificación en la zona de la fisura se vuelve masiva y se extiende rápidamente (Figura 3).



Figura 2 **Corte de una sección con daños por fatiga (propagación con forma de concha de playa)**

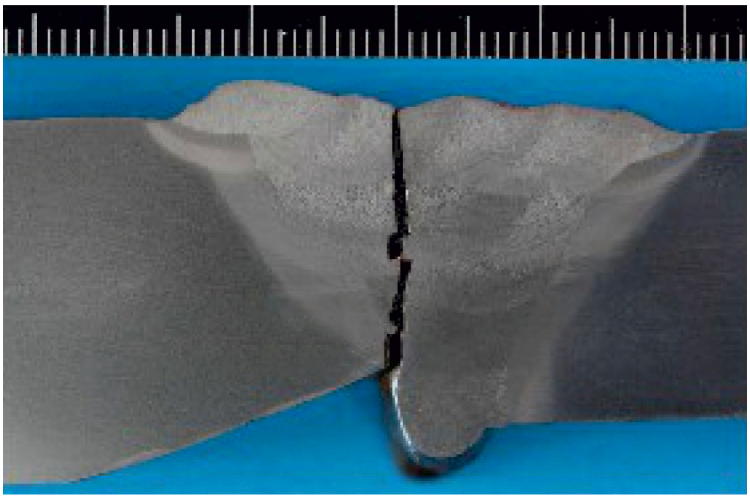


Figura 3 **Rotura por fatiga de una soldadura por propagación de una entalla en la raíz**

2.2.2.2 La placa de Griffith-Irwin

El ejemplo básico para comprender el fenómeno de la Mecánica de Fractura es la placa de Griffith-Irwin, consistente en una chapa plana elástica e isótropa de pequeño espesor en cuyo centro existe una perforación (asimilable a una elipse) de eje mayor $2a$ y menor $2b$. Cuando lejos del defecto central con forma elíptica actúa una tensión de tracción σ perpendicular al eje mayor, la teoría clásica de la elasticidad establece que la tensión σ_A en los vértices del eje mayor, según la dirección de σ, tiene el valor de la expresión (2).

$$\sigma_A = \sigma\left(1+2\frac{a}{b}\right) \tag{2}$$

Ha de entenderse que la fisura es lo suficientemente pequeña en comparación con las dimensiones de la chapa como para que la tensión exterior aplicada no se vea afectada por

la singularidad de la fisura, y que la amplificación de tensiones en la línea de la fisura sea un fenómeno muy localizado (Figura 4). De este modo, es posible trabajar siempre con la carrera de tensión aplicada supuesta como constante independientemente del tamaño que vaya adquiriendo la fisura.

La expresión (2) implica que, cuando el orificio tiende a semejarse a una fisura en la que el eje menor es despreciable frente al mayor ($b<<a$), la tensión en el labio de la fisura aumenta rápidamente hasta el infinito. En realidad, la concentración de tensiones se traduce en una disipación de energía a base de una plastificación progresiva y una dislocación de los enlaces del metal en las inmediaciones de la fisura, es decir, la propagación.

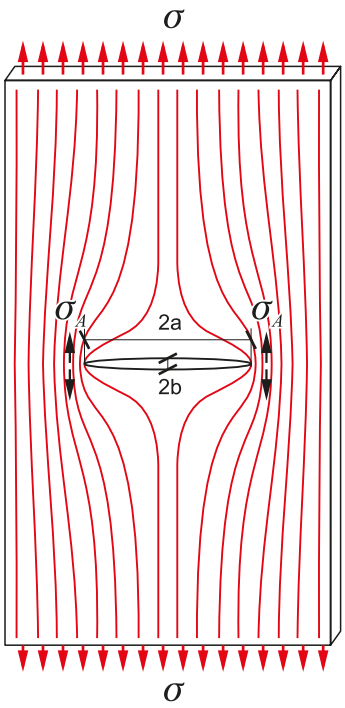


Figura 4 **Placa de Griffith-Irwin y esquema de concentración de tensiones junto a la fisura**

Además de estudiar la distribución de tensiones en el material en la zona fisurada, se ha desarrollado el análisis de la componente energética de la fractura, que se mide mediante el parámetro denominado factor de concentración de tensiones K. Su valor depende del tamaño de la propia fisura y de la tensión aplicada, según la expresión (3).

$$K = Y\,\sigma\sqrt{\pi\,a} \tag{3}$$

donde:

K factor de concentración de tensiones, con unidades de tensión por longitud$^{1/2}$

Y coeficiente cuyo valor depende de la geometría de la chapa, de las dimensiones de la fisura y de las condiciones de contorno. Se puede determinar mediante cálculos por ordenador, mediante fotoelasticidad o acudiendo a libros o prontuarios técnicos que lo tabulan

σ tensión aplicada en los extremos de la chapa

a semilongitud de la fisura

La distribución teórica de tensiones en el material a lo largo de la línea de la fisura puede asimilarse a una función decreciente con una singularidad en el labio, y cuyo desarrollo en serie (4) contiene en su primer término al factor K:

$$\sigma(x) = \frac{K}{\sqrt{2\pi\, x}} + \ldots \tag{4}$$

donde:

x distancia según la línea de la fisura medida a partir del labio

Por otra parte, la importancia del factor K estriba en que está asociado a una magnitud intrínseca del material denominada tenacidad de fractura K_c, cuyo valor se define en la expresión (5).

$$K_c = Y\sqrt{E\, R} \tag{5}$$

donde:

E módulo de elasticidad del material

R energía específica de fractura, es decir, la energía necesaria para aumentar la fisura 1 m^2 Sus unidades son de energía por unidad de superficie (J/m^2 o cal/m^2)

La tenacidad de fractura expresa el inicio del desgarro inestable de la fisura y, por tanto, permite deducir el valor de apertura de la fisura que, bajo la máxima tensión del ciclo de fatiga σ_{max}, antecede al fallo frágil. Dicha abertura crítica a_c, se calcula igualando la tenacidad de fractura K_c, al factor de concentración de tensiones K (para esa abertura crítica a_c) acorde con la expresión (6).

$$K_c = K(a_c) = Y(a_c)\,\sigma_{max}\,\sqrt{\pi\, a_c} \tag{6}$$

De la fórmula anterior se deduce que existen una serie de factores que condicionan la posibilidad de que exista un desgarro inestable de la fisura. Estos factores a su vez se deben abordar desde distintas perspectivas:

- La Mecánica de Fractura establece las relaciones entre la tensión σ, el tamaño de la fisura a y la geometría de la pieza con el factor de concentración de tensiones. El Eurocódigo 3 establece las bases para el análisis de la propagación de fisuras por fatiga en estructuras metálicas en la Parte 1-9 (UNE-EN 1993-1-9), mientras que el tamaño de la fisura inicial a_0 queda acotado en UNE-EN 1090-2
- Las propiedades del material y la temperatura de servicio determinan la tenacidad de fractura del material. Estos factores quedan acotados en la Parte 1-10 del Eurocódigo 3 (UNE-EN 1993-1-10).

Por otra parte, conviene señalar que la fatiga es un fenómeno que, idealmente, sólo afecta a elementos traccionados. Cuando parte de la onda de tensión provoca compresión en el elemento, la amplitud de la carrera de fatiga se reduce a la diferencia entre la máxima tracción y la tensión nula (fenómeno que se explica en 2.3 y Figura 12). En el extremo, cuando un elemento está comprimido y la pésima onda de tracción sigue dejándolo en compresión, no podría desarrollarse la fatiga. En puntos posteriores (3.4.1) se analizará el tratamiento normativo correspondiente a las tensiones de compresión. Asimismo, el propio nivel de tensión media en la pieza condiciona la validez de determinadas hipótesis y formulaciones, aunque la normativa no lo refleje explícitamente.

2.2.3 Ley de Paris

Los estudios posteriores de Paris y Erdogan permitieron establecer una relación entre la velocidad de propagación de la fisura (tasa de crecimiento con respecto al número de ciclos de fatiga aplicados) y la variación del factor de concentración de tensiones dentro del campo de propagación estable bajo carreras de amplitud constante, de acuerdo con la expresión (7).

$$\frac{da}{dN} = C\,\Delta K^{m} \tag{7}$$

donde:

- a tamaño de la fisura
- N número de ciclos de fatiga
- C, m coeficientes que dependen del material
- ΔK oscilación del factor de concentración de tensiones

La ecuación diferencial (7) sólo se admite como válida en la zona de propagación moderada de fisuras. La Figura 7 ilustra el campo de aplicación de la ley de Paris, expresada en una escala bilogarítmica, en función de la relación experimental entre el coeficiente K y la velocidad de propagación donde:

- Δ_{Kth} valor de la oscilación del factor de concentración de tensiones por debajo del cual las fisuras no se propagan
- Δ_{KIc} valor de la oscilación del factor de concentración de tensiones por debajo del cual no se produce rotura frágil

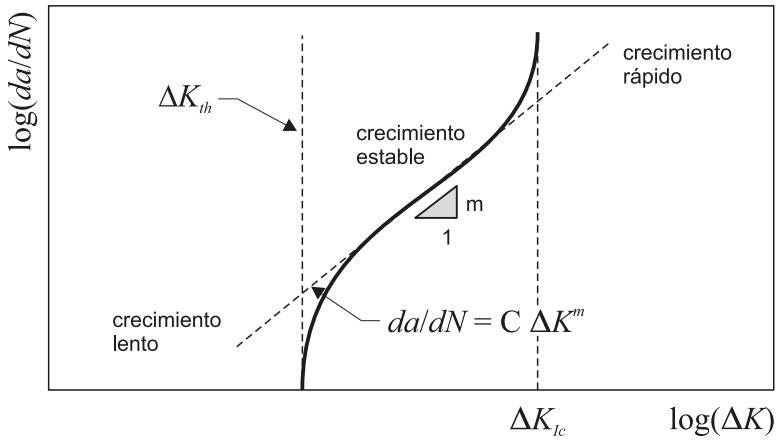


Figura 5 **Dominios de validez de la ley de Paris**

2.2.4 Las curvas S–N o de Wöhler

Restringiendo el análisis a unos límites lo suficientemente acotados como para que la propagación de la fisura sea estable, es posible utilizar la expresión (3) para resolver la expresión (7) y así deducir el número de ciclos de amplitud constante, N, necesarios para provocar la fractura de la pieza, resultando la expresión (8).

$$N = \frac{1}{C\,\Delta\sigma^m\,\pi^{m/2}} \int_{a_o}^{a_d} \frac{da}{Y(a)^m\,a^{m/2}} \tag{8}$$

Admitiendo que la variación del tamaño de la fisura es despreciable frente a las dimensiones de la pieza, es posible suponer que $Y(a)$ es práctiz

$$N = \frac{1}{C\,\Delta\sigma^m\,Y^m\,\pi^{m/2}} \frac{a_0^{1-m/2} - a_d^{1-m/2}}{\frac{m}{2}-1} \tag{9}$$

donde:

- N número de ciclos resistidos hasta el fallo
- C, m coeficientes que dependen del material
- $\Delta\sigma$ oscilación al factor de concentración de tensiones constante
- Y factor que depende de la geometría de la pieza y de las condiciones de contorno (ver expresión (3))
- a_0 valor inicial de la fisura (Figura 6)
- a_d valor crítico o de cálculo de la fisura (Figura 6)

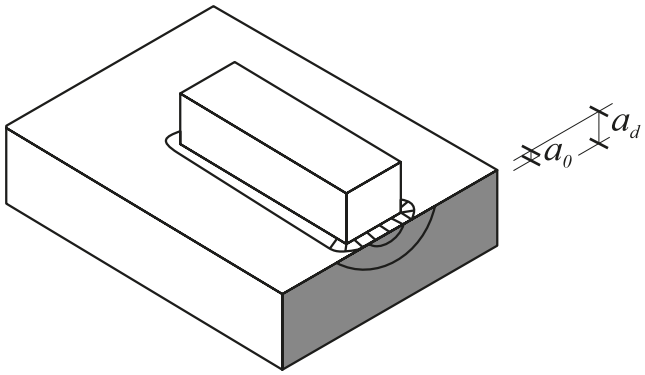


Figura 6 **Representación ilustrativa de la propagación de una fisura por fatiga**

Si todos los datos son conocidos, la relación entre el número de ciclos N y la carrera de tensión de amplitud constante $\Delta\sigma$ en el instante de la rotura queda, tras agrupar términos y aplicar logaritmos, acorde con la expresión (10).

$$\log \Delta\sigma = A - \frac{1}{m} \log N \tag{10}$$

donde el sumando A engloba todos los demás términos de la expresión (9).

Representada en escala bilogarítmica, la relación entre la carrera de tensión solicitante y los ciclos resistentes da lugar a una gráfica lineal y decreciente donde es válida la siguiente expresión (11).

$$\Delta\sigma_1^{\ m} \ N_1 = \Delta\sigma_2^{\ m} \ N_2 \tag{11}$$

La evidencia experimental (ensayos de Wöhler) refrenda esta ley, pero con el matiz de que para valores bajos de la oscilación tensional la resistencia al fallo por fatiga (expresada en número de ciclos) es ilimitada (Figura 7). Se trata del umbral de daño bajo oscilaciones tensionales de amplitud constante, valor de la carrera de tensiones por debajo del cual no se propagan las fisuras y la vida del detalle es ilimitada.

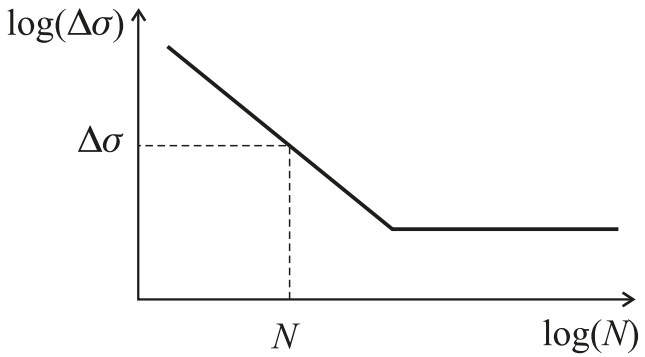


Figura 7 **Representación esquemática de la curva S-N o de Wöhler**

2.3 Curvas de fatiga en elementos metálicos

Las curvas S–N (o de Wöhler) son la relación analítica que, simplificada, ha llegado a los códigos técnicos para la verificación a fatiga. Dichas curvas permiten prever el comportamiento de un elemento (en fase elástica) bajo la aplicación de una carga cíclica con amplitud de tensión constante.

En el caso del acero estructural, dichas curvas presentan, en su configuración para la acción de carreras de tensiones normales, las siguientes zonas (representación en escala bilogarítmica de la Figura 8).

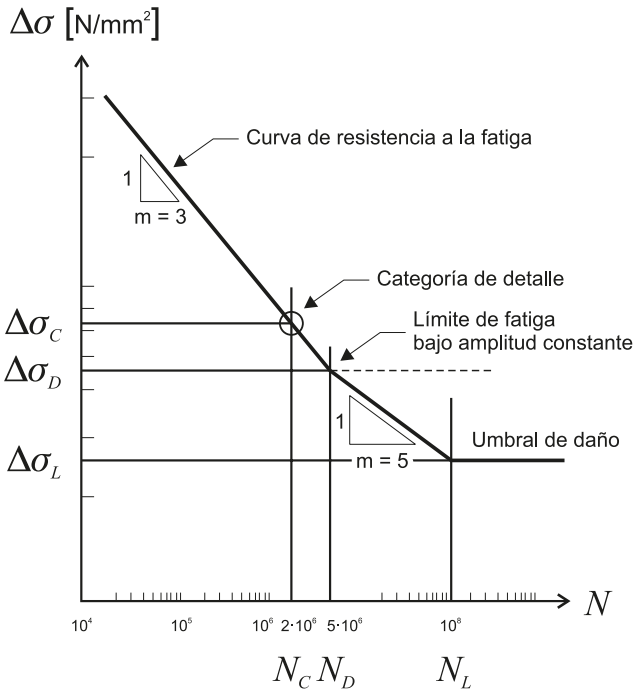


Figura 8 **Curva tipo de resistencia a fatiga para carreras de tensiones normales en un elemento de acero**

- Zona m = 3, para carreras de tensión compatibles con un número de ciclos resistentes inferior a 5 millones. Se trata de la zona de daño real por fatiga (también denominada zona de daño acelerado), para la que, como se verá con mayor detalle, no son válidas determinadas fórmulas simplificadas (por quedar del lado de la inseguridad).

- Zona m = 5, para carreras de tensión compatibles con un número de ciclos resistentes de entre 5 y 100 millones. Se trata de la zona de daño moderado, en la cual son válidas las fórmulas del Método del Daño Equivalente (o también conocido comúnmente como Método Simplificado) de UNE-EN 1993-2 (ver apartado 3.4).

  Este tramo no responde realmente a la evidencia empírica, sino que pretende representar, de manera aproximada y mediante una pendiente de compromiso, el incremento de daño que producen las carreras de orden inferior, teóricamente inocuas, a medida que la fisura va aumentando de tamaño por efecto de las ondas de tensión que entran en el dominio de m = 3 (Figura 9). Es decir, según progresa

la fisura, oscilaciones de tensión que inicialmente no provocaban la propagación pasan a contribuir al daño porque otras mayores ya lo han iniciado

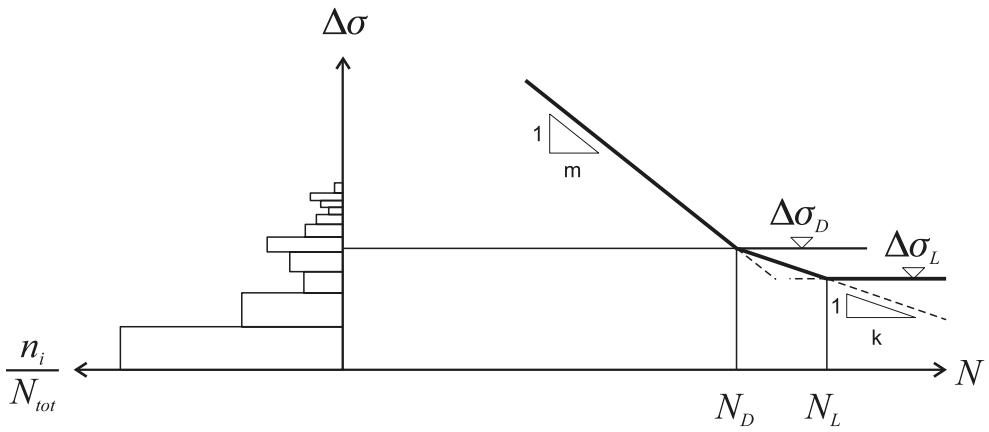


Figura 9 **Justificación de la rama de pendiente $m = 5$**

Zona $m \to \infty$, para carreras de tensión que no inducen ningún daño por fatiga y que, por tanto, admiten un número ilimitado de ciclos de aplicación

donde los puntos singulares se corresponden con las siguientes carreras de tensiones:

$\Delta\sigma_C$ categoría del detalle (para $N_C = 2{\cdot}10^6$ ciclos), que se explica más abajo

$\Delta\sigma_D$ límite de fatiga de amplitud constante (para $N_D = 5{\cdot}10^6$ ciclos).

$\Delta\sigma_L$ umbral de daño (para $N_L = 100{\cdot}10^6$ ciclos).

En el apartado 3.3.2.1 se establecen los comentarios oportunos acerca de estos tres tramos y de su tratamiento práctico.

En cambio, para carreras de tensiones tangenciales, no se adopta la rama de $m = 3$ y sólo se considera la parte del gráfico con $m = 5$ (Figura 10).

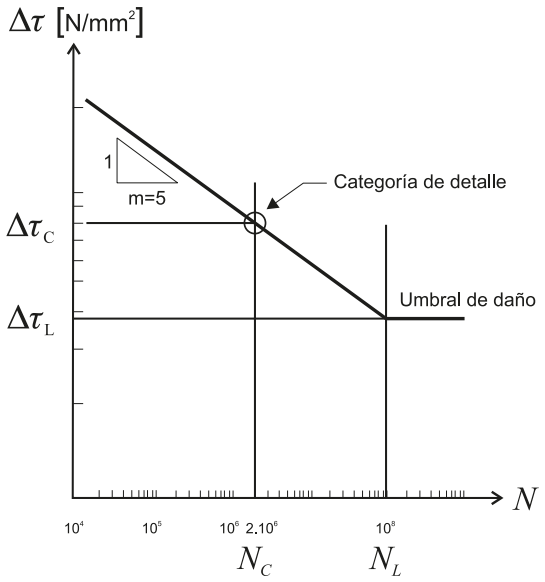


Figura 10 **Curva tipo de resistencia a fatiga para carreras de tensiones tangenciales**

La Figura 11 ilustra el resumen de resultados en el ensayo de fatiga de un detalle genérico. Para cada oscilación de tensiones (ordenada), se aprecia cómo hay una dispersión en el número de ciclos resistentes (abscisa), como es esperable en cualquier ensayo al no haber dos probetas idénticas en geometría ni en otros factores mucho menos controlables (tensiones residuales del material base, las inducidas por las soldaduras, la presencia de entallas, la distribución espacial de las microfisuras, etc.).

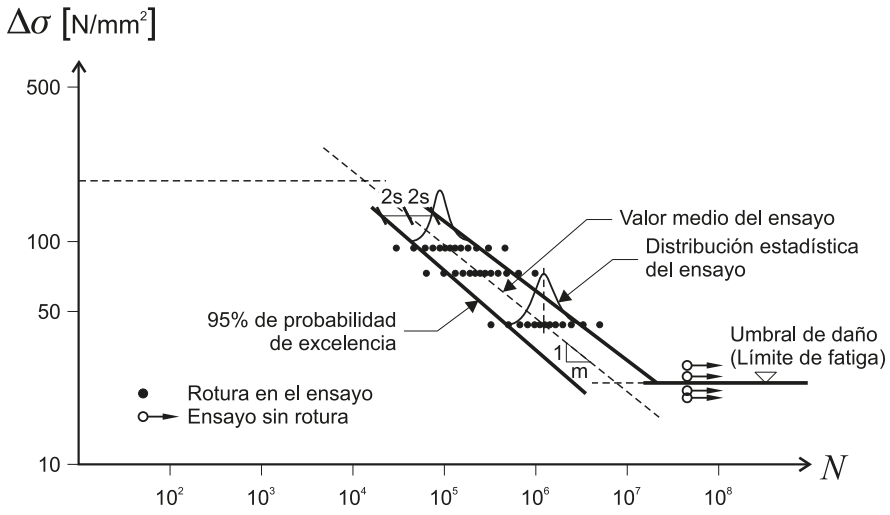


Figura 11 **Resultados de varios ensayos de fatiga solicitando el detalle con variación tensional constante**

La curva S–N del detalle corresponde a la banda característica, es decir, a la envolvente de puntos con un 95% de probabilidad de excedencia en términos de ciclos resistentes (con un grado de confianza del 75%). Se revela cómo, conforme aumenta la carrera de tensión, la banda de confianza (intervalo de la nube entre el 5% y el 95% de excedencia) se estrecha, es decir, la dispersión de resultados se reduce.

Por otra parte, el comportamiento real a fatiga de un detalle depende del estado tensional total, es decir, no sólo de la amplitud de la oscilación sino también de la relación entre la tensión máxima y la mínima. Las tablas con las categorías de detalles del Eurocódigo están basadas en ensayos realizados sobre probetas inicialmente descargadas (tensión media nula) sometidas a ondas simétricas (de igual amplitud) de tracción y compresión. Se comprueba, y así lo recoge la bibliografía, que la resistencia a fatiga en número de ciclos, a igual amplitud de la oscilación de tensiones, es tanto menor cuanto mayor es la tensión inicial en el elemento puesto que las ondas de compresión no son capaces de cerrar la fisura.

De hecho, cuando a partir de cierto nivel de compresión se cierra efectivamente la fisura,el resto de la onda en compresión no contribuye y se descuenta de la carrera de fatiga (Figura 12). Este enfoque es el que parece intentar reflejarse, mediante el concepto de carrera de tensión nominal neta, en 7.2.1 de UNE-EN 1993-1-9, aunque restringido a elementos no soldados, como se explica en 3.4.1.2.

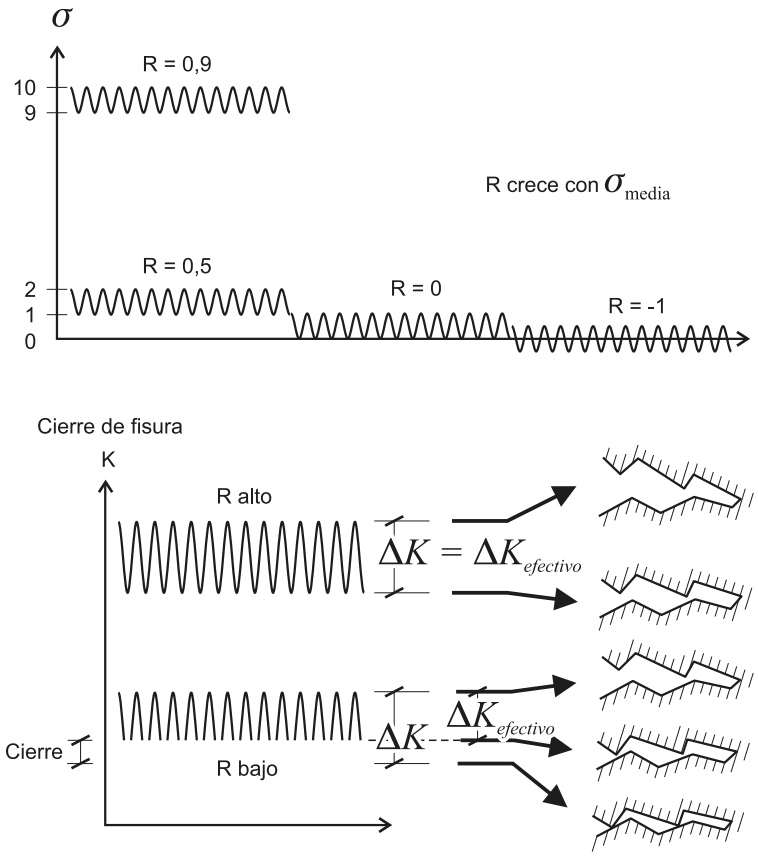


Figura 12 **Variación de la relación de tensiones R**

Se denomina relación de tensiones R al cociente entre la tensión mínima y la tensión máxima bajo la carga de fatiga en el elemento, teniendo en cuenta el estado tensional de partida. Así, para una probeta inicialmente descargada sometida a ondas simétricas (igual amplitud en tracción y en compresión), $R = -1$, mientras que para una tensión (de tracción) inicial muy elevada y ondas de amplitud despreciable, R tiende a la unidad. Por tanto, R aumenta, sin superar la unidad, con la tensión inicial (Figura 12).

El estado tensional inicial también tiene su influencia en tamaño crítico de la fisura. Recordando la definición de tenacidad (expresión (6)), cuanto mayor sea la máxima tensión, menor será el tamaño de la fisura antes de iniciarse la rotura.

Sin embargo, el tratamiento normativo no considera, aparentemente, de forma explícita este hecho.

2.3.1 El concepto de categoría de detalle

Las curvas de Wöhler indican que, para cada carrera de tensión de amplitud constante $\Delta\sigma$, hay un número de ciclos máximo N que provoca el fallo por fatiga del detalle. Una forma de caracterizar la resistencia de un detalle es mediante ensayos con probetas idénticas que se llevan hasta la rotura aplicando una carrera de tensión de amplitud constante en una muestra sin tensión inicial. Si se admite, simplificadamente, que las curvas de fatiga para un mismo material son paralelas entre sí y que los quiebros en las curvas S–N se producen siempre en las mismas abscisas (número de ciclos), bastaría con conocer un solo par de agotamiento $(N,\ \Delta\sigma)$ para obtener la curva de fatiga de un detalle.

Convencionalmente, se toma como referencia la carrera de tensión que causa el fallo por fatiga del detalle en 2 millones de ciclos ($N = 2{\cdot}10^6$ ciclos). El valor de la carrera de tensión que se corresponde con ese número de ciclos se conoce como categoría del detalle. La normativa suele proporcionar tablas con los detalles típicos y su categoría correspondiente.

A efectos de cálculo, la curva S–N o de Wöhler de un detalle determinado es la que pasa por el punto ($\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$; $N = 2{\cdot}10^6$ ciclos), siendo:

$\Delta\sigma_C$ categoría del detalle

γ_{Mf} coeficiente parcial para la resistencia a fatiga del material adoptado (ver apartado 3.3.1).

Retomando la expresión (6), conocida la categoría de un detalle y el tamaño de la fisura inicial, sería posible deducir la amplificación de la misma al cabo de 2 millones de ciclos, punto a partir del cual se considera que la propagación es inestable y conducente a la fractura por fatiga del detalle. A la inversa, las ecuaciones (5) y (6) permiten deducir la apertura crítica de fisura compatible con un nivel máximo de tensión a partir de la tenacidad de fractura del material, con lo cual se lograría obtener la apertura inicial propiciadora del fallo.

2.4 Métodos de análisis a fatiga

La comprobación de la seguridad frente a la fatiga de elementos metálicos se puede realizar, entre otros, a través de métodos simplificados como es el Método de la Tensión Equivalente de Daño o de métodos más rigurosos como es el Método del Daño Acumulado. Estando ambos métodos contemplados en la normativa, su descripción detallada se hace en el Capítulo 3 dedicado a este tema. En este apartado se realiza una breve descripción de cada uno de ellos y de sus conceptos asociados.

Tanto el Método de la Tensión Equivalente de Daño como el Método del Daño Acumulado tienen como objetivo el estudio del período que antecede a la fractura del detalle, es decir, determinan si la vida útil de fatiga de la estructura corresponde con la vida útil considerada en el proyecto.

El Método de la Tensión Equivalente de Daño es la base teórica del Método de los Coeficientes λ de Daño Equivalente (también conocido como Método del Daño Equivalente o Método Simplificado) sugerido por UNE-EN 1993-2; es un método de fácil análisis pero con algunas limitaciones a la hora de su aplicación (ver apartado 3.4). Así, en caso de no ser posible la aplicación de este método, la norma sugiere el uso del Método del Daño Acumulado como alternativa, este último más riguroso y aplicable a cualquier tipo de estructura, pero de aplicación más laboriosa.

2.4.1 Método del Daño Acumulado

El Método del Daño Acumulado permite un análisis detallado y riguroso basado en el paso de las cargas por la estructura correspondientes al tráfico real (en dimensiones y masa) y cuyo objetivo consiste en determinar el daño provocado en el elemento estudiado debido a dichas solicitaciones.

El concepto de daño por fatiga

Conocida la categoría de un detalle $\Delta\sigma_C$ (o $\Delta\tau_C$), se entiende como daño asociado a una carrera tensional de amplitud constante $\Delta\sigma$ (o $\Delta\tau$) el cociente entre los ciclos aplicados de dicha carrera y los resistentes según la curva de fatiga del detalle analizado (expresión (12)).

$$D = \frac{n}{N\left(\Delta\sigma\right)} \tag{12}$$

donde:

D daño asociado a una carrera de tensión ($\Delta\sigma$)

n número de ciclos de amplitud constante $\Delta\sigma$ aplicados

$N(\Delta\sigma)$ número de ciclos resistentes para una oscilación de tensión constante de valor $\Delta\sigma$, según la curva de fatiga del detalle

El concepto de daño acumulado

Cuando un detalle se ve sometido a diferentes ondas de tensión, cada una asociada a un número de ciclos de aplicación, la suma algebraica de los daños individuales se conoce como daño acumulado.

La afirmación anterior se basa en la hipótesis lineal de Palmgren–Miner, según la cual el daño es independiente del orden de aplicación de las carreras, y cuya formulación se recoge en la expresión (13).

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N\left(\Delta\sigma_i\right)} \tag{13}$$

Existen teorías alternativas para evaluar el daño causado por diferentes carreras de tensión aplicadas en un orden concreto, pero no se desarrollarán en esta guía al no encontrar su reflejo normativo en los Eurocódigos Estructurales.

El concepto de daño es de gran importancia al constituir la base del método de Palmgren–Miner, el procedimiento más general y riguroso que presentan las normativas para evaluar la seguridad a fatiga de un detalle y que se describirá con profusión en el capítulo siguiente.

2.4.2 Método de la Tensión Equivalente de Daño

El Método de la Tensión Equivalente de Daño consiste en un análisis teórico simplificado basado en el paso único de un conjunto de cargas por la estructura (vehículo tipo), y la posterior comparación para cada detalle de la máxima carrera de tensión obtenida, debidamente calibrada de acuerdo con las características de la estructura, la composición del tráfico y vida útil (carrera de tensión equivalente) con la resistente (categoría de detalle).

El concepto de carrera de tensión equivalente

Cabe preguntarse si, ante el daño causado por varias oscilaciones tensionales con sus ciclos asociados, es posible encontrar un valor único de carrera de tensión que, aplicado un número concreto de ciclos, cause el mismo daño. Ese valor existe y, cuando está referido a 2 millones de ciclos de aplicación, se denomina carrera de tensión equivalente $\Delta\sigma_E$ (designada como $\Delta\sigma_{E2}$ en UNE-EN 1993-1-9). La decisión de tomar como base 2 millones de ciclos es convencional y tiene como propósito comparar dicha carrera equivalente, un artificio matemático, con la categoría del detalle, una realidad empírica.

La obtención de una carrera de tensión equivalente es el concepto subyacente en los métodos simplificados incluidos en las normativas, en los cuales el formato de seguridad de un detalle se verifica cuando la carrera equivalente sea inferior a la categoría del detalle.

La carrera de tensión equivalente $\Delta\sigma_E$, a partir de un daño supuesto conocido en el detalle, es la ordenada en la curva de fatiga del detalle para la abscisa N_0, número de ciclos resistente para obtener un daño D en 2 millones de ciclos aplicados, que se deduce por pura definición de daño según la expresión (14).

$$N_0 = \frac{2 \cdot 10^6}{D} \tag{14}$$

En el caso del acero estructural sometido a tensiones normales, habrá tres posibilidades al existir hasta tres dominios Figura 8:

- Si $N_0 \leq 5{\cdot}10^6$ ciclos (zona de $m = 3$)

$$\Delta\sigma_E = \Delta\sigma_D \left(\frac{5\cdot10^6}{N_0}\right)^{1/3} = \Delta\sigma_C \left(\frac{2\cdot10^6}{N_0}\right)^{1/3}$$

- Si $5\cdot10^6 < N_0 \leq 100\cdot10^6$ ciclos (zona de $m = 5$)

$$\Delta\sigma_E = \Delta\sigma_D \left(\frac{5\cdot10^6}{N_0}\right)^{1/5} = \Delta\sigma_L \left(\frac{100\cdot10^6}{N_0}\right)^{1/5}$$

- Si $N_0 > 100\cdot10^6$ ciclos (zona de $m \rightarrow \infty$), se adopta el valor de umbral de daño, $\Delta\sigma_L$

3

VERIFICACIONES DE LOS EUROCÓDIGOS PARA EL CÁLCULO A FATIGA

3.1 La fatiga en los Eurocódigos

A la hora de realizar el análisis frente a fatiga de un puente metálico o mixto será necesario el empleo de los siguientes Eurocódigos:

- Eurocódigo 1 (UNE-EN 1991) Acciones en estructuras
  - UNE-EN 1991-2: Cargas de tráfico en puentes
- Eurocódigo 2 (UNE-EN 1992) Proyecto de estructuras de hormigón
  - UNE-EN 1992-1-1: Reglas generales y reglas para edificación
  - UNE-EN 1992-2: Puentes de hormigón
- Eurocódigo 3 (UNE-EN 1993) Proyecto de estructuras de acero
  - UNE-EN 1993-1-1: Reglas generales y reglas para edificación
  - UNE-EN 1993-1-9: Fatiga
  - UNE-EN 1993-1-10: Tenacidad de fractura y resistencia transversal
  - UNE-EN 1993-1-11: Cables y tirantes
  - UNE-EN 1993-2: Puentes
- Eurocódigo 4 (UNE-EN 1994) Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón
  - UNE-EN 1994-1-1: Reglas generales y reglas para edificación
  - UNE-EN 1994-2: Reglas generales y reglas para puentes

Además, los criterios para la ejecución, las tolerancias y el control de la ejecución de las estructuras de acero se rigen por lo establecido en UNE-EN 1090-2.

3.1.1 Campo de aplicación de UNE-EN 1993-1-9

En 1.1(4) de UNE-EN 1993-1-9 se establece que los métodos de verificación de la norma son válidos para todos los grados de acero, acero inoxidable y acero autopatinable, salvo que se indique lo contrario en las tablas de categorías de detalles. En esta norma, según la cláusula 1.1(6), no se considera el efecto de tratamientos post–ejecución que mejoren la resistencia a fatiga que no sean el alivio de tensiones.

Asimismo, UNE-EN 1993-1-9 sólo cubre los materiales que cumplan los requisitos de tenacidad de fractura de UNE-EN 1993-1-10. Finalmente, y de acuerdo con la cláusula 1.1(7), las resistencias a fatiga de las tablas de categoría sólo son válidas para estructuras en servicio bajo condiciones atmosféricas normales, con suficiente protección anti–corrosión y mantenimiento regular. El efecto de la corrosión marina no está cubierto, ni tampoco el daño microestructural causado por altas temperaturas (superiores a 150 ºC).

UNE-EN 1993-1-9 señala en 1.1(5) que métodos de análisis distintos de las curvas S-N, tales como el de deformación en la entalla o la mecánica de fractura, no están amparados por este Eurocódigo.

3.1.2 Exigencia del análisis a fatiga en puentes metálicos

De acuerdo con 9.1.1 de UNE-EN 1993-2, las verificaciones de fatiga se realizarán en todas las zonas críticas de acuerdo con UNE-EN 1993-1-9, no siendo aplicable a pasarelas, acueductos u otros puentes con acción fundamentalmente estática. Asimismo, en los puentes metálicos no será preciso efectuar comprobaciones a fatiga en aquellas partes o elementos que no vayan a verse solicitados por las acciones del tráfico o que no sean susceptibles de excitación por el viento (según 9.1.1(2) de UNE-EN 1993-2).

En puentes metálicos de carretera, será posible omitir el dimensionamiento a fatiga si se cuenta con resultados de ensayos normalizados que aseguren la durabilidad de los diferentes detalles (según 9.1.2(1) de UNE-EN 1993-2). A este respecto el Anejo Nacional señala que *"Todos los elementos estructurales de puentes de carretera sometidos a cargas repetidas deberán ser comprobados frente al estado límite de fatiga, siempre que se identifiquen como críticos en este aspecto"*.

La cláusula 2(4) de UNE-EN 1993-1-9 remite a UNE-EN 1990 en materia de ejecución y análisis de los ensayos de fatiga[1], y la cláusula 1.1(2) de UNE EN 1993-1-9 remite a UNE-EN 1090

1 La nota 1 de 7.1(3) de UNE-EN 1993-1-9 señala que el método estadístico aplicado para determinar las categorías de detalle mediente resultados de ensayos, con un grado de confianza del 75%, tiene en cuenta la desviación típica y el número de datos utilizado en la determinación, nunca inferior a 10, remitiendo al anexo D de EN 1990.

en materia de tolerancias, en particular a UNE-EN 1090-2, no definiendo el Anejo Nacional ningún criterio adicional.

3.2 Acciones de fatiga en puentes de carretera según el Eurocódigo 1-2

El Eurocódigo 1, parte 2, de cargas de tráfico en puentes (UNE-EN 1991-2) define en 4.6 cinco modelos de carga de tráfico para el análisis a fatiga en puentes de carretera ("*Fatigue Load Models*" o por su acrónimo en inglés FLM), en función del nivel de seguridad exigible en el proyecto, de la información disponible y del método de análisis empleado. El uso concreto de cada modelo corresponde a las prescripciones recogidas en el resto de Eurocódigos en función del material, UNE-EN 1992 a UNE-EN 1999

En los siguientes apartados se describen en detalle los cinco diferentes modelos de carga de fatiga incluidos en UNE-EN 1991-2

3.2.1 Modelo de carga de fatiga FLM1

El modelo de carga de fatiga 1 (generalmente denominado como FLM1, siglas en inglés de "*Fatigue Load Model* 1"), definido en 4.6.2 de UNE-EN 1991-2, tiene la configuración del modelo característico de carga tipo 1 (LM1) definido en 4.3.2 de UNE-EN 1991-2, con valores de carga por eje 0,7 Q_{ik} y valores para la carga distribuida 0,3 q_{ik} y 0,3 q_{rk}, que son ligeramente inferiores al valor frecuente de la sobrecarga de uso. Los factores α no son de aplicación a este modelo.

Los valores máximo y mínimo de tensiones en cada punto determinados a partir del paseo del FLM1 en el puente se emplearán para la evaluación de la seguridad a fatiga.

3.2.2 Modelo de carga de fatiga FLM2

El modelo de carga de fatiga 2 (FLM2), definido en 4.6.3 de UNE-EN 1991-2, consiste en un conjunto de camiones ideales, denominados camiones frecuentes.

Cada camión frecuente queda caracterizado por el número de ejes, la batalla entre ellos, la carga de cada uno y el tipo de rueda (Tabla 1 que reproduce la Tabla 4.6 de UNE-EN 1991-2) y la definición geométrica de la huella de la rueda y la distancia transversal entre ruedas (Tabla 2 que reproduce la Tabla 4.8 de UNE-EN 1991-2).

Los valores máximo y mínimo de tensiones en cada punto empleados para la evaluación de la seguridad a fatiga se tomarán del paseo de cada camión frecuente individualmente considerado por el carril pertinente.

En el análisis se deben considerar los camiones que sean más críticos de los incluidos en la Tabla 1.

Tabla 1 **Conjunto de camiones "frecuentes" (Tabla 4.6 de UNE-EN 1991-2)**

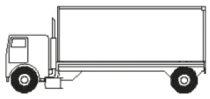
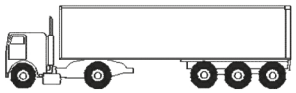
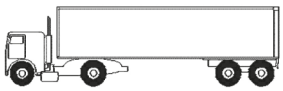
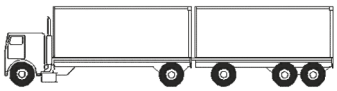
1	2	3	4
Silueta del camión	Espacio entre ejes [m]	Cargas frecuentes por eje [kN]	Tipo de rueda (ver tabla 4.8 de UNE-EN 1991-2)
	4,5	90 190	A B
	4,2 1,3	80 140 140	A B B
	3,2 5,2 1,3 1,3	90 180 120 120 120	A B C C C
	3,4 6,0 1,8	90 190 140 140	A B B B
	4,8 3,6 4,4 1,3	90 180 120 110 110	A B C C C

Tabla 2 **Coeficientes por tipo de tráfico (tabla NN.1 de UNE-EN 1992-2)**

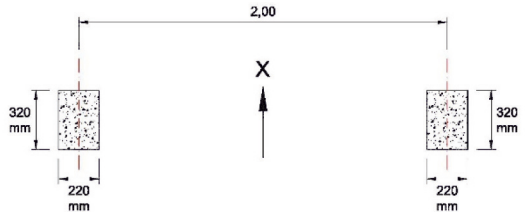
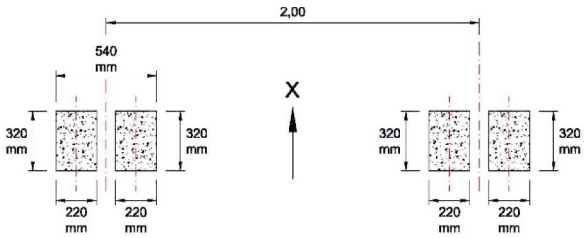
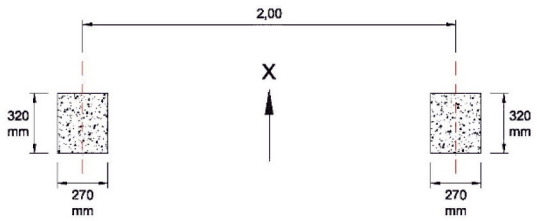
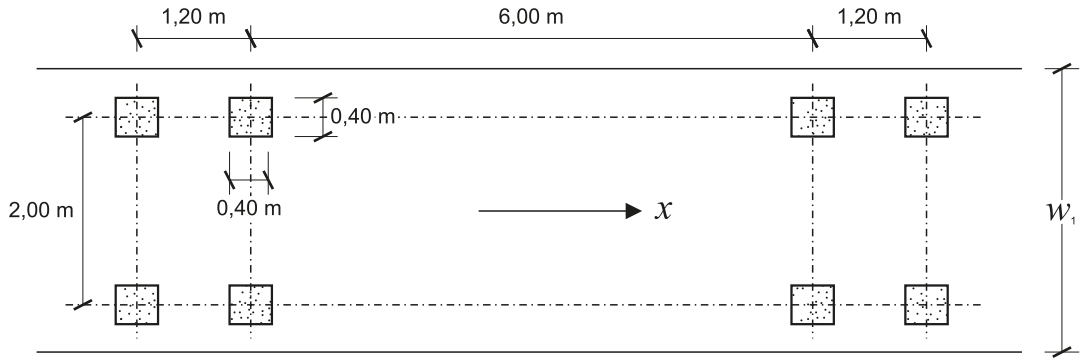
TIPO DE RUEDA/EJE	DEFINICIÓN GEOMÉTRICA
A	
B	

Tabla 2 **continúa >**

TIPO DE RUEDA/EJE	DEFINICIÓN GEOMÉTRICA
C	

3.2.3 Modelo de carga de fatiga FLM3

El modelo de carga de fatiga 3 (FLM3), definido en 4.6.4 de UNE-EN 1991-2, representa un tráfico de referencia considerado como representativo de las carreteras europeas. Consta de 4 ejes de dos ruedas idénticas de huella 0,40 x 0,40 m y la carga por eje es de 120 kN. Las distancias entre ejes son 1,20, 6,00 y 1,20 m Figura 13.



Leyenda

w_1 = Anchura del carril

x = Eje longitudinal del puente

Figura 13 **Modelo de carga de fatiga 3 (Figura 4.8 de UNE-EN 1991-2)**

Los valores máximo y mínimo de tensión en cada punto empleados para la evaluación de la seguridad a fatiga se tomarán de las envolventes de esfuerzos correspondientes al paseo del vehículo por el puente.

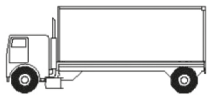
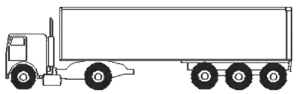
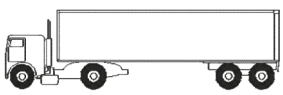
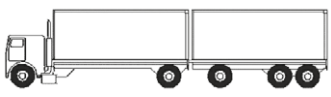
Donde sea relevante, podrá considerarse la circulación de dos vehículos en el mismo carril. Las recomendaciones para este tipo de paseo, de acuerdo con 4.6.4(3) de UNE-EN 1991-2, comprenden el paso de un vehículo como el anteriormente definido y de otro con carga por eje 36 kN en vez de 120 kN, a una distancia no menor de 40 m entre sus centros de acción. El uso de dos vehículos es especialmente interesante en las zonas de flexión negativa, donde la carga en vanos consecutivos en posiciones no críticas puede ser peor que la acción de un solo vehículo en su posición pésima.

No obstante, el borrador del Anejo Nacional de UNE-EN 1991-2 indica que sólo se considerará un vehículo en el mismo carril en el FLM3.

3.2.4 Modelo de carga de fatiga FLM4

El modelo de carga de fatiga 4 (FLM4), definido en 4.6.5 de UNE-EN 1991-2, engloba 5 camiones tipo con diferentes repartos cuyo efecto conjunto es equivalente al del tráfico típico de las carreteras europeas. La Tabla 3 recoge la geometría de cada camión tipo y su porcentaje en la intensidad del tráfico de pesados N_{obs} (Tabla 3), según el tipo de carretera (larga, media o corta distancia), pudiendo observarse el predominio de los vehículos más pesados en el tráfico de larga distancia.

Tabla 3 **Conjunto equivalente de camiones (tabla 4.7 de UNE-EN 1991-2)**

TIPO DE VEHÍCULO			TIPO DE TRÁFICO			
1	2	3	4	5	6	7
			Larga distancia	Media distancia	Tráfico local	
Camión	Espacio entre ejes [m]	Cargas equivalentes por ejes [kN]	Porcentaje de camiones	Porcentaje de camiones	Porcentaje de camiones	Tipo de rueda
	4,5	70 130	20,0	40,0	80,0	A B
	4,2 1,3	70 120 120	5,0	10,0	5,0	A B B
	3,2 5,2 1,3 1,3	70 150 90 90 90	50,0	30,0	5,0	A B C C C
	3,4 6,0 1,8	70 140 90 90	15,0	15,0	5,0	A B B B
	4,8 3,6 4,4 1,3	70 130 90 80 80	10,0	5,0	5,0	A B C C C

3.2.5 Modelo de carga de fatiga FLM5

El modelo de carga de fatiga 5 (FLM5), definido en 4.6.6 de UNE-EN 1991-2, se basa en la aplicación directa del tráfico real medido o previsto en el puente (tanto en términos de intensidad y porcentajes como en dimensiones y pesos), considerando la posibilidad de circulación simultánea de varios camiones en el mismo o diferentes carriles. El borrador del Anejo Nacional no proporciona información adicional.

El anexo B de UNE-EN 1991-2, que es informativo y así mantiene su carácter en el Anejo Nacional, establece especificaciones para la aplicación de este modelo basado en registros de tráfico.

3.2.6 Comentarios adicionales a los modelos de fatiga (FLM)

Con carácter general, 4.6.1 de UNE-EN 1991-2 introduce las siguientes matizaciones acerca de cada modelo:

Análisis de tensiones:

- Los modelos de carga de fatiga 1, 2 y 3 solo sirven para obtener las tensiones máxima y mínima en cada elemento mediante envolventes; en muchos casos plasmados en UNE-EN 1992 a UNE-EN 1999, solo se emplea la diferencia entre ambas, es decir, la máxima carrera, para las verificaciones de fatiga
- Por el contrario, los modelos de fatiga 4 y 5 tienen por finalidad determinar los espectros (distribución en amplitud y número) de carreras de tensión resultantes del paso de vehículos pesados. A efectos de cálculo, cada camión se pasea de manera aislada y se obtiene, para cada detalle analizado, el registro histórico de tensiones para proceder a la generación de su espectro de tensiones (por cualquier método reconocido) y a la evaluación del daño a fatiga por el Método del Daño Acumulado

Tipo de comprobación a fatiga:

- Los modelos de fatiga 1 y 2 se emplean para comprobar si la vida a fatiga (ver conceptos relacionados con la vida útil a fatiga en el apartado 2.2.1) es ilimitada cuando se conoce claramente el límite de fatiga de amplitud constante $\Delta\sigma_D$ (CAFL, ver 3.3.2.1). Por tanto, son adecuados en el caso de estructuras de acero y no tanto para otros materiales. El modelo de fatiga 1 es, por lo general, conservador y cubre automáticamente el efecto del tráfico en múltiples carriles. El modelo de fatiga 2 es más ajustado cuando se puede despreciar el efecto del tráfico simultáneo de camiones en diferentes partes del puente. Si no se da tal caso, el análisis ha de verse complementado con datos adicionales
- De acuerdo con la Nota 4 de 4.6.1(2) de UNE-EN 1992-2, el Anejo Nacional, así como el proyecto, pueden modificar los valores de los modelos de carga de fatiga 1 y 2. En particular, el Anejo Nacional no considera ninguna modificación de estos modelos

- Los modelos de fatiga 3, 4 y 5 tienen por finalidad la evaluación de la seguridad a fatiga conforme a las curvas de resistencia oportunas recogidas en UNE-EN 1992 a UNE-EN 1999. No deberían emplearse para verificar si la vida a fatiga es ilimitada, es decir, se entiende implícitamente que, en el caso concreto del acero sometido a tensiones normales, la curva de fatiga que debe usarse es la de tres ramas

- Asimismo, el modelo de fatiga 3 permite la verificación a fatiga conforme al Método Simplificado en el que la distribución de tráfico y la geometría del puente se tienen en cuenta mediante un coeficiente λ corrector, como se verá en 3.4

- De esto se deduce que la verificación a fatiga conforme a los modelos 4 y 5 sólo permite el uso del Método del Daño Acumulado (3.4) y nunca el Simplificado. Este es un aspecto sobre el que conviene llamar la atención: todo Método Simplificado (en puentes de carretera o de ferrocarril) está asociado a un vehículo tipo, y los coeficientes de equivalencia de daño (coeficientes λ) no deben aplicarse a la ligera a otros modelos de carga

Ajuste de los FLM al tráfico:

- El modelo de fatiga 4 es más preciso que el 3 en una variedad de puentes y de tráfico cuando puede despreciarse el efecto del tráfico simultáneo de camiones en diferentes partes del puente. Si no se da tal caso, el análisis ha de verse complementado con datos adicionales. El Anejo Nacional, que puede establecer las recomendaciones oportunas sobre el uso de este modelo de fatiga, no proporciona, en su actual borrador, ninguna información adicional

- El modelo de fatiga 5 es el más general, al emplear datos reales de tráfico basados en aforos donde se especifica la intensidad y distribución de vehículos pesados

- Los modelos de fatiga 1 a 3 son adecuados para el tráfico pesado típico esperable en las principales carreteras europeas (categoría de tráfico 1 según la Tabla 3, que reproduce la Tabla 4.5(n) de UNE-EN 1991-2).

- Las cargas de los modelos de fatiga 1 y 2 pueden modificarse mediante un factor de proporcionalidad para el proyecto en cuestión o según el Anejo Nacional cuando se consideren otras categorías de tráfico. Para el modelo de fatiga 3 la modificación depende del procedimiento de verificación. En particular, el borrador del Anejo Nacional no matiza este aspecto

De acuerdo con 4.6.1(3) de UNE-EN 1991-2 la categoría del tráfico, a efectos de fatiga, se caracteriza, al menos, por el número de carriles con tráfico lento y la intensidad anual (medida o estimada) de vehículos pesados por carril lento. Se entiende como vehículo pesado, conforme a este apartado del Eurocódigo, aquél de tara superior a 100 kN.

En la Tabla 4.5(n) de UNE-EN 1991-2, reproducida en la Tabla 4, se establece una clasificación indicativa de las carreteras por categorías de tráfico en función de la intensidad anual de vehículos pesados esperada en cada carril lento (N_{obs}) para el uso de los modelos de fatiga 3 y 4, adoptando el Anejo Nacional estos valores.

Sin embargo, tal y como señala el Eurocódigo, la Tabla 4.5(n) no es suficiente para caracterizar el tráfico para comprobaciones de fatiga, pudiendo tener que considerarse otros parámetros tales como:

- porcentajes de tipos de vehículos que dependen del tipo de tráfico
- parámetros definitorios de la distribución del peso de los vehículos o ejes de cada tipo

Tabla 4 **Número aproximado de vehículos pesados esperado por año y carril de tráfico lento (Tabla 4.5 (n) UNE-EN 1991-2)**

Categorías de tráfico		N_{obs} por año y carril de tráfico lento
1	Carreteras y autovías con dos o más carriles por sentido con alto flujo de camiones	$2x10^6$
2	Carreteras y autovías con flujo intermedio de camiones	$0,5x10^6$
3	Carreteras principales con bajo flujo de camiones	$0,125x10^6$
4	Carreteras locales con bajo flujo de camiones	$0,05x10^6$

Además, se indica que, a falta de mejor información, puede suponerse que por los carriles de tráfico rápido circula un 10% de la intensidad N_{obs}

A efectos globales de aplicación de las cargas de fatiga, los paseos de tráfico se realizarán centrados en los carriles virtuales conforme a 4.2.4(3) de UNE-EN 1991-2. Se estudiará su coordinación con los carriles de tráfico lento reales de la calzada.

En el caso de los modelos de carga de fatiga 3, 4 y 5, cuando la posición transversal de los vehículos en el carril sea relevante para la verificación local de elementos concretos (como en los tableros ortótropos) se tendrá en cuenta una distribución estadística conforme a la de la Figura 14 (Figura 4.6 de UNE-EN 1991-2).

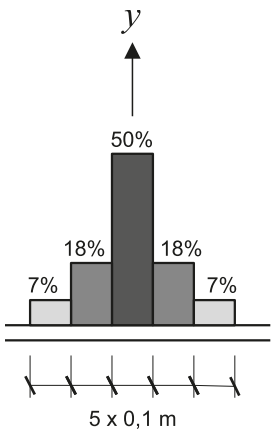


Figura 14 **Distribución de frecuencia de localización transversal del eje central del vehículo (Figura 4.6 de UNE-EN 1991-2)**

Se destaca también que los modelos de carga 1 a 4 incluyen posibles efectos de la amplificación dinámica correspondiente para pavimentos de buena calidad, aunque se prescribe un factor de amplificación adicional (Figura 15) en las proximidades de las juntas de dilatación, que varía linealmente entre 1,30 en la junta y 1,00 a los 6 m de distancia, según la expresión (15) (que reproduce la expresión 4.7 de UNE-EN 1991-2).

$$\Delta\phi_{fat} = 1{,}30\left(1-\frac{D}{26}\right)\ ;\ \Delta\phi_{fat} \geq 1 \tag{15}$$

donde:

D es la distancia [m] de la sección transversal en estudio desde la junta de dilatación (Figura 15).

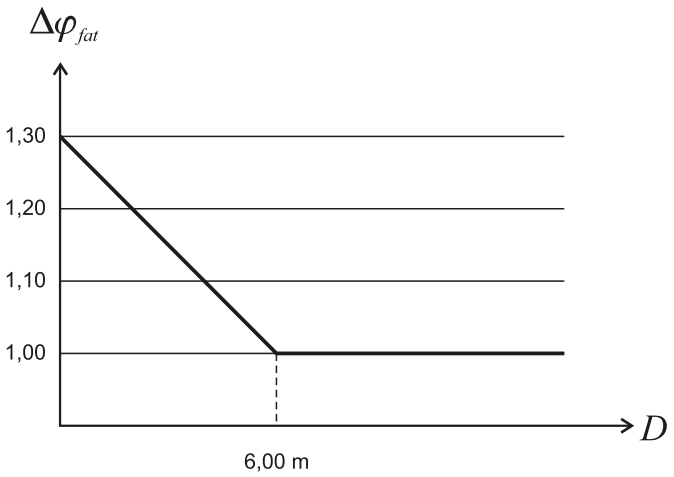


Figura 15 **Representación del factor adicional de amplificación (Figura 4.7 de UNE EN 1991-2)**

En el caso del modelo de fatiga FLM5, y de acuerdo con el Anexo B de UNE EN 1991-2, los datos registrados representativos del trafico real deberían multiplicarse por un factor de amplificación dinámico φ_{fat} . Este factor de amplificación dinámico debería tener en cuenta el

comportamiento dinámico del puente, y depende de la rugosidad esperable del pavimento y otros factores de amplificación dinámica ya incluidos en los registros.

La cláusula (3) del Anexo B de UNE-EN 1991-2 indica que a menos que se especifique lo contrario, los valores de carga por eje registrados, se deberían multiplicar por:

φ_{fat} = 1,2 para superficies con rugosidad buena

φ_{fat} = 1,4 para superficies con rugosidad media

Además, cuando se consideran secciones que se encuentran a una distancia menor de 6,00 metros de una junta de dilatación, la carga debería multiplicarse por el factor de amplificación dinámico adicional $\Delta\varphi_{fat}$ obtenido de la Figura 15.

La clasificación de la rugosidad de la superficie se puede realizar de acuerdo con la Norma ISO 8608. Para una estimación rápida y no muy ajustada de la calidad de la rugosidad, se pueden emplear las siguientes pautas:

- Superficies de rodadura nuevas como, por ejemplo, capas de asfalto u hormigón, se pueden suponer con una calidad buena o muy buena
- Superficies de rodadura antiguas que no hayan sido mantenidas adecuadamente, se pueden clasificar como de rugosidad media
- Superficies de rodadura a base de adoquines o material similar, se pueden clasificar como medias, malas o muy malas

3.3 Verificaciones a fatiga en Eurocódigos 2, 3 y 4

En este apartado se describen y desarrollan las comprobaciones a fatiga en puentes de carretera metálicos o mixtos de acuerdo con el Eurocódigo. Cada elemento que forma parte de la estructura se regula por los Eurocódigos correspondientes:

- Acero estructural: UNE-EN 1993-2 y UNE-EN 1993-1-9
- Pernos conectadores: UNE-EN 1994-2
- Armadura pasiva y activa, y hormigón: UNE-EN 1992-1 y UNE-EN 1992-2
- Cables y tirantes: UNE-EN 1993-1-11

Para la comprobación a fatiga de los elementos expuestos anteriormente, la normativa sugiere el uso tanto del Método del Daño Acumulado (MDA) como de un Método Simplificado (MS) basado en la obtención de una carrera de tensión equivalente.

3.3.1 Criterios de evaluación y coeficiente parcial para la comprobación de la resistencia a fatiga

A la hora de comprobar el comportamiento a fatiga de un elemento o detalle, la resistencia de sus materiales constituyentes debe verse afectada por el coeficiente parcial para la resistencia a fatiga γ_{Mf}

En el caso del acero estructural, el valor de γ_{Mf} fijado para la categoría del detalle analizado depende del criterio de evaluación para la resistencia a fatiga que se va a seguir, así como de la gravedad del fallo por fatiga del elemento estudiado.

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

- Tolerancia al daño (en inglés, *"damage tolerant"*, según 3(2) de UNE-EN 1993-1-9), caracterizado por una menor exigencia en los requisitos si se garantizan todas las siguientes provisiones:
    - Selección de detalles, materiales y niveles tensionales que supongan baja velocidad de propagación de fisuras y una gran amplitud crítica de fisura
    - Fácil acceso al detalle para su inspección
    - Existencia de caminos alternativos para el viaje de las cargas en caso de fallo (estructura redundante).
    - Concepción de detalles capaces de interrumpir la propagación de las fisuras
    - Realización de inspecciones periódicas de los detalles. Acorde con el Anejo Nacional, los planes de inspección y vigilancia deberán especificar:
        - los elementos y detalles estructurales a inspeccionar
        - las medidas adoptadas para garantizar la viabilidad de las inspecciones
        - los métodos de inspección y su capacidad de detección de daño
        - los intervalos entre inspecciones
        - las medidas a adoptar en función de los resultados de las inspecciones
- Integridad asegurada (en inglés, *"safe life"* según 3(3) de UNE-EN 1993-1-9), más exigente que el anterior, al no poder garantizar alguno de los requisitos anteriores

Atendiendo a la gravedad del daño por fatiga del detalle, se diferencia entre consecuencias de fallo leves y graves. De acuerdo con el Anejo Nacional, se considerará 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 γ_{Mf} en acero estructural, en función del método de análisis y de las consecuencias del fallo, son los de la Tabla 5 (Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9).

Tabla 5 **Valores recomendados del coeficiente parcial para la resistencia a fatiga (Tabla 3.1 de 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 γ_{Mf}

En el caso de los pernos conectadores, y de acuerdo con el apartado 6.8.2(1) del 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, que es el valor recomendado.

El apartado 2.4.2.4(1) de UNE-EN 1992-1-1 indica que los coeficientes parciales de seguridad para la resistencia a fatiga a adoptar para el hormigón $\gamma_{C,fat}$, y para el acero (armadura pasiva o activa) $\gamma_{S,fat}$, son los de la Tabla 2.1N de UNE-EN 1992 1-1 para las situaciones de proyecto persistentes.

$$\gamma_{C,fat} = 1{,}50$$

$$\gamma_{S,fat} = 1{,}15$$

que son los recomendados por el Eurocódigo, y los adoptados por el Anejo Nacional.

En el caso de cables y tirantes, UNE-EN 1993-1-11 remite a UNE-EN 1993-1-9 para la evaluación de fatiga no incluidas en la primera. Así, los coeficientes parciales para la resistencia a fatiga de cables y tirantes serán los correspondientes a los del acero estructural Tabla 5, con el criterio de evaluación de integridad asegurada.

Influencia del coeficiente parcial para la resistencia a fatiga en el intervalo entre inspecciones

La adopción de un determinado coeficiente parcial para la resistencia a fatiga tiene repercusión en la vida útil real de los detalles y, por tanto, en el intervalo entre inspecciones y reparaciones integrales.

Tomando como ejemplo el caso del acero estructural y de acuerdo con el Método del Daño Acumulado, la relación de daños entre detalles dimensionados con un enfoque u otro es proporcional a las potencias cúbica y quinta del coeficiente parcial γ_{Mf}, como evidencia la expresión (20) (resultante de las expresiones (16) y (17)) cuya obtención se presenta a continuación.

siendo:

$$\Delta\sigma_1^m \, N_1 = \Delta\sigma_2^m \, N_2 \tag{16}$$

y

$$D = \frac{n}{N\left(\Delta\sigma\right)} = \sum_i \frac{n_i}{N\left(\Delta\sigma_i\right)} \tag{17}$$

El valor de $N(\Delta\sigma_i)$ correspondiente a una determinada tensión $\Delta\sigma_i$ sería (a partir de la expresión (16)):

$$N\left(\Delta\sigma_i\right) = \frac{\Delta\sigma_2{}^m \, N_2}{\Delta\sigma_i^m} \tag{18}$$

Así y a partir de (17) y (18):

$$D = \frac{n}{N\left(\Delta\sigma\right)} = \sum_i \frac{n_i}{N\left(\Delta\sigma_i\right)} = \sum \frac{n_i}{\frac{\Delta\sigma_2^m \, N_2}{\Delta\sigma_i^m}} = \sum \frac{\Delta\sigma_i^m \, n_i}{\Delta\sigma_2^m \, N_2} \tag{19}$$

Los valores indicados con subíndice 2 representan valores de referencia en la curva de fatiga que, en este caso, corresponden a:

$\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_D$

$N_2 = 5{\cdot}10^6$

De esta observación y de (19) resulta la expresión (20), considerando la existencia de carreras de tensión tanto en el dominio $m = 3$ como en el dominio $m = 5$.

$$D = \frac{\sum_i \Delta\sigma_i^3 \, n_i}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}\right)^3 5{\cdot}10^6} + \frac{\sum_i \Delta\sigma_i^5 \, n_i}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}\right)^5 5{\cdot}10^6} \tag{20}$$

En la expresión anterior el primer sumando es para carreras de tensión que superan el límite de fatiga de amplitud constante (región $m = 3$) y el segundo para las que se hallan por debajo de este valor (dominio $m = 5$). Como en un diseño adecuado lo esperable es que no se entre en la zona de daño acelerado (dominio $m = 3$), es posible, sobre la base de este razonamiento, que el daño se limite al segundo sumando, por lo que sería fundamentalmente proporcional a la potencia quinta del coeficiente parcial. Es decir, a igualdad de categoría de detalle, de oscilación tensional y de número de ciclos, entre un criterio de evaluación de integridad asegurada en un detalle con consecuencias de fallo graves y otro tolerante al daño en un detalle con consecuencias de fallo leves, la vida útil de fatiga del detalle será $(1{,}35/1{,}00)^5 = 4{,}48$ veces mayor en el primero y, en consecuencia, la robustez de las secciones tendrá que ser mayor. Esta diferencia de 1 a más de 4 implica que, dada una vida útil concreta de un detalle, sería posible concebir un diseño conforme a la óptica tolerante al daño y acometer una inspección y reparación integral de todos los detalles así dimensionados cada vez que se haya cubierto una cuarta parte de esa vida.

Análogamente, la relación de vida útil entre un dimensionamiento con diseño de integridad asegurada y un dimensionamiento tolerante al daño para un detalle con consecuencias de fallo leves será $(1{,}15/1{,}00)^5 = 2{,}01$. Es decir, en el caso de un diseño tolerante al daño debería efectuarse una inspección al alcanzarse la mitad de la vida útil de la estructura.

La realización de reparaciones en los detalles al cabo del periodo de intervención supone "renovar" la vida de esos detalles saneándolos hasta restituir las condiciones originales de ejecución (Figura 16).

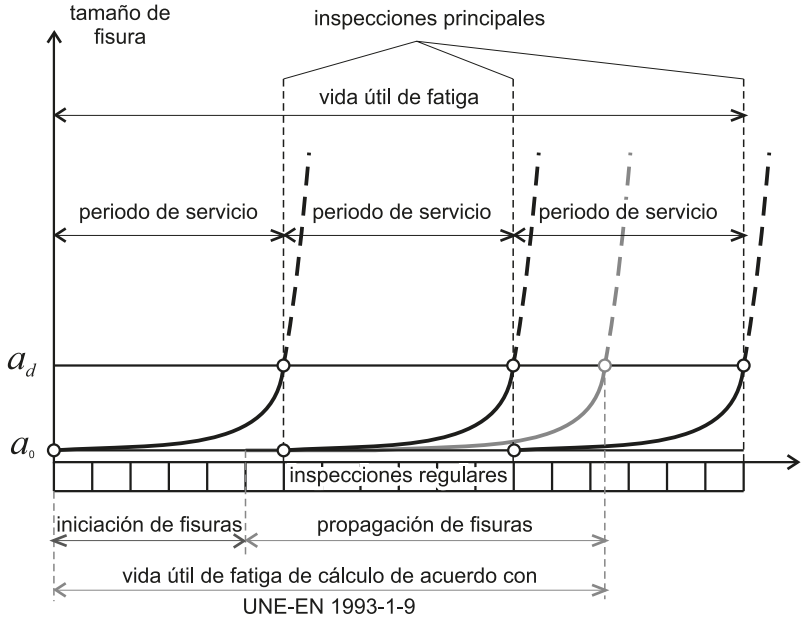


Figura 16 **Idealización de los periodos de intervención**

Se destaca, así, que un proyecto basado en el método de tolerancia al daño (empleando coeficientes parciales para la resistencia a fatiga menores) sería más económico, pero implicaría la exigencia de inspecciones más frecuentes. Sin embargo, y como se ha expuesto anteriormente, el Anejo Nacional de UNE-EN 1993-1-9 restringe el proyecto frente a fatiga al criterio de integridad asegurada, que reduce la necesidad de inspecciones periódicas, pero no las elimina.

3.3.2 Resistencia a fatiga

Las curvas de fatiga (curvas de Wöhler) permiten prever el comportamiento de un elemento, en fase elástica, bajo la acción de carreras de tensión de amplitud constante. En ellas se expresa la relación entre una determinada carrera de tensión y el número de ciclos que, bajo esa misma carrera, lleva a la rotura del elemento permitiendo así, determinar su resistencia a fatiga. En el Capítulo 2 se ha expuesto la teoría asociada a la obtención de estas curvas.

3.3.2.1 Curvas de fatiga normativas para acero estructural

En el caso del acero estructural sometido a tensiones normales, los puntos notables son, de acuerdo con la Figura 17, que es reproducción de la Figura 7.1 de UNE-EN 1993-1-9.

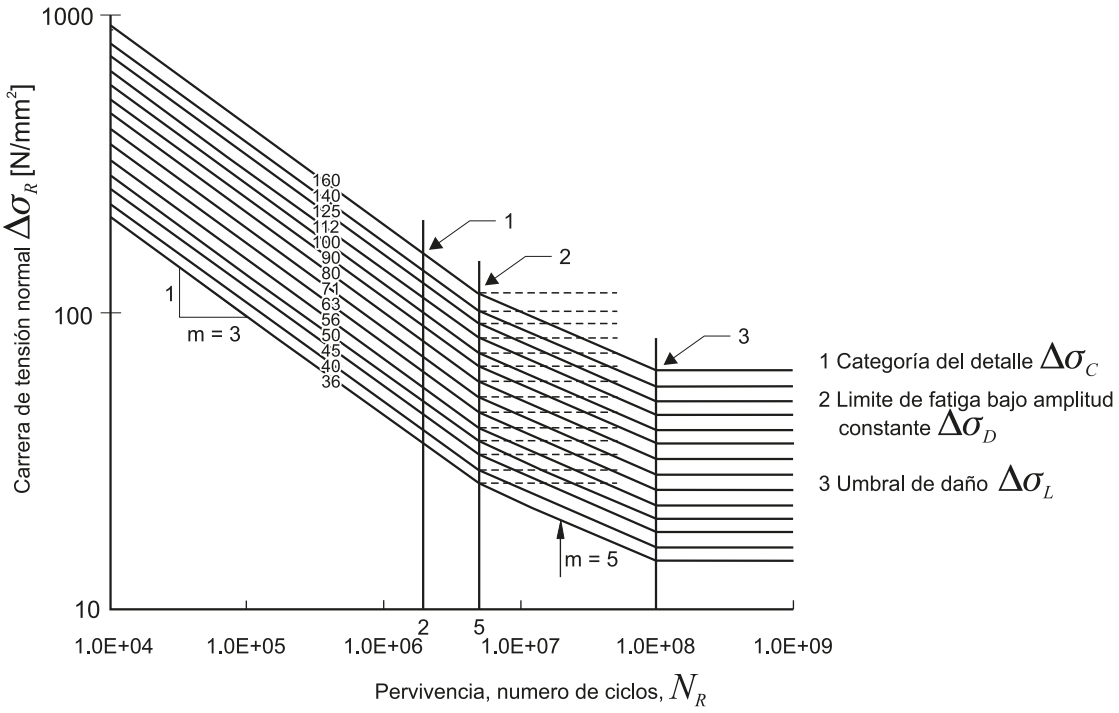


Figura 17 **Curvas de resistencia a fatiga para carreras de tensión normal (Figura 7.1 de UNE-EN 1993-1-9)**

- $\Delta\sigma_c$: *categoría del detalle,* correspondiente a una abscisa de 2 millones de ciclos. Para la definición de la categoría de un detalle, UNE-EN 1993-1-9 incorpora las tablas 8.1 a 8.10, que se han incluido en el ANEJO A (reproducidas y analizadas pormenorizadamente en el Capítulo 4).

  A partir de la categoría de un detalle se definen unos valores de referencia que se corresponden con los puntos singulares de la curva de fatiga del detalle, sabiendo que en cada tramo de igual exponente m se cumple la relación de proporcionalidad inversa reflejada en la expresión (21):

$$D = \frac{\sum_i \Delta\sigma_i^{\,3}\, n_i}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}\right)^3 5\cdot 10^6} + \frac{\sum_i \Delta\sigma_i^{\,5}\, n_i}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}\right)^5 5\cdot 10^6} \qquad (21)$$

- $\Delta\sigma_D$: límite de fatiga de amplitud constante o, por sus siglas en inglés, CAFL, *"Constant Amplitude Fatigue Limit"*.

  Es el punto de cambio de pendiente m = 3 a m = 5, coincidente con una abscisa de 5 millones de ciclos. Puede expresarse, en función de la categoría del detalle según expresión (22):

$$\Delta\sigma_D{}^3\, 5\cdot 10^6 = \Delta\sigma_C{}^3\, 2\cdot 10^6 \rightarrow \Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0{,}7368\,\Delta\sigma_C \qquad (22)$$

UNE-EN 1993-1-9 indica en 1.3.3.3 que cuando en el espectro de tensiones que solicitan al detalle la máxima carrera no excede este límite, no hay daño y la vida del detalle es ilimitada. Por tanto, si se tiene la plena y absoluta certeza de que todas las carreras son inferiores a $\Delta\sigma_D$, la curva de fatiga se simplifica pasando a un tramo horizontal a partir de este punto (línea discontinua en la Figura 17). A la inversa, si al menos una carrera supera este límite, la curva de fatiga es la de tres ramas para tener en cuenta, como ya se explicó en 2.3, el daño adicional causado por las carreras de orden inferior, inicialmente inocuas, a medida que la fatiga progresa.

Algunos textos especializados recalcan la complejidad del fenómeno de la fatiga bajo carreras de amplitud variable y de la incidencia del orden de aplicación de las ondas de tensión, y previenen de la posibilidad de que se desarrolle daño bajo carreras inferiores a la máxima por la acción ocasional de oscilaciones superiores al límite de fatiga de amplitud constante ($\Delta\sigma_D$) no consideradas en los cálculos. En el caso de algunos puentes de carretera, esta situación es una posibilidad real pero difícil de valorar, debido a la circulación de transportes especiales de peso muy elevado (no previsible) pero de frecuencia de paso muy baja.

- $\Delta\sigma_L$: *umbral de daño* o punto de truncamiento de la curva de fatiga (1.3.3.4 de UNE-EN 1993-1-9).

  Es el punto de cambio de pendiente m = 5 a $m = \infty$, coincidente con una abscisa de 100 millones de ciclos. Marca la frontera entre la zona libre de daño y la de daño moderado. La relación entre este valor y los anteriores puede expresarse según la expresión (23).

$$\Delta\sigma_L^5\, 100\cdot 10^6 = \Delta\sigma_D{}^5\, 5\cdot 10^6 \rightarrow$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0{,}5493\,\Delta\sigma_D = 0{,}4047\,\Delta\sigma_C \qquad (23)$$

  A partir de estos puntos, y aplicando la expresión (21), es posible determinar el número de ciclos resistentes N_R para una carrera de tensión dada $\Delta\sigma$, admitiendo que las tres ramas de la curva son válidas:

- Si $\Delta\sigma \geq \Delta\sigma_D$, $N_R = 5\cdot 10^6 \left(\dfrac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma}\right)^{1/3} = 2\cdot 10^6 \left(\dfrac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma}\right)^{1/3}$

- Si $\Delta\sigma_D \geq \Delta\sigma \geq \Delta\sigma_L$, $N_R = 5\cdot 10^6 \left(\dfrac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma}\right)^{1/5} = 100\cdot 10^6 \left(\dfrac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma}\right)^{1/5}$

- Si $\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$, $N_R \rightarrow \infty$, la vida del detalle es ilimitada

A la inversa, para saber la máxima carrera admisible $\Delta\sigma_R$ para un número de ciclos N dado, se tendrá:

- Si $N \leq 5{\cdot}10^6$, $\Delta\sigma = \Delta\sigma_D \left(\frac{5\cdot10^6}{N}\right)^{1/3} = \Delta\sigma_C \left(\frac{2\cdot10^6}{N}\right)^{1/3}$
- Si $5{\cdot}10^6 \leq N \leq 100{\cdot}10^6$, $\Delta\sigma = \Delta\sigma_D \left(\frac{5\cdot10^6}{N}\right)^{1/5} = \Delta\sigma_L \left(\frac{100\cdot10^6}{N}\right)^{1/5}$
- Si $N > 100{\cdot}10^6$, $\Delta\sigma = \Delta\sigma_L$, valor del umbral de daño

Aplicando razonamientos análogos es posible obtener las relaciones S-N para tensiones tangenciales en el acero estructural, para cables o tirantes y para pernos.

Por otra parte, determinados efectos dimensionales asociados, por ejemplo, al espesor de chapas, se tienen en cuenta afectando la categoría del detalle mediante un coeficiente k_s, según recoge la expresión (24) (que reproduce la expresión (7.1) de UNE-EN 1993-1-9).

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \, \Delta\sigma_C \tag{24}$$

La expresión concreta del factor depende de cada detalle analizado y puede encontrarse en las tablas de referencia (ver capítulo 4).

Para acero estructural sometido a tensiones tangenciales no se considera la rama de m = 3 y sólo se considera la parte del gráfico con m = 5 (Figura 18).

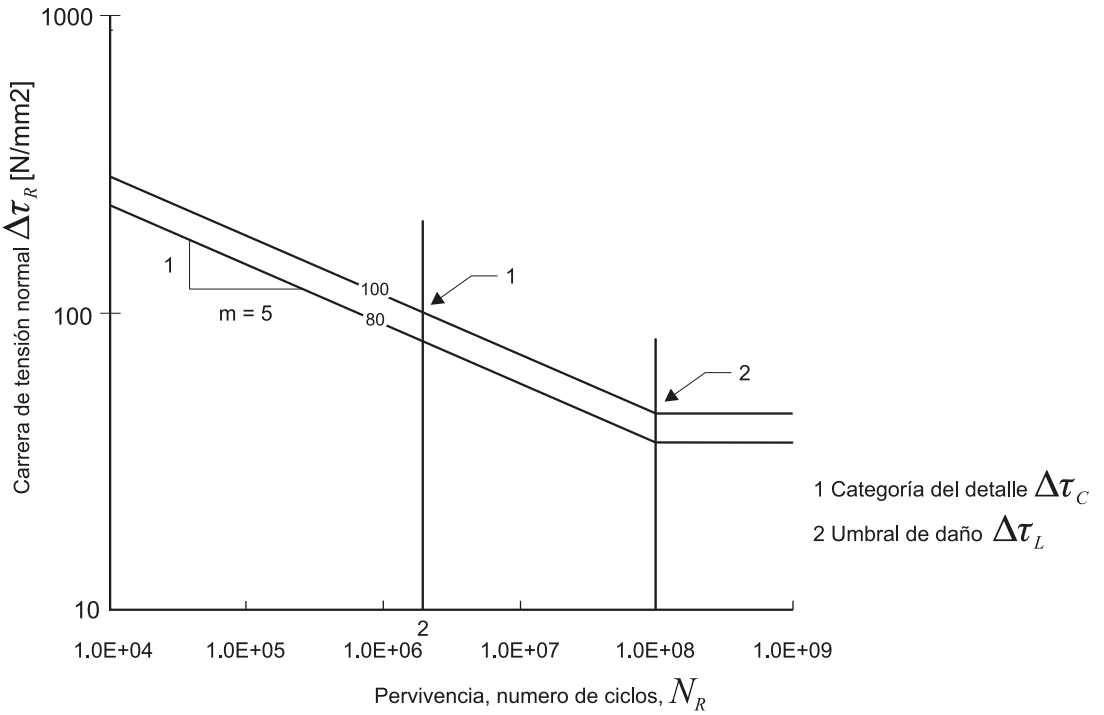


Figura 18 **Curvas de resistencia a fatiga para carreras de tensión cortante (Figura 7.2 UNE-EN 1993-1-9)**

Curvas de fatiga normativas para categorías alternativas

Algunos detalles sometidos a tensiones normales no pueden caracterizarse con total fiabilidad mediante una curva de fatiga convencional. Por eso la Nota 3 de 7.1(3) de UNE-EN 1993-1-9 indica que, en tales casos, se ha optado por rebajar ligeramente su categoría. Tales detalles quedan marcados con un asterisco ($\Delta\sigma_C^*$) en las tablas de detalles 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9.

El propio texto permite un tratamiento algo más favorable, consistente en mantener la categoría como correspondería estadísticamente, a cambio de prolongar la rama m = 3 hasta los 10 millones de ciclos, punto que se adoptaría como límite de fatiga bajo amplitud constante $\Delta\sigma_D$. Teniendo en cuenta que el umbral de daño $\Delta\sigma_L$ no varía, es fácil deducir (mediante las ecuaciones (23) y (25)) la categoría mejorada (con quiebro entre m = 3 y m = 5 en 10 millones de ciclos) y la reducida de las tablas ($\Delta\sigma_C^*$).

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{100}{10}\right)^{1/5} \Delta\sigma_L = 0{,}6414\,\Delta\sigma_C^* \rightarrow \Delta\sigma_C = \left(\frac{10}{2}\right)^{1/3} \Delta\sigma_D = 1{,}097\,\Delta\sigma_C^* \qquad (25)$$

Es decir, las categorías afectadas con un asterisco pueden tratarse como cualquier otra mediante una curva convencional de tres ramas sabiendo que tal enfoque es conservador, o pasando a otra, también de tres ramas, con una categoría un 10% mayor que la de la tabla, pero con quiebro entre las ramas de m = 3 y m = 5 para los 10 millones de ciclos en vez de los 5 millones habituales (Figura 19). Por sencillez operativa se recomienda la primera opción.

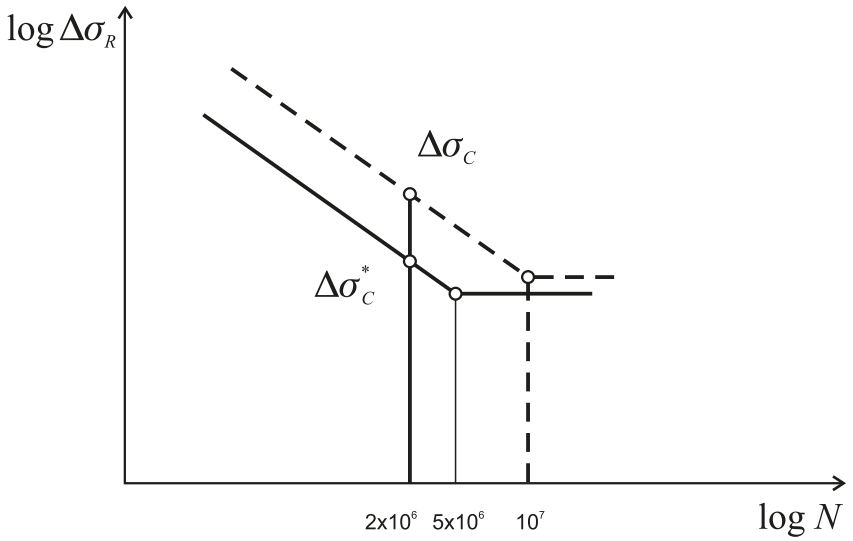


Figura 19 **Categoría alternativa $\Delta\sigma_C$ para detalles catalogados con categoría $\Delta\sigma_C^*$ (Figura 7.3 de UNE-EN 1993-1-9)**

3.3.2.2 Curvas de fatiga normativas para pernos conectadores

Los pernos conectadores de soldadura automática tienen una curva de fatiga caracterizada por una única rama de pendiente m = 8 (Figura 6.25 de UNE-EN 1994-2). La categoría de fatiga, expresada como una tensión tangencial tomando como sección resistente la

correspondiente al diámetro nominal del vástago, es de 90 MPa, referida a los 2 millones de ciclos (Figura 20).

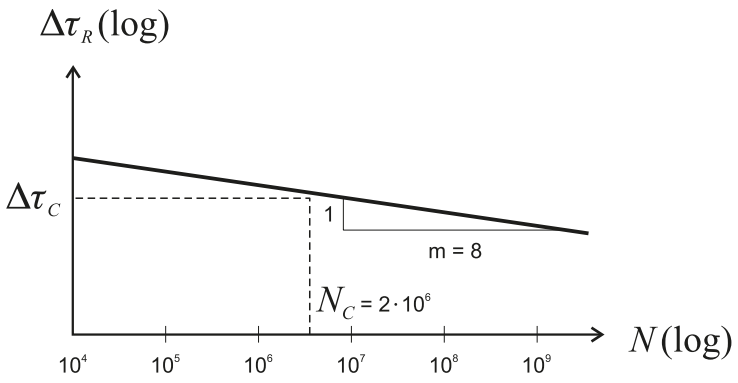


Figura 20 **Curva de resistencia a fatiga para pernos con cabeza en losas macizas (Figura 6.25 de UNE-EN 1994-2)**

Para pernos embebidos en losas de hormigón con áridos ligeros y densidades conformes a UNE-EN 1992-1-1, la categoría ha de corregirse mediante un factor η_E dado en el punto 11.3.2 de UNE-EN 1992-1-1, según la expresión (26).

$$\eta_E = \left(\rho/2200\right)^2 \tag{26}$$

donde:

ρ densidad seca [kg/m^3] conforme al capítulo 4 de UNE-EN 206-1, y según la tabla 11.1 de UNE-EN 1992-1-1

3.3.2.3 Curvas de fatiga normativas para acero de armadura pasiva y activa

Las curvas de fatiga para acero de armadura pasiva y activa tienen la configuración, que recoge la Figura 21, que es reproducción de la Figura 6.30 de UNE-EN 1992-1-1.

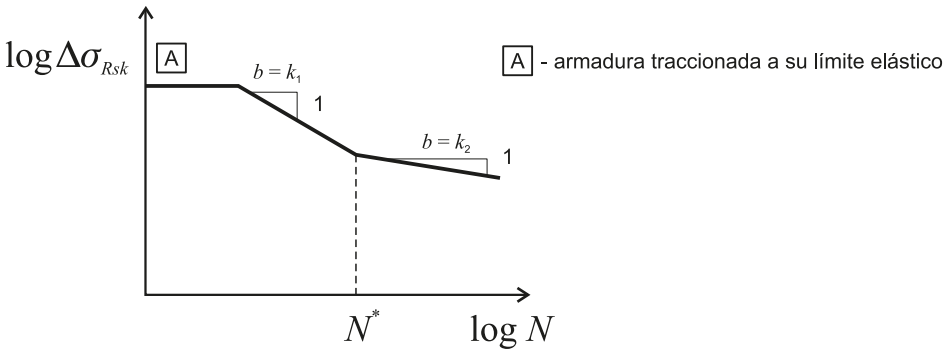


Figura 21 **Forma de la curva de resistencia a fatiga característica (curvas S-N para armaduras activas y pasivas) (Figura 6.30 de UNE-EN 1992-1-1)**

Los valores de los parámetros N^*, k_1 y k_2 para armaduras pasivas y activas están definidos en las Tablas 6.3N y 6.4N de UNE-EN 1992-1-1 para la armadura pasiva y activa respectivamente

(son los valores recomendados de parámetros de determinación nacional que adopta el Anejo Nacional), presentándose a continuación (Tabla 6 y Tabla 7).

Tabla 6 **Parámetros para curvas S-N de armaduras pasivas (Tabla 6.3N de UNE EN 1992-1-1)**

Tipos de armadura pasiva	N^*	Exponente de la tensión		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [MPa] en N^* ciclos
		k_1	k_2	
Barras rectas y dobladas (1)	10^6	5	9	162,5
Barras soldadas y mallas electrosoldadas	10^7	3	5	58,5
Dispositivos de empalme	10^7	3	5	35,0

NOTA 1: Los valores de $\Delta\sigma_{Rsk}$ son para barras rectas. Los valores para barras dobladas se deberían obtener empleando un factor de reducción $\xi = 0{,}35 + 0{,}026\, D/\phi$

donde:

D es el diámetro del mandril

ϕ es el diámetro de la armadura

Tabla 7 **Parámetros para curvas S-N de armadura activa (Tabla 6.4N de UNE EN 1992 1-1)**

Curva S–N de armadura activa utilizada para	N^*	Exponente de la tensión $\Delta\sigma$		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [MPa] en N^* ciclos
		k_1	k_2	
Armadura pretesa	10^6	5	9	185
Armadura postesa:				
- monocordones en vainas de plástico	10^6	5	9	185
- armaduras activas rectas o curvas en vainas de plástico	10^6	5	10	150
- armaduras activas curvas en vainas de acero	10^6	5	7	120
- dispositivos de empalme	10^6	5	5	80

3.3.2.4 Curvas de fatiga normativas para cables

Por su parte, UNE-EN 1993-1-11 (proyecto de estructuras de acero con elementos traccionados, es decir, cables y tirantes) diferencia en su capítulo 9 sólo dos zonas en las curvas de fatiga de estos elementos, una de $m = 4$ y otra de $m = 6$, encontrándose el quiebro justo en los 2 millones de ciclos, valor para el que se fija la categoría del detalle según la Figura 22 y la Tabla 8 (Figura 9.1 y Tabla 9.1 de UNE-EN 1993-1-11).

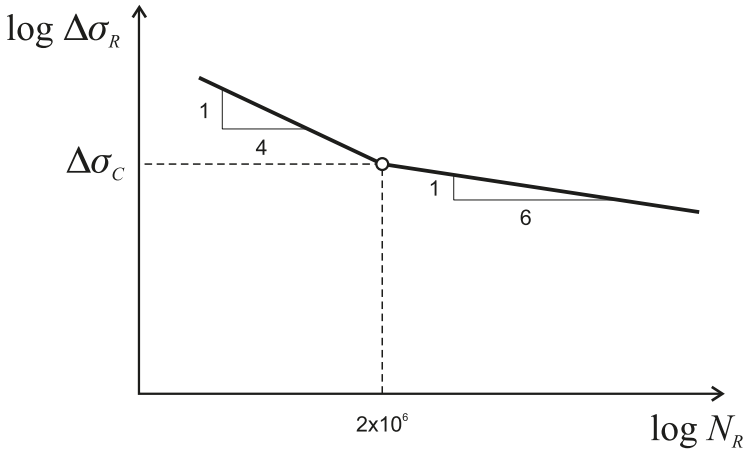


Figura 22 **Curvas de resistencia a la fatiga para componentes de tracción (Figura 9.1 de UNE-EN 1993-1-11)**

Tabla 8 **Categorías de detalle para resistencia a la fatiga de acuerdo con la Norma UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 9.1 de UNE-EN 1993-1-11)**

Grupo	Componentes de tracción		Categoría de detalle $\Delta\sigma_C$ [N/mm²]
A	1	Barras pretensadas	105
B	2	Cable adujado cerrado totalmente con encastres cónicos de metal o resina	150
	3	Cordones en espiral con encastres cónicos de metal o resina	150
C	4	Trenzados de alambres paralelos con encastres de epoxi	160
	5	Haz de cordones paralelos	160
	6	Haz de alambres paralelos	160

3.3.3 Cálculo de tensiones bajo cargas de fatiga

El capítulo 4 de UNE-EN 1993-1-9 prescribe que los modelos de cálculo deberán tener en cuenta todos los efectos estructurales esperables asociados a las acciones de fatiga y se basarán en el análisis elástico y lineal, tanto para los elementos estructurales como para las uniones, no permitiéndose la redistribución plástica.

Para vigas en celosía con miembros tubulares el modelo de cálculo puede ser continuo en los cordones y articulado en las diagonales y montantes. Siempre que se tengan en cuenta las tensiones debidas a las acciones en el plano de la celosía que inciden sobre los elementos entre nudos, los efectos debidos a los momentos secundarios resultantes de la rigidez real de los nudos podrán incorporarse afectando las tensiones mediante un coeficiente k_1 ,

cuyos valores se recogen en la Tabla 9 y la Tabla 10 (Tablas 4.1 y 4.2 de UNE-EN 1993-1-9, respectivamente).

Tabla 9 **Factores k_1 para secciones circulares huecas bajo carga en el plano (Tabla 4.1 de UNE-EN 1993-1-9)**

Tipo de unión		Cordones	Montantes	Diagonales
Uniones con separación	Tipo K	1,5	-	1,3
	Tipo N o KT	1,5	1,8	1,4
Uniones con solape	Tipo K	1,5	-	1,2
	Tipo N o KT	1,5	1,65	1,25

Tabla 10 **Factores k_1 para secciones rectangulares huecas bajo carga en el plano (Tabla 4.2 de UNE-EN 1993-1-9)**

Tipo de unión		Cordones	Montantes	Diagonales
Uniones con separación	Tipo K	1,5	-	1,3
	Tipo N o KT	1,5	2,2	1,6
Uniones con solape	Tipo K	1,5	-	1,3
	Tipo N o KT	1,5	2,0	1,4

Para la definición de los tipos de unión véase la Figura 7.1 de 1993-1-8.

Con carácter general, el capítulo 5 de UNE-EN 1993-1-9 indica que las tensiones se calcularán para el Estado Límite de Servicio. Las secciones de clase 4 se tratarán conforme a UNE-EN 1993-1-5 (complementado por lo recogido en UNE-EN 1993-2 a UNE-EN 1993-6).

Las tensiones han de obtenerse en los puntos donde sea esperable la iniciación de fatiga (lo cual no sólo incluye uniones soldadas o atornilladas, sino también chapas base de una pieza sin empalmes ni cambios de sección). Para detalles no recogidos en las tablas 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9, se empleará un factor de concentración de tensiones apropiado para modificar la carrera de tensiones nominal. Aunque no se indica explícitamente, la futura redacción de este punto recoge que dicho factor se obtendrá acudiendo a manuales especializados o a modelos de elementos finitos adecuadamente calibrados.

Cuando se usen métodos de evaluación de tensiones con consideración de la geometría de los detalles cubiertos por la tabla B.1 de UNE-EN 1993-1-9 (método del *punto caliente*), la

carrera equivalente se obtendrá afectando la carrera nominal por un factor de concentración de tensiones k_f (según 6.5 de UNE-EN 1993-1-9), obtenido de manuales o de modelos de elementos finitos.

Para chapas, las tensiones empleadas en los cálculos serán normales y tangenciales, según 5(5) de UNE-EN 1993-1-9.

En el caso de elementos especiales como rigidizadores longitudinales o vigas transversales con recortes para el paso de rigidizadores, se seguirán las indicaciones de 9.4.2 de UNE-EN 1993-2.

En soldaduras, las tensiones manejadas serán normales y tangenciales (Figura 23). Las tensiones de la misma naturaleza se compondrán pitagóricamente, y se comprobará su efecto por separado, es decir, por un lado, normales y, por otro, tangenciales (acorde con 5(6) de UNE-EN 1993-1-9). Este procedimiento difiere del expuesto en 4.5.3.2 de UNE-EN 1993-1-8 para la verificación de uniones soldadas en ángulo en Estado Límite Último.

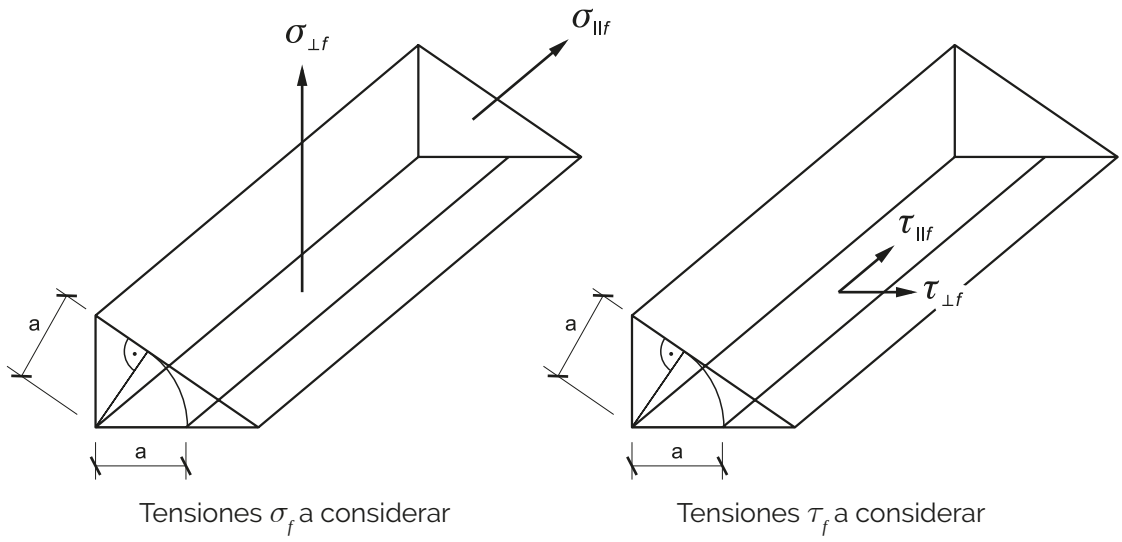


Figura 23 **Tensiones a considerar en las soldaduras en ángulo (Figura 5.1 de UNE EN 1993-1-9)**

En pernos conectadores, la fuerza actuante en cada elemento se obtendrá mediante una distribución elástica de esfuerzos rasantes en la sección a partir del esfuerzo cortante. En el caso de secciones con posibilidad de fisuración en la losa que conectan los pernos, se trabajará bajo la hipótesis de sección no fisurada al ser, por lo general, mayor el esfuerzo rasante que los pernos deben transferir al metal.

Con carácter general, pero muy especialmente en el caso del acero pasivo, se evaluará la respuesta estructural, en términos de esfuerzos y tensiones, teniendo en cuenta de manera realista la rigidez de las diferentes secciones, especialmente en aquellas secciones mixtas donde el hormigón de la losa del tablero sea susceptible de fisurar. Esta consideración incluye, si llegara a ser preciso, el análisis de las secciones incorporando el efecto de rigidez bajo tracción (fenómeno conocido también por su denominación en inglés, *"tension stiffening"*). Sin duda, en secciones cuya losa pueda fisurar parcialmente será conservador (a veces

excesivamente y sin mayor incidencia en las conclusiones) suponerla totalmente fisurada a la hora de evaluar tensiones en sus diferentes elementos, y concretamente en la armadura longitudinal de la losa.

3.4 Método Simplificado

El Método del Daño Equivalente, también conocido como Método Simplificado (MS), tiene como base el Método de la Tensión Equivalente de Daño, expuesto en el apartado 2.4.2. Este método permite la comparación directa entre la categoría de detalle $\Delta\sigma_C$ (ver apartado 2.3.1) y la carrera de tensión equivalente $\Delta\sigma_{E2}$, esta última correspondiente a la máxima carrera de tensión obtenida en el detalle debida al paso del vehículo tipo FLM3 ($\Delta\sigma_p$), convertida en otra (de amplitud constante) que, al ser aplicada 2 millones de ciclos, provoca el mismo daño que las cargas reales a lo largo de la vida útil de la estructura.

Esta conversión resulta del producto de la carrera de tensión $\Delta\sigma_p$ por el coeficiente de daño equivalente λ, que la calibra de acuerdo con el tipo de elemento, estructura y tráfico, la vida útil esperada y la distribución transversal del tráfico en el tablero.

A lo largo de este apartado se exponen los formatos de comprobación a fatiga para los diferentes elementos analizados (chapas de acero estructural, pernos conectadores, acero de armadura pasiva y activa, y cables y elementos traccionados) y para cada uno de ellos se describe la obtención de las correspondientes carreras de tensión y los coeficientes de daño equivalente λ.

3.4.1 Método Simplificado aplicado al acero estructural

3.4.1.1 Comprobación a fatiga

En el caso de chapas de acero estructural, el formato de la comprobación a fatiga en tensiones según UNE-EN 1993-1-9 y UNE-EN 1993-2 es válido en el dominio marcado por la expresión (27), acorde con 8(1) y la expresión (8.1) de UNE-EN 1993-1-9.

$$\Delta\sigma \leq 1{,}5\ f_y \quad \text{y} \quad \Delta\tau \leq 1{,}5\ f_y / \sqrt{3} \tag{27}$$

donde:

$\Delta\sigma,\ \Delta\tau$ carreras de tensiones nominales normales y tangenciales respectivamente (corregidas por los factores k_1 y k_f cuando corresponda según 6.4 y 6.5 de UNE-EN 1993-1-9) bajo el valor frecuente de la carga de fatiga, $\psi_1\ Q_k$

f_y límite elástico del acero

En estas condiciones, la verificación de la seguridad a fatiga de un detalle es la de las inecuaciones (28) equivalentes a las expresiones (8.2) de UNE-EN 1993-1-9.

$$\gamma_{Ff}\ \Delta\sigma_{E,2} \le \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \quad ; \quad \gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2} \le \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \tag{28}$$

donde:

γ_{Ff} coeficiente parcial de las carreras de tensión equivalentes $\Delta\sigma_E$ y $\Delta\tau_E$. El Anejo Nacional de UNE-EN 1993-2 adopta en 9.3(1) el valor recomendado de γ_{Ff} = 1,00

γ_{Mf} coeficiente parcial para la resistencia a fatiga, según la Tabla 5 de 3.3.1 (Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9). Aplicando el criterio de verificación de integridad asegurada, que es el que permite el Anejo Nacional, adopta los valores 1,15 o 1,35 en función de que las consecuencias de fallo sean 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

$\Delta\sigma_C$ categoría del detalle para tensiones normales, con las correcciones oportunas (factor de tamaño k_s, conforme a 7.2.2 de UNE-EN 1993-1-9, ya introducido en el apartado 3.3.2.1) según las tablas de referencia 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9

$\Delta\tau_C$ categoría del detalle para tensiones tangenciales, con las correcciones oportunas (factor de tamaño k_s, conforme a 7.2.2 de UNE-EN 1993-1-9, ya introducido en el apartado 3.3.2.1) según las tablas de referencia 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9

En algunos detalles de las tablas 8.1 a 8.9 de UNE-EN 1993-1-9 las tensiones normales que han de emplearse en la verificación serán las principales.

En el caso de solicitación simultánea de tensiones normales y tangenciales (para los detalles recogidos en las tablas 8.8 y 8.9 de UNE-EN 1993-1-9), su interacción se evalúa mediante la expresión (29) (que reproduce la expresión (8.3) de UNE-EN 1993-1-9).

$$\left(\frac{\gamma_{Ff}\ \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C\ /\ \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C\ /\ \gamma_{Mf}}\right)^5 \le 1 \tag{29}$$

donde los términos tienen el significado de las expresiones precedentes.

El enfoque que adopta el Eurocódigo en este particular es, de forma velada, el de daño acumulado conforme a la regla de Palmgren-Miner ya que, mediante la exponenciación, se logra pasar de la comparación en tensiones a otra en ciclos, es decir, a daño, ajeno a la simultaneidad en las solicitaciones. Se trata, por tanto, de una fórmula rigurosa, ajustada a las curvas S–N y tan conservadora como lo sea la obtención de las carreras de cálculo, basadas en el coeficiente λ La formulación de este coeficiente conforme al Método Simplificado se explica en 3.4.1.3.

Por otra parte, cuando no sea posible obtener las carreras de cálculo, bien por la inaplicabilidad de los factores k_1 o k_f, bien por dudas en la obtención de un coeficiente λ fiable, o bien porque no se cumple el requisito de la expresión (27), se acudirá al formato de seguridad del Método del Daño Acumulado, expuesto en 3.4.

3.4.1.2 Cálculo de carreras de tensión

El apartado 6.1(1) de UNE-EN 1993-1-9 establece tres consideraciones respecto a la obtención de las carreras de tensión:

- Para detalles recogidos en las tablas 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9, se emplea la carrera nominal, que es la diferencia algebraica entre la tensión máxima y la mínima causadas por el paso de los vehículos
- Para detalles con discontinuidades abruptas cerca de la zona de iniciación de fisuras no recogidos en las tablas 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9, se empleará la carrera nominal modificada mediante un factor de concentración de tensiones k_f apropiado
- Para uniones con importantes saltos o concentraciones de tensión originados en la proximidad de talones de soldadura (debido a geometrías complejas o a flexión local) como los de la tabla B.1 de UNE-EN 1993-1-9, se empleará la carrera geométrica, producto de la nominal por un factor de concentración de tensiones (método del punto caliente, *"hot spot"* en inglés, ver 3.3.3).

Carrera de tensión efectiva

En el caso de chapas de acero estructural (elementos no soldados), la carrera de tensión nominal neta pretende considerar el efecto de ondas de tensión que induzcan compresiones. UNE-EN 1993-1-9 establece en 7.2.1 que, en aquellos elementos no soldados o que hayan sido tratados para aliviar sus tensiones residuales, cuando se produzca compresión por efecto de la carga de fatiga, la carrera nominal modificada será la diferencia algebraica entre la pésima tensión de tracción y el 60% de la pésima de compresión (Figura 24 – caso 2). Asimismo, se sobreentiende que si estos elementos quedan siempre comprimidos incluso bajo la pésima onda de tracción, la carrera que debe considerarse será el 60% de la diferencia algebraica entre la máxima y la mínima (Figura 24 – caso 3).

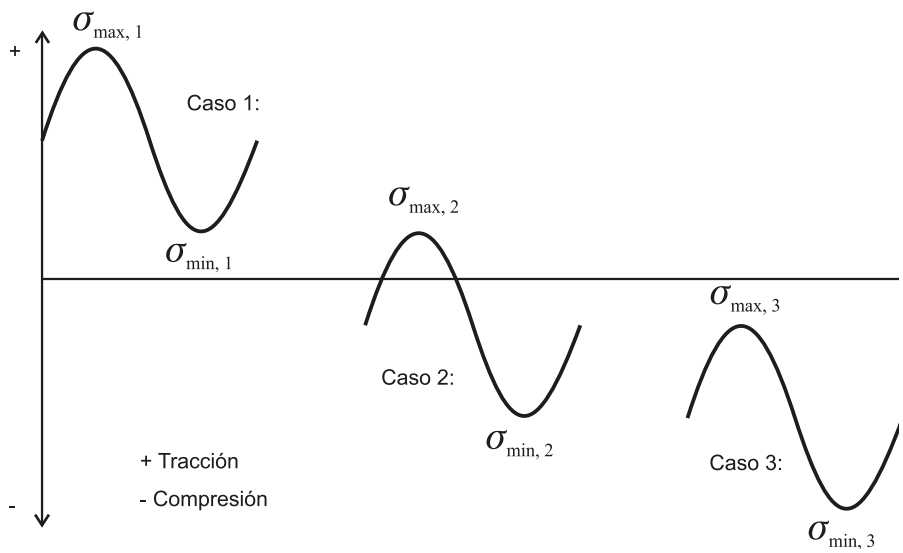


Figura 24 **Carrera de tensiones efectiva para detalles sin soldaduras o con soldaduras sometidas a tratamiento de relajación de tensiones**

Valores de cálculo de carreras de tensión nominal

La comprobación de la seguridad a fatiga de un detalle implica la obtención de una carrera de tensión que, en función del elemento analizado, ha de obtenerse de una determinada manera. Las carreras de tensión obtenidas directamente del cálculo del paso del vehículo de fatiga empleado se designan como carreras nominales. Esas mismas carreras, después de ser debidamente calibradas y afectadas del coeficiente parcial de fatiga (en función del tipo de estructura, tráfico, etc.) son directamente comparables con la categoría del detalle en análisis y se designan como carreras de cálculo.

Los valores de cálculo de las carreras de tensión nominal estarán referidos siempre a un número concreto de ciclos de fatiga (dos millones para acero estructural) 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 (30), que corresponde a la expresión (6.1) de UNE-EN 1993-1-9.

$$\gamma_{Ff}\ \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \ldots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff}\ Q_k)$$

(30)

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

donde:

γ_{Ff} coeficiente parcial de las carreras de tensión equivalentes $\Delta\sigma_E$ y $\Delta\tau_E$. El Anejo Nacional de UNE-EN 1993-2 adopta en 9.3(1) el valor recomendado de γ_{Ff} = 1,00

$\gamma_{Ff}\ \Delta\sigma_{E,2}$ 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

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff}\,Q_k)$ 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, $\gamma_{Ff}\,Q_k$

λ_i coeficientes de daño equivalente, que pretenden convertir la carrera de tensión causada por la carga tipo, $\Delta\sigma(\gamma_{Ff}\,Q_k)$ 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 (u otra solicitación) real a lo largo de la vida útil de la estructura. Su expresión concreta depende del elemento, del tipo de estructura analizada y de otros factores como el tráfico real y el vehículo tipo empleado en la calibración. En lo sucesivo, sólo se estudiará el caso de puentes metálicos o mixtos de carretera

Valores de cálculo de carreras de tensión nominal modificada

Los valores de cálculo de las carreras de tensión nominal modificada para chapas de acero estructural se determinan según la expresión (31) (expresión (6.2) de UNE-EN 1993-1-9).

$$\gamma_{Ff}\;\Delta\sigma_{E,2} = k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \ldots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff}\;Q_k) \tag{31}$$

$$\gamma_{Ff}\;\Delta\tau_{E,2} = k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \ldots \times \lambda_n \times \Delta\tau(\gamma_{Ff}\;Q_k)$$

donde todos los términos tienen el mismo significado que en la expresión (30) y, además:

k_f factor de concentración de tensiones que corrige la carrera nominal en chapas para tener en cuenta puntas de tensión no recogidas en los modelos, como pueden ser las causadas por transiciones bruscas o por la presencia de talones de soldadura o flexiones locales en chapas; fuera de estos casos, $k_f = 1$

Valores de cálculo de carreras de tensión en uniones soldadas de perfiles huecos

En ausencia de resultados obtenidos con métodos más precisos, los valores de cálculo de las carreras de tensión nominal modificada $\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_{E,2}$ deberían determinarse según el modelo simplificado de 4(2) de UNE-EN 1993-1-9 y de acuerdo con la expresión (32) (expresión (6.3) de UNE-EN 1993-1-9).

$$\gamma_{Ff}\;\Delta\sigma_{E,2} = k_1\left(\gamma_{Ff}\;\Delta\sigma^*_{E,2}\right) \tag{32}$$

donde:

$\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma^{*}_{E,2}$ valor de cálculo de la carrera de tensión normal equivalente, referida a 2 millones de ciclos, obtenido con un modelo simplificado de estructura articulada

k_1 factor de corrección de la carrera nominal en chapas para tener en cuenta tensiones causadas por la flexión en nudos de celosías tubulares en modelos con cordones continuos y articulaciones en las diagonales y montantes (Tabla 9 y Tabla 10; fuera de este caso, $k_1 = 1$).

y el resto de los términos con el significado de las expresiones precedentes.

Valores de cálculo de carreras de tensión geométrica (punto caliente)

Los valores de cálculo de las carreras de tensión geométrica se determinan de acuerdo con la expresión (33) (expresión (6.4) de UNE-EN 1993-1-9).

$$\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_{E,2} = kf\left(\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma^{*}_{E,2}\right) \tag{33}$$

donde:

k_f factor de concentración de tensiones que corrige la carrera nominal en chapas para tener en cuenta puntas de tensión no recogidas en los modelos, como pueden ser las causadas por transiciones bruscas o por la presencia de talones de soldadura o flexiones locales en chapas; fuera de estos casos, $k_f = 1$

y el resto de los términos con el significado de las expresiones precedentes.

3.4.1.3 Coeficientes de daño equivalente λ

En puentes metálicos de carretera el coeficiente de daño equivalente λ para acero estructural se calcula según la expresión (34) (expresión (9.9) de UNE-EN 1993-2).

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4 \qquad \lambda \leq \lambda_{\max} \tag{34}$$

donde:

λ_1 coeficiente por daño del tráfico en función de la longitud y forma de la línea o superficie de influencia crítica

λ_2 coeficiente de intensidad de tráfico

λ_3 coeficiente de vida útil

λ_4 coeficiente por tráfico en carriles adicionales al carril principal de tráfico pesado

λ_{max} máximo valor normativo del coeficiente λ teniendo en cuenta el límite de fatiga

Es importante reseñar que, según se deduce del tratamiento que en 9.5.2(2) de UNE-EN 1993-2 se hace del coeficiente λ_1, este método sólo está calibrado y es aplicable para el análisis global de puentes y de determinados elementos, que serían:

- Tableros y elementos de apoyo en puentes cuyo esquema resistente sea el de una viga (incluyendo las celosías).
- En puentes arco, las péndolas (se entiende que en puentes de arco atirantado o *bowstring*) y el arco (lo cual resulta llamativo al ser un elemento comprimido, por lo que es, en principio, poco habitual que aparezcan oscilaciones de tracción neta).

Por tanto, no puede garantizarse la seguridad del método en otras tipologías ni en elementos locales (rigidizadores, celosías transversales, etc.). Hay que recalcar también que la validez de estos coeficientes de daño equivalente (y, por tanto, del Método Simplificado) se restringe a puentes metálicos y mixtos de entre 10 y 80 m de luz.

En los subapartados sucesivos se trata el significado e hipótesis de trabajo de cada coeficiente en el ámbito de los puentes de carretera. Los valores de los coeficientes de daño equivalente son parámetros de determinación nacional y, en todos los casos, el Anejo Nacional mantiene los valores recomendados.

3.4.1.4 Coeficiente λ_1

λ_1 es el coeficiente de daño por tráfico en función de la longitud de la línea o superficie de influencia critica. Este coeficiente pretende considerar la actuación de varias carreras inferiores a la pésima pero también susceptibles de inducir daño por fatiga.

Hay que distinguir en función de la tipología estructural, la respuesta solicitante analizada (esfuerzo o reacción) y el elemento estudiado. Así, de acuerdo con 9.5.2(2) de UNE-EN 1993-2, se tiene:

- Para trabajo a flexión (tensiones normales), se distingue entre zonas de apoyos intermedios (caracterizadas por una luz tributaria igual a la semisuma de los vanos adyacentes) y zonas de vano (con una luz característica igual al vano).
- Para trabajo a cortante (tensiones tangenciales), los apoyos extremos tienen asociada una luz tributaria igual al vano; para la sección de centro de vano, 0,4 veces la luz; para los apoyos intermedios, la semisuma de los vanos adyacentes
- Para el análisis de reacciones, los criterios son iguales que para el cortante, distinguiéndose entre apoyos extremos e intermedios
- En puentes arco, se toma como luz tributaria para el arco la mitad del vano; para las péndolas, el doble de la distancia entre ellas

Las expresiones concretas para flexión y cortante se reflejan en la Figura 25 (Figura 9.5 de UNE-EN 1993-2).

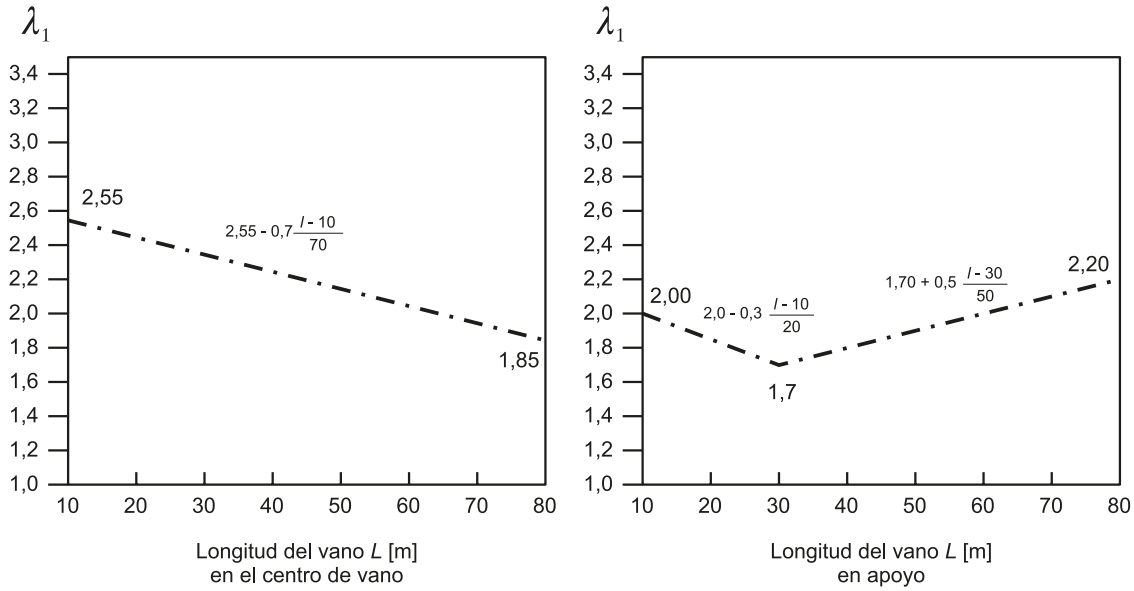


Figura 25 λ_1 **para momentos en puentes de carretera (Figura 9.5 de UNE-EN 1993-2)**

3.4.1.5 Coeficiente λ_2

λ_2 es el coeficiente de intensidad de tráfico. Este coeficiente pretende expresar el daño causado por los vehículos pesados que realmente van a circular por la estructura en términos del provocado por el tráfico del vehículo pesado tipo, FLM3, definido como un camión de 480 kN a razón de 500.000 pasos al año. Se trata, por tanto, de un factor de valor desconocido mientras no se cuente con información detallada sobre la composición e intensidad de los vehículos que atraviesan el puente.

El tráfico promedio que sirve como referencia se basa en el tratamiento estadístico de observaciones en carreteras europeas durante los años 80 y 90 en la etapa previa de redacción de los Eurocódigos.

La expresión normativa es la (35) (expresión (9.10) de UNE-EN 1993-2).

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0}\left(\frac{N_{obs}}{N_0}\right)^{1/5} \tag{35}$$

donde:

Q_0 carga del vehículo pesado tipo, coincidente con el FLM3, es decir, 480 kN

N_{obs} intensidad media anual del tráfico pesado de la vía (medida, estimada o, a falta de mejor información, la de la Tabla 4 (Tabla 4.5(n) de UNE-EN 1991-2) según la categoría de la vía), expresada en millones de vehículos

N_0 intensidad media anual del tráfico tipo: $0{,}5 \cdot 10^6$ vehículos/año

Q_{m1} carga del vehículo pesado medio [kN], en términos de daño. Su determinación se desarrolla en la expresión (36), recogida en 9.5.2(3) de UNE-EN 1993-2

$$Q_{m1} = \left(\frac{\sum_i n_i \, Q_i^5}{\sum_i n_i} \right)^{1/5} \tag{36}$$

siendo:

Q_i carga del camión i en kN en el carril de vehículos lentos

n_i número de camiones de carga Q_i en el carril de vehículos lentos

A título de ejemplo, la Tabla 11 (Tabla 9.1 de UNE-EN 1993-2) recoge los valores de λ_2 para diferentes combinaciones de intensidad anual de tráfico y peso del vehículo medio. Se aprecia que una duplicación de la intensidad de tráfico supone un aumento aproximado del 15% en la tensión equivalente; una cuadruplicación, un 32%, etc. Por tanto, un dimensionamiento holgado podría absorber importantes crecimientos de la IMD.

Tabla 11 λ_2 **(Tabla 9.1 de UNE-EN 1993-2)**

Q_{m1} [kN]	N_{obs} [10^6 veh/año]							
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
200	0,362	0,417	0,452	0,479	0,500	0,519	0,535	0,550
300	0,544	0,625	0,678	0,712	0,751	0,779	0,803	0,825
400	0,725	0,833	0,904	0,957	1,001	1,038	1,071	1,100
500	0,907	1,042	1,130	1,197	1,251	1,298	1,338	1,374
600	1,088	1,250	1,356	1,436	1,501	1,557	1,606	1,649

Seguidamente (Tabla 12) se resumen los valores de λ_2 para todos los posibles escenarios del modelo de carga FLM4 (tráfico usado en las calibraciones del Método Simplificado) en cada categoría de carretera.

Tabla 12 **Coeficiente λ_2 para modelo de carga FLM4**

Tipo FLM4	Q [kN]	Escenario		
		Larga distancia	Media distancia	Tráfico local
FLM4 (a)	200	20%	40%	80%
FLM4 (b)	310	5%	10%	5%

Tabla 14 continúa >

Tipo FLM4	Q [kN]	Escenario		
		Larga distancia	Media distancia	Tráfico local
FLM4 (c)	490	50%	30%	5%
FLM4 (d)	390	15%	15%	5%
FLM4 (e)	450	10%	5%	5%
Q_{m1} [kN]		445,40	406,98	316,69
N_{obs} [10^6 veh/año]		λ_2		
0,05		**0,5855**	**0,5350**	**0,4163**
0,125		**0,7032**	**0,6426**	**0,5000**
0,50		**0,9279**	**0,8479**	**0,6598**
2,00		**1,2244**	**1,1188**	**0,8706**

3.4.1.6 Coeficiente λ_3

El coeficiente λ_3 es el de vida útil. Convierte, en términos de tensión, el daño del tráfico tipo, referido a 100 años, para cualquier otra vida útil t_{Ld}, expresada en años, y viene dado por la expresión (37) (expresión (9.11) de UNE-EN 1993-2).

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100}\right)^{1/5} \tag{37}$$

La Tabla 13 recoge valores de λ_3 para diferentes vidas útiles del puente.

Tabla 13 λ_3 **(Tabla 9.2 de UNE-EN 1993-1-9)**

Vida útil en años (t_{Ld})	50	60	70	80	90	100	120
Coeficiente λ_3	0,871	0,903	0,931	0,956	0,979	1,000	1,037

La vida útil de proyecto para puentes t_{Ld}, de acuerdo con la tabla 2.1 de UNE EN 1990 es de 100 años, y a su vez el Anejo Nacional de UNE-EN 1990/A1 no proporciona ninguna otra información adicional respecto a este parámetro, por lo que λ_3 = 1,00.

3.4.1.7 Coeficiente λ_4

λ_4 es el coeficiente que tiene en cuenta el daño a fatiga causado por la circulación en carriles adicionales al principal de tráfico pesado, al cual están referidos los coeficientes λ_1 y λ_2. Su desarrollo se basa en equiparación de daños y conversión de dicho daño en un coeficiente

corrector de la tensión. Su valor se obtiene según la expresión (38) (expresión (9.12) de UNE-EN 1993-29.)

$$\lambda_4 = \left(1 + \frac{N_2}{N_1}\left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^5 + \frac{N_3}{N_1}\left(\frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^5 + \cdots + \frac{N_k}{N_1}\left(\frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^5\right)^{1/5} \quad (38)$$

donde:

k número de carriles con tráfico de vehículos pesados. Si solo hay un carril de vehículos pesados $\lambda_4 = 1$

Q_{mj} peso del vehículo pesado medio [kN], en términos de daño, que circula por el carril j. Su determinación se desarrolla en la expresión (36).

N_j intensidad media anual de tráfico pesado en el carril j

η_j valor de la línea de influencia de la máxima carrera de tensión en el detalle estudiado para el paso de una carga unitaria centrada en el carril j

A modo de ejemplo, si se están analizando las chapas de un puente de carretera de dos carriles con el mismo sentido de circulación, en el que por el carril izquierdo circula un 10% de vehículos pesados (respecto al carril de vehículos pesados) de un peso medio el 50% de los que pasan por el carril derecho, el coeficiente λ_4 valdría:

$$\lambda_4 = \left(1 + 0{,}10\left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\,0{,}50\right)^5\right)^{1/5}$$

El cociente η_2 / η_1 de las líneas de influencia depende de la configuración estructural. Por ejemplo, para un puente cajón (el caso más simple) la tensión normal en un mismo punto es independiente de la posición transversal de la carga (suponiendo, por sencillez, despreciable el efecto de las tensiones tangenciales). Por tanto, $\eta_2 / \eta_1 = 1{,}0$, de donde se deduciría, en este caso, que $\lambda_4 = 1{,}00062$. Generalizando este ejemplo para diferentes relaciones de intensidad y de peso, se llegaría a los valores de la Tabla 14.

Tabla 14 **Coeficiente λ_4 para viga cajón y tablero con dos carriles en el mismo sentido, considerando $\eta_2 / \eta_1 = 1$**

N_2 / N_1 [%]	Q_{m2} / Q_{m1} [%]			
	≤ 40	50	75	100
5	1	1,00031	1,00236	1,00981
10	1	1,00062	1,00470	1,01924
15	1	1,00094	1,00702	1,02835

Tabla 14 continúa >

N_2 / N_1 [%]	Q_{m2} / Q_{m1} [%]			
	≤ 40	50	75	100
20	1	1,00125	1,00932	1,03714
25	1	1,00156	1,01159	1,04564
40	1	1,00249	1,01830	1,06961
50	1	1,00311	1,02268	1,08447
75	1	1,00464	1,03330	1,11843
100	1	1,00617	1,04351	1,14870

3.4.1.8 Coeficiente λ_{max}

Este coeficiente dependiente de la luz de cálculo, con iguales criterios que λ_1. El valor recomendado para flexión y cortante, que es el que adopta el Anejo Nacional, se recoge en la Figura 26 (Figura 9.6 de UNE-EN 1993-2).

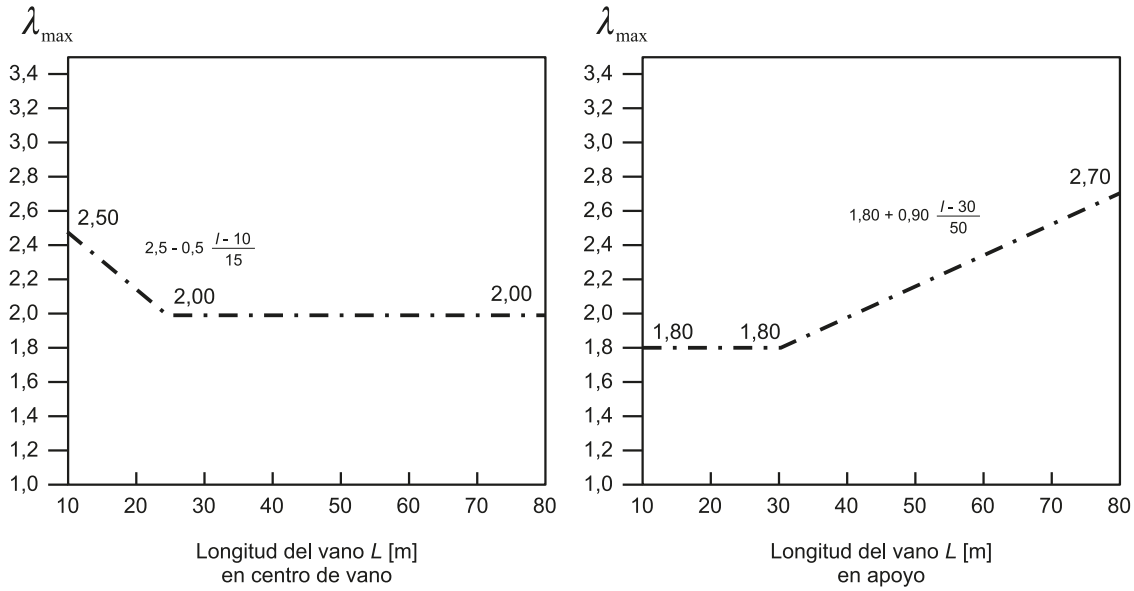


Figura 26 λ_{max} **para momentos en puentes de carretera (Figura 9.6 de UNE-EN 1993 2)**

3.4.2 Método Simplificado aplicado a pernos de soldadura automática

3.4.2.1 Comprobación a fatiga

El formato de seguridad a fatiga para pernos conectadores soldados a alas comprimidas (bajo la combinación de acciones cíclica acorde con las expresiones (6.68) y (6.69) de UNE-EN 1992 1 1) sigue la expresión (39) (expresión (6.55) de UNE-EN 1994-2).

$$\gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2} \leq \eta_E \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf,s}} \tag{39}$$

donde:

γ_{Ff} coeficiente parcial para las cargas de fatiga. El apartado 6.8.2(2) de UNE-EN 1994-2 remite a la Nota de 9.3(1) de UNE-EN 1993-2, adoptando el Anejo Nacional de éste último el valor recomendado de γ_{Ff} = 1,00

$\gamma_{Mf,s}$ coeficiente parcial para la resistencia a fatiga de los pernos conectadores (según 3.3.1). Según el apartado 6.8.2(1) de UNE-EN 1994-1-1, el valor recomendado es $\gamma_{Mf,s}$ = 1,00, que es el valor que adopta el Anejo Nacional

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

$\Delta\tau_C$ categoría del detalle (vástago del perno), 90 MPa según el detalle 10 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 (refrendado por 6.8.3(3) de UNE-EN 1994-2).

η_E coeficiente corrector de la categoría para hormigones con áridos ligeros, conforme a 11.3.2 de UNE-EN 1992-1-1. En el caso de empleo de hormigones sin áridos ligeros, como suele ser lo habitual, η_E = 1,0

Por otra parte, cuando la chapa de acero a la que se halla soldado el conectador está sometida a tracción (bajo la combinación de acciones acorde con 6.8.3 de UNE-EN 1992-1-1), será preciso evaluar la interacción entre la carrera de tensión normal en la chapa y la de tensión tangencial en el perno conforme a la expresión (40) (expresión (6.56) de UNE-EN 1994-2).

$$\frac{\gamma_{Ff}\ \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}} + \frac{\gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2}}{\eta_E \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf,s}}} \leq 1{,}3 \tag{40}$$

donde los términos tienen el significado de las expresiones precedentes.

Y además se debe verificar la platabanda de forma independiente según la expresión (28) y el perno conectador según la expresión (39), donde la componente de tensión normal es la correspondiente a la platabanda y la tangencial, la del perno (adviértase la diferencia en los coeficientes parciales), con los significados antes explicados. De acuerdo con el detalle 9 de

la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, la categoría para una platabanda con un perno soldado a ella es de 80 MPa.

La expresión (40) ha de verificarse para la carrera de cálculo de tensión normal en la chapa de acero combinada con la carrera de tensión tangencial concomitante en el perno, así como para la carrera de tensión tangencial de cálculo en el perno combinada con la carrera concomitante de tensión normal en la platabanda. Siempre será conservador emplear simultáneamente las carreras de cálculo en ambos elementos.

3.4.2.2 Carreras de tensión

UNE-EN 1994-2 establece en 6.8.6.2(1) que la carrera nominal de tensiones en los pernos conectadores será la oscilación de tensión tangencial en el perno tomando como sección resistente la correspondiente al diámetro nominal del vástago (área por unidad de longitud) y como solicitación el esfuerzo rasante (fuerza por unidad de longitud) calculado conforme a 3.3.3.

Valores de cálculo de las carreras de tensión nominal

Para pernos conectadores el valor de cálculo para las carreras de tensión nominal (para dos millones de ciclos) se deduce a partir de la expresión (41) (apartado 6.8.6.2(1) de UNE-EN 1994-2).

$$\gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2} = \lambda_v\ \Delta\tau(\gamma_{Ff}\ Q_k) \tag{41}$$

donde:

γ_{Ff} coeficiente parcial de la carrera de tensión equivalente $\Delta\tau_E$, según UNE-EN 1993-2. El Anejo Nacional adopta –según 9.3(1)– el valor recomendado, $\gamma_{Ff} = 1{,}00$

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

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

λ_v coeficiente de daño equivalente que pretende convertir la carrera causada por la carga tipo, $\Delta\tau(\gamma_{Ff}\ Q_k)$, en otra de amplitud constante que, aplicada 2 millones ciclos, provoque el mismo daño que el tráfico (u otra solicitación) real a lo largo de la vida útil de la estructura. Este coeficiente depende del espectro y de la pendiente m de la curva de resistencia a fatiga

3.4.2.3 Coeficientes de daño equivalente λ_v

En el caso de los pernos conectadores el coeficiente de daño equivalente λ_v, que engloba la influencia de la luz, el volumen y tipo de tráfico, la vida útil del puente y la existencia de

vehículos pesados en los carriles adicionales, se define según la expresión (42) (apartado 6.8.6.2 (3) de UNE-EN 1994-2).

$$\lambda_v = \lambda_{v,1} \times \lambda_{v,2} \times \lambda_{v,3} \times \lambda_{v,4} \tag{42}$$

donde:

- $\lambda_{v,1}$ coeficiente por daño del tráfico en función de la longitud y forma de la línea o superficie de influencia crítica
- $\lambda_{v,2}$ coeficiente de intensidad de tráfico
- $\lambda_{v,3}$ coeficiente de vida útil
- $\lambda_{v,4}$ coeficiente por tráfico en carriles adicionales al carril principal de tráfico pesado

UNE-EN 1994-2 no plantea la utilización de un coeficiente λ_{max} en el caso de pernos conectadores.

Hay que señalar que la validez de estos coeficientes (y, por tanto, del Método Simplificado) aplicado a pernos conectadores se restringe a puentes mixtos de luz inferior a 100 metros.

A continuación se trata el significado e hipótesis de trabajo de cada factor en el ámbito de los puentes de carretera. Los valores de los coeficientes de daño equivalente son parámetros de determinación nacional y el Anejo Nacional adopta en todos los casos los valores recomendados.

Coeficiente $\lambda_{v,1}$

$\lambda_{v,1}$ es el coeficiente de daño por tráfico en función de la longitud de la línea o superficie de influencia critica. Este coeficiente pretende considerar la actuación de varias carreras inferiores a la pésima pero también susceptibles de inducir daño por fatiga. En el caso de los pernos conectadores de puentes de carretera, UNE-EN 1994-2 define en 6.8.6.2(4) que para el coeficiente $\lambda_{v,1}$ se debe tomar el valor de 1,55 para vanos de hasta 100 metros.

Coeficiente $\lambda_{v,2}$

$\lambda_{v,2}$ es el coeficiente de intensidad de tráfico. Este coeficiente pretende expresar el daño causado por los vehículos pesados que realmente van a circular por la estructura en términos del provocado por el tráfico pesado tipo, definido como un camión de 480 kN a razón de 500.000 pasos al año. Se trata, por tanto, de un factor de valor desconocido mientras no se cuente con información detallada sobre la composición e intensidad de los vehículos que atraviesan el puente.

El apartado 6.8.6.2(4) de UNE-EN 1994-2 indica que $\lambda_{v,2}$ se debe obtener de acuerdo con 9.5.2(3) y 9.5.2(4) de UNE-EN 1993-2, aplicando las mismas expresiones que para chapas de acero, pero empleando los exponentes 8 y 1/8 en lugar de los indicados para considerar

la pendiente con m = 8, de la curva de resistencia a fatiga de los pernos conectadores con cabeza.

Las expresiones para la obtención de este coeficiente se presentan a continuación (expresiones (43) y (44)).

$$\lambda_{v,2} = \frac{Q_{m1}}{Q_0}\left(\frac{N_{obs}}{N_0}\right)^{1/8} \tag{43}$$

donde:

Q_{m1} carga del vehículo pesado medio [kN], en términos de daño. Su determinación se deduce mediante la expresión (44), recogida en 9.5.2(3) de UNE-EN 1993-2 (equivalente a la expresión (36) pero con m = 8).

$$Q_{m1} = \left(\frac{\sum_i n_i Q_i^8}{\sum_i n_i}\right)^{1/8} \tag{44}$$

Q_0 carga del vehículo pesado tipo, coincidente con el FLM3, es decir, 480 kN

N_{obs} intensidad media anual del tráfico pesado de la vía (medida, estimada o, a falta de mejor información, la de la Tabla 4 según la categoría de la vía)

N_0 intensidad media anual del tráfico tipo, $0{,}5 \cdot 10^6$ vehículos/año

Coeficiente $\lambda_{v,3}$

El coeficiente $\lambda_{v,3}$ es el de vida útil. Convierte, en términos de tensión, el daño del tráfico tipo, referido a 100 años, para cualquier otra vida útil t_{Ld}, expresada en años.

El apartado 6.8.6.2(4) de UNE-EN 1994-2 indica que $\lambda_{v,3}$ se debe obtener de acuerdo con 9.5.2(5) de UNE-EN 1993-2, pero empleando el exponente 1/8 en lugar de 1/5, según la expresión (45).

$$\lambda_{v,3} = \left(\frac{t_{Ld}}{100}\right)^{1/8} \tag{45}$$

La Tabla 15 recoge valores de $\lambda_{v,3}$ para diferentes vidas útiles de la estructura.

Tabla 15 **Valores del coeficiente $\lambda_{v,3}$ para pernos conectadores**

Vida útil en años (t_{Ld})	50	60	70	80	90	100	120
Coeficiente $\lambda_{v,3}$ (m = 8)	0,917	0,938	0,956	0,972	0,987	1,000	1,023

La vida útil de proyecto para puentes t_{Ld} la establece el Anejo Nacional en 100 años (valor recomendado), y en ese caso $\lambda_{v,3}$ = 1,00.

Coeficiente $\lambda_{v,4}$

$\lambda_{v,4}$ es el coeficiente que tiene en cuenta el daño a fatiga causado por la circulación en carriles adicionales al principal de tráfico pesado, al cual están referidos los coeficientes $\lambda_{v,1}$ y $\lambda_{v,2}$. Su desarrollo se basa en equiparación de daños y conversión de dicho daño en un coeficiente corrector de la tensión.

El apartado 6.8.6.2(4) de UNE-EN 1994-2 indica que $\lambda_{v,4}$ se debe obtener de acuerdo 9.5.2(6) de UNE-EN 1993-2 pero empleando los exponentes 8 y 1/8 en lugar de 5 y 1/5, según la expresión (46).

$$\lambda_{v,4} = \left(1 + \frac{N_2}{N_1}\left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^8 + \frac{N_3}{N_1}\left(\frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^8 + \cdots + \frac{N_k}{N_1}\left(\frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}}\right)^8\right)^{1/8} \tag{46}$$

donde:

k número de carriles con tráfico de vehículos pesados ($k \geq 2$). Si hay solo un carril de vehículos pesados $\lambda_{v,4}$ = 1

Q_{mj} peso del vehículo pesado medio [kN], en términos de daño, que circula por el carril j. Su determinación se desarrolla en la expresión (44).

N_j intensidad media anual de tráfico pesado en el carril j

η_j valor de la línea de influencia de la máxima carrera de tensión en el detalle estudiado para el paso de una carga unitaria centrada en el carril j

3.4.3 Método Simplificado aplicado a armaduras activas o pasivas

3.4.3.1 Comprobación a fatiga

El formato de seguridad a fatiga para armaduras activas y pasivas, y sus dispositivos de empalme, sigue la expresión (47) (expresión (6.71) de UNE-EN 1992-1-1).

$$\gamma_{F,fat}\,\Delta\sigma_{S,equ}(N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{s,fat}} \tag{47}$$

donde:

$\gamma_{F,fat}$ coeficiente parcial para acciones de fatiga. El Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1 adopta en 2.4.2.3(1) el valor recomendado de $\gamma_{F,fat}$ = 1,00

$\gamma_{s,fat}$	coeficiente parcial para la resistencia a fatiga de las armaduras activas y pasivas, de valor $\gamma_{s,fat}$ = 1,15 acorde con el Anejo Nacional (valor para la situación persistente de la tabla 2.1N de UNE-EN 1992-1-1).
$\gamma_{F,fat}\ \Delta\sigma_{S,equ}(N^*)$	valor de cálculo de la carrera de tensión normal equivalente, referida a N^* ciclos
$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$	resistencia a fatiga de la armadura o del dispositivo de empalme, referida a N^* ciclos. Este valor marca el punto de cambio de pendiente en la curva de fatiga de las armaduras, como refleja la Figura 21
N^*	Número de ciclos resistente para el que se produce el cambio de pendiente en la curva de fatiga de las armaduras, y cuyo valor se encuentra en la Tabla 6 y Tabla 7 de 3.3.2.3 (Tablas 6.3N y 6.4N de UNE-EN 1992-1-1).

Analizando la Tabla 6 de 3.3.2.3, se aprecia cómo los dispositivos de empalme de las armaduras pasivas constituyen el punto más débil de la armadura, con una resistencia a fatiga ($\Delta\sigma_{Rsk}\ (N^* = 107)$ = 35 MPa) de casi la quinta parte que las barras rectas ($\Delta\sigma_{Rsk}\ (N^* = 106)$ = 162,5 MPa).

3.4.3.2 Carreras de tensión

El Anejo NN de UNE-EN 1992-2 indica en NN.2.1, que los valores allí indicados son únicamente aplicables con el tren de cargas de fatiga FLM3 modificado de UNE-EN 1991-2, cuyas cargas por eje, para el cálculo de los rangos de tensión de daño equivalente para la comprobación del acero, deben multiplicarse por los siguientes coeficientes:

1,75 para comprobación en apoyos intermedios de puentes continuos

1,40 para comprobación en otras zonas

UNE-EN 1992-1-1 indica en 6.8.2 que el cálculo de las tensiones debe basarse en la hipótesis de secciones transversales fisuradas, despreciando la capacidad resistente del hormigón a tracción, pero cumpliendo la compatibilidad de las deformaciones unitarias. Además, se establece que el efecto de los distintos comportamientos de adherencia de armaduras activas y pasivas se debe considerar aumentando el rango de tensiones en la armadura pasiva calculada bajo la hipótesis de una adherencia perfecta, mediante el factor η que se obtiene de la expresión (48) (expresión (6.64) de UNE-EN 1992-1-1).

$$\eta = \frac{A_S + A_P}{A_S + A_P\sqrt{\xi\left(\phi_S/\phi_P\right)}} \tag{48}$$

donde:

A_S área de armadura pasiva

A_P área de armadura activa

ϕ_S mayor diámetro de la armadura pasiva

ϕ_P diámetro equivalente de la armadura activa, siendo:

$\phi_P = 1{,}6\sqrt{A_P}$ para grupos de barras

$\phi_P = 1{,}75\phi_{Wire}$ para cordones de 7 alambres, donde ϕ_{Wire} es el diámetro del alambre

$\phi_P = 1{,}20\phi_{Wire}$ para cordones de 3 alambres, donde ϕ_{Wire} es el diámetro del alambre

ξ es la relación entre la resistencia de adherencia de las armaduras activas adherentes y el acero corrugado en hormigón. El valor queda sometido al Documento de Idoneidad Técnica Europeo (DITE)[2] correspondiente. En su ausencia, se pueden usar los valores indicados en la Tabla 16 (Tabla 6.2 de UNE-EN 1992-1-1).

Tabla 16 **Relación de resistencias de adherencia ξ entre la armadura activa y la pasiva (Tabla 6.2 de UNE-EN 1992-1-1)**

Armadura activa	ξ		
	pretesa	adherente, postesa	
		< C50/60	≥ C70/85
Barras y alambres lisos	No aplicable	0,3	0,15
Cordones	0,6	0,5	0,25
Alambres grafilados	0,7	0,6	0,3
Barras corrugadas	0,8	0,7	0,35

NOTA: Se puede interpolar para obtener los valores intermedios entre C50/60 y C70/85

Valores de cálculo de las carreras de tensión nominal

La comprobación de la seguridad a fatiga de un detalle implica la obtención de una carrera de tensión que, en función del elemento analizado, ha de obtenerse de una determinada

2 A partir del 1 de julio de 2013, y de acuerdo con el Reglamento europeo de productos de la construcción (UE) 305/2011, los DITE quedan sustituidos por otro documento, la Evaluación Técnica Europea (ETE).

manera. Las carreras de tensión obtenidas directamente del paso del vehículo de fatiga empleado se designan como carreras nominales. Esas mismas carreras, tras ser debidamente calibradas y afectadas del coeficiente parcial para la resistencia a fatiga (en función del tipo de estructura, tráfico, etc.), son directamente comparables con la categoría del detalle en análisis y se designan como carreras de cálculo.

Para armaduras activas o pasivas en puentes de carretera el valor de cálculo de la tensión nominal (para N^* ciclos) se obtiene conforme a la expresión (49), de acuerdo con el Anejo NN de UNE-EN 1992-2.

$$\gamma_{F,fat}\,\Delta\sigma_{S,equ}(N^*) = \lambda_s\,\Delta\sigma_{s,Ec}(\gamma_{F,fat}\,Q_k) \tag{49}$$

donde:

$\gamma_{F,fat}$ coeficiente parcial para acciones de fatiga. El Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1 adopta en 2.4.2.3(1) el valor recomendado de $\gamma_{F,fat}$ = 1,00

$\gamma_{F,fat}\,\Delta\sigma_{S,equ}(N^*)$ valor de cálculo de la carrera de tensión normal equivalente, referida a N^* ciclos

$\Delta\sigma_{s,Ec}(\gamma_{F,fat}\,Q_k)$ carrera de tensión normal en la armadura bajo la acción de la carga de fatiga de cálculo, $\gamma_{F,fat}\,Q_k$. Este rango de tensiones es el originado por el tren de cargas de fatiga FLM3 modificado, según se ha señalado más arriba

λ_s coeficiente de daño equivalente, que pretende convertir la carrera causada por la carga tipo, $\Delta\sigma_{s,Ec}(\gamma_{F,fat}\,Q_k)$, en otra de amplitud constante que, aplicada N^* ciclos, provoque el mismo daño que el tráfico (u otra solicitación) real a lo largo de la vida útil de la estructura

3.4.3.3 Coeficientes de daño equivalente λ_s

Para armaduras pasivas y activas, λ_s, que engloba la influencia de la luz, el volumen y tipo de tráfico, la vida útil del puente, la influencia del tráfico pesado en los carriles adicionales y la rugosidad superficial, se calcula según la expresión (50) (expresión (NN.102) de UNE-EN 1992-2).

$$\lambda_s = \phi_{fat}\cdot\lambda_{s,1}\cdot\lambda_{s,2}\cdot\lambda_{s,3}\cdot\lambda_{s,4} \tag{50}$$

donde:

ϕ_{fat} coeficiente de impacto de daño equivalente, función de la rugosidad superficial (definido en el anexo B de UNE-EN 1991-2).

$\lambda_{s,1}$ coeficiente que considera el tipo de elemento (por ejemplo, viga continua) y tiene en cuenta el daño que produce el tráfico dependiendo de la longitud crítica de la línea o el área de influencia

$\lambda_{s,2}$ coeficiente que considera el volumen del tráfico

$\lambda_{s,3}$ coeficiente que considera la vida útil del puente

$\lambda_{s,4}$ coeficiente que se aplica cuando el elemento estructural está cargado en más de un carril

Al igual que en el caso de pernos conectadores, UNE-EN 1992-2 no plantea la utilización de un coeficiente λ_{max} en el caso de armadura activa y pasiva.

Hay que señalar que la validez de estos coeficientes (y, por tanto, del Método Simplificado) aplicado a armaduras se restringe a puentes mixtos de luz inferior a 100 metros.

A continuación, se trata el significado e hipótesis de trabajo de cada coeficiente en el ámbito de los puentes de carretera. Los valores de los coeficientes de daño equivalente son parámetros de determinación nacional y corresponden, en todos los casos, a los valores recomendados.

Coeficiente $\lambda_{s,1}$

$\lambda_{s,1}$ es el coeficiente de daño por tráfico en función de la longitud de la línea o superficie de influencia critica. Este coeficiente pretende considerar la actuación de varias carreras inferiores a la pésima pero también susceptibles de inducir daño por fatiga. Para la armadura activa y pasiva es necesario acudir a las figuras NN.1 y NN.2 de UNE-EN 1992-2, reproducidas en la Figura 27 y la Figura 28, respectivamente.

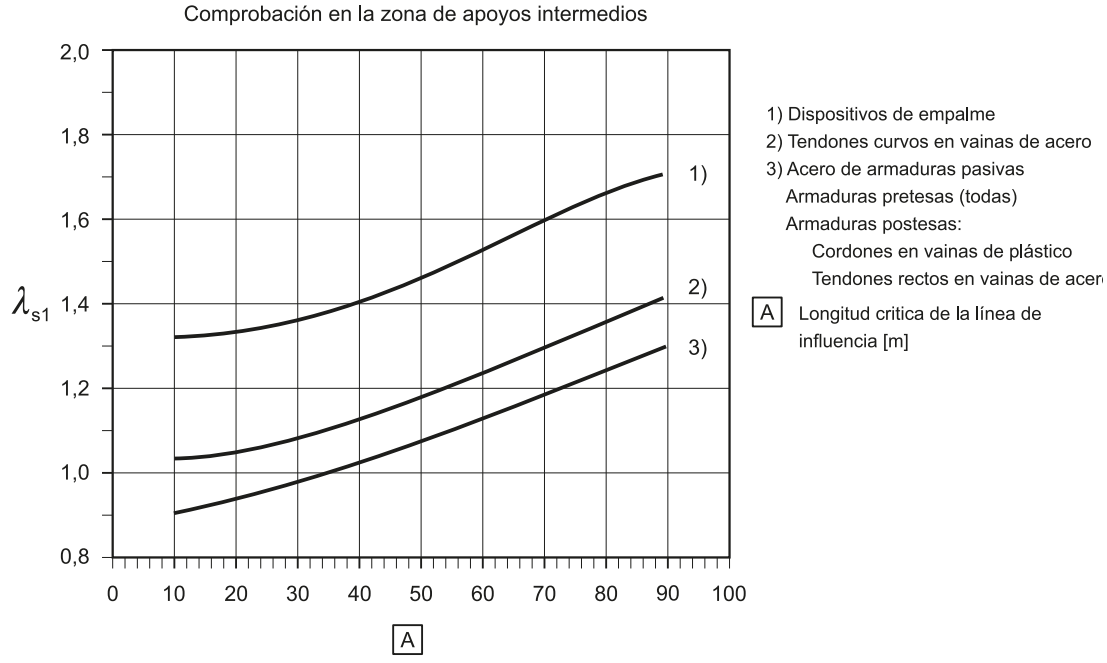


Figura 27 **Coeficiente $\lambda_{s,1}$ para la comprobación a fatiga en las zonas de apoyos intermedios (Figura NN.1 de UNE-EN 1992-2)**

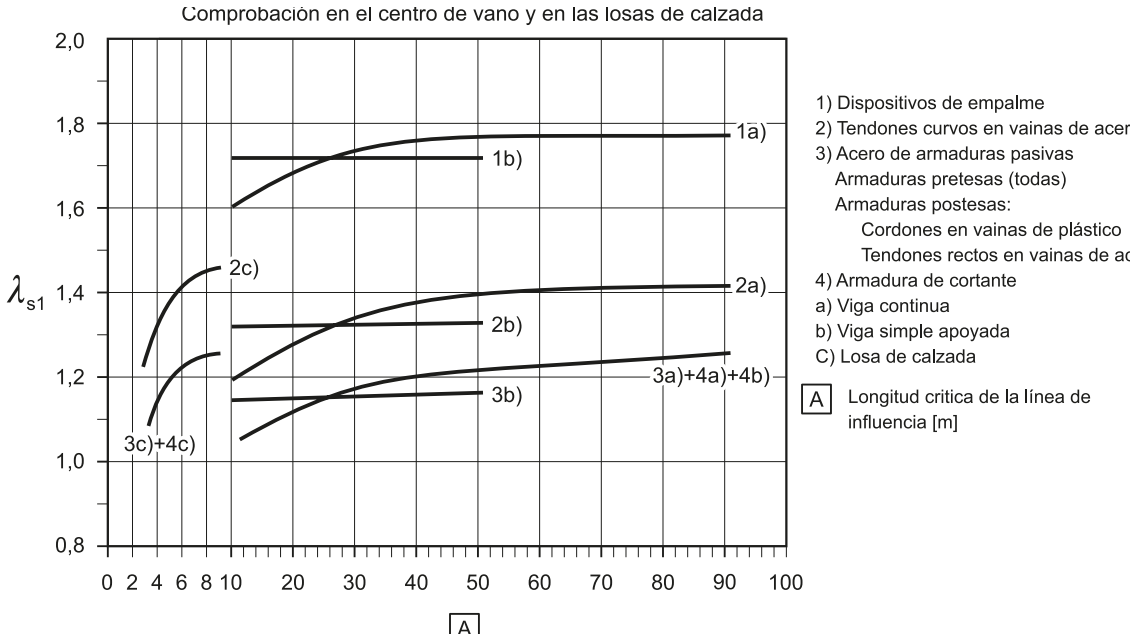


Figura 28 **Coeficiente $\lambda_{s,1}$ para la comprobación a fatiga en las zonas de centro de vano y para los elementos locales (Figura NN.2 de UNE-EN 1992-2)**

Coeficiente $\lambda_{s,2}$

$\lambda_{s,2}$ es el coeficiente de intensidad y tipo de tráfico. Este coeficiente pretende expresar el daño causado por los vehículos pesados que realmente van a circular por la estructura en términos del provocado por el tráfico pesado tipo. Se trata, por tanto, de un factor de valor desconocido mientras no se cuente con información detallada sobre la composición e intensidad de los vehículos que atraviesan el puente.

La expresión normativa es la de la expresión (51) (expresión (NN.103) incluida en el Anexo NN.2.1 de UNE-EN 1992-2).

$$\lambda_{S2} = \overline{Q} \sqrt[k_2]{\frac{N_{obs}}{2,0}} \tag{51}$$

donde:

$\overline{Q}$ coeficiente función del tipo de tráfico conforme a la Tabla 20 (tabla NN.1 de UNE-EN 1992-2).

N_{obs} intensidad media anual del tráfico pesado de la vía (medida, estimada o, a falta de mejor información, la de la Tabla 4 (Tabla 4.5(n) de UNE-EN 1991-2) según la categoría de la vía), expresada en millones de vehículos

k_2 exponente de la curva de fatiga para armadura pasiva, Tabla 6 (Tabla 6.3N de UNE-EN 1992-1-1) y Tabla 7 (Tabla 6.4N de UNE-EN 1992-1-1).

Tabla 17 **Coeficientes por tipo de tráfico (tabla NN.1 de UNE-EN 1992-2)**

Coeficiente $\overline{Q}$ para	Tipo de tráfico (véase la tabla 4.7 de UNE-EN 1991-2)		
	Larga distancia	Media distancia	Tráfico local
$k_2 = 5$	1,0	0,90	0,73
$k_2 = 7$	1,0	0,92	0,78
$k_2 = 9$	1,0	0,94	0,82

Coeficiente $\lambda_{s,3}$

El coeficiente $\lambda_{s,3}$ es el de vida útil. Convierte, en términos de tensión, el daño del tráfico tipo, referido a 100 años, para cualquier otra vida útil N_{Years} (equivalente a t_{Ld}). Su expresión es la de la expresión (52) (expresión (NN.104) incluida en NN.2.1 de UNE-EN 1992-2).

$$\lambda_{s,3} = \sqrt[k_2]{\frac{N_{Years}}{100}} \tag{52}$$

La Tabla 18 recoge valores de $\lambda_{s,3}$ para diferentes vidas útiles de la estructura.

Tabla 18 **Valores del coeficiente $\lambda_{s,3}$ en función de la vida útil ($k_2 = 9$)**

Vida útil en años (t_{Ld})	50	60	70	80	90	100	120
Coeficiente $\lambda_{s,3}$	0,926	0,945	0,961	0,976	0,988	1,000	1,020

La vida útil de proyecto para puentes t_{Ld} la establece el Anejo Nacional en 100 años (valor recomendado), y en ese caso $\lambda_{s,3}$ = 1,00.

Coeficiente $\lambda_{s,4}$

$\lambda_{s,4}$ es el coeficiente que tiene en cuenta el daño a fatiga causado por la circulación en carriles adicionales al principal de tráfico pesado, al cual están referidos los coeficientes $\lambda_{s,1}$ y $\lambda_{s,2}$. Su desarrollo se basa en equiparación de daños y conversión de dicho daño en un coeficiente corrector de la tensión.

En el caso del análisis a fatiga de armaduras activas y pasivas, la expresión (38) del coeficiente 4 se simplifica al tomar todos los cocientes $\eta_k Q_{mk} / \eta_1 Q_{m1}$ iguales a la unidad, resultando la expresión (53) (expresión NN.105 de UNE-EN 1992 2).

$$\lambda_{s,4} = \sqrt[k_2]{\frac{\Sigma N_{obs,i}}{N_{obs,1}}} \tag{53}$$

donde:

$N_{obs,i}$ es el número de vehículos pesados previstos al año en el carril i

$N_{obs,1}$ es el número de vehículos pesados previstos al año en el carril de vehículos lentos

3.4.4 Método Simplificado aplicado a cables y tirantes

En el caso de cables y tirantes, la UNE-EN 1993-1-11 remite a UNE-EN 1993-1-9 para materias de evaluación de fatiga no incluidas en la primera. De esta manera, la comprobación a fatiga de cables y tirantes será análoga a la del acero estructural (ver 3.4.1) teniendo en cuenta las curvas de fatiga del apartado 3.3.2.4.

3.5 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 explicada en 2.4.1. 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 (normativo) de UNE-EN 1993-1-9 y se describe con detalle en los apartados siguientes.

3.5.1 Definición de la composicion de tráfico

La definición de la composición de tráfico esperable implica la caracterización del tipo de vehículo (carga por eje y batallas), dato que es una incógnita dada la aleatoriedad del fenómeno. Se hace preciso definir un conjunto y reparto razonables de vehículos pesados tipo (enfoque del modelo de carga FLM5).

En cuanto a la IMD, a falta de información específica, se puede acudir a la Tabla 4 en combinación con el modelo de carga FLM4, o a los *Mapas de Tráfico del Ministerio de Fomento* y hacer las inferencias y proyecciones oportunas.

Además, se requiere elegir el carril de paseo esperable para cada vehículo tipo, siendo posible adoptar el carril virtual más desfavorable o emplear la distribución real de carriles de la calzada.

3.5.2 Histórico de tensiones

Tras la definición de las cargas representativas del tráfico real de la estructura, se realiza el paseo de cada vehículo tipo a la velocidad especificada, con cálculo dinámico, si se requiriese (ver 3.2.6), y se procede al almacenamiento de la historia de esfuerzos en los elementos de estudio.

La historia Figura 29 consiste en el registro continuo en el tiempo de los esfuerzos en una determinada sección de control a causa del paso cada vehículo.

a) Secuencia de procesos de carga: ciclo de cargas típico (repetida n veces a lo largo de la vida útil de proyecto)

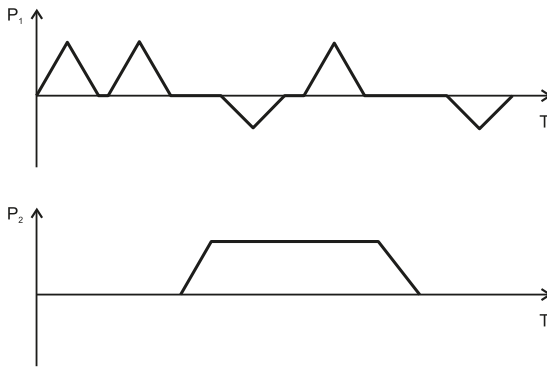


Figura 29 **Ejemplos de histórico de esfuerzos en una sección (Figura A.1a de UNE EN 1993-1-9)**

A partir del registro de esfuerzos y de las constantes estáticas de cada sección de estudio, se genera la historia de tensiones Figura 30, para el paso de todos los vehículos.

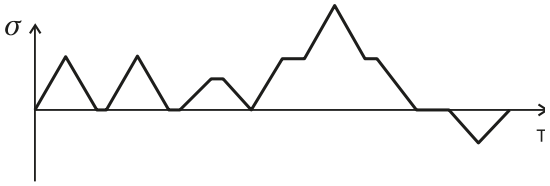
b) Historial de tensiones de un detalle constructivo	

Figura 30 **Ejemplo de histórico de tensiones en un detalle (Figura A.1b de UNE-EN 1993-1-9)**

3.5.3 Espectro de carreras de tensiones

Para el cálculo del daño en un elemento se hace precisa la conversión del histórico de tensiones en un espectro de tensiones. Esta conversión tiene como objetivo la transformación del registro continuo en un conjunto de eventos aislados y consiste en la depuración (aislamiento de los picos) de cada historia de tensiones para obtener carreras tensionales comparables (Figura 31). La normativa y la bibliografía especializada definen el concepto de carrera tensional comparable, así como la metodología disponible para su obtención.

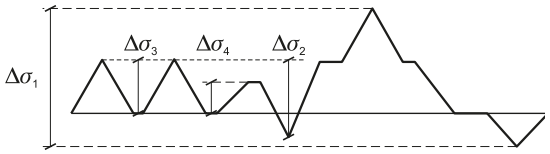
c) Conteo de ciclos (por ejemplo, con el método del depósito)	

Figura 31 **Recuento de carreras de tensión de fatiga (Figura A.1c 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 (ver apartados 3.5.3.1 y 3.5.3.2), 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 (Figura 32), asociado a un vehículo pesado concreto, y el número de veces que va a pasar por la estructura en toda la vida útil (IMD_p 365 t_{Ld}), se obtiene el número de ciclos de fatiga para cada escalón. Obsérvese que, del lado de la seguridad y por comodidad operativa, es habitual asignar a todas las carreras de tensión dentro de un mismo escalón el valor del máximo.

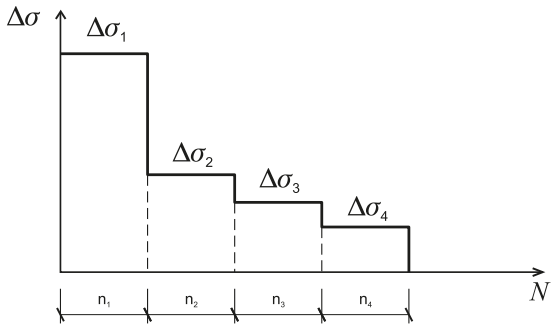
c) Espectro de carreras de tensión	

Figura 32 **Espectro de carreras de tensión de fatiga (Figura A.1d 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 seguidamente.

3.5.3.1 Método del depósito

El método del depósito es didáctico y visual[3], aunque difícilmente programable y de complicada aplicación en historias de tensiones largas. Consiste en la asimilación de la historia de picos de tensión a un embalse lleno de agua que comienza a desaguar por el punto más bajo (punto 4 de la Figura 33). Una vez vaciado, quedarán nuevos embalses, que habrá que volver a desaguar, y así sucesivamente, siempre desde el siguiente punto bajo (Punto 2 $\rightarrow$ Punto 6 $\rightarrow$ Punto 8). Las profundidades de cada embalse resultante tras un desagüe son las carreras de tensión de fatiga (carreras de tensión $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ y $\Delta\sigma_4$ de la Figura 33). Lógicamente, la profundidad del embalse inicial coincide con la carrera máxima.

3 Para visualizar mejor el método del depósito es conveniente representar dos eventos seguidos.

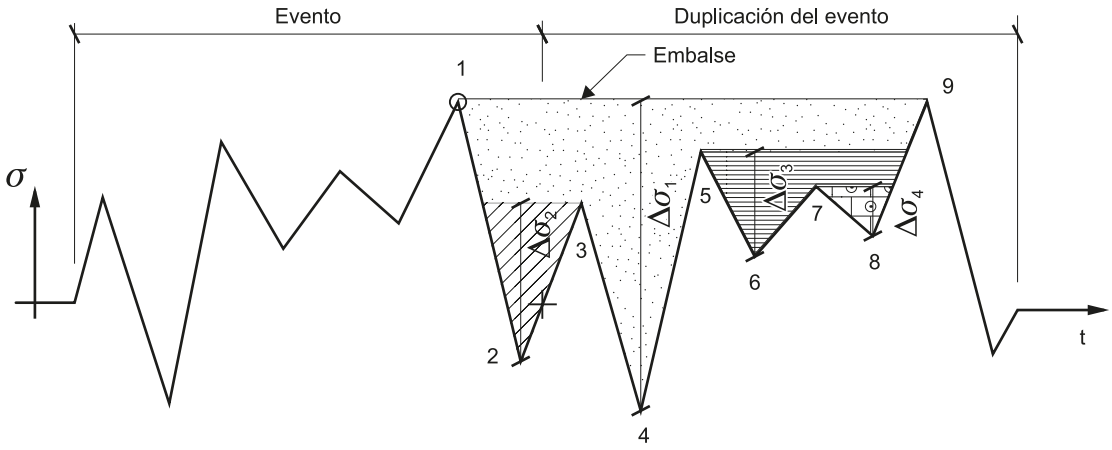


Figura 33 **Método del depósito**

3.5.3.2 Método de la gota de agua

El método de la gota de agua, desarrollado por Matsuishi y Endo, es mucho más fácilmente programable y su explicación también resulta visual: si se gira 90º la historia de picos de tensión en el detalle de estudio, de manera que el eje de tiempo apunte hacia abajo, se obtiene una línea similar a los aleros de una pagoda china. Si una gota de agua fuera cayendo desde el punto más alto de la gráfica y bifurcándose en cada pico, se obtendría una serie de regueros entre cada dos picos sobre los que pueden caer gotas de aleros superiores. Los criterios para decidir cuándo un reguero se interrumpe y converge con la gota que cae sobre él o al revés son (ver Figura 34):

- Al llegar la corriente que corre por un faldón al extremo de éste (un extremo de semiciclo) cae verticalmente, pudiendo incidir sobre otro faldón situado más abajo o quedar cortada (es decir, llega al suelo).
- Admitiremos que la corriente de agua queda cortada cuando no hay debajo un faldón de anchura suficiente sobre el que caer o cuando, habiéndolo, el faldón receptor tiene su origen (punto más alto) más a la izquierda que el faldón donante si éste transcurre de izquierda a derecha o más a la derecha si discurre de derecha a izquierda
- Se considera que cada corriente es un semiciclo de variación de tensión igual a la diferencia de las tensiones de sus extremos, puntos de origen y final de la corriente de agua. Como ejemplo de un semiciclo tenemos E-G o H-L
- Las interrupciones de corriente se consideran como ciclos completos. Como ejemplo tenemos B-C (cuya corriente no puede seguir ya que el punto E se encuentra más a la izquierda de B, punto inicial. En este caso, la amplitud de tensión, $\Delta\sigma$, sería igual a σ_C-σ_B) o H-J (cuya corriente no puede seguir ya que el punto L se encuentra más a la derecha de H, punto inicial. En este caso $\Delta\sigma$, sería igual a σ_H-σ_J).

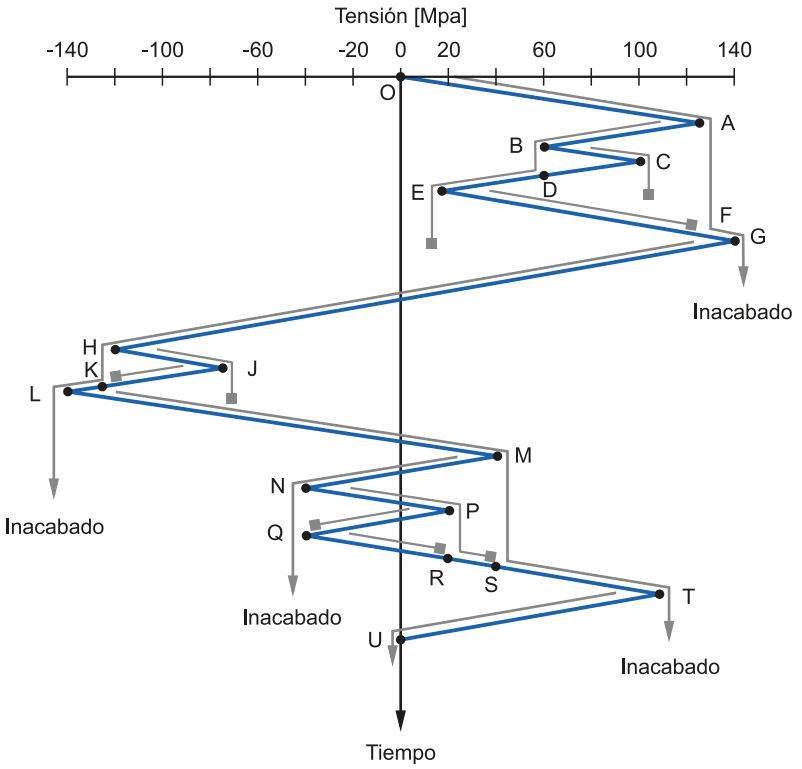


Figura 34 **Método de la gota de agua**

Tras la aplicación de las condiciones expuestas anteriormente, se obtiene un diagrama como el incluido en la Figura 35. En esta figura se presentan ejemplos de algunos de los semiciclos y ciclos extraídos del histórico de tensiones de la Figura 34, aplicando el método de la gota de agua.

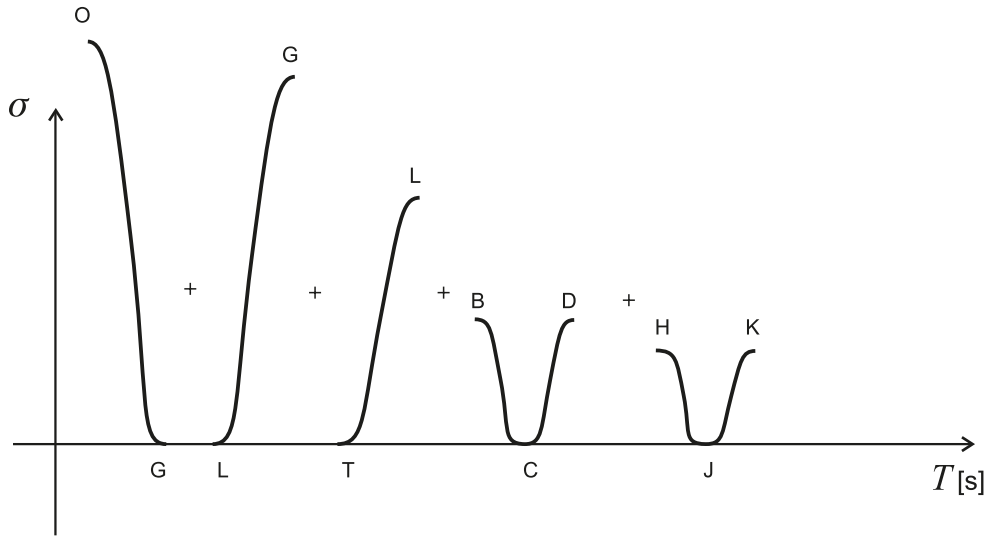


Figura 35 **Carreras de tensión extraídas por aplicación del método de la gota de agua**

A efectos de programación, suele emplearse el algoritmo desarrollado por Fryba (1996) que se detalla a continuación:

- En la historia de picos de tensión se van haciendo cuaternas comenzando por el primer punto del registro. Si los dos puntos centrales de la cuaterna están comprendidos en la banda definida por los dos puntos extremos, el salto de tensión entre los dos puntos centrales se cuenta como un ciclo completo de tensión (Figura 36). Es decir, si i - 1, i, i + 1 e i + 2 son los subíndices correspondientes a una cuaterna, debe cumplirse que:

$$\sigma_{i-1} \leq \sigma_{i+1} < \sigma_i \leq \sigma_{i+2} \quad \text{o bien} \quad \sigma_{i-1} \geq \sigma_{i+1} > \sigma_i \geq \sigma_{i+2}$$

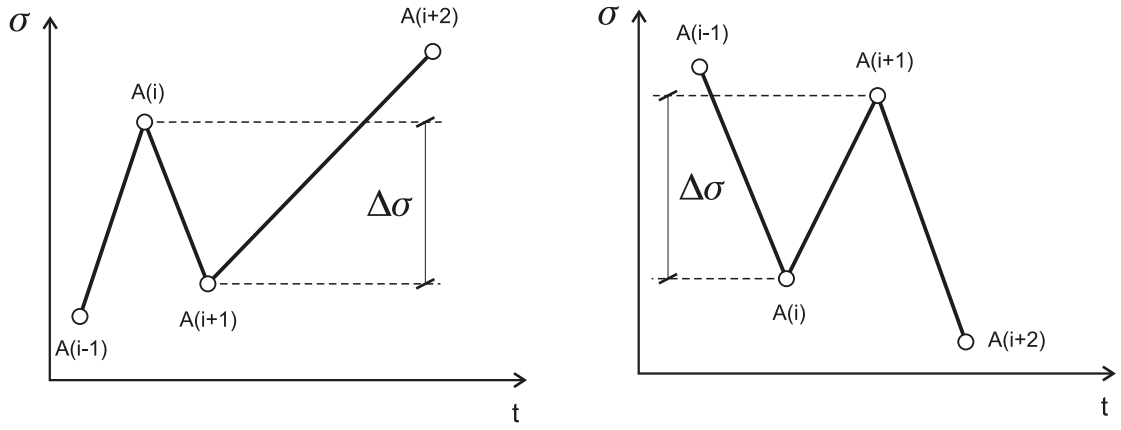


Figura 36 **Conteo de ciclos completos de fatiga**

Si no se cumple la condición anterior, se forma una nueva cuaterna pasando al siguiente punto. Si se cumple, se eliminan esos dos puntos del registro y se reinicia el proceso.

- El salto de tensión entre cada par de puntos eliminados se computa como un ciclo completo de fatiga
- Se procede de forma repetitiva hasta que sea imposible eliminar ninguna pareja de puntos
- Con el diagrama resultante, la diferencia entre cada dos puntos consecutivos se computa como medio ciclo de fatiga (Figura 37).

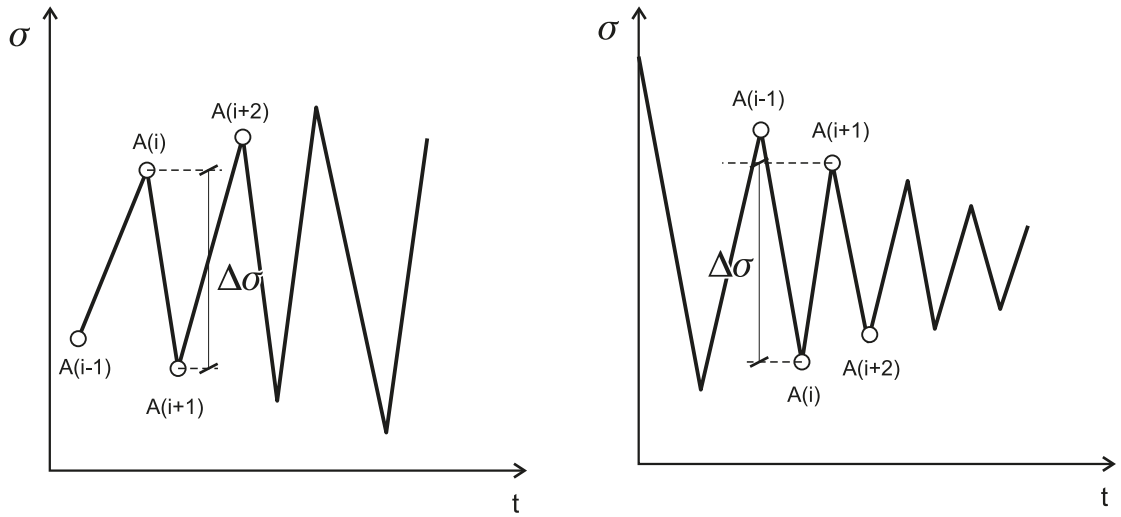


Figura 37 **Conteo de medios ciclos de fatiga**

3.5.4 Cálculo del daño

Conociendo el espectro de carreras de tensiones (número de ciclos de aplicación correspondiente a cada carrera de tensión –Figura 32–), queda determinar el correspondiente número de ciclos hasta rotura por fatiga para cada carrera, mediante las curvas S-N del detalle (Figura 38).

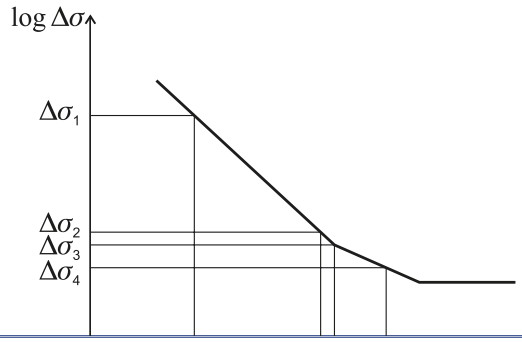
e) Número de ciclos de rotura	

Figura 38 **Obtención de los ciclos resistentes para cada carrera de tensión (Figura A.1e de UNE-EN 1993-1-9)**

El cálculo del 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 (12), que se vuelve a reproducir a continuación.

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

De acuerdo con la regla de Palmgren-Miner (Figura 39), 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.

f) Acumulación de daño (regla de Palmgren-Miner)	$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \le D_d$

Figura 39 **Daño acumulado (Figura A.1f de UNE-EN 1993-1-9)**

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 (54) (expresión (A.1) de UNE EN 1993-1-9).

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \qquad (54)$$

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 $\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_i$ de la i-ésima carrera de tensiones en la curva de resistencia a fatiga minorada del detalle $(\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}) - N_R$

La expresión (54) del daño por fatiga puede plantearse, de acuerdo con la expresión (20), en función de los distintos valores de las carreras de tensión asociadas al espectro, de la siguiente forma:

$$D_d = \frac{\sum_i \left(\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_i\right)^3 n_{Ei}}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}\right)^3 5\cdot 10^6} + \frac{\sum_j \left(\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_j\right)^5 n_{Ej}}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}\right)^5 5\cdot 10^6} \qquad (55)$$

$$\text{para}: \quad \gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_i > \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}$$

$$\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} > \gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_j > \frac{\Delta\sigma_L}{\gamma_{Mf}}$$

Si el daño así evaluado es menor que el valor objetivo (inferior a la unidad), el detalle planteado con su categoría asociada cumple el Estado Límite Último de Fatiga, reflejado en las expresiones (56) y (57) (acorde con las expresiones (A.2) y (A.3) de UNE-EN 1993-1-9).

$$D_d \leq 1 \qquad (56)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} \leq \sqrt[m]{D_d}\,\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad \text{con } m=3 \qquad (57)$$

donde:

D_d daño acumulado de cálculo

$\Delta\sigma_{E,2}$ carrera de tensión normal equivalente

$\Delta\sigma_C$ categoría del detalle

γ_{Ff} coeficiente parcial de la carrera de tensión equivalente $\Delta\sigma_{E,2}$. El Anejo Nacional de UNE-EN 1993-2 adopta el valor recomendado γ_{Ff} = 1,00

γ_{Mf} coeficiente parcial para la resistencia a fatiga, según el apartado 3.3.1

3.6 Análisis de los dos métodos

Como ya se indicó en 2.4.1, el Método del Daño Acumulado es mucho más general y riguroso que el Método Simplificado. De hecho, es aplicable a cualquier puente o elemento metálico, ya sea principal o secundario. Asimismo, su generalidad permite calibrar el Método Simplificado. De hecho, la formulación de los coeficientes λ_1, λ_2 y λ_{max} se basa en el MDA. Como contraprestación, el enfoque de cada método es diferente y tiene un uso preferente, aunque no excluyente, extractándose las siguientes indicaciones:

- El MS es más recomendable para el dimensionamiento de elementos principales en puentes, ya que la obtención de tensiones en cada punto asociadas al vehículo FLM3 es sencilla, así como la comparación con la categoría del detalle (cuya elección y concepción es responsabilidad del proyectista). Efectuada la comparación y, en caso de incumplimiento, es fácil deducir, por pura proporcionalidad, cuanto se deben aumentar los espesores de las chapas para limitar la carrera máxima causada por el tráfico
- A la inversa, el MS no permite deducir fácilmente la vida útil real del detalle analizado, en el caso de detalles ya ejecutados. Es decir, si la carrera equivalente de tensiones es mayor que la categoría del detalle (afectada por su coeficiente parcial), no se puede estimar con certeza la vida hasta el fallo o el cambio de IMD para garantizar la seguridad del detalle. Ello se debe al uso de fórmulas no necesariamente conservadoras y a conversiones no lineales
- Por su parte, el MDA es más recomendable para la verificación afinada de detalles cuya categoría es conocida, estén ejecutados o no, o de aquellos que, conforme al MS, incumplen por muy poco margen. Además, el MDA es compatible con carreras de tensión superiores a la categoría del detalle. Asimismo, elimina incertidumbres acerca de la influencia de la IMD o la luz
- Por el contrario, el MDA no permite deducir fácilmente cuál ha de ser la categoría mínima exigible de un detalle ni cómo han de variar las propiedades de la sección resistente para asegurar el cumplimiento para una categoría dada, sino que se basa en prueba y error debido a la no linealidad de las curvas S–N. En 3.6.2 se proporcionarán reglas prácticas orientativas para agilizar el dimensionamiento mediante el MDA

3.6.1 Conversión de daño a carrera de tensión equivalente

Rescatando el desarrollo de carrera de tensión equivalente de 2.4.2, es posible establecer una correlación entre el Método del Daño Acumulado y el Método Simplificado de la normativa. Conocido el daño en un detalle causado por el paso de una determinada composición de tráfico con una IMD, se puede deducir una categoría equivalente del detalle, es decir, un valor único de carrera de tensión que cause el mismo daño en 2 millones de ciclos aplicados. Este valor de carrera equivalente es el que se debe comparar con la categoría real del detalle (afectada por su coeficiente parcial). Así, si se supone una categoría concreta para un detalle y se analiza su seguridad por el MDA, se puede ver que, si el daño calculado es superior a 1, la categoría equivalente resultante será superior a la supuesta al inicio del análisis, es decir, el detalle no cumple las condiciones de seguridad. Al revés, para un daño inferior a la unidad, la categoría equivalente será inferior a la supuesta, cumpliéndose así las condiciones de seguridad.

Visto así, parece que existe una relación directa y biunívoca entre ambos métodos y que sería posible deducir analíticamente una carrera equivalente estricta para cada detalle en función del daño causado por el tráfico circulante y, con ella, un coeficiente λ exacto. Sin embargo, no es así; si se suponen dos categorías para un mismo detalle y se aborda su análisis por el MDA, los valores resultantes de daño conducirán a carreras equivalentes distintas. Esto se debe a la no linealidad de las curvas S–N, por la cual, a igualdad de oscilaciones tensionales, suponer una categoría u otra puede hacer que las carreras de tensión de los diferentes vehículos caigan en dominios diferentes (exponente m). Es decir, en función de la categoría inicialmente supuesta, una misma carrera puede hallarse en la región de m = 3 (daño acelerado), m = 5 (daño moderado) o $m = \infty$ (sin daño). Esto pone de relieve la limitación de las fórmulas de λ_1 y λ_2 en el MS.

3.6.2 Dimensionamiento de secciones

Partiendo de una determinada sección analizada, bien por el Método Simplificado o por el Método del Daño Acumulado, es posible redimensionarla para ajustarla a la categoría del detalle crítico en la sección, bien porque cumple holgadamente a fatiga o porque resulta insuficiente.

Si la verificación se ha efectuado por el MS, el factor de ajuste de las constantes estáticas para asegurar el cumplimiento estricto en el detalle pésimo de la sección es sencillamente el de la expresión (58).

$$\frac{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}}{\lambda\, \Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)} \tag{58}$$

donde el numerador $\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}$ es la categoría del detalle entre el coeficiente parcial de la resistencia a fatiga, y el denominador $\lambda\Delta\sigma\,(\gamma_{Ff} Q_k)$ es la carrera de tensión equivalente (convertida a dos millones de ciclos). Este factor de corrección de tensiones se aplicará dividiendo el área y la inercia para pasar a redimensionar la sección y verificar que sus constantes estáticas no quedan por debajo de estos valores teóricos.

Si la comprobación se ha abordado por el MDA, el factor de ajuste por el que hay que dividir las constantes estáticas es la raíz cúbica o quinta del inverso del daño, cuando éste no es nulo. El criterio para discernir entre una y otra es saber si las carreras de tensión en el detalle crítico de la sección quedan en la zona de m = 3 o m = 5 de la curva S–N del detalle. Como regla práctica, siempre es conservador tomar la raíz cúbica del daño cuando éste es superior a la unidad y la raíz quinta cuando el daño es inferior. Si el daño es nulo porque todas las carreras de tensión son inferiores al umbral de daño, el factor de ajuste por el que se dividen las constantes estáticas es igual al cociente del umbral de daño entre el coeficiente parcial para la resistencia a fatiga, $\Delta\sigma_L / \gamma_{Mf}$, y la máxima carrera de tensión causada por el tráfico.

Para tensiones tangenciales las ideas son las mismas, con la particularidad de que siempre se usará la raíz quinta del daño cuando los cálculos se basen en el MDA.

El diagrama de flujo de la Figura 40 resume la verificación a fatiga en acero estructural contemplando ambos métodos y las condiciones para su aplicación en el dimensionamiento de detalles.

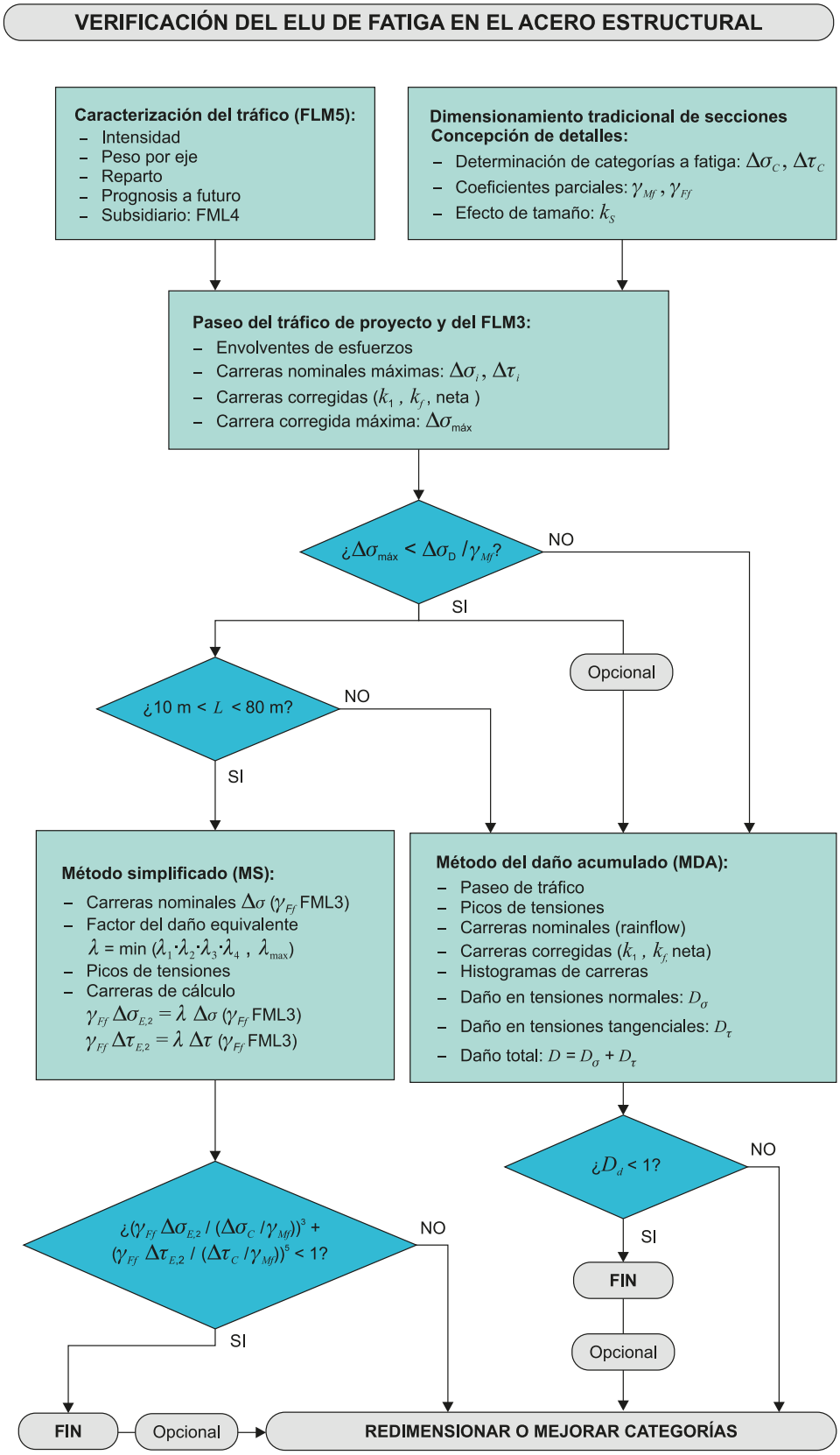


Figura 40 **Diagrama de flujo para análisis a fatiga en acero estructural**

3.7 Breve descripción de las verificaciones a fatiga en la RPM-95 y RPX-95

La RPM-95 (Recomendaciones para el Proyecto de Puentes Metálicos para carreteras) y la RPX-95 (Recomendaciones para el Proyecto de Puentes Mixtos para carreteras) se desarrollaron a inicios de los años 90 con el objetivo de establecer los criterios para el proyecto de puentes metálicos y mixtos de carretera.

Las verificaciones de seguridad a fatiga plasmadas en la RPM-95 y RPX-95 se resuelven con el Método Simplificado análogo al de UNE-EN 1993-1-9, sin llegar a desarrollar el Método del Daño Acumulado.

El Método Simplificado allí incluido se basa en el paseo de un vehículo pesado tipo (Figura 41) de tres ejes de 156 kN cada uno separados 1,50 m entre sí, con un total de 468 kN (cargas que ya incluyen un coeficiente de impacto de 1,20). Como se puede comprobar este vehículo tipo no es muy diferente del FLM3 de UNE-EN 1991-2 (con 480 kN), aunque sus ejes están más próximos, concentrando algo más la carga.

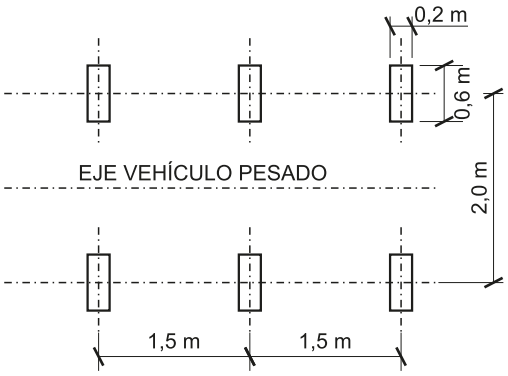


Figura 41 **Modelo de carga de fatiga para puentes de carretera (Figura 8.3 RPM-95)**

La comprobación a fatiga incluida en estas recomendaciones responde a la expresión (59) (apartado 8.2 RPM-95), análoga a la incluida en UNE-EN 1993-1-9 que se recogió en la expresión (28).

$$\Delta\sigma_{SF} \leq \frac{\Delta\sigma_{RF}}{\gamma_{MF}} \tag{59}$$

donde:

$\Delta\sigma_{SF}$ máxima amplitud de tensión aplicada al elemento en análisis debido al paso del vehículo de fatiga tipo (apartado 8.2 RPM-95), según la expresión (60)

$$\Delta\sigma_{SF} = \left|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}\right| \tag{60}$$

$\Delta\sigma_{RF}$ resistencia a fatiga del detalle analizado cuyo valor se determina de acuerdo con la expresión (61) (apartado 8.2 RPM-95).

$$\Delta\sigma_{RF}=\Delta\sigma_f\left[\frac{2\cdot10^6}{N_{eq}}\right]^{1/3} \tag{61}$$

donde:

$\Delta\sigma_f$ categoría del detalle, según la Tabla 8.4 del apartado 8.4 de RPM-95 (tabla basada en las tablas 9.8.1 a 9.8.5 con las categorías de detalles de fatiga de la versión experimental del Eurocódigo 3 ENV 1993-1-1, versión previa a las actuales tablas 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9).

N_{eq} número de ciclos equivalentes para el cual la carga de fatiga provoca el mismo daño que el tráfico real, según tabla 8.3 de RPM-95, reproducida en la Tabla 19

Tabla 19 **Numero de ciclos equivalentes en función del volumen de tráfico (Tabla 8.3 RPM-95)**

Intensidad media de vehículos pesados por día laborable (250 días/año) y sentido de circulación	Número de ciclos equivalentes, N_{eq}
≤100	$5\cdot10^5$
500	$9\cdot10^5$
1000	$1{,}3\cdot10^6$
2000	$1{,}9\cdot10^6$
5000	$3{,}2\cdot10^6$
≥ 8000	$5\cdot10^6$

γ_{Mf} coeficiente parcial para la resistencia a fatiga, cuyo valor se define acorde con la tabla 8.5 de RPM-95 (reproducida en la Tabla 20).

Tabla 20 **Coeficiente parcial para la resistencia frente a la fatiga (Tabla 8.5 RPM-95)**

Inspección y accesibilidad	Detalles críticos	Detalles no críticos
Inspección y mantenimiento periódicos Fácil acceso al detalle considerado	1,35	1,10
Inspección y mantenimiento periódicos Difícil acceso al detalle considerado	1,50	1,25

En el caso de las tensiones tangenciales, la resistencia a fatiga se comprueba de forma análoga a las tensiones normales de acuerdo con la expresión (62) (apartado 8.2 de RPM 95).

$$\Delta\tau_{SF} \leq \frac{\Delta\tau_{RF}}{\gamma_{MF}} \tag{62}$$

Teniendo en cuenta la expresión (63).

$$\Delta\tau_{RF} = \Delta\tau_{f} \left[\frac{2\cdot 10^{6}}{N_{eq}}\right]^{1/5} \tag{63}$$

Y cuando hay variación de tensión normales concomitantes con tensiones tangenciales, la verificación incluida en la RPM-95 es la de la expresión (64), análoga a la de UNE EN 1993-1-9 que se recogió en la expresión (29).

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{SF}}{\Delta\sigma_{RF}/\gamma_{MF}}\right)^{3} + \left(\frac{\Delta\tau_{SF}}{\Delta\tau_{RF}/\gamma_{MF}}\right)^{5} \leq 1 \tag{64}$$

Respecto a este método incluido en la RPM-95 (y RPX-95), hay que destacar los siguientes aspectos:

- La vida útil de proyecto a fatiga implícita en este método de ambas recomendaciones es de 70 años, frente a los 100 años contemplados por UNE EN 1993-2
- El método se considera válido para longitudes de influencia menores de 60 m
- Sólo se considera la rama m = 3 de la curva S–N del detalle. Se trata de un enfoque *a priori* conservador, al restringir el dominio de seguridad del detalle
- Los coeficientes parciales de la resistencia a fatiga son 1,10 y 1,35 para el método de tolerancia al daño, y 1,25 y 1,50 para el de integridad asegurada (Tabla 20), mayores que los incluidos en UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 5).
- No parece que se tenga en cuenta el efecto de la línea de influencia (contemplado en el coeficiente λ_1 de UNE-EN 1993-2).
- El efecto del tráfico pesado real (coeficiente λ_2 de UNE-EN 1993-2) se recoge mediante la conversión a un número de ciclos del vehículo tipo, en función de la IMD de vehículos pesados por sentido de circulación (referida a 250 días laborables al año), pero ajena al peso del camión medio. Tal correlación se establece mediante una tabla (Tabla 19).
- La Tabla de categorías de detalles 8.4 de RPM-95 no es válida para aceros con límite elástico superior a 700 MPa, tornillos de calidad superior a la clase 10.9, carreras de tensión para el vehículo tipo superiores a 1,5 veces el límite elástico y menos de 100.000 ciclos aplicados

Con todo esto, la máxima carrera de tensión asociada al vehículo tipo, aplicada un número de ciclos N_{eq} proporcionado por la Tabla 8.3 de RPM-95 (Tabla 19), se transforma en una equivalente referida a 2 millones de ciclos según la expresión (11), acorde con las expresiones (61) y (63), de manera análoga al Método Simplificado de UNE-EN 1993-2.

Tras dicha conversión, se efectúa la comparación de la tensión equivalente con la categoría del detalle (afectada por el coeficiente parcial para la resistencia a fatiga), acorde con las expresiones (59), (62) y (64).

Aunque el Método Simplificado de la RPM-95 y RPX-95 maneja coeficientes parciales mayores que los de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 20 frente a Tabla 5 respectivamente) y sólo emplea la rama m = 3 de la curva S–N del detalle, lo que lo haría más conservador en las verificaciones, el coeficiente de conversión de la carrera del vehículo tipo no puede superar el valor 1,357 (correspondiente al paso de 5 a 2 millones de ciclos), por lo general bastante inferior al coeficiente de daño equivalente λ (o λ_{max}) de UNE-EN 1993-2 para intensidades y pesos razonables.

Sin embargo, en otro párrafo se recalca que, si el número de ciclos equivalentes es desconocido o sólo se conoce el límite de fatiga de amplitud constante (CAFL) del detalle, la verificación se lleva a cabo asegurando que la carrera asociada al vehículo tipo sea menor que dicho límite. Tal verificación, aunque matemáticamente idéntica a la referida a 2 millones de ciclos, es conceptualmente razonable, ya que enlaza con la definición más purista de curva de fatiga, la de dos ramas, tal como se describe en 2.3.

La principal incógnita es la procedencia de la tabla que relaciona la IMD de pesados con el número de ciclos equivalentes del vehículo tipo (Tabla 19). El estudio de bibliografía especializada y otros códigos estructurales (norma SIA suiza o la BS británica) parece apuntar a que la calibración efectuada para dicha tabla puede basarse en registros de tráfico de los años 70-80, con menores IMD y un peso medio de los vehículos pesados también menor que los valores de los estudios desarrollados en los años 80-90 en carreteras europeas para el desarrollo del Eurocódigo 3.

Página generada
intencionalmente
en blanco

4

RECOMENDACIONES PARA LA CONCEPCIÓN, DIMENSIONAMIENTO, EJECUCIÓN Y CONTROL DE LOS DETALLES TÍPICOS DE PUENTES METÁLICOS Y MIXTOS DE CARRETERA

En este capítulo se incluye una serie de recomendaciones para la concepción y el dimensionamiento de las principales uniones y detalles que suelen presentarse con más frecuencia en la estructura metálica de las tipologías más convencionales de puentes metálicos o mixtos de carretera.

Asimismo, se incluyen criterios o recomendaciones relativos a la ejecución y el control de la ejecución que permitan asegurar que un detalle presenta una categoría de fatiga lo más alta posible.

El capítulo se centrará, sobre todo, en dar recomendaciones para conseguir detalles con la mayor categoría de fatiga posible en los detalles más frecuentes para cajones mixtos y tableros con vigas mixtas (bijácena o multijácena). Adicionalmente se incluirán algunas recomendaciones relativas a tableros en celosía y losas ortótropas, que presentan detalles con particularidades específicas.

4.1 Categorías de detalles tipo acorde con UNE-EN 1993-1-9

El capítulo 8 de UNE-EN 1993-1-9 define en las tablas 8.1 a 8.10, que se reproducen en el ANEJO A de esta guía, una serie de detalles tipo con la asignación de la categoría del detalle frente a fatiga para una dirección dada de la oscilación de las tensiones, marcada en las tablas con una flecha doble. Este valor numérico de la categoría del detalle $\Delta\sigma_c$ (o $\Delta\tau_c$), expresado en N/mm^2, representa la curva de resistencia a fatiga aplicable para el análisis estructural del detalle correspondiente.

La categoría de detalle más alta de las tablas es de 160, que corresponde a una chapa metálica laminada sin ningún tipo de corte o de unión, mientras que el detalle de unión con la peor de las geometrías y, por tanto, la peor concentración de tensión, se sitúa en la categoría 36.

En ocasiones el valor numérico de la categoría del detalle se debe corregir multiplicándolo por k_s, que es el factor de minoración de la resistencia a fatiga por efecto del tamaño de las chapas a unir.

Las tablas referidas incluyen una serie de detalles tipo habituales en estructuras metálicas junto con una descripción del detalle, los materiales o criterios de ejecución, junto con una serie de requisitos relativos al control de la ejecución que permiten discernir entre una categoría de detalle u otra.

En la Tabla 21 se enumeran las tablas de UNE-EN 1993-1-9 con los detalles de fatiga analizados, y su correspondencia con los distintos apartados del capítulo de la guía en el que se tratan.

Tabla 21 **Detalles de fatiga de UNE-EN 1993-1-9 analizados en este capítulo**

Tabla de UNE-EN 1993-1-9	Detalles analizados	Apdo o Figura del capítulo 4 de la *Guía*
8.1 Detalles sin uniones o con uniones mecánicas	Detalles 1 a 7	Apdo 4.3
	Detalles 8 a 15	Figura 103
8.2 Piezas armadas soldadas	Detalles 1 a 11	Apdo 4.7
8.3 Empalmes soldados	Detalles 1 a 10 y 13	Apdo 4.5
	Detalles 14 a 16	Apdo 4.5.2
	Detalle 17	Apdo 4.5.1.2
	Detalles 18 y 19	Apdo 4.6.3

Tabla 21 **continúa >**

Tabla de UNE-EN 1993-1-9	Detalles analizados	Apdo o Figura del capítulo 4 de la *Guía*
8.4 Cartelas y rigidizadores soldados	Detalles 1 a 3	Apdo 4.6.1
	Detalles 4 y 5	Apdo 4.6.3
	Detalles 6 a 8	Apdo 4.6.4
	Detalle 9	Apdo 4.9
8.5 Uniones soldadas transmisoras de esfuerzos	Detalles 1 a 5	Apdo 4.8.2
	Detalles 6 y 7	Apdo 4.8.1
	Detalles 8 y 9	Apdo 4.7
	Detalle 10	Apdo 4.9
8.6 Perfiles huecos	Detalles 1 a 9	Apdo 4.12.1.1
	Detalle 2	Apdo 4.11.2
8.7 Uniones en nudos de vigas en celosía	Detalles 1 a 4	Apdo 4.12.1.1
8.8 Tableros ortótropos con rigidizadores longitudinales cerrados	Detalles 1 a 8	Apdo 4.12.2.1
8.9 Tableros ortótropos con rigidizadores longitudinales abiertos	Detalles 1 y 2	Apdo 4.12.2.2
8.10 Uniones ala superior-alma de vigas carril	Al tratarse de detalles que no se suelen aplicar en puentes de carretera no se analizarán en esta guía	

Para que a un detalle específico se le pueda asignar una categoría de fatiga, se deben cumplir todas las condiciones incluidas en la descripción y en los requisitos del detalle tipo de la tabla correspondiente. Si no se cumple alguna de las condiciones de la descripción o alguno de los requisitos establecidos, el detalle analizado tendrá una categoría inferior a la definida en ese punto.

Muchos de los detalles incluidos en las tablas son claros y su aplicación a los casos tipo habituales de puentes es directa, pero en ocasiones no queda demasiado clara la correspondencia de los detalles reales habituales de puentes con una de las categorías específicas de las tablas del capítulo 8 de UNE-EN 1993-1-9.

En los apartados siguientes se incluyen una serie de criterios para poder facilitar la asignación de la categoría de fatiga a los detalles tipo más habituales de puentes de carretera.

En cada detalle de las tablas anteriores se indica el lugar más probable de inicio de la fisura de fatiga, representada en trazo de color negro, perpendicular o paralela a la dirección de

la variación tensional solicitante (representada por una doble flecha negra), clasificando el detalle por su categoría de fatiga. En los sucesivos apartados de este capítulo se repasan todos estos detalles incluyendo, en algunos casos, imágenes que permiten aclarar o explicar el detalle y su proceso de ejecución, en las que se ha representado la ubicación de la posible fisura con un trazo en color rojo para una mayor facilidad de comprensión.

En las imágenes mencionadas, en ocasiones se incluyen una serie de leyendas con el criterio de colores siguiente:

- Textos que sirven para definir distintos elementos del puente que facilitan la ubicación de la posición de un detalle: texto en minúscula recuadrado y en color blanco. En mayúscula se incluyen los elementos principales a los que se refiere la imagen
- Textos que identifican un detalle específico con una categoría de fatiga: texto en mayúsculas recuadrado y en color amarillo. En alguna ocasión se incluye algún texto explicativo en letra minúscula
- Textos que identifican un detalle específico con una categoría de fatiga baja y que en la medida de lo posible se debería de evitar, y detalles con una ejecución deficiente o incorrecta que penalice la categoría de fatiga del detalle: texto en mayúsculas recuadrado y en color rojo
- En los casos que el detalle sea claramente mejorable por presentar una categoría de fatiga baja, o por una ejecución defectuosa, la imagen se recuadra además en color rojo para llamar todavía más la atención

4.2 Clases de ejecución

En el anexo B de UNE-EN 1090-2 se establecen los criterios para la elección de la clase de ejecución de una estructura en función de los tres siguientes parámetros:

- Categoría de servicio (SC)

  Los criterios para definir las categorías de servicio se definen en la tabla B.1 de UNE-EN 1090-2 (Tabla 22).

Tabla 22 **Criterios para las categorías de servicio Tabla B.1 de UNE-EN 1090-2) de UNE-EN 1090-2)**

Categorías	Criterios
SC1	- Estructuras y componentes proyectados solamente para acciones cuasi-estáticas (Ejemplo: edificios) - Estructura y componentes con sus conexiones proyectados para resistir acciones sísmicas en regiones con actividad sísmica baja y en DCL* - Estructuras y componentes proyectados para resistir acciones de fatiga procedentes de grúas (clase S_0)**

Tabla 22 continúa >

Categorías	Criterios
SC2	- Estructuras y componentes proyectados para resistir acciones de fatiga de acuerdo con la Norma EN 1993. (Ejemplos: puentes de carretera y de ferrocarril, grúas (clases S1 a S9)**, estructuras susceptibles a vibraciones inducidas por el viento, muchedumbres o maquinaria giratoria) - Estructuras y componentes con sus conexiones proyectados frente a acciones sísmicas en regiones con actividad sísmica media o alta y en DCM* y DCH*

* DCL, DCM, DCH: clases de ductilidad de acuerdo con la Norma EN 1998-1

** Para la clasificación de las acciones de fatiga procedentes de grúas, véanse las Normas EN 1991-3 y EN 13001-1

– Categoría de producción o de ejecución (PC)

Los criterios para definir las categorías de producción se definen en la tabla B.2 de UNE-EN 1090-2 (Tabla 23).

Tabla 23 **Criterios para las categorías de producción (Tabla B.2 de UNE-EN 1090-2)**

Categorías	Criterios
PC1	- Componentes o piezas no soldadas fabricadas a partir de productos de todos los tipos de acero - Componentes soldados fabricados de productos de tipo de acero inferior a S355
PC2	- Componentes soldados fabricados de productos de tipo de acero de S355 y por encima - Componentes esenciales para la integridad estructural que están montados por soldeo en el lugar de construcción - Componentes con fabricación por conformación en caliente o que reciben tratamiento térmico durante la fabricación - Componentes de vigas en celosía CHS que requieren cortes del perfil de extremo

– Clases de consecuencia (CC)

Los criterios para definir las clases de consecuencia se definen en la tabla B.1 de UNE-EN 1990 (Tabla 24).

Tabla 24 **Definición de las clases de consecuencia (Tabla B.1 de UNE-EN 1990)**

Clases de consecuencia	Descripción	Ejemplos de edificios y obras de ingeniería civil
CC3	**Consecuencia grave** de pérdida de **vidas** humanas; o consecuencias económicas, sociales o medio ambientales **muy importantes**	Estadios, edificios en que las consecuencias de un fallo son graves (por ejemplo, una sala de conciertos)

Tabla 24 **continúa >**

Clases de consecuencia	Descripción	Ejemplos de edificios y obras de ingeniería civil
CC2	**Consecuencia moderada** de pérdida de vidas humanas; o consecuencias económicas, sociales o medioambientales **considerables**	Edificios residenciales y de oficinas, edificios públicos donde las consecuencias de un fallo son moderadas (por ejemplo, un edificio de oficinas)
CC1	**Consecuencia leve** de pérdida de vidas humanas y consecuencias económicas, sociales o medioambientales **mínimas o despreciables**	Edificios agrícolas en los que la gente no entra normalmente (por ejemplo, almacenes, invernaderos)

La tabla que establece la clase de ejecución se define en función de estos tres parámetros en la tabla B.3 de UNE-EN 1090-2 (Tabla 25).

Tabla 25 **Matriz recomendada para la determinación de las clases de ejecución (Tabla B.3 de UNE-EN 1090-2)**

Clases de consecuencia		CC1		CC2		CC3	
Categorías de servicio		**SC1**	**SC2**	**SC1**	**SC2**	**SC1**	**SC2**
Categorías de producción	**PC1**	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3[a]	EXC3[a]
	PC2	**EXC2**	**EXC2**	**EXC2**	**EXC3**	**EXC3[a]**	**EXC4**

[a] La clase de ejecución EXC4 debería aplicarse a estructuras especiales o estructuras con consecuencias extremas de un fallo estructural como requieran las disposiciones nacionales

En general, en el caso de puentes de carretera la clase de ejecución podrá ser EXC3 o EXC4, acorde con la tabla B.3 de UNE-EN 1090-2, ya que normalmente son susceptibles de poder sufrir problemas de fatiga (con categoría de servicio SC2), se ejecutan con aceros de calidad S-355 o superiores (con categoría de producción PC2), y presentan clases de consecuencia que pueden ser normalmente o bien CC2 en puentes cuya rotura tenga una consecuencia moderada, o CC3 en puentes cuya rotura tenga una consecuencia grave.

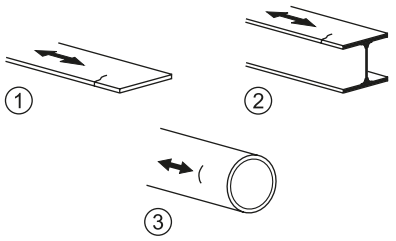
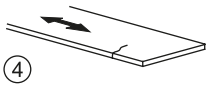
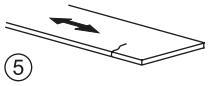
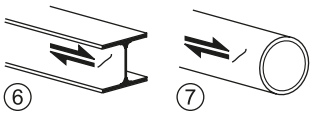
La clase de ejecución tendrá consecuencias en los criterios de ejecución y control de determinados detalles e influirá en la elección de los detalles para su asignación a la categoría de fatiga.

4.3 Corte y preparación de bordes de chapas

La tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9 incluye en los detalles 1 a 7 cuatro categorías de fatiga para chapas o perfiles cortados o laminados sin ningún tipo de soldadura o unión (Tabla 26). Como se puede apreciar en dicha tabla, ningún detalle puede tener una categoría superior a 160 y, en función del proceso de corte o fabricación y de los tratamientos de la zona cortada la categoría del detalle, se puede reducir hasta 100.

Los detalles 1 a 5 se refieren a tensiones normales, mientras que los detalles 6 y 7 se refieren a tensiones tangenciales.

Tabla 26 **Categoría de chapas cortadas o perfiles laminados sin uniones ni soldaduras (detalles 1 a 7 de tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9)**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
160	NOTA: La resistencia a fatiga asociada a la categoría 160 es la más alta. Ningún detalle puede tener mayor resistencia a fatiga para ningún número de ciclos 	<u>Productos laminados o extruidos</u> 1) Chapas y productos planos brutos de laminación. 2) Perfiles laminados brutos de laminación. 3) Perfiles huecos sin soldadura, circulares o rectangulares.	<u>Detalles 1) a 3):</u> Las aristas vivas, los defectos superficiales y los defectos de laminación deberán desbastarse hasta su eliminación, dejando transiciones suaves.
140		<u>Chapas oxicortadas o cizalladas</u> 4) Material oxicortado o cizallado con posterior saneamiento de bordes. 5) Material oxicortado a máquina con estrías de corte regulares y poco profundas, o a mano con posterior saneamiento de bordes para eliminación de aristas. Máquinas de oxicorte que cumplan las especificaciones de calidad de la Norma Europea EN 1090.	4) Deberá eliminarse toda traza visible de aristas. Las superficies de corte deberán ser mecanizadas o desbastadas y toda rebaba eliminada. Cualquier marca dejada por la maquinaria empleada, por ejemplo en el desbastado, deberá ser paralela a la dirección de las tensiones. <u>Detalles 4) y 5)</u> Las esquinas entrantes deberán ser mejoradas mediante desbaste (pendiente $\leq 1/4$) o tenerse en cuenta en los cálculos mediante el factor de concentración de tensiones correspondiente. No se admiten reparaciones por relleno con soldadura.
125			
100 $m = 5$		6) y 7) Productos fabricados por laminación o extrusión, como los de los detalles 1), 2), 3).	<u>Detalles 6) y 7):</u> $\Delta\tau$ calculado como: $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$
Si los detalles 1-5 se ejecutan en acero con resistencia mejorada a la corrosión debe adoptarse la categoría de detalles inmediatamente inferior			

En una nota incluida tras los detalles 6 y 7 se indica que hay que tener en cuenta, para aceros tipo Corten con resistencia mejorada a la corrosión, que para los detalles 1 a 5 se debe adoptar la categoría inmediatamente inferior a la definida por la tabla. Así un detalle como el 1, 2 o 3 en acero tipo Corten tendría una categoría de fatiga de 140 (en lugar de 160), un detalle como el 4 tendría una categoría de fatiga de 125 (en lugar de 140), y un detalle como el 5 tendría una categoría de fatiga de 100 (en lugar de 125).

Como se puede apreciar en los requisitos establecidos para los detalles 1 a 5 de la tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9, en general, se requiere la completa eliminación de aristas vivas y defectos superficiales, mecanizando o desbastando cualquier rebaba o pequeña entalla que el proceso de corte o de preparación de bordes haya podido dejar en los cantos de las chapas.

En puentes, en general siempre hay que realizar labores de corte de chapas y por lo tanto la categoría mínima será de 140 si se respetan los requisitos establecidos en el detalle 4 de la tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9. La principal diferencia entre el detalle 4 (con categoría 140) y el 5 (con categoría 125), es que en el detalle 5 se permite la realización del corte a mano, en lugar de emplear oxicorte o cizallado automático que exige el detalle 4, de ahí la bajada de la categoría del detalle de 140 a 125, eso sí siempre que se haga el posterior saneado de los bordes con eliminación de marcas y entallas.

A la hora de la programación del proceso de corte automatizado de las chapas en taller, ya sea mediante oxicorte o mediante corte con plasma, hay que adoptar la precaución de iniciar el corte algo separado de una arista o vértice de una de las chapas a emplear en el puente, ya que el punto de inicio del corte provoca siempre un cráter de arranque como se puede apreciar en las imágenes de la Figura 42.

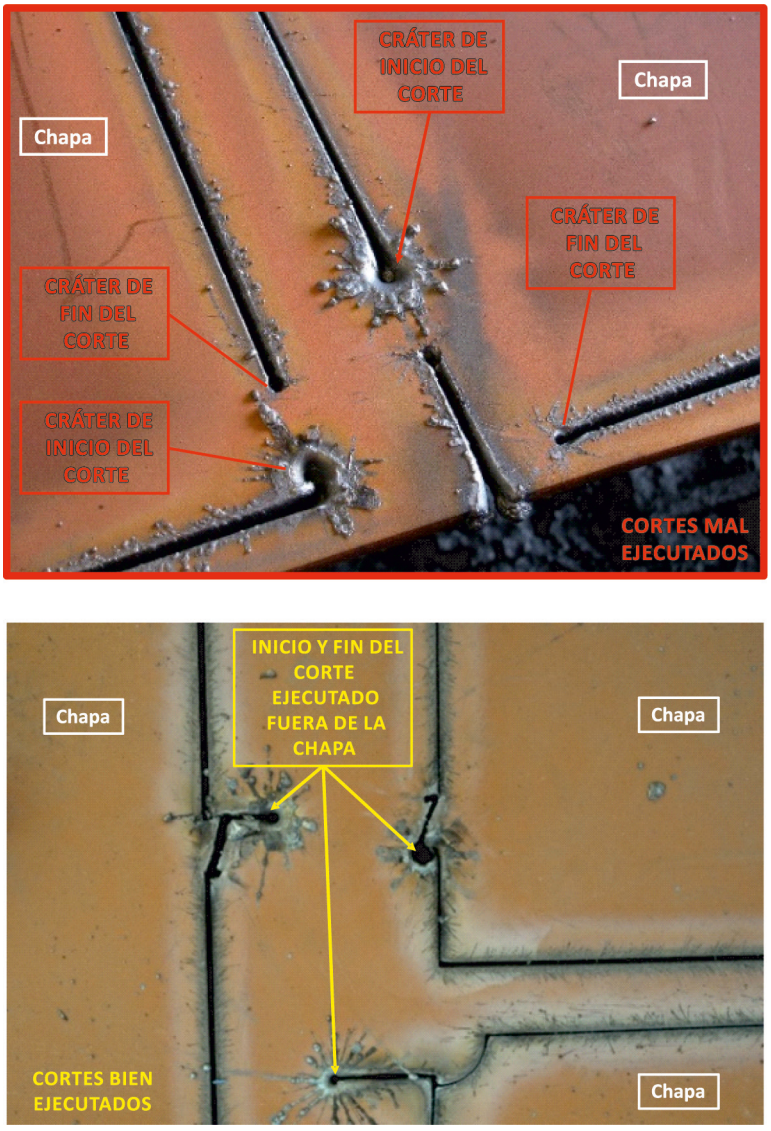


Figura 42 **Inicio del corte de chapas mediante oxicorte en taller con cráter inicial y final. Imagen superior detalle mal ejecutado, imagen inferior detalle bien ejecutado**



Figura 43 **Corte de chapas a partir de una chapa base con el inicio del corte fuera del borde de cada chapa**

En la imagen superior de la Figura 42 se aprecia claramente cómo el corte se programó de forma incorrecta coincidiendo con una arista o un vértice, quedando las chapas dañadas por el cráter generado al iniciar y finalizar el corte, en cambio en la imagen inferior de la Figura 42 y en la Figura 43 se aprecia cómo el inicio y final del corte se hacen fuera de un borde de la pieza, siendo posteriormente mucho más sencillo de repasar mediante amolado la zona que queda con un pequeño exceso de material.

Otra precaución que hay que adoptar a la hora de programar el corte de las chapas es que el proceso implica la pérdida de algún milímetro de dimensión, inherente a la operación de corte. La dimensión del ancho del corte depende de la calibración de la maquinaria empleada por el taller, y en función de esta calibración el corte será más o menos preciso dejando más o menos estrías o entallas en los cantos de las piezas cortadas. Tal y como establecen los requisitos de los detalles 4 y 5 de la tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9, tras el proceso de corte y por extensión también tras la preparación de bordes en caso de que exista, deben eliminarse las rebabas o entallas generadas por el proceso, mecanizando o desbastando la superficie.

En la Figura 44 se aprecia el proceso de realización de la transición de bordes con una pendiente no mayor de 1/4 (acorde con el detalle 4 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, que se explicará más adelante) en el extremo de una chapa a soldar con otra de menor espesor (figura izquierda) y el proceso de biselado (figura derecha), en el que se aprecia el acabado con estrías y entallas.

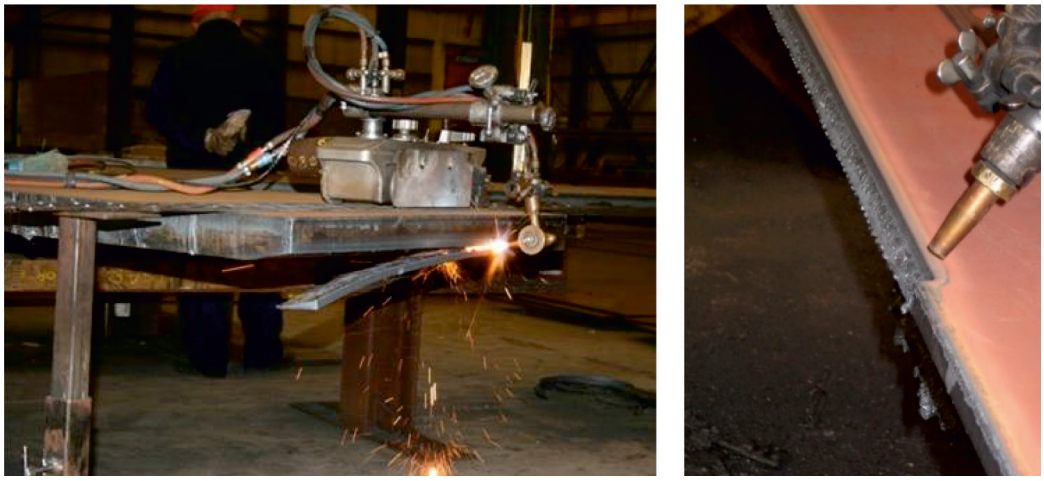


Figura 44 **Realización de la transición del espesor en el extremo de una chapa y del bisel de la preparación de bordes**

El acabado del canto lateral de la chapa, de la zona de la transición del espesor, así como de las preparaciones de bordes se debe desbastar o mecanizar eliminando cualquier entalla o defecto producido por el oxicorte. El resultado de esta operación de mecanizado puede apreciarse en las imágenes incluidas en la Figura 45.



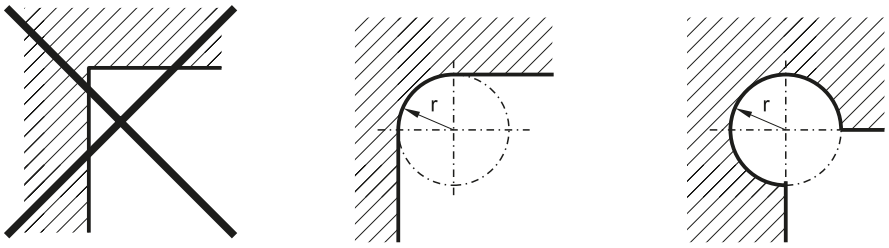
Figura 45 **Cantos de chapas, transiciones de bordes y biseles mecanizados sin entallas ni marcas del proceso de corte**

Los detalles 4 y 5 de la tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9 requieren además que las esquinas entrantes en el corte de chapas se suavicen con pendientes no mayores de 1/4, o lo que es mejor, mediante la disposición de un ojal circular en el vértice del quiebro (Figura 46 imagen izquierda). Esto es habitual en chapas (normalmente alas) que requieren el cruce de otra perpendicular a través suya (normalmente un alma) (Figura 46 derecha).



Figura 46 **Extremos entrantes en el corte de chapas con ojales circulares**

A este respecto UNE-EN 1090-2 indica en su apartado 6.7 que las esquinas entrantes en el corte, que son aquellas que presentan un ángulo de apertura menor de 180º, se deben redondear con un radio mínimo de 5 mm para estructuras con clase de ejecución EXC2 o EXC3 y de 10 mm con clases de ejecución EXC4. La Figura 47 reproduce la Figura 2 de UNE-EN 1090-2 con las recomendaciones para ejecutar el corte de esquinas entrantes.



Leyenda
1 No permitido
2 Forma A (recomendada para corte automático o totalmente mecanizado)
3 Forma B (permitida)

Figura 47 **Extremos entrantes en el corte de chapas con ojales circulares (Figura 2 de UNE-EN 1090-2)**

La Figura 48 muestra una serie de detalles que incumplen los requisitos establecidos en los detalles 4 y 5 de la tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9. La figura representa el tirante de un arco atirantado tipo bowstring con sección tubular circular que se desmembra con un corte diametral que permite el paso de una chapa a través suyo. El corte entrante en el tubo desmembrado presenta su extremo con acabado recto y ausencia de transición u ojal. La ejecución más correcta de este detalle sería realizar un ojal en su extremo de forma análoga al detalle de la imagen derecha de la Figura 46. Asimismo, las preparaciones de bordes de los biseles

del tubo y de la chapa central en su zona extrema presentan un cambio muy brusco con ausencia de transiciones suaves y graduales.

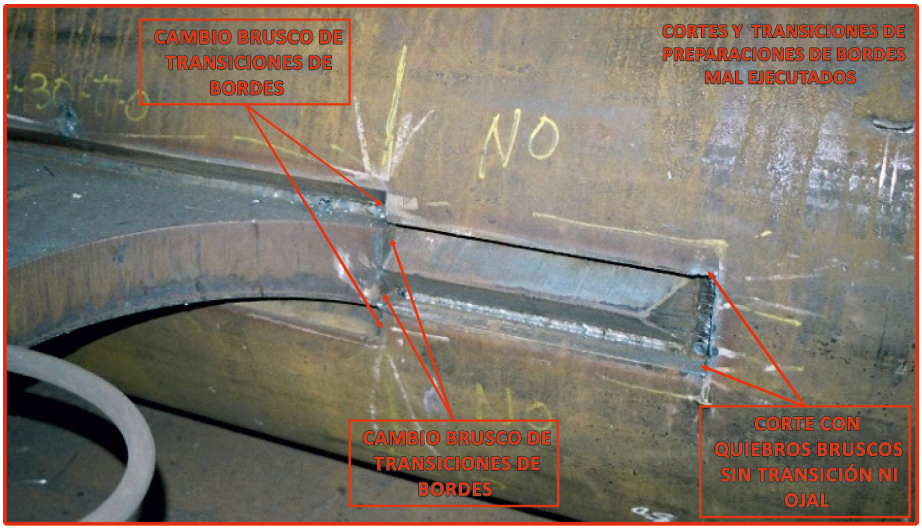


Figura 48 **Biseles con acabados bruscos sin transiciones y corte entrante sin ojal en su extremo. Detalles mal ejecutados**

Un ejemplo de cómo se deben hacer las transiciones de preparaciones de bordes con cambios de pendiente no superior a 1/4, en un caso análogo al de la Figura 48, sería el representado en la Figura 49, en la que se aprecian transiciones suaves y graduales de la variación de biseles en la chapa central y en la chapa desmembrada.



Figura 49 **Transición suave de biseles en la chapa central y la chapa desmembrada**

Del mismo modo los extremos de cortes entrantes deben acabar en ojales con transiciones de preparaciones de borde suaves, reduciendo la dimensión del bisel cuando sea necesario, como se aprecia en las imágenes de la Figura 50.



Figura 50 **Extremos de cortes entrantes con ojales bien ejecutados, evitando entallas en su extremo y con detalle de transición suave de biseles en sus extremos**

Para que todos estos detalles se ejecuten con plenas garantías, los planos de taller deben definir los ojales y las transiciones de forma precisa y detallada, de manera que no quede nada abierto a la improvisación del operario durante la ejecución.

Otro caso típico de corte entrante en ángulo recto que puede dar problemas es el desmembrado del ala de un perfil (angular, o con sección en doble T) si se realiza sin adoptar las precauciones de evitar que el extremo del alma se dañe durante la operación del corte del ala. La Figura 51 muestra la entalla realizada en el extremo del alma al desmembrar el ala de dos perfiles angulares.

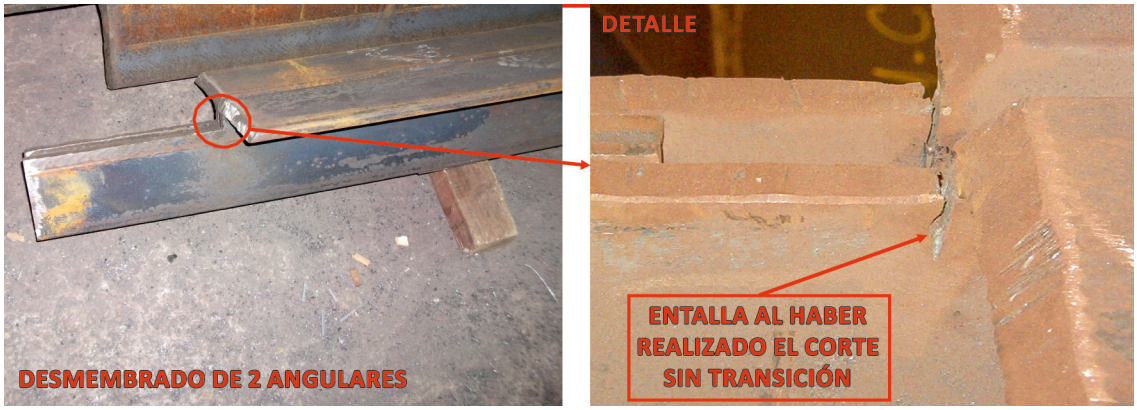


Figura 51 **Desmembrado del ala de dos angulares con entallas en el extremo del ala. Detalle mal ejecutado**

4.4 Marcado de piezas

En general, en puentes de carretera, tal y como establece 6.2 de UNE-EN 1090-2, se debe evitar el marcado de las piezas mediante estampado, troquelado, punzonado u otro procedimiento que produzca daños o entallas en las piezas que pueda reducir la categoría de fatiga de un detalle específico

El marcado se puede hacer mediante procedimientos que no afecten a la resistencia a fatiga o realizar el marcado en elementos secundarios no susceptibles de verse afectados por fenómenos de fatiga.

4.5 Empalmes transversales de chapas mediante soldadura a tope

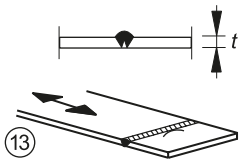
En este apartado se analizan los detalles más habituales de empalmes de chapas mediante soldaduras transversales a la dirección del esfuerzo solicitante, que son las uniones, en general, de mayor responsabilidad en los puentes, siendo su diseño y ejecución críticos para conseguir un adecuado nivel de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

Es muy recomendable concebir todos los empalmes trasversales 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 por solo un lado de esta forma sería 36 (detalle 13 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9).

Es cierto que el detalle 13 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 27) 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 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.

Tabla 27 **Detalle 13 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9. Soldaduras con penetración completa ejecutadas por un solo lado sin *"backing"***

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
36		13) Soldaduras a tope ejecutadas desde un solo lado.	13) Sin chapa dorsal.
71	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	13) Soldaduras a tope ejecutadas desde un solo lado con penetración total y verificación mediante técnicas END apropiadas.	

Aunque en UNE-EN 1993-1-9 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 llegar a considerarse, en general, con una categoría de detalle superior a 36.

Un claro ejemplo de la mala calidad que suele estar ligada a las soldaduras ejecutas por un solo lado sin ningún tipo de respaldo son las imágenes de la Figura 52 en las que se aprecia una clara falta de penetración en toda la raíz de la soldadura.

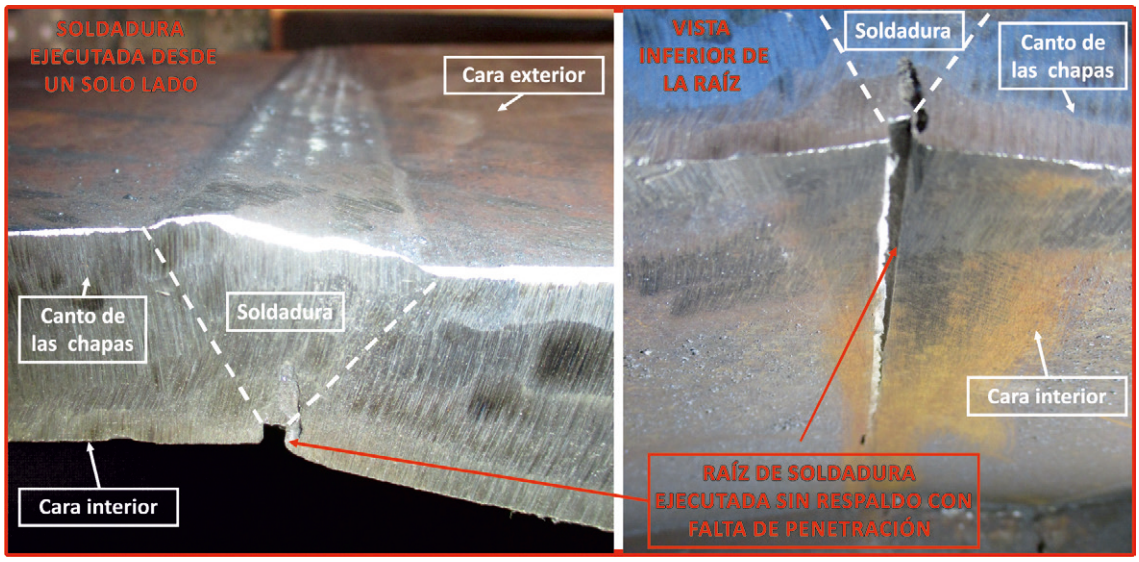


Figura 52 **Soldadura ejecutada por un solo lado sin respaldo, con falta de penetración en la raíz. Detalle mal ejecutado**

La imagen de la Figura 53 muestra el recorte de la soldadura de dos chapas. La soldadura presenta un defecto similar al de la figura anterior en la raíz al haberse ejecutado por un solo lado, sin chapa de respaldo y sin saneo de la raíz, con una clara falta de penetración y entalla geométrica. En este caso se suma que la transición del espesor de las chapas es muy brusco, con una pendiente de 1/1, mucho mayor de la recomendada de 1/4, empeorando todavía más la categoría de fatiga del detalle.

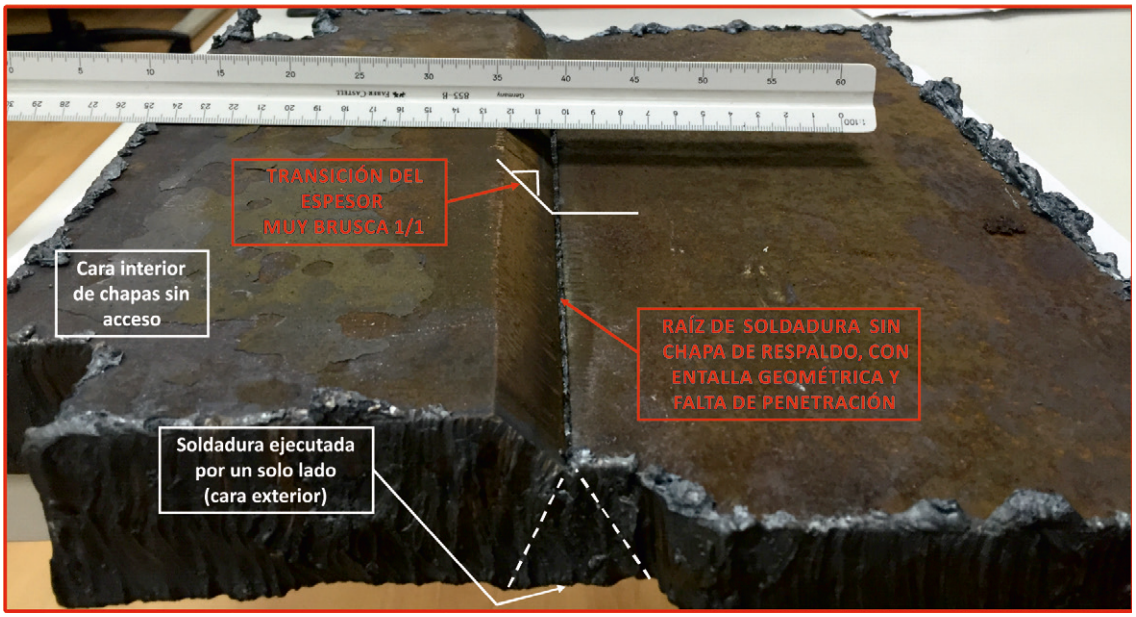


Figura 53 **Soldadura ejecutada por un solo lado sin respaldo, con falta de penetración en la raíz y transición muy brusca de espesores. Detalle mal ejecutado**

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.

Tabla 28 **Detalles 1 a 11 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9. Soldaduras a tope con penetración completa**

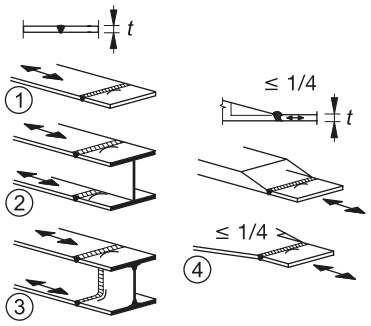
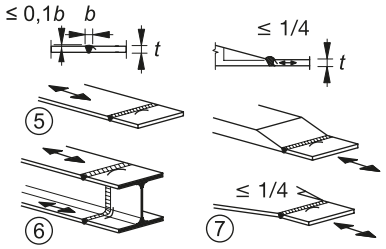
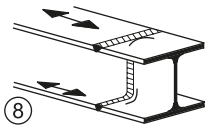
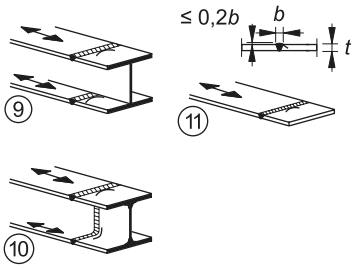
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
112	 Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$	Sin chapa de respaldo: 1) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos 2) Empalmes en prolongación de alas y almas antes del armado de la viga 3) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas sin groeras 4) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos de anchura o espesor rebajado con pendiente ≤ 1/4	- 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). Detalle 3): Sólo para uniones de perfiles laminados, cortadas y soldadas

Tabla 28 **continúa >**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
90	 Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0,2}$	5) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos 6) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas sin groeras 7) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$ Eliminación de entallas en soldaduras por mecanizado	- 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). Detalles 5 y 7): Soldaduras ejecutadas en posición horizontal
90	 Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0,2}$	8) Como el detalle 3) pero con groeras	- 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 $k_s = (25/t)^{0,2}$	9) Empalmes en prolongación de vigas armadas sin groeras 10) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas con groeras 11) Empalmes en prolongación de chapas, productos planos, perfiles laminados y chapas de vigas armadas	- 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). Detalle 10: Sobreespesor de cordones inferiores al 10 % de la anchura con transición gradual al plano de las superficies empalmadas

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 (Tabla 28).

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, ver Tabla 30).

En puentes cajón o puentes de vigas metálicas, hay muy pocas soldaduras que obligatoriamente requieran el empleo de 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 los empalmes de las células superiores o inferiores (Figura 54), o algunas zonas rigidizadas en mamparos de apoyo que dejan zonas pequeñas cerradas e inaccesibles, pueden llegar a obligar el empleo de chapas de respaldo.

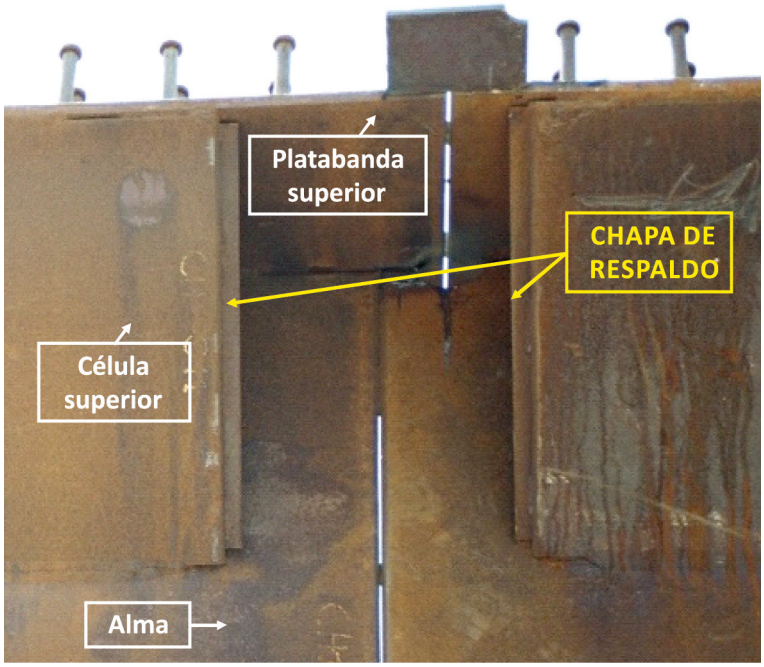


Figura 54 **Empleo de chapas de respaldo en el empalme de una célula superior al no haber acceso al interior de la raíz**

Otros ejemplos de empalmes de piezas que obligatoriamente requieren el empleo de chapa de respaldo metálica en puentes sería el caso de la soldadura a tope de secciones de perfiles tubulares empleadas habitualmente en celosías transversales o arriostramientos de secciones cajón o bijácena, o en el empalme de las secciones cerradas de los cordones, montantes y diagonales de tableros en celosía (imagen izquierda de la Figura 55). También se puede dar la necesidad del empleo de chapa de respaldo en el empalme de rigidizadores con sección cerrada en U o en Omega, frecuentes en losas ortótropas (imagen derecha de la Figura 55).

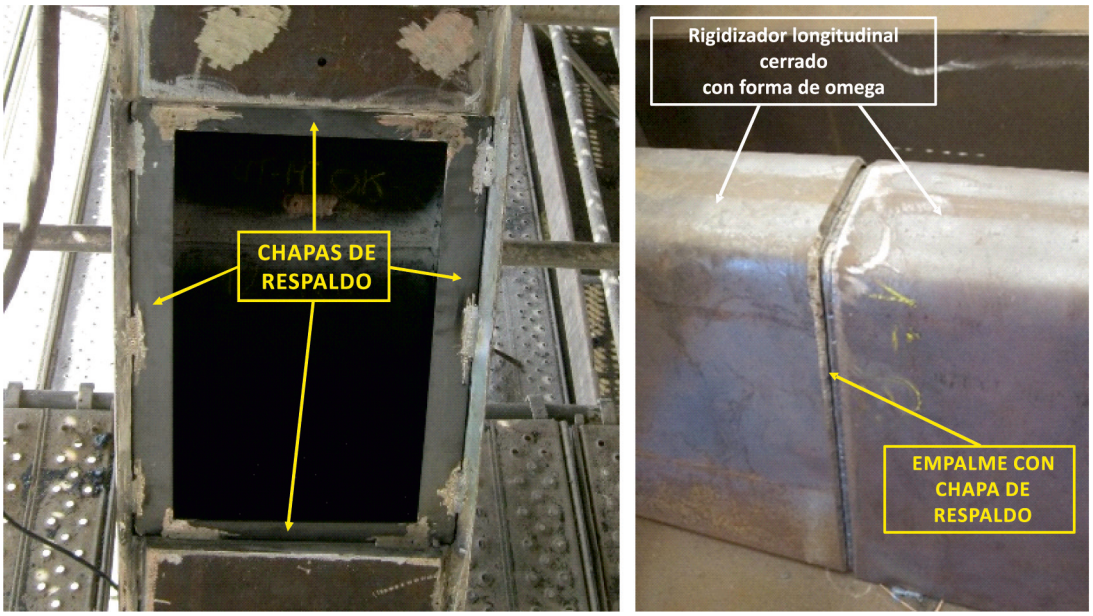


Figura 55 **Soldaduras con chapas de respaldo sin acceso a la raíz**

4.5.1 Empalmes de chapas a tope con acceso por los dos lados

4.5.1.1 Empalmes de chapas 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 no mayor de 1/4 (acorde a los detalles 4 y 7 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9), siendo recomendable emplear una pendiente de 1/5 (ver Figura 45).

En todos los casos (detalles 1 a 11 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9), para la realización de la soldadura, se deben emplear chapas laterales de derrame provisionales (Figura 56), 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 (Figura 57).

Asimismo, en todos estos casos, es necesario que la soldadura se realice desde ambos lados con la posterior verificación por ensayos no destructivos, habitualmente ultrasonidos y eventualmente radiografías.



Figura 56 **Chapas de derrame provisionales para realizar la soldadura**



Figura 57 **Soldadura tras la retirada de las chapas de derrame con el canto amolado en la dirección de la chapa**

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 58) en la dirección paralela al esfuerzo (normalmente perpendicular a la soldadura) 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).

  Es muy conveniente que las soldaduras a tope de las chapas de fondo o platabandas inferiores de tableros empujados siempre se amuelen por la parte inferior para evitar que la rugosidad de la soldadura o algún pequeño sobreespesor pueda dañar las láminas de los apoyos deslizantes, aumentando el rozamiento de la operación



Figura 58 **Soldadura amolada sin sobreespesor**

- Si el sobreespesor de la soldadura (Figura 59) se limita a un máximo del 10% de la anchura de la soldadura, realizando una transición gradual hasta el contacto con las dos chapas adyacentes, la categoría del detalle puede llegar a ser 90 (detalles 5 a 7 de tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9).

- Si en cambio el sobreespesor de la soldadura (Figura 59) se encuentra entre el 10% y el 20% de la anchura de la soldadura, realizando una transición gradual hasta el contacto con las dos chapas adyacentes, la categoría del detalle puede llegar a 80 (detalles 9 a 11 de tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9).

En cualquier caso, el valor máximo del sobreespesor admitido será 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 (Tabla 28). La imagen inferior de la Figura 56 muestra un ejemplo de variación de anchura de una chapa con transición suave.

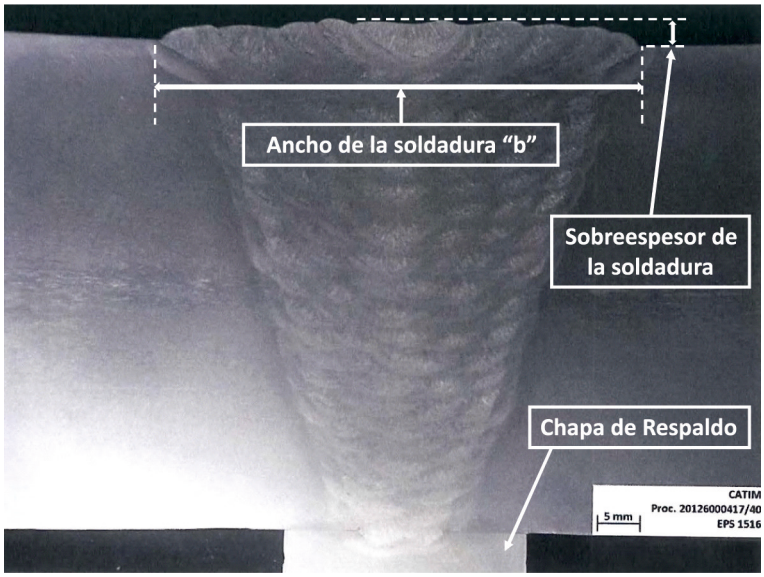


Figura 59 **Detalle de la medida del sobreespesor de una soldadura**

Además del diferente sobreespesor admitido en la soldadura, la principal diferencia entre los detalles 5 y 7 con categoría 90 y el detalle 11 con categoría 80 es que los primeros se deben realizar soldando en posición horizontal y no hay exigencias adicionales de la posición de soldeo para el detalle 11.

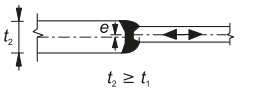
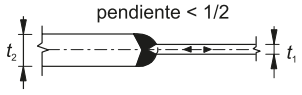
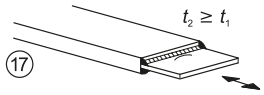
Como se puede apreciar comparando los detalles de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, si se realiza la soldadura con ciertos controles y precauciones soldando desde ambos lados, la categoría mínima obtenida es de 80, que siempre será mejor que la obtenida con el empalme empleando chapa de respaldo con acceso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

4.5.1.2 Empalmes de chapas a tope con continuidad del plano medio

No es demasiado frecuente que los empalmes de chapas a tope con penetración completa de distinto espesor se hagan con continuidad del plano medio de las chapas, y es, en general mucho más frecuente que la continuidad se haga siempre por una de las caras, normalmente la cara exterior de la chapa, de forma que la apariencia externa sea siempre plana: plataban-da superior plana por arriba, chapa de fondo plana por abajo, y almas planas por el exterior. Sin embargo, se puede dar el caso de empalmes con continuidad del plano medio en almas centrales en cajones multicelulares o empalmes de rigidizadores o vigas con cartelas. En este caso el detalle de fatiga de aplicación sería el 17 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 29).

Si el detalle 17 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 se ejecuta sin transiciones de bordes en la chapa de mayor espesor y la pendiente resultante en la soldadura entre las dos chapas es menor o igual de 1/2, el detalle tendrá una categoría de fatiga 71 (corregido por el factor k_s en el caso de que alguna de las chapas sea superior a 25 mm).

Tabla 29 **Detalle 17 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 con empalme con continuidad del plano medio**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción		Requisitos
71	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm y/o excentricidad: $k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0,2} / \left(1 + \frac{6e}{t_1} \frac{t_1^{1,5}}{t_1^{1,5} + t_2^{1,5}}\right)$  $t_2 \geq t_1$	 	17) Empalmes en prolongación con continuidad del plano medio y discontinuidad de espesor.	

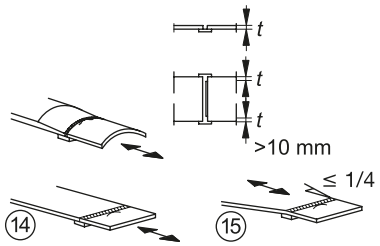
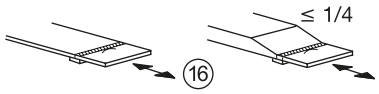
Lo que no aclara este detalle es qué ocurre si la pendiente es inferior a 1/4 y se ejecuta con transiciones en el espesor en la chapa más gruesa, acorde con los detalles 4 o 7 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, pero de forma simétrica. En este caso es evidente que, si la pendiente resultante por ambos lados fuera equiparable al detalle 4 o 7 y se cumplen las condiciones de ejecución para aquellos detalles, la categoría de fatiga será de 112 o 90 respectivamente, en lugar de 71.

El efecto de que pueda existir una cierta excentricidad entre las dos chapas a unir penaliza la categoría del detalle, como también lo hace si el espesor mínimo de las chapas a unir supera los 25 mm.

4.5.2 Empalmes de chapas a tope con chapa de respaldo

Como ya se ha expuesto, en la medida de lo posible es siempre conveniente realizar soldaduras con acceso por ambos lados (acorde con alguno de los detalles 1 a 11 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9) 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 (Tabla 30).

Tabla 30 **Detalles 14 a 16 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 de soldaduras con chapas de respaldo**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
71		Con chapa dorsal: 14) Empalmes en prolongación. 15) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos o curvos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$.	Detalles 14 y 15): Soldaduras en ángulo de unión de la chapa dorsal con extremos distantes más de 10 mm de la chapa cargada. Puntos de soldadura aplicados en la zona a ocupar por las soldaduras a tope.
	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		
50		16) Empalmes en prolongación con chapa dorsal permanente y anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$. También válido para chapas curvadas.	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.
	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		

En el caso de que sea necesario realizar empalmes de chapas a tope con penetración completa 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. En cuanto las chapas a unir tengan espesores significativos, el espesor de la chapa de respaldo puede que requiera un espesor de hasta 10 mm. De cualquier manera, el procedimiento de homologación de la soldadura es quién debe definir el espesor de la chapa de respaldo a emplear
- 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 anchura lo suficientemente amplia para evitar que ésta pueda quedar demasiado ajustada en uno o en los dos lados y pueda llegar a producirse la salida del caldo de la soldadura por alguno de ellos, produciendo descuelgues y posibles entallas en esa zona de la raíz

  En el caso de 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 o desbordes por un extremo

- 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. En las imágenes de la Figura 60 se muestran soldaduras con chapas de respaldo mal ajustadas con separación excesiva respecto de las chapas a unir

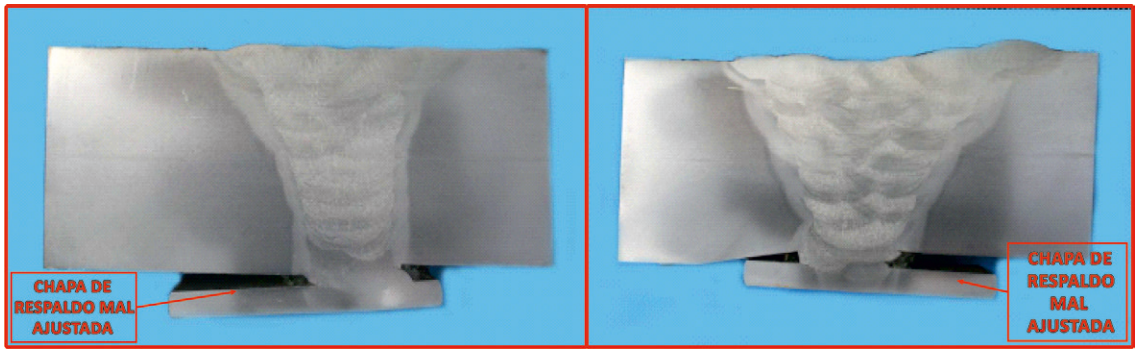


Figura 60 **Chapas de respaldo mal ajustadas. Detalles mal ejecutados**

La Figura 61 incluye una soldadura con la chapa de respaldo perfectamente ajustada en su posición

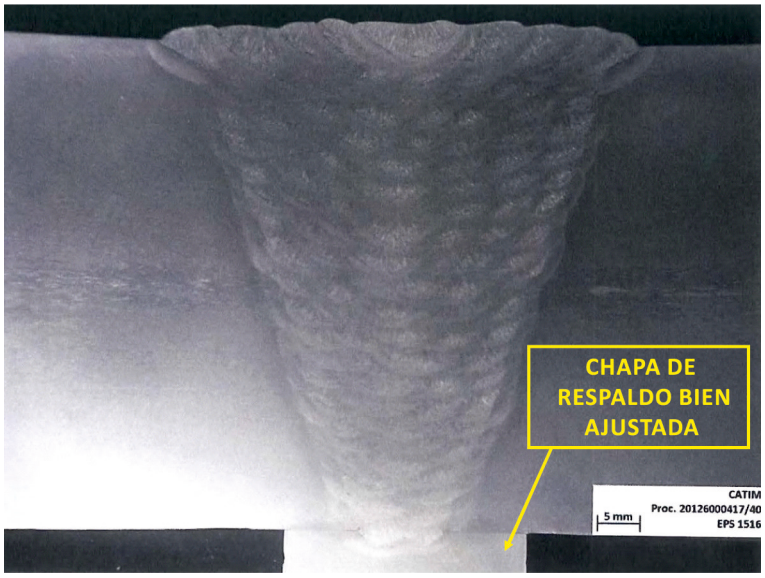


Figura 61 **Macro de soldadura con chapa de respaldo perfectamente colocada**

- Los punteos de fijación provisional de la chapa de respaldo a las chapas a unir 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. 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 borde (Figura 62), acorde con los detalles 14 y 15 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, 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

Antes del inicio de la primera pasada de raíz de la soldadura, se debe verificar que los punteos están exentos de fisuras o defectos, para poder englobarlos en la soldadura definitiva, acorde con 7.5.7 de UNE-EN 1090-2

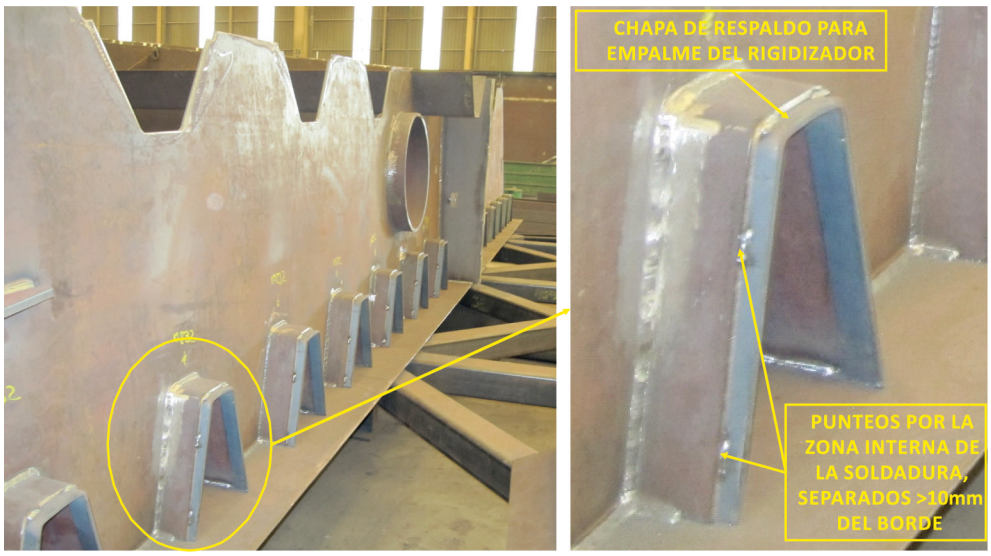


Figura 62 **Chapas de respaldo con punteos de más de 50 mm de longitud con al menos 10 mm libre en los extremos**

– 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

  En la Figura 63 se puede apreciar la soldadura entre dos chapas sin apenas transición en la mayor de ellas, lo cual obliga a un quiebro brusco de la soldadura en la zona de la raíz con la chapa de respaldo muy quebrada, con una pendiente muy superior al valor de 1/4 establecido para las transiciones de los detalles 14 a 16 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, por lo que esa unión ni siquiera podría considerarse como de categoría 50, aunque la chapa de respaldo estuviera bien ajustada

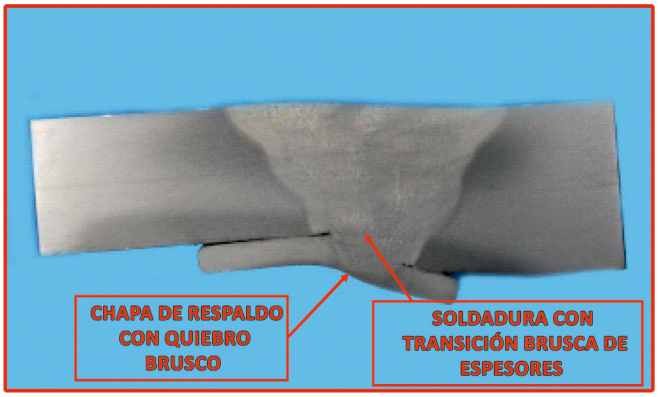


Figura 63 **Soldadura de dos chapas de distinto espesor sin transición de espesores y con la chapa de respaldo con un quiebro demasiado brusco**

- En el empalme entre chapas con diferente espesor en las que la mayor tenga una transición del mismo por el lado de la raíz, como suele ser habitual, será necesario disponer la chapa de respaldo plegada, con la pendiente de la transición en uno de los dos lados, de forma que se ajuste bien a las dos chapas a unir, evitando separaciones excesivas (Figura 64 y Figura 65).

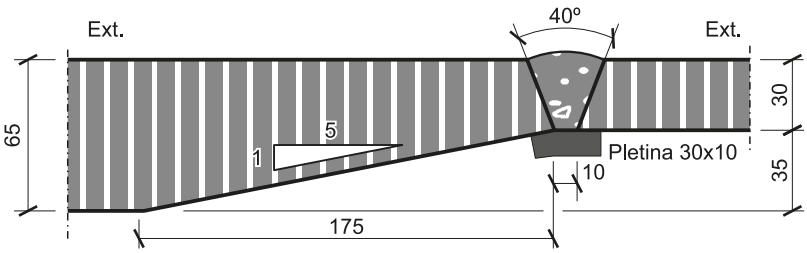


Figura 64 **Chapa de respaldo plegada en soldadura de chapas con diferente espesor**

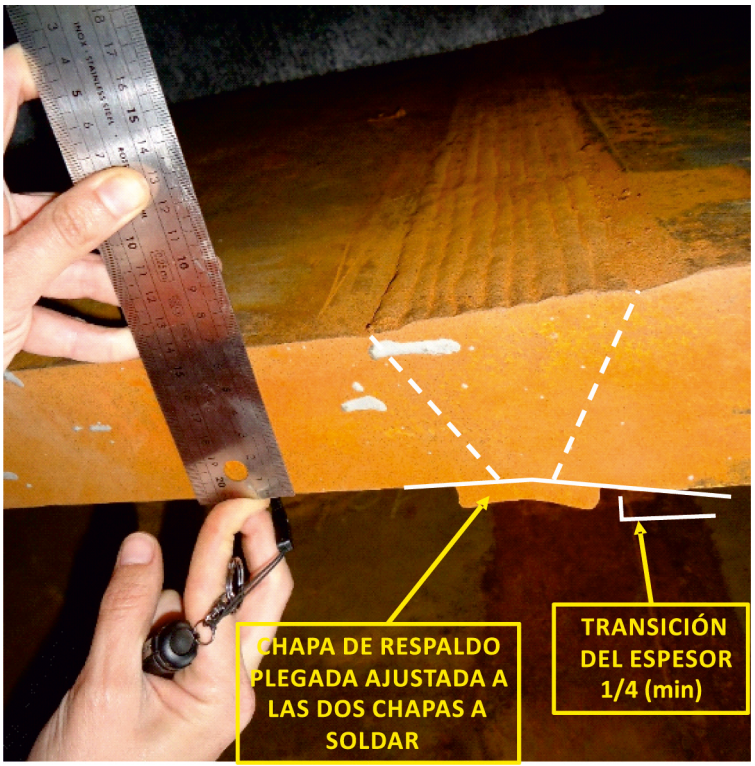


Figura 65 **Chapa de respaldo plegada en soldadura de chapas con diferente espesor**

- 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

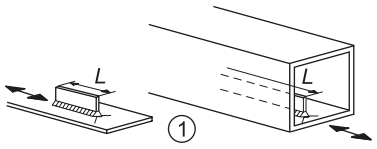
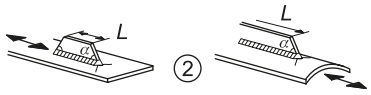
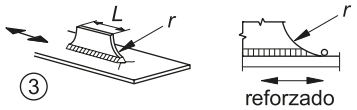
- Es fundamental que, previo al inicio de la soldadura, quede perfectamente documentado el correcto ajuste (*"fit-up"*) de las dos chapas a unir y el perfecto ajuste de la chapa de respaldo y sus punteos de fijación provisionales, de forma que se eviten los posibles problemas descritos antes y que, en caso de producirse, reducirán la categoría del detalle a fatiga

4.6 Rigidizadores, cartelas, y otros elementos soldados a chapas principales

4.6.1 Elementos soldados en la dirección paralela a las chapas principales

La tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 incluye una serie de detalles de elementos soldados a chapas principales analizando el detalle de la propagación de una fisura en la chapa principal en la zona del extremo de la soldadura del rigidizador.

Tabla 31 **Detalles 1 a 3 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 con elementos soldados en la dirección paralela al esfuerzo principal**

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$L \leq 50$ 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	$50 < L \leq 80$ mm			
63	$80 < L \leq 100$ mm			
56	$L > 100$ mm			
71	$L > 100$ mm $\alpha < 45°$		2) Cartelas longitudinales soldadas a chapas o tubos.	
80	$r > 150$ 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.

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 de la Tabla 31. Aunque esos tres detalles representan chapas o rigidizadores soldados en la dirección del esfuerzo principal de forma ortogonal a la chapa base, estos detalles serían también de aplicación para chapas soldadas con un cierto ángulo de incidencia, pero siempre que su soldadura se mantenga paralela a la dirección de la variación de tensiones de la chapa principal.

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 importante (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 31.

El detalle 2, con categoría 71, requiere un ángulo de incidencia menor de 45º y rebordeo de soldadura en el extremo del elemento. Para mejorar este detalle hasta una categoría de 80, es necesario pasar al detalle 3, que requiere un acabado con acuerdo con transición curva con un radio mayor de 150 mm, con la soldadura en ángulo 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, como se puede apreciar en la imagen de la Figura 66.

Un claro ejemplo de este tipo de detalles con la soldadura de un elemento longitudinal soldado a una chapa principal sería la soldadura del ala de un rigidizador transversal con sección en T al ala superior, a la chapa de fondo o las células (superior o inferior) de una sección cajón o bijácena. Si este detalle se ejecuta sin realizar ninguna transición curva en el extremo del ala del rigidizador, como suele ser habitual, la categoría del detalle de fatiga baja hasta 56 en cuanto la dimensión del ala del rigidizador supere los 100 mm que suele ser lo más habitual (Figura 67).



Figura 66 **Detalle con categoría 80 con acabado amolado tangente (detalle 3 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

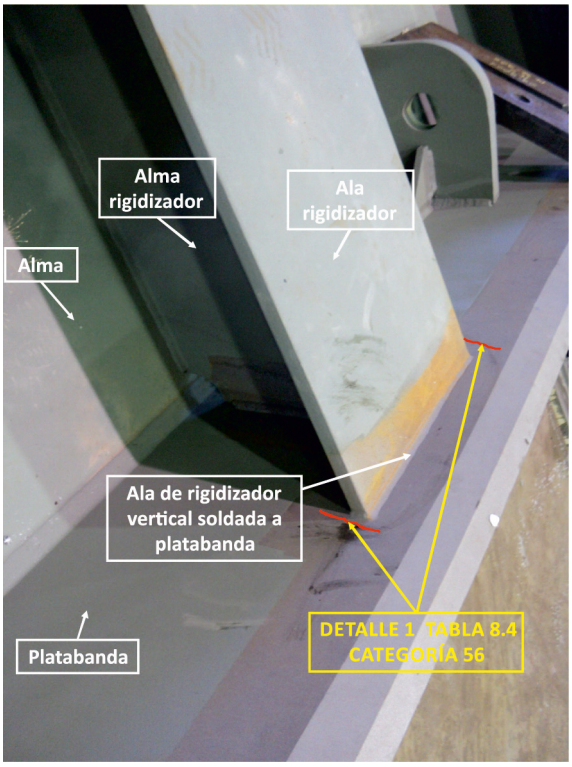


Figura 67 **Detalle con categoría 56 (detalle 1 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

Una forma de evitar este mal detalle, que reduce notablemente la categoría de fatiga de la chapa principal, sería no soldar el ala del rigidizador a la platabanda principal como se aprecia en los ejemplos de la Figura 68 y Figura 69, y soldar solo el alma. Si se ejecuta de esta manera la categoría del detalle subiría hasta 80, acorde con el detalle 7 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (ver apartado 4.6.4), dejando de condicionar en el dimensionamiento de la chapa principal a la que se suelda.

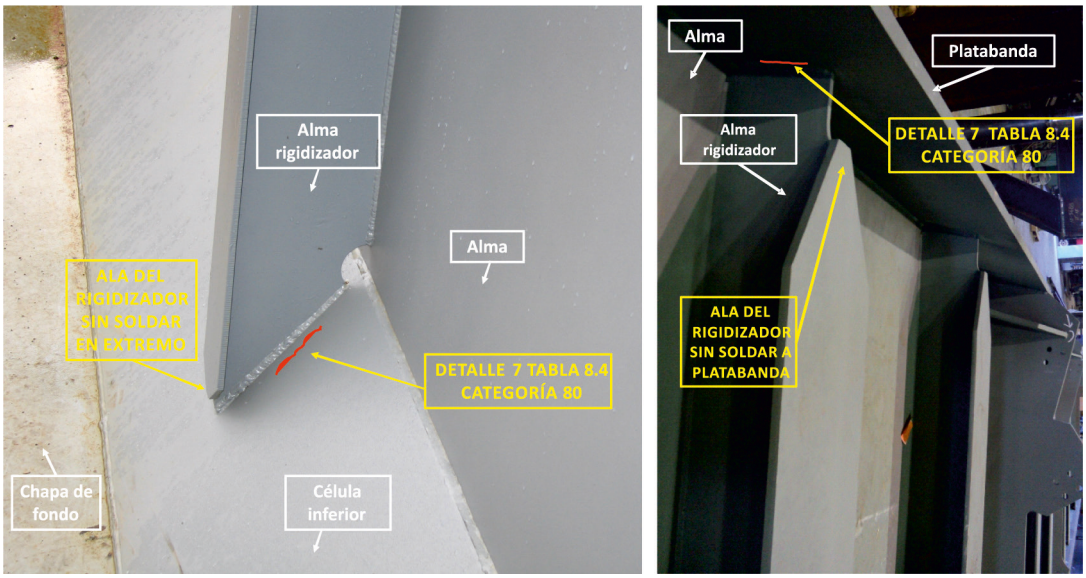


Figura 68 **Rigidizador transversal de alma con el ala sin soldar en su extremo. Detalle con categoría 80 (detalle 7 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

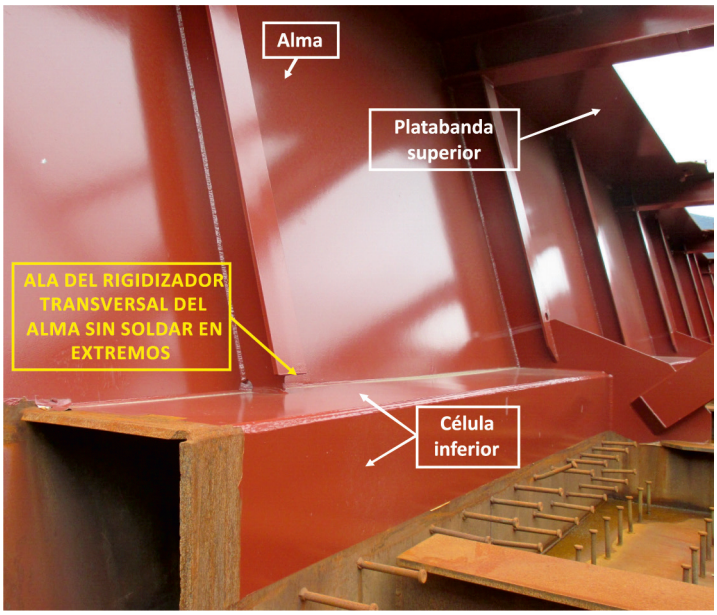


Figura 69 **Extremo de rigidizador transversal de alma con el ala sin soldar en su extremo. Detalle con categoría 80 (detalle 7 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

La Figura 70 muestra el detalle de la soldadura de un rigidizador transversal de alma que forma parte de un diafragma transversal en una sección bijácena. La soldadura de los dos rigidizadores en prolongación de las alas del montante horizontal al alma de la viga principal, al haberse realizado en este caso sin ninguna transición, se corresponde con el detalle 1 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, que, al tener una longitud mayor de 100 mm, presenta una categoría de fatiga baja, de 56. Este es un mal detalle que se puede mejorar claramente si se redondea con acuerdos circulares según el detalle 3 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, aunque dado que su ubicación está bastante alejada de la platabanda inferior y por lo tanto estará más cerca de la fibra neutra de la sección transversal, tendrá una variación tensional muy inferior a la de la platabanda, y es probable que, aunque la categoría de fatiga no sea elevada, no condicione su dimensionamiento incluso aunque tenga una categoría 56.

Sin embargo, el detalle de la soldadura del extremo del rigidizador transversal del alma de la imagen de la Figura 70, en donde no se suelda el ala inferior a la célula (o a una platabanda), presenta un detalle con categoría de fatiga 80, acorde con el detalle 7 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (ver apartado 4.6.4).

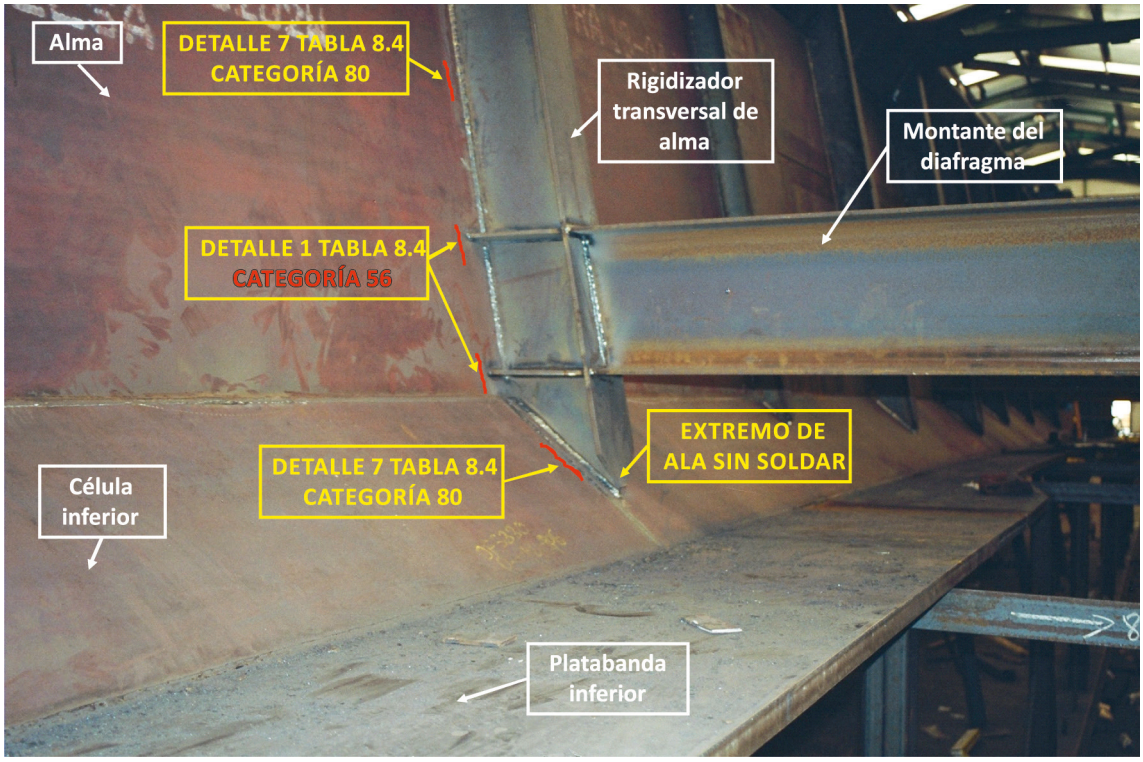


Figura 70 **Detalles típicos en los diafragmas transversales en secciones bijácena**

4.6.2 Problemática de la soldadura de elementos auxiliares en la dirección paralela a las chapas principales

El problema de dejar soldado algún elemento auxiliar recto en la dirección paralela a las chapas principales del puente, con una longitud superior a 100 mm, como una orejeta de izado o un elemento de arriostramiento o fijación provisional, es que el detalle reduce la categoría de fatiga hasta 56, acorde con el detalle 1 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993 1-9 (Tabla 31), y eso siempre que su soldadura se haga de forma continua y rebordeándola en los extremos. Dado que este detalle puede condicionar la respuesta a fatiga de una chapa principal, se debe evitar dejar cualquier elemento no definitivo en el puente.



Figura 71 **Orejetas provisionales de izado soldadas a una chapa principal**

A este respecto es necesario incorporar en los planos de montaje o de taller todas las orejetas de izado (Figura 71), casquillos, cáncamos o cualquier elemento auxiliar (Figura 72) de fijación a la estructura principal que sea preciso para las operaciones de manipulación, armado, izado, levantamiento, volteo, empuje, etc., durante el montaje, y definir los procedimientos para su posterior eliminación, su control y procedimientos de reparación y saneo de los eventuales daños a la estructura principal, de forma que no se vea reducida la categoría del detalle frente a fatiga de la chapa principal.



Figura 72 **Elementos auxiliares de montaje, soldados a chapas principales: barandillas provisionales, o "sietes" para ajuste de chapas**

La retirada de estos elementos auxiliares se debe hacer de forma controlada, cortando por encima de la soldadura sin producir daños o entallas en las chapas principales, y amolando la soldadura hasta su completa eliminación dejando la superficie de la chapa base perfectamente enrasada. Posteriormente a la retirada del elemento auxiliar será necesario realizar los ensayos oportunos que permitan asegurar que no existe ningún daño en la chapa base, normalmente ultrasonidos para descartar daños interiores y líquidos penetrantes o partículas magnéticas para descartar daños superficiales.

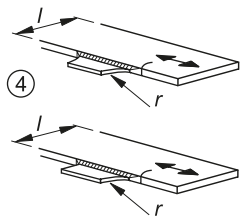
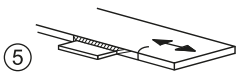
Aunque el Eurocódigo no dice nada de forma explícita al respecto, una chapa a la que se suelda un elemento auxiliar, si posteriormente se retira, se sanea la chapa principal y se verifica que no presenta defectos mediante los ensayos pertinentes que así lo aseguren, se podría considerar que mantiene su categoría de fatiga original, ya que no se incluyen criterios para reducir la categoría de fatiga de una chapa a la que se le suelda un elemento y que posteriormente se retira y repara.

Ahora bien, también es cierto que parece evidente que, aunque el elemento auxiliar se elimine y se repare la chapa principal, siempre será mejor la categoría de una chapa a la que no se le ha soldado previamente nada, que la de la misma chapa que pasa por el proceso de soldadura de un elemento auxiliar y que posteriormente se elimina y sanea la zona afectada. Este razonamiento incide en la necesidad previa de planificar con detalle y documentar en planos de taller o montaje, la ubicación de todos los elementos auxiliares que sea necesario soldar a la estructura por motivos de montaje, intentando en todo momento disponerlos en las zonas que sean menos susceptibles de condicionar a fatiga, y siempre que sea posible en chapas que estén siempre comprimidas.

4.6.3 Cartelas o chapas soldadas en el canto de una chapa principal

La tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 define en los detalles 4 y 5 (Tabla 32) 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. La posible fisura de fatiga se localiza en la chapa principal en el extremo de la soldadura de la chapa soldada en su canto. El detalle de fatiga de una posible fisura en la chapa soldada a la principal se rige por los detalles 18 o 19 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, descritos al final de este apartado.

Tabla 32 **Detalles 4 y 5 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9. Chapas soldadas en el canto de otra**

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
90	$\frac{r}{l} \geq \frac{1}{3}$ o $r > 150$ mm		4) Cartela soldada al borde de una chapa o al del ala de una viga.	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.
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.	

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.

Como se puede apreciar en el detalle 5, si la cartela a soldar se realiza sin ningún tipo de acuerdo o transición (Figura 73), la categoría de fatiga del detalle se reduce hasta 40 (Tabla 32) y, en general, se deben diseñar detalles del extremo de las cartelas con acuerdos circulares que mejoren este mal detalle.

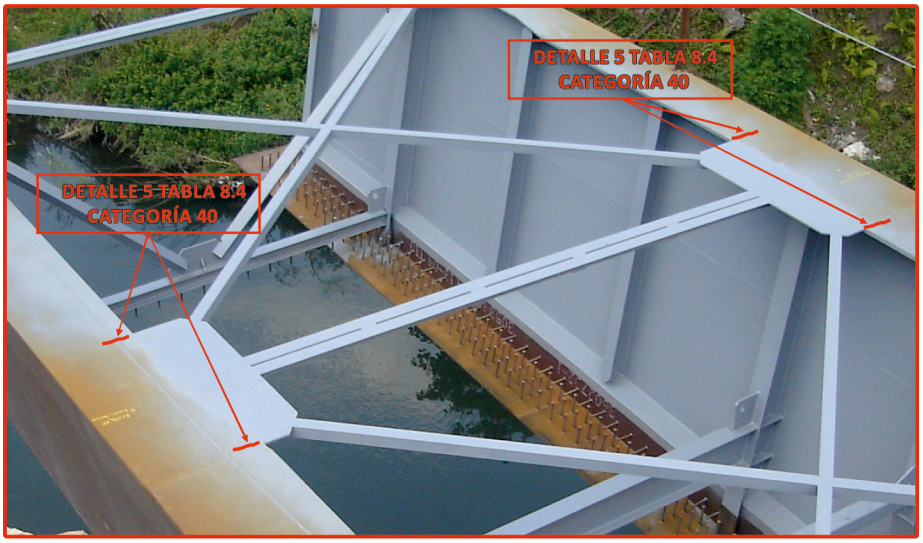


Figura 73 **Detalles con categoría 40 (detalle 5 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

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 $r/l \geq 1/3$, 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 74

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

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 74).



Figura 74 **Cartela soldada en el canto de una chapa principal con extremos redondeados y soldaduras amoladas con acabado tangente (detalle 4 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

Es bastante habitual que el espesor de la cartela o del elemento que se suelda contra el canto de una platabanda principal tenga menor espesor que esta última. En ese caso, no suele ser conveniente realizar la clásica transición de espesor (con pendiente no mayor del 1/4) en la platabanda principal (que normalmente es la de mayor espesor) ya que se estaría debilitando localmente su sección resistente, que normalmente suele estar bastante solicitada.

En el caso de que se decidiera hacer esta transición de espesor en la chapa principal, se debe verificar que su sección resistente reducida por la transición (que en ocasiones puede verse reducida significativamente), tenga capacidad suficiente para resistir los distintos estados límite bajo los esfuerzos solicitantes y que, además, la transición realizada en la chapa principal no acabe de forma brusca en la zona del extremo de la cartela, evitando las aristas vivas. Se debe suavizar la transición con una pérdida progresiva de la misma con una variación de la pendiente no mayor de 1/4.

En la imagen de la Figura 75 se aprecian varios detalles de ejecución incorrectos:

- Se ha realizado la transición del espesor en la chapa principal, lo cual *a priori*, se debería evitar
- La transición del espesor en la chapa principal es demasiado brusca, incumpliendo la pendiente mínima de 1/4 de los detalles 4 y 7 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9
- El acabado de la transición en el extremo deja aristas vivas y no se realiza de forma suave y progresiva con una pendiente mínima del 1/4

– La soldadura de la cartela no queda amolada con acabado tangente al canto de la chapa en el extremo



Figura 75 **Defectos de ejecución en la soldadura de una cartela a una chapa principal (detalle 4 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

La Figura 76 muestra el mismo detalle de la Figura 75 pero con una ejecución correcta, con una transición suave de la pérdida de la transición del espesor.

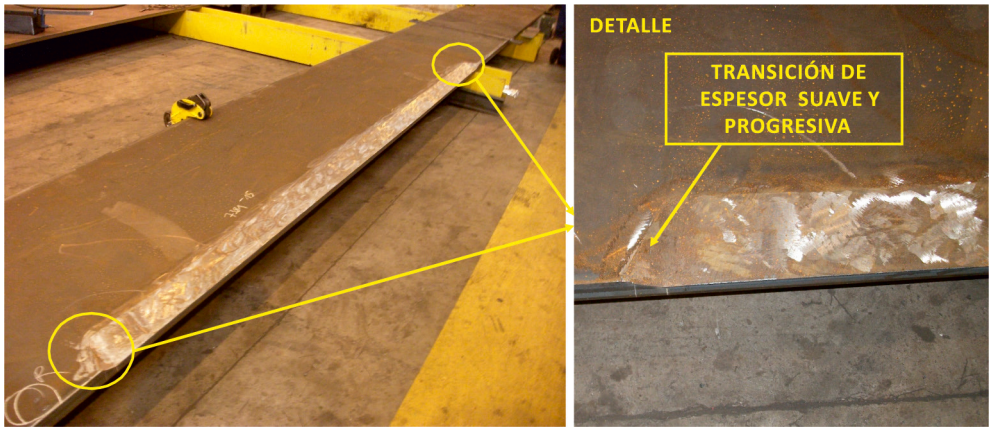


Figura 76 **Ejecución correcta de transición de espesor de forma suave y progresiva**

Los detalles 4 y 5 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 no especifican si la soldadura entre las dos chapas se debe hacer entre chapas del mismo espesor o si las dos chapas pueden tener distinto espesor, como suele ser lo más habitual. Además, en estos casos, lo más habitual es enrasar la unión de las dos chapas por una de las dos caras. Una alternativa al realizar la transición de espesor en la chapa principal, que como se ha descrito, no suele ser la mejor solución, sería la de soldar la cartela a tope con penetración total directamente contra la chapa principal, normalmente alineando la cartela con la cara superior en la platabanda superior, o con la cara inferior en la platabanda inferior, y completar dicha soldadura con una soldadura adicional en ángulo adicional por la parte libre, que haga que la transición de esfuerzos sea algo más suave, como el detalle de la Figura 77.

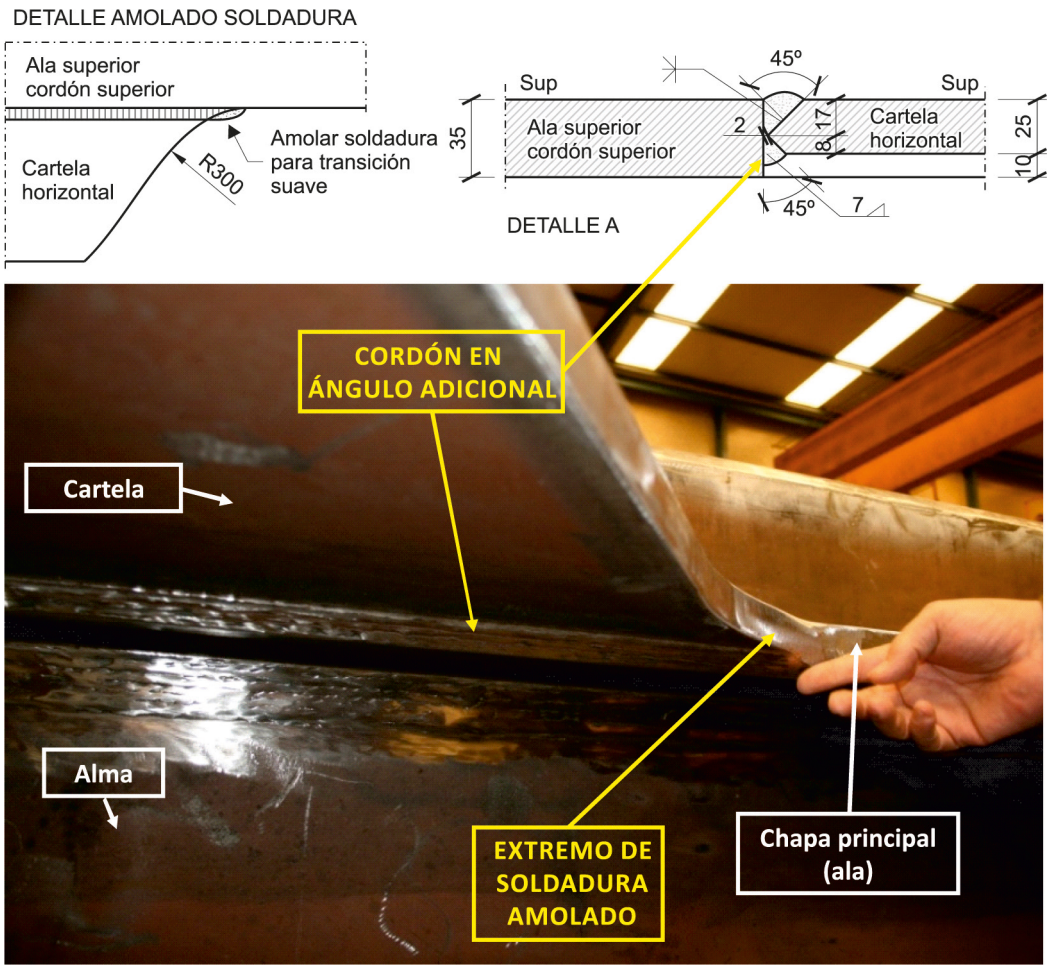
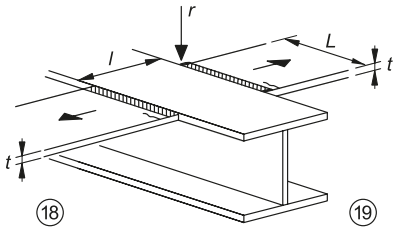


Figura 77 **Soldadura de cartela a chapa principal con soldadura adicional en ángulo**

El caso del detalle de la posible fisuración en el elemento secundario soldado al principal, ya sea una cartela, una viga o un elemento transversal soldado en prolongación de una plata-banda principal, se rige por los detalles 18 o 19 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 33), tabla que a su vez remite a los detalles 4 o 5 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 32) en función de que exista o no transición en el extremo de la soldadura.

Tabla 33 **Detalles 18 y 19 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 con empalme en prolongación**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
40		18) Empalmes en prolongación a través de ala interpuesta.	Detalles 18) y 19): La comprobación a fatiga del elemento interpuesto debe efectuarse como detalle 4 o 5 de la tabla 8.4.
Como el detalle 4 de la tabla 8.4		19) Para transiciones con acuerdo conforme al detalle 4 de la tabla 8.4.	

Por lo tanto la problemática de la chapa principal se reproduce en la secundaria, con detalles con la misma categoría de fatiga (Figura 78 y Figura 79).

En el caso de cartelas de arriostramientos soldadas a platabandas superiores en secciones cajón, no suele ser condicionante el detalle 18 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 en la zona de la cartela, porque la variación de tensiones en la zona de la soldadura de la cartela a la chapa principal (perpendiculares a la soldadura), en general, suele ser baja debido a que la geometría de los arriostramientos obliga a que el ancho de la cartela sea lo suficientemente grande como para reducir hasta un nivel adecuado las tensiones en esa zona. De cualquier manera, el detalle que sí puede ser claramente condicionante en platabandas superiores con mucha variación tensional de fatiga es el detalle 5 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 que, como se ha descrito anteriormente, se debería ejecutar siempre que fuera posible con la geometría redondeada del detalle 4 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9.

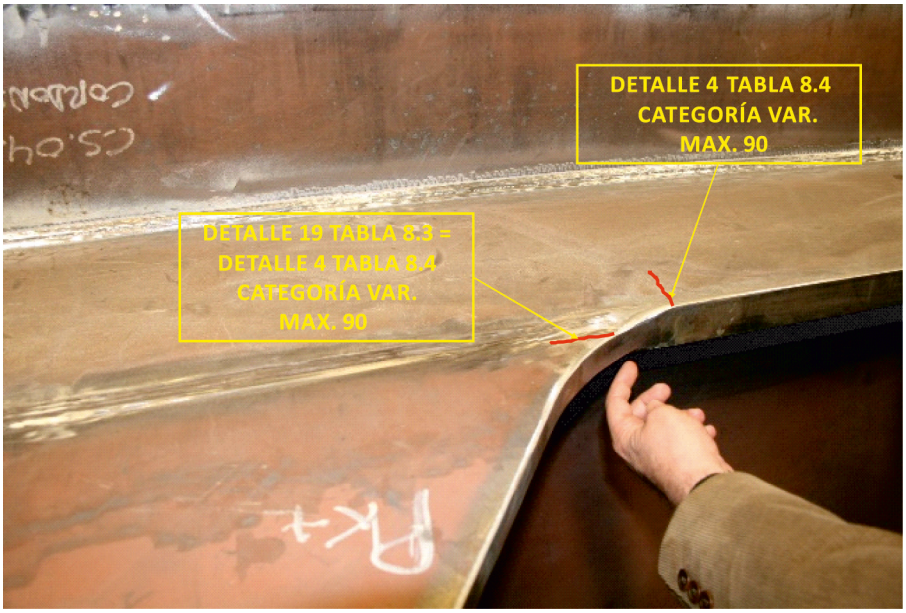


Figura 78 **Detalles bien concebidos y bien ejecutados con categoría 90 (detalle 19 de tabla 8.3 y detalle 4 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

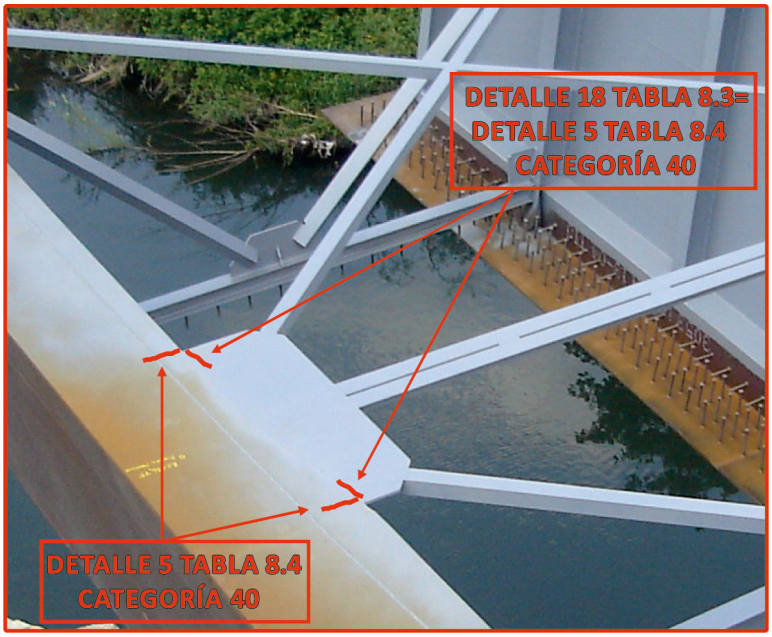
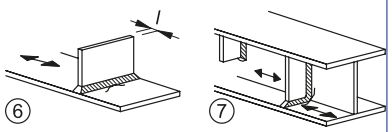
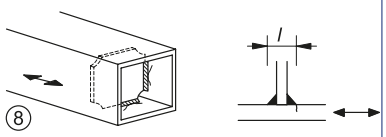


Figura 79 **Detalles mal concebidos con categoría 40 (detalle 18 de tabla 8.3 y detalle 5 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

4.6.4 Rigidizadores o chapas soldados transversalmente a las chapas principales

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 (Tabla 34).

Tabla 34 **Detalles 6 a 8 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, con soldaduras de cartelas o rigidizadores transversales**

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

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 (Figura 80).

La categoría del detalle dependerá del espesor del elemento soldado a la chapa principal (definido como *l* en la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9). Con espesores menores de 50 mm, que suele ser lo más habitual, la categoría del detalle sería de 80, y solo 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 (Figura 80), desbastando el extremo del cordón en caso de no continuidad.



Figura 80 **Rigidizador transversal y detalle de ojal con soldaduras rebordeadas**

La Figura 71, Figura 72 y Figura 73 muestran una serie de ejemplos de rigidizadores transversales de alma con sección en T soldados en sus extremos (a platabandas o a células superior e inferior) en los que sólo se suelda el alma contra una platabanda o una célula, dejando sin soldar el ala del rigidizador, logrando así una categoría de fatiga 80, acorde con el detalle 7 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 34). La Figura 81 muestra un plano con la definición de un caso particular.

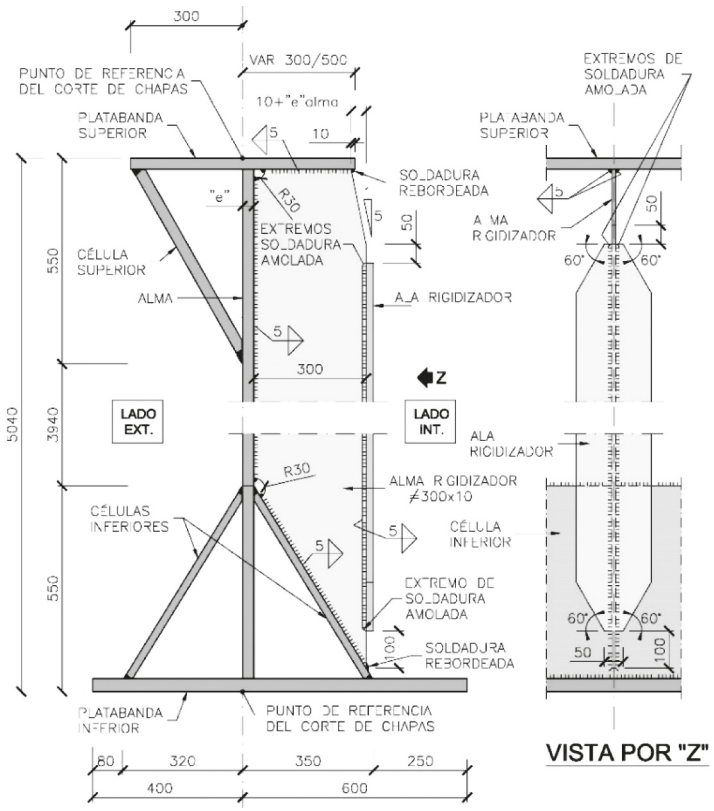


Figura 81 **Rigidizador transversal con ala sin soldar en extremos**

4.7 Soldaduras de rasante en piezas armadas y soldaduras entre alas y almas

La tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 define las soldaduras de rasante de elementos armados (Tabla 35).

Tabla 35 **Tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 con detalles de fatiga para elementos armados**

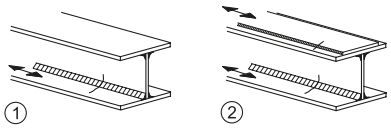
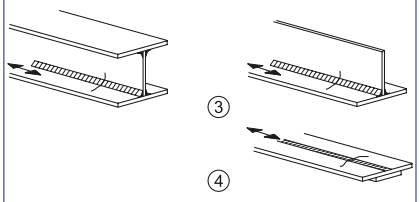
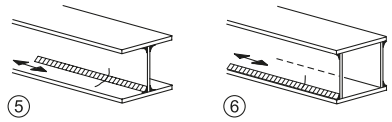
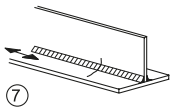
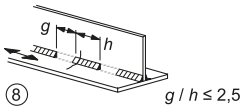
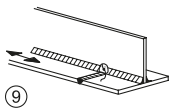
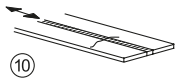
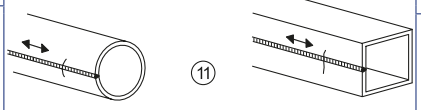
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
125		Cordones longitudinales continuos 1) Soldaduras a tope con ejecución automática o completamente mecanizada efectuada desde ambos lados. 2) Soldaduras en ángulo de ejecución automática o completamente mecanizada. Los extremos de las platabandas se comprobarán como detalles 6) o 7) de la tabla 8.5.	Detalles 1) y 2): La soldadura deberá ejecutarse ininterrumpidamente, a menos que se trate de una reparación realizada por especialistas y verificada mediante inspección.

Tabla 35 continúa >

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
112		3) Soldaduras a tope o en ángulo con ejecución automática o completamente mecanizada intermitente efectuada desde ambos lados. 4) Soldaduras a tope con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida efectuada con chapa dorsal continua desde un solo lado.	4)La categoría de este detalle es 100 N/mm² cuando se ejecuta intermitentemente.
100		5) Soldaduras a tope o en ángulo ejecutadas manualmente. 6) Soldaduras a tope, de ejecución automática o completamente mecanizada o manual desde un solo lado, en particular las de vigas cajón.	5) y 6) Es fundamental conseguir un buen ajuste entre las chapas de alma y de ala. Los bordes de alma deben acondicionarse para que la penetración de la soldadura en la raíz de la unión sea regular y continua.
100		7) Reparaciones automáticas o completamente mecanizadas o manuales de soldaduras a tope o en ángulo de detalles 1) a 6).	7) Es posible recuperar la categoría del detalle original mejorando la reparación mediante desbaste realizado por especialistas para eliminar los signos visibles de la reparación y la posterior verificación del detalle reparado.
80		8) Soldaduras longitudinales discontinuas en ángulo.	8) Los valores de $\Delta\sigma$ basados en las tensiones normales del ala.
71		9) Soldaduras longitudinales, a tope o en ángulo, o soldaduras interrumpidas por groeras de altura no superior a 60 mm. Para groeras de altura superior a 60 mm, véase el detalle 1) de la tabla 8.4.	9) Los valores de $\Delta\sigma$ basados en las tensiones normales del ala.
125		10) Soldaduras longitudinales a tope, enrase de ambas caras con muela en la dirección de carga, 100% END.	
112		10) Ejecución ininterrumpida; sin desbaste.	
90		10) Ejecución con interrupciones	
140		11) Soldaduras longitudinales de cierre de perfiles huecos con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida.	Espesor de pared $t \leq 12{,}5$ mm
125		11) Soldaduras longitudinales de cierre de perfiles huecos con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida.	Espesor de pared $t > 12{,}5$ mm
90		11) Ejecución con interrupciones.	

Los detalles 1 a 11 ejecutados con soldadura automática y con soldadura mecanizada tienen igual categoría de detalle.

La categoría del detalle de la soldadura longitudinal de rasante entre un ala y un alma, o entre una célula (superior o inferior) con un ala o un alma (Figura 82 y Figura 83) variará acorde con los detalles 1 a 3 y 5 a 9 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 en función de cómo se ejecute y

se controle. La posible fisuración de fatiga de estos detalles sería perpendicular a la soldadura progresando en las chapas de unión, en general, ala y alma, o célula y ala o alma.



Figura 82 **Soldaduras longitudinales de rasante de armado de piezas**

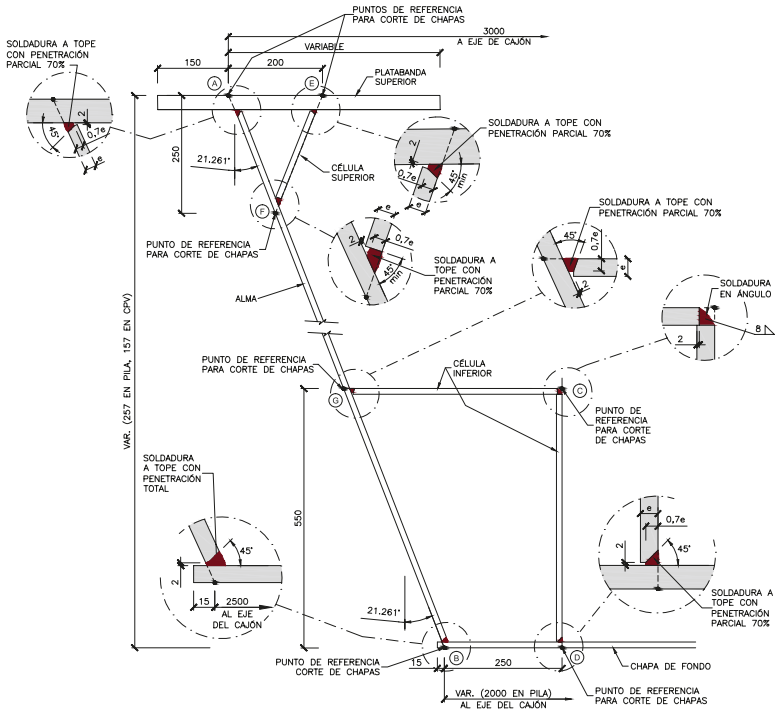


Figura 83 **Soldaduras longitudinales de rasante**

Una eventual fisura paralela a la soldadura de rasante se clasificaría como el detalle 8 o 9 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9, descrito más adelante.

Las principales diferencias de cada detalle de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 35) son las siguientes:

- Detalles 1 y 2 con categoría 125: es el mejor detalle de todos los de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 y aplica a soldaduras a tope (detalle 1) ejecutadas con soldadura automática o completamente mecanizada, efectuada la soldadura desde ambos lados, con soldaduras ininterrumpidas

  El detalle 2 aplicaría a soldaduras en ángulo ejecutadas con soldadura automática o completamente mecanizada (por un solo lado o por dos lados) con soldaduras ininterrumpidas

  El extremo de dichas soldaduras se debe verificar con los detalles 6 o 7 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9, descrita más adelante

- Detalle 3 con categoría 112: igual que los detalles 1 y 2 pero admitiendo soldaduras intermitentes efectuadas desde ambos lados

- Detalles 5 y 6 con categoría 100:

  - El detalle 5 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 aplica a soldaduras a tope o en ángulo ejecutadas manualmente

  - El detalle 6 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 aplica a soldaduras a tope ejecutadas con soldadura automática o completamente mecanizada ejecutada desde un solo lado. Este suele ser el caso de soldaduras de rasante de células a almas o a alas, ejecutadas en general a tope ya sea con penetración parcial o total

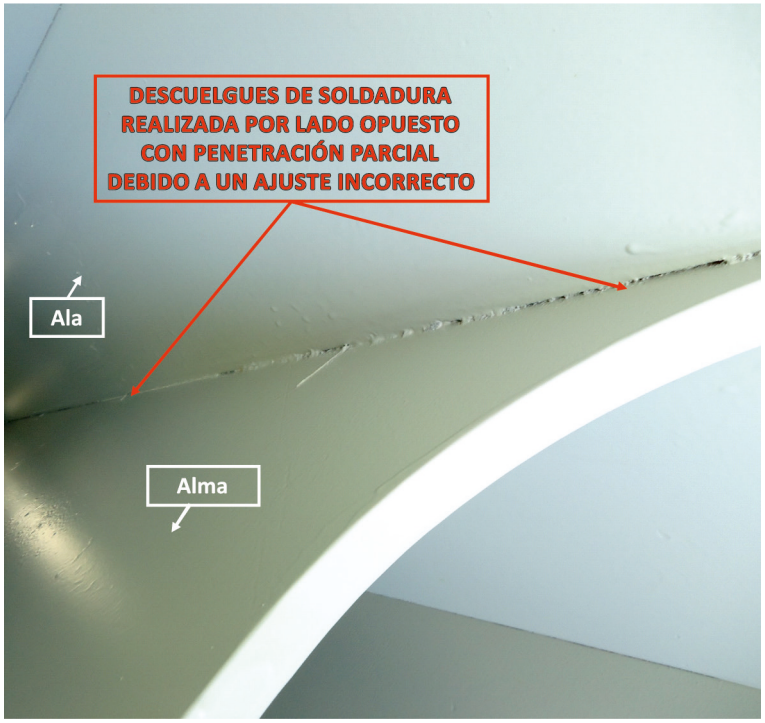


Figura 84 **Descuelgues en una soldadura con penetración parcial**

En ambos casos se requiere que se consiga un ajuste de las dos chapas a unir muy bueno, respetando las tolerancias establecidas en UNE-EN 1090-2, de manera que se eviten descuelgues de la soldadura por la zona de la raíz (Figura 84) debido a un exceso de separación entre las dos chapas a unir, y que el extremo de la chapa a soldar contra la chapa continua, normalmente el alma contra las alas, o la célula contra un ala o un alma, se acondicione para lograr que la penetración de la soldadura en la raíz sea regular y continua

- Detalle 7 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 con categoría 100: se refiere a reparaciones de soldaduras ejecutadas con soldadura automática, completamente mecanizadas o manuales de soldaduras a tope o en ángulo de los detalles 1 a 6. La forma de recuperar la categoría original del detalle sería realizar el desbaste por especialistas para eliminar los signos visibles de la reparación, y siempre que se haga el control de la reparación mediante los ensayos adecuados

- Detalle 8 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 con categoría 80: aplica a soldaduras longitudinales en ángulo discontinuas. En general este detalle no suele ser demasiado adecuado en puentes y en la medida de lo posible se debe evitar

- Detalle 9 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 con categoría 71: aplica a soldaduras longitudinales a tope o en ángulo interrumpidas por un ojal de altura no superior a 60 mm. Si la altura supera los 60 mm el detalle que aplica sería el detalle 1 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9. En la medida de lo posible se debe evitar que la altura del ojal sea superior a 60 mm, para no reducir todavía más la categoría del detalle, lo cual siempre se puede lograr haciendo el ojal rasgado en caso de que sea necesario, limitando su altura

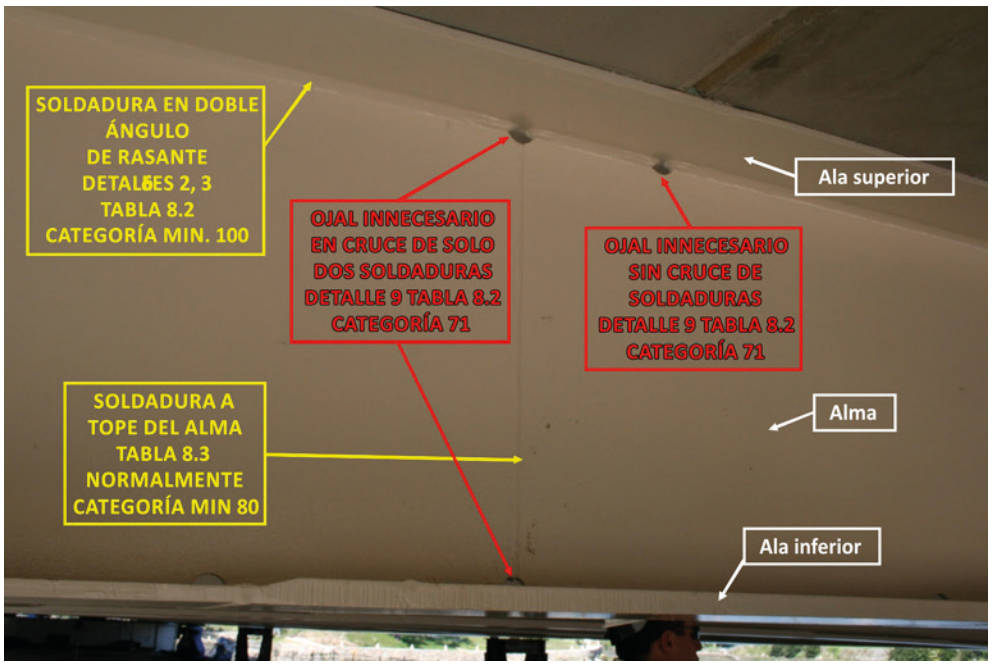


Figura 85 **Ojales innecesarios con categoría 71 (detalle 9 de tabla 8.2 de UNE-EN 1993 1-9)**

En general, si se evitan los ojales, los detalles de soldaduras de rasante tendrán al menos categoría 100 y no condicionarán frente al detalle de empalme de alas o almas, pero la presencia de un ojal sí puede llegar a condicionar el dimensionamiento frente a fatiga del ala al bajar la categoría hasta 71. La Figura 85 muestra una serie de ojales que se podrían haber evitado

Los ojales en los empalmes del alma de una viga se pueden evitar casi siempre adoptando las precauciones siguientes:

- Siempre que se evite el cruce de 3 soldaduras, se podría evitar disponer un ojal, por lo que en las uniones de taller se deben decalar los empalmes de alas y de alma. En el caso de existir células, estos empalmes también se deben decalar, evitando que confluyan en la misma sección

  En las uniones de tramos en obra se debe intentar hacer lo mismo, evitando en la medida de lo posible los empalmes de 3 soldaduras en la misma sección. La Figura 86 y Figura 87 representan un esquema y una imagen de soldaduras decaladas de almas, alas y células, evitando el empleo de ojales

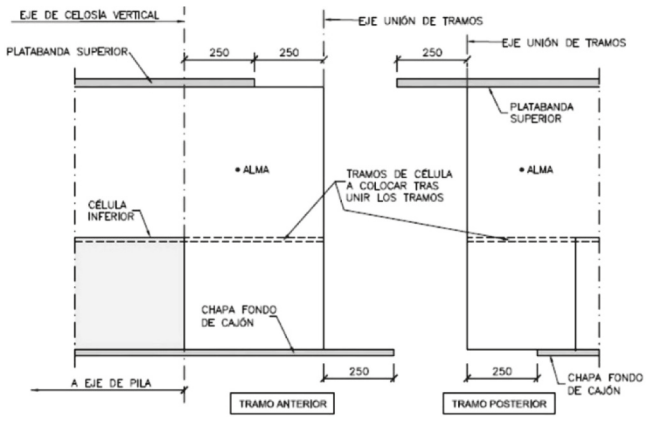


Figura 86 **Empalme de tramos en obra con soldaduras decaladas**



Figura 87 **Empalme entre tramos con decalaje de soldaduras de alas y almas**

- En el caso de que el empalme del ala se haga entre dos chapas de distinto espesor, será necesario realizar una transición en el espesor del ala de mayor espesor, acorde con los detalles de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 28). En este caso la forma de evitar el ojal sería decalar las soldaduras de empalme de alas y alma, y realizar el corte del alma con la forma de la transición del espesor de la chapa del ala (Figura 88). De esta forma se puede asegurar el perfecto ajuste del alma a las dos chapas del ala a unir, incluso en la zona de transición de espesor, y evitar así la necesidad de disponer un ojal, tal y como muestra la Figura 89 y Figura 90

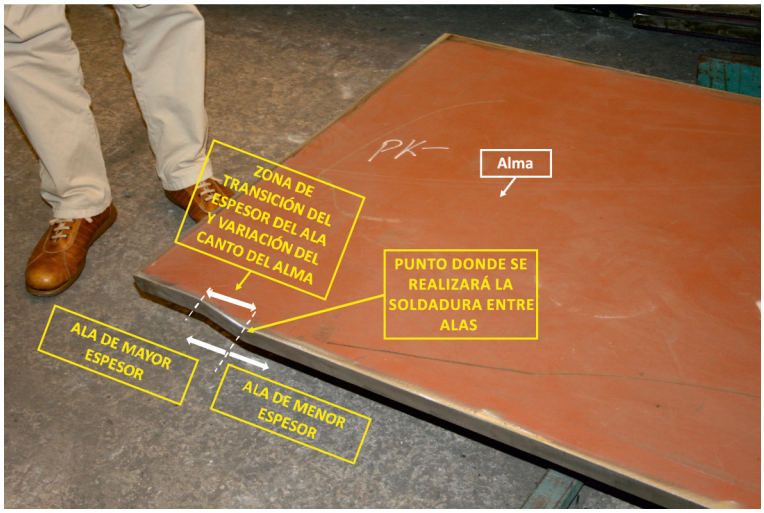


Figura 88 **Corte de alma con la misma transición que el ala para evitar un ojal**

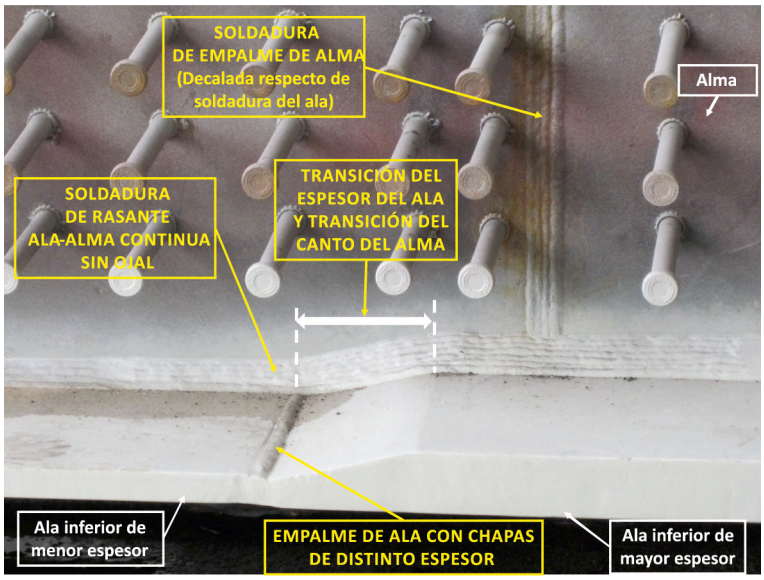


Figura 89 **Soldadura ala-alma con cambio de espesor del ala sin necesidad de ojal**

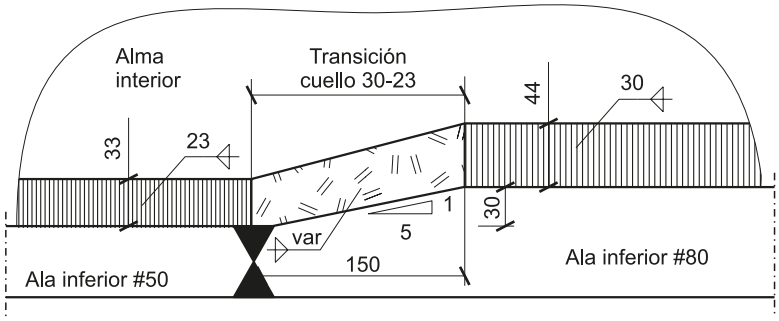


Figura 90 **Plano de taller que representa el detalle de la soldadura de rasante continua en una transición de espesor de chapas**

- En el caso de que la soldadura de rasante entre ala y alma tenga que cambiar entre una soldadura en doble ángulo con acceso para soldar por los dos lados, a una soldadura a tope con penetración parcial o total con acceso solo desde un solo lado, también se puede evitar la necesidad de disponer un ojal en el punto del cambio de la soldadura si se realiza una transición suave de la penetración y se prolonga la soldadura en ángulo amolándola en su extremo una vez se solape con la parte con penetración. La variación de la transición y la pérdida de la soldadura en ángulo en el extremo amolado se debe hacer con una pendiente no mayor de 1/4. La Figura 91 y los esquemas del plano de taller de la Figura 92 muestran el detalle de transición de la penetración en el alma evitando la necesidad del ojal.

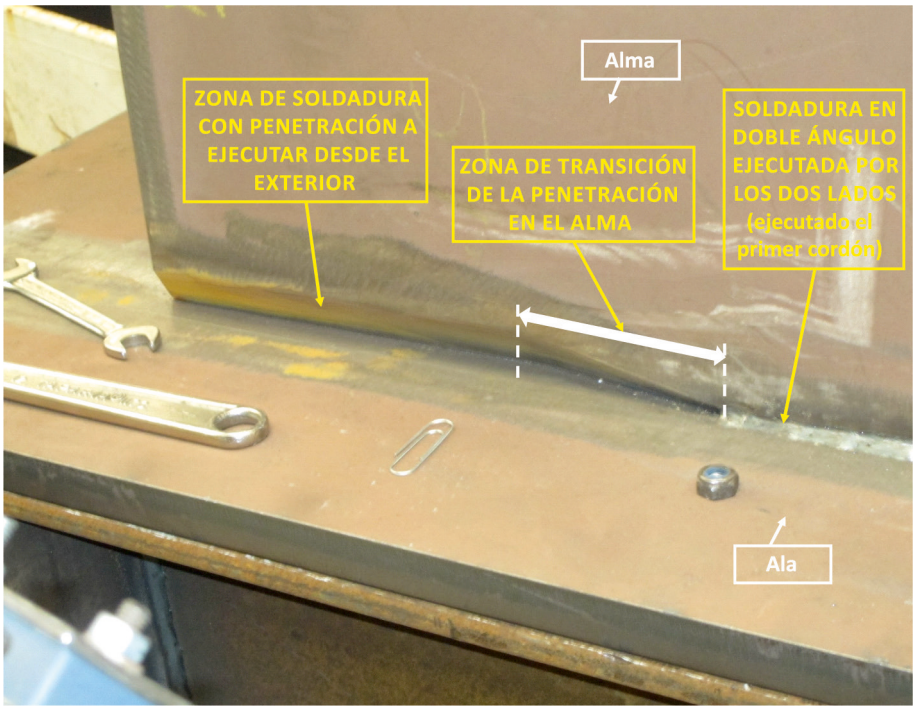


Figura 91 **Detalle de transición de soldadura en doble ángulo a soldadura a tope con penetración (parcial) por un solo lado**

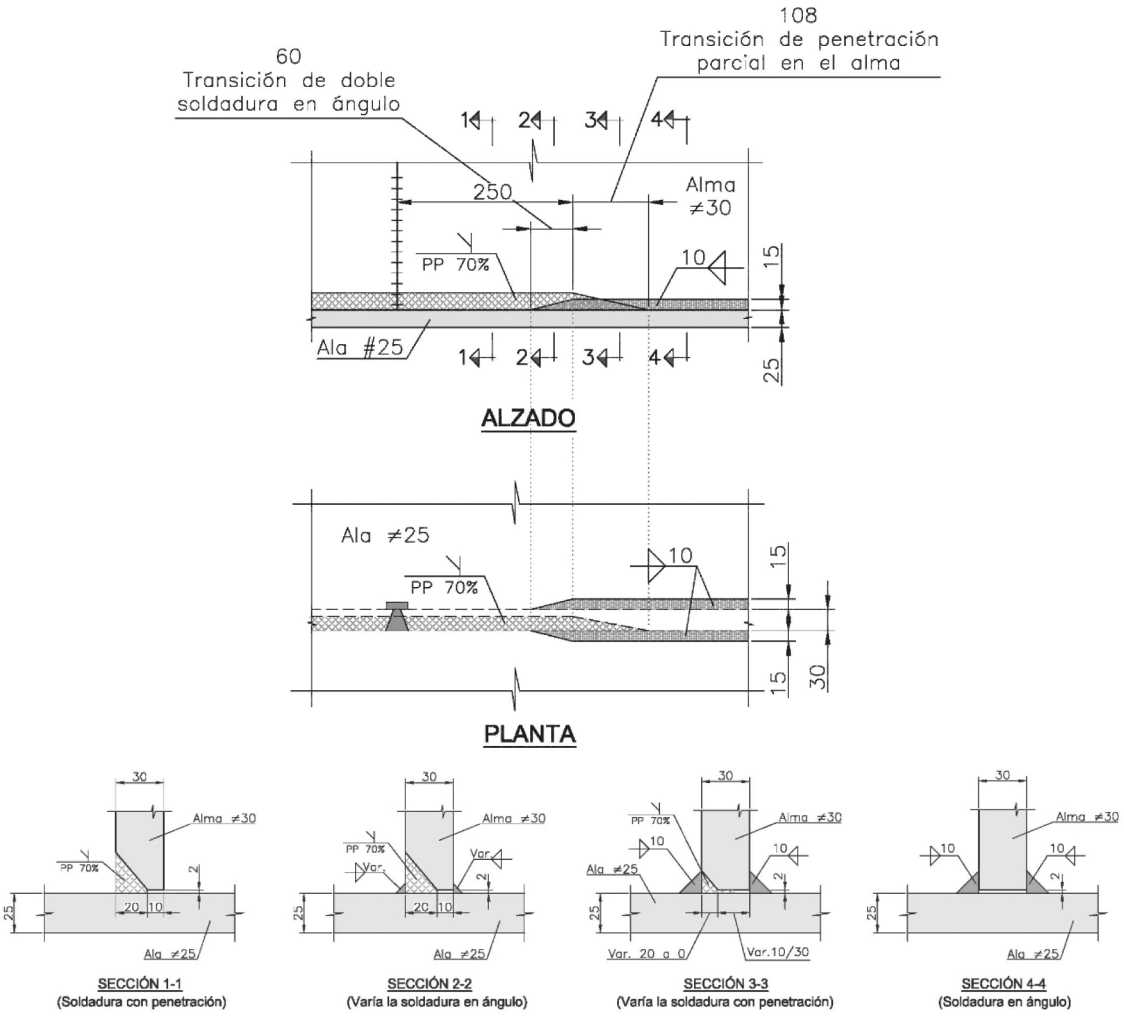


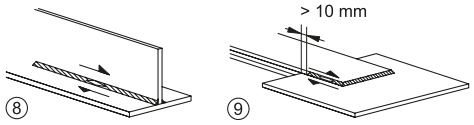
Figura 92 **Plano de taller con la transición de la soldadura en doble ángulo a soldadura a tope con penetración (parcial) por un solo lado**

Aunque la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 no lo dice de forma explícita, las soldaduras a tope de rasante entre alas y almas (y entre células y alas o almas) incluidas en dicha tabla se pueden ejecutar tanto con penetración completa como con penetración parcial, que suele ser el caso más habitual de las soldaduras de rasante cuando no hay acceso para soldar en doble ángulo, o el ángulo de incidencia entre las dos chapas a soldar recomiendan adoptar esta solución. Este sería el caso de un ángulo de incidencia muy obtuso, que obligaría a recurrir a la soldadura con penetración.

Es necesario puntualizar que, aunque la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 no lo dice explícitamente, el detalle de soldaduras en ángulo ejecutadas por los dos lados que llegan a un ojal, aunque como se ha descrito no es el mejor detalle al reducir la categoría de fatiga a 71, se debe hacer siempre rebordeando las soldaduras en el extremo (Figura 80). El rebordeo no tiene por qué mantener la misma garganta de las soldaduras en ángulo longitudinales, pero sí debe hacerse de forma que no existan entallas ni defectos en la zona de la transición en el interior de la zona del ojal y el ojal debe tener la dimensión suficiente para que las soldaduras a rebordear a su través no se junten.

Los detalles 1 a 3 y 5 a 9 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 35) descritos anteriormente aplican a una posible fisura progresando en una o las dos chapas soldadas con soldadura de rasante. El detalle que regula una eventual fisura en una soldadura en ángulo de rasante es el detalle 8 o 9 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9, que presenta una categoría de fatiga 80, aplicable a la carrera de tensiones tangenciales $\Delta\tau$, por lo que la rama de la curva de fatiga corresponde a $m = 5$ (Tabla 36).

Tabla 36 **Detalles 8 y 9 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9. Soldaduras de rasante en ángulo**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
80 $m = 5$		8) Soldadura continua en ángulo con transmisión de esfuerzos rasantes, como en el caso de las uniones ala-alma en vigas armadas. 9) Uniones por solape con soldaduras en ángulo.	8) $\Delta\tau$ debe calcularse para la sección de garganta del cordón. 9) $\Delta\tau$ debe calcularse para la sección de garganta considerando toda la longitud del cordón, cuyo extremo debe distar más de 10 mm del borde de la chapa. Véanse también los detalles 4) y 5).

Los detalles de empalme de chapas planas con soldaduras longitudinales paralelas a la dirección de la variación de tensiones (Figura 93 y Figura 94), o de tubos cerrados, se representan en los detalles 4, 10 y 11 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 35):

- El detalle 4 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 35) con categoría 112 representa el empalme de dos chapas planas con la soldadura paralela a la dirección del esfuerzo principal, ejecutada con chapa de respaldo. La soldadura a tope se debe ejecutar con soldadura automática o completamente mecanizada de forma ininterrumpida

  En general el detalle anterior no suele ser demasiado habitual en puentes, sin embargo sí suele ser algo más habitual el detalle 10 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 35), que representa el empalme de dos chapas planas con la soldadura paralela a la dirección del esfuerzo principal, con soldadura a tope desde ambos lados sin chapa de respaldo

  Este detalle se suele dar en el empalme de chapas de alma (Figura 93) o en chapas de fondo de cajones anchos (Figura 94), cuando dichas chapas son demasiado grandes y por condiciones de laminación se requiere realizar un empalme longitudinal. Normalmente con chapas de más de 3 m de ancho suele ser necesario realizar un empalme longitudinal. Este detalle presenta 3 categorías diferentes en función de cómo se ejecute:

  - Categoría 125, si se ejecuta la soldadura desde los dos lados, se amolan ambas caras en la dirección del esfuerzo paralelo a la soldadura, y si se realizan ensayos no destructivos, en general ultrasonidos o radiografías
  - Categoría 112, si la soldadura se ejecuta desde ambos lados de forma ininterrumpida, pero no se amolan las caras de la soldadura

- Categoría 90, si la soldadura se ejecuta desde ambos lados con interrupciones y no se amolan las superficies de la soldadura

En general lo habitual en este detalle suele ser la categoría 90, si se suelda de forma interrumpida, o 112 si se hace de forma ininterrumpida, ya que no es muy habitual amolar la soldadura, que subiría la categoría de fatiga hasta 125



Figura 93 **Soldaduras longitudinales de almas**



Figura 94 **Soldadura longitudinal en chapa de fondo**

– El detalle 11 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 35) representa el empalme longitudinal de un elemento tubular cerrado. Como el detalle 10, presenta 3 categorías diferentes en función de cómo se ejecute:

  • Categoría 140 si se ejecuta con soldadura automática o completamente mecanizada ejecutada de forma ininterrumpida y con espesor de chapas a unir menor o igual a 12,5 mm

  • Categoría 125: igual que el caso anterior, pero con espesor superior a 12,5 mm

  • Categoría 90: con soldadura automática o completamente mecanizada ejecutada con interrupciones

  En general es muy habitual recurrir a la necesidad de puntear las chapas a unir en la fase de armado previo a la realización de la soldadura de rasante definitiva. Como ya se ha descrito al tratar las soldaduras a tope con chapa de respaldo, para que esos punteos se puedan englobar dentro de la soldadura definitiva, deben tener una longitud mínima de 50 mm, estar separados al menos 10 mm de extremo de la soldadura y se debe verificar que los punteos están exentos de fisuras o defectos acorde con el apartado 7.5.7 de UNE-EN 1090-2. La Figura 95 muestra el armado de perfiles tubulares con punteos discontinuos con más de 50 mm de longitud.



Figura 95 **Armado de piezas con punteos discontinuos de más de 50 mm de longitud**

4.8 Uniones soldadas transmisoras de esfuerzos

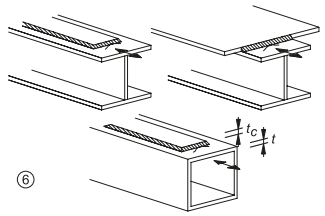
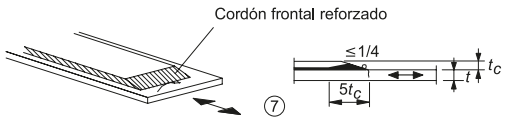
4.8.1 Empleo de refuerzos de chapas principales con uniones soldadas por solape

La tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 define en los detalles 6 y 7 la categoría de fatiga de las soldaduras de refuerzo de chapas principales mediante el empleo de chapas adicionales superpuestas (Tabla 37).

En general estos detalles son malos frente a fatiga y se deben evitar en la medida de lo posible, al tener una categoría baja (menor o igual de 56). En fase de proyecto será siempre preferible aumentar el espesor de la chapa principal evitando la soldadura por solape o buscar un diseño más adecuado ante la necesidad de añadir área a una chapa principal, con otro tipo de rigidización.

Para las categorías marcadas con asterisco (56*) se remite al apartado 3.3.2.1, al referirse a las curvas de fatiga normativas para categorías alternativas.

Tabla 37 **Detalles 6 y 7 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9**

<table>
<tr><th>Categoría de detalle</th><th colspan="3">Detalle constructivo</th><th>Descripción</th><th>Requisitos</th></tr>
<tr><td></td><td>$t_c < t$ [mm]</td><td>$t_c \geq t$ [mm]</td><td rowspan="6"> 
⑥</td><td rowspan="6">Platabandas en vigas y vigas armadas:
6) Extremos de platabandas simples o múltiples, soldadas con o sin cordón en el borde frontal.</td><td rowspan="6">6) Si la platabanda es más ancha que el ala, es necesario un cordón de soldadura en el borde frontal cuidadosamente desbastado para eliminar mordeduras.
La longitud mínima de platabanda es de 300 mm. Para longitudes menores, el efecto del tamaño es el del detalle 1.</td></tr>
<tr><td>56*</td><td>$t \leq 20$ mm</td><td>-</td></tr>
<tr><td>50</td><td>$20 < t \leq 30$</td><td>$t \leq 20$</td></tr>
<tr><td>45</td><td>$30 < t \leq 50$</td><td>$20 < t \leq 30$</td></tr>
<tr><td>40</td><td>$t > 50$ mm</td><td>$30 < t \leq 50$</td></tr>
<tr><td>36</td><td>-</td><td>$t > 50$</td></tr>
<tr><td>56</td><td colspan="3"> 

⑦</td><td>7) Platabandas en vigas y vigas armadas.
La longitud del refuerzo ha de ser superior a 5 t_c</td><td>7) El cordón del borde frontal enrasado con muela, así como el extremo de la platabanda, con una pendiente < 1/4, si $t_c > 20$ mm.</td></tr>
</table>

Ambos detalles, 6 y 7, regulan la categoría de una posible fisura de fatiga que se produzca en la chapa principal, en el extremo de la chapa de refuerzo soldada. El detalle 6 se aplica tanto si se ejecuta con o sin soldadura en el extremo frontal, y la categoría oscila entre 36 y 56 en función del espesor de cada una de las dos chapas a unir, siendo t el espesor de la chapa principal y t_c el espesor de la chapa de refuerzo.

La forma de mejorar ligeramente el detalle 6 para espesores importantes de chapas, sería ejecutarlo respetando los requisitos del detalle 7 (Figura 96), con categoría de fatiga 56, reforzando el cordón de soldadura en una longitud de al menos 5 veces el espesor de la chapa del refuerzo y amolando el borde del extremo de la soldadura frontal junto con el extremo de la chapa del refuerzo con una pendiente menor o igual a 1/4. De cualquier manera, el detalle sigue siendo malo y casi con toda seguridad condicionará el dimensionamiento de la chapa principal.

Aunque la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 no indica nada al respecto, parece evidente que, si el detalle 7 se ejecuta redondeando la geometría del extremo de la chapa de refuerzo con un acabado suave redondeado y no recto en el extremo frontal, la categoría de fatiga podría mejorar por encima de 56. De cualquier manera, dado que no es difícil concebir en proyecto soluciones alternativas, este detalle se debería evitar siempre que sea posible en zonas susceptibles de condicionar frente a fatiga.



Figura 96 **Chapa de refuerzo con unión por solape con categoría variable entre 36 y 56 (detalle 6 o 7 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9). Mal detalle**

Otro caso de aplicación del detalle 6 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 sería la posible fisura en la chapa de fondo con la soldadura de una cuña metálica dispuesta sobre un apoyo (Figura 97). Este detalle que se da siempre en todos los apoyos de puentes metálicos y mixtos tiene también una categoría de fatiga relativamente baja, entre 56 y 36, en función del espesor de la chapa de fondo y de la cuña.

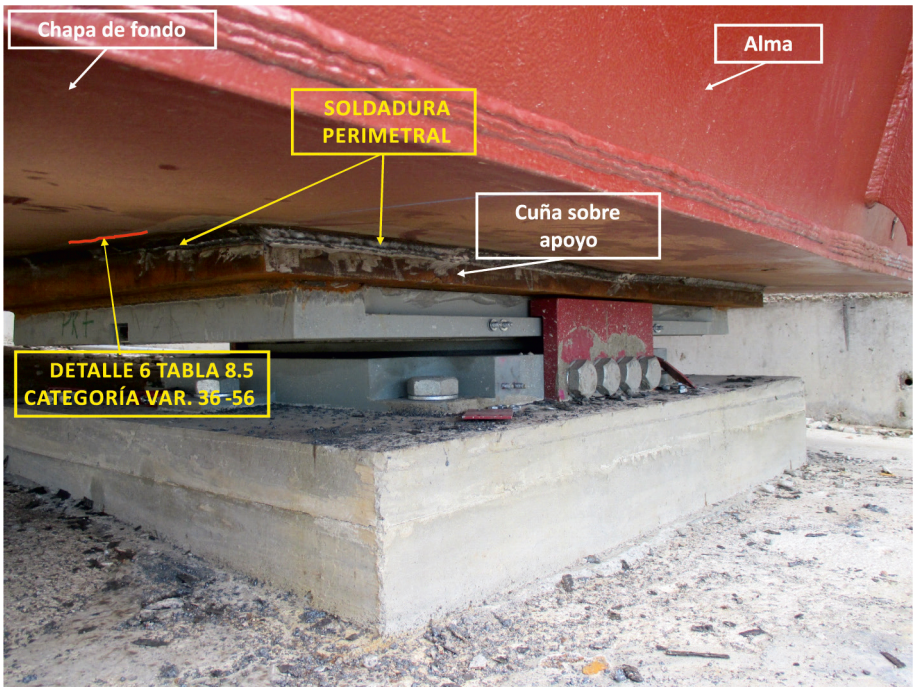


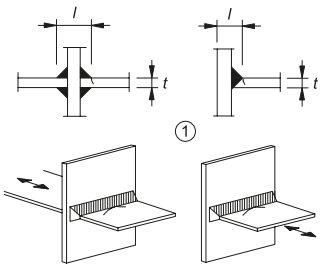
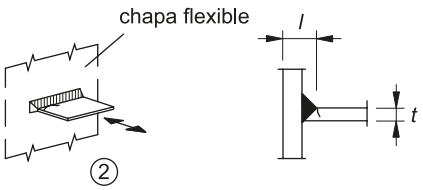
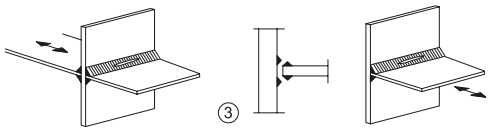
Figura 97 **Soldadura de cuña de apoyos a chapa de fondo de un cajón mixto con categoría variable entre 36 y 56 (detalle 6 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9)**

En general la cuña suele tener bastante espesor, normalmente incluso más que el de la propia chapa de fondo ($t_c > t$) y para espesores altos de la chapa de fondo (t) la categoría de fatiga del detalle baja bastante. De cualquier manera, aunque el detalle de fatiga no es bueno, no suele ser demasiado condicionante dado que, en estribos o en apoyos de tableros isostáticos la chapa de fondo apenas tiene variación tensional, mientras que en apoyos continuos la variación tensional estará limitada por la presencia del hormigón de fondo, y además la chapa de fondo estará siempre comprimida.

4.8.2 Uniones soldadas perpendiculares transmisoras de esfuerzos

Los detalles 1 a 3 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 representan la categoría de fatiga de la soldadura de chapas transmisoras de esfuerzos, soldadas de forma perpendicular (Tabla 38).

Tabla 38 **Detalles 1 a 3 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9**

<table>
<tr><th>Categoría de detalle</th><th colspan="2">Detalle constructivo</th><th>Descripción</th><th>Requisitos</th></tr>
<tr><td>80</td><td>$l \leq 50$ mm
todo t</td><td rowspan="6"> 
①</td><td rowspan="7">Uniones en cruz y en T:
1) Fisuración del pie del cordón en soldaduras a tope con penetración total y en todas las soldaduras con penetración parcial.</td><td rowspan="8">1) Comprobada mediante inspección la ausencia de discontinuidades y desalineaciones fuera de las tolerancias especificadas por la Norma Europea EN 1090.
2) Para calcular $\Delta\sigma$ se emplean las tensiones nominales modificadas.
3) En uniones con penetración parcial son necesarias dos comprobaciones a fatiga. Una para fisuración de la raíz de la unión con las tensiones definidas en el capítulo 5 y con las categoría de detalle 36* para $\Delta\sigma_{\omega}$ y 80 para $\Delta\tau_{\omega}$
Otra para fisuración del pie del cordón con el valor de $\Delta\sigma$ correspondiente a la chapa que transmite la carga.
Detalles 1) a 3):
La desalineación de las chapas cargadas no debería superar el 15% del espesor de la chapa interpuesta.</td></tr>
<tr><td>71</td><td>$50 < l \leq 80$ mm
todo t</td></tr>
<tr><td>63</td><td>$80 < l \leq 100$ mm
todo t</td></tr>
<tr><td>56</td><td>$100 < l \leq 120$ mm
todo t</td></tr>
<tr><td>56</td><td>$l > 120$ mm
$t \leq 20$ mm</td></tr>
<tr><td>50</td><td>$120 < l \leq 200$ mm
$t > 20$ mm
$l > 200$ mm
$20 < t \leq 30$ mm</td></tr>
<tr><td>45</td><td>$200 < l \leq 300$ mm
$t > 30$ mm
$l > 300$ mm
$30 < t \leq 50$ mm</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>40</td><td>$l > 300$ mm
$t > 50$ mm</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Como el detalle 1 de la tabla 8.5</td><td colspan="2"> 
chapa flexible
②</td><td>2) Fisuración del pie de cordón desde los extremos de la soldadura, con concentración de tensiones debida a la flexibilidad de la chapa.</td></tr>
<tr><td>36*</td><td colspan="2"> 
③</td><td>3) Fisuración de la raíz de la unión en uniones en ángulo y en uniones a tope en T con penetración parcial, de acuerdo con la figura 4.6 de la Norma EN 1993-1-8:2005.</td><td></td></tr>
</table>

Los detalles 1 y 2 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 establecen la categoría de fatiga de posibles fisuras que se producirían en chapas soldadas perpendicularmente a otras, transmisoras de esfuerzos. El detalle 1 define la posible fisuración de la zona central de la soldadura (Figura 98) y el detalle 2 la fisuración del extremo en el caso de que la chapa solicitada se suelde con otra flexible sin continuidad por el otro lado. Ambos detalles aplican para soldaduras con penetración completa o parcial, aunque lo más adecuado en estos casos siempre será ejecutar el detalle con soldaduras con penetración completa, evitando la soldadura con penetración parcial.

La categoría de fatiga de este detalle no es demasiado buena, variando entre 80 y 40 en función de la dimensión l, que engloba el espesor de la chapa perpendicular a la que se suelda la chapa solicitada más la suma de la dimensión de la soldadura. La categoría de 80 sólo se

logrará si la dimensión l es menor o igual a 50 mm, y cuando l es superior a 120 mm la categoría depende además del espesor t de la chapa solicitada.

Un ejemplo de este detalle sería el caso de elementos transversales soldados directamente a otros principales, como puede ser el caso de la soldadura de arriostramientos transversales en tableros de celosía (Figura 98) o el caso de costillas o jabalcones transversales soldados a las almas de una sección cajón o bijácena (Figura 99).

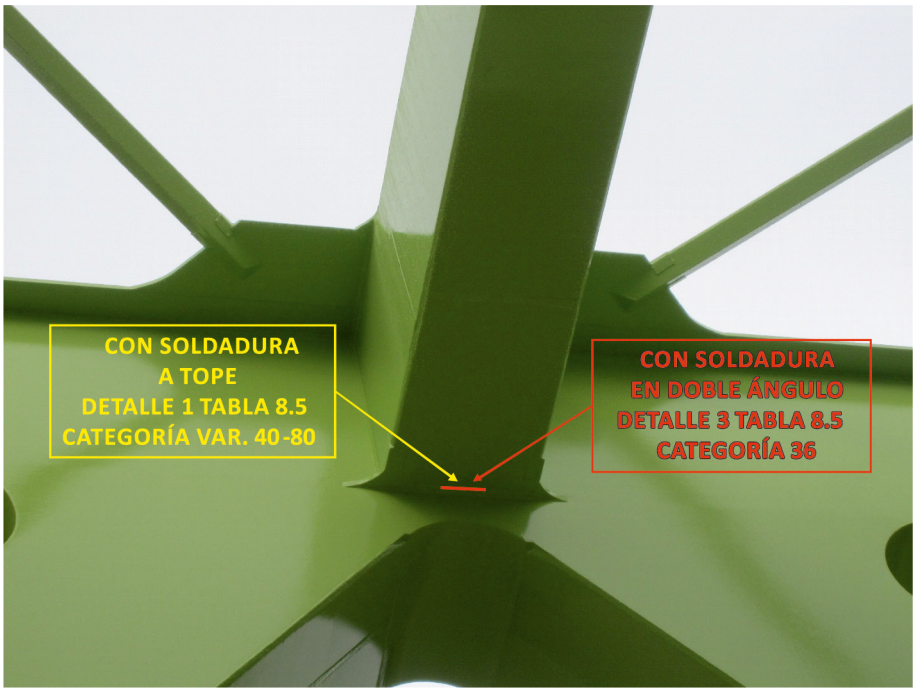


Figura 98 **Soldadura de un arriostramiento transversal en una celosía**



Figura 99 **Soldadura de costilla al alma de una sección cajón**

Otro ejemplo del detalle 1 (o 2) de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 sería la soldadura de un alma (o un ala) contra una basa frontal transmisora de esfuerzos. Este caso se puede dar por

ejemplo en la unión de un tramo metálico con un tramo de hormigón, como se muestra en la Figura 100.

Una alternativa a los detalles 1 y 2 con soldaduras con penetración completa, sería el detalle 3 con soldaduras en doble ángulo. Como se puede apreciar en la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 la categoría de fatiga del detalle 3 se reduce hasta 36, lo cual desaconseja su empleo, siendo preferible siempre el empleo del detalle 1 con soldaduras a tope con penetración completa.



Figura 100 **Basa frontal soldada a un alma**

El caso de los mamparos de apoyo en secciones cajón es otro claro ejemplo de estos detalles. La soldadura de los rigidizadores de apoyos contra la chapa de fondo genera este detalle en los rigidizadores, que, por lo general, siempre estarán comprimidos.

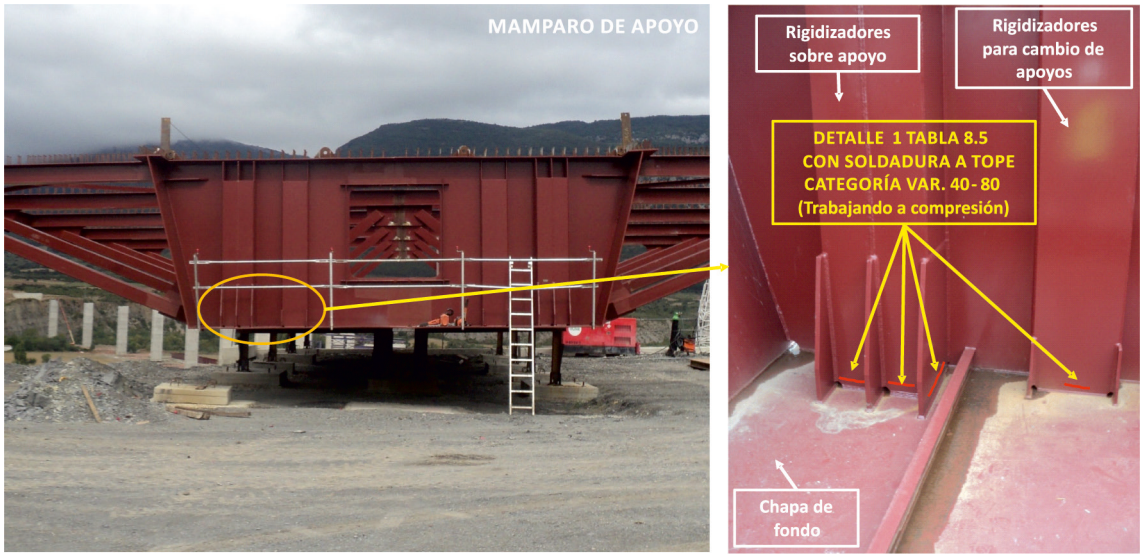
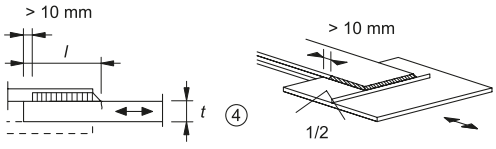
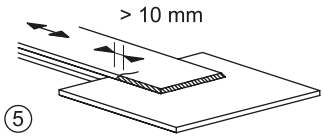


Figura 101 **Rigidizadores en mamparos de apoyo soldados contra la chapa de fondo del cajón**

4.8.3 Uniones soldadas por solape transmisoras de esfuerzos

Los detalles 4 y 5 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 representan la categoría de fatiga de la unión de chapas (o elementos) por solape mediante soldaduras en ángulo trabajando a rasante (Tabla 39).

Tabla 39 **Detalles 4 y 5 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
Como el detalle 1 de la tabla 8.5	 Área de la chapa principal sometida a tensiones: pendiente = 1/2	Uniones por solape soldadas: 4) Uniones por solape con soldaduras en ángulo.	4) En la chapa principal, $\Delta\sigma$ debe calcularse empleando el área indicada en la figura. 5) $\Delta\sigma$ también debe calcularse, en las chapas exteriores. Detalles 4) y 5): - Extremos de la soldadura a más de 10 mm del borde de la chapa principal. - La fisuración por cortante de los cordones debería comprobarse como el detalle 8.
45°		Uniones por solape soldadas: 5) Uniones por solape con soldaduras en ángulo.	

Este detalle es bastante común en el caso de la soldadura de perfiles con sección en UPN o angulares en L a cartelas formando parte de celosías transversales u horizontales, con la soldadura del perfil sobre la cartela en ángulo.

En la Figura 102 se muestra la imagen de un perfil UPN soldado de forma solapada a una cartela formando parte de una celosía transversal. Éste es un ejemplo del detalle 4 de la Tabla 39, que establece la categoría de una posible fisura en la chapa (cartela) a la que se suelda el elemento solicitado (en este caso el perfil UPN), permitiendo abrir la zona tensionada de la cartela en el ancho del perfil soldado más 2 veces la longitud del perfil soldado por

la pendiente de 1/2, tal y como se muestra en el detalle. Su categoría coincide con el detalle 1 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993 1 9 (Tabla 38), siendo l la longitud del cordón de soldadura en el borde del perfil o chapa paralelo a su directriz, habiendo dejado además al menos 10 mm en su extremo inicial sin soldar, y t el espesor de la chapa o cartela a la que se suelda el perfil o chapa que sufre la oscilación tensional.

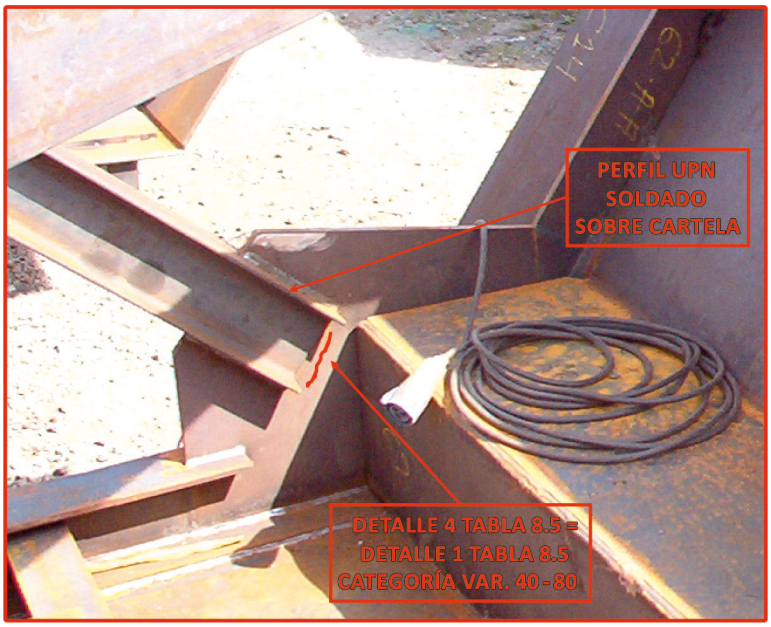


Figura 102 **Soldadura de UPN a una cartela en una celosía transversal**

Cuanto mayor es la longitud de la soldadura l peor es la categoría de fatiga, variando desde una categoría 80 para $l \leq 50$ mm, hasta 40 para $l > 300$ mm, lo cual no es demasiado inusual cuando el perfil o la chapa a soldar tiene una cierta dimensión.

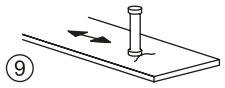
El detalle 5 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 39) establece la categoría de fatiga de una posible fisura en el elemento soldado (perfil o chapa) sobre la cartela principal, en el extremo inicial de la soldadura. Como en el caso del detalle 4, la categoría de fatiga es baja, de 45, y por lo tanto, siempre que se pueda, como ya se expuso para los detalles 6 y 7 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 37), se debería evitar este tipo de detalle mediante el empalme de elementos solapándolos soldados sobre una chapa principal.

En el apartado dedicado a los detalles de celosías verticales (4.11.2) se incluyen recomendaciones para mejorar este detalle frente a fatiga.

4.9 Conexión

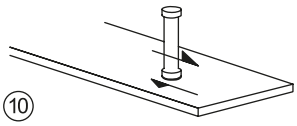
El detalle de fatiga de una platabanda superior o una chapa de fondo con pernos conectadores soldados trabajando a cortante es de 80, acorde con el detalle 9 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 40); por lo tanto una chapa con conectadores no podrá tener una categoría superior a 80 al condicionar el detalle de la soldadura de los pernos.

Tabla 40 **Categoría de fatiga de chapa con pernos soldados (detalle 9 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9)**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
80		9) Efecto debido a los conectadores de transmisión de cortante soldados sobre material base.	

En cambio el detalle de fatiga del perno trabajando a rasante tiene categoría 90 acorde con el detalle 10 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 41).

Tabla 41 **Categoría de fatiga de pernos conectadores (detalle 10 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9)**

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
90 $m = 8$ Ver EN 1994-2		Conectadores soldados para transmisión de cortante: 10) Para estructuras mixtas.	10) $\Delta\tau$ se calcula para la sección nominal del perno del conectador.

La Figura 103 muestra el empleo de pernos conectadores en la platabanda superior de un cajón mixto, y en la chapa de fondo y la célula inferior en zona de negativos con doble acción mixta. Asimismo, se aprecian los pernos conectadores en la viga transversal superior.

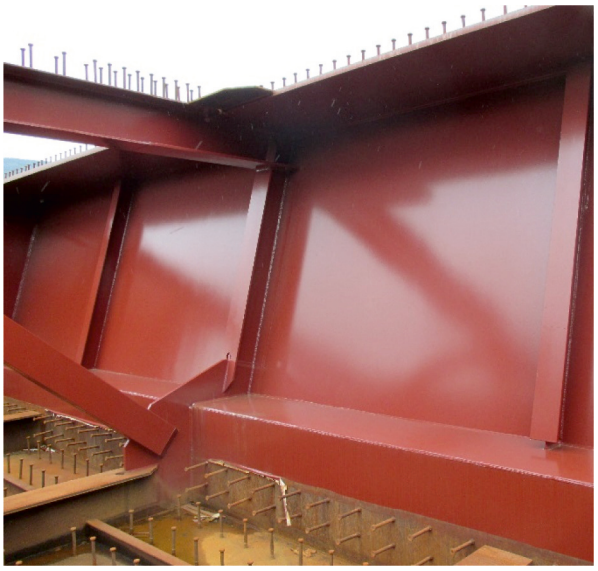


Figura 103 **Pernos conectadores en platabanda superior, chapa de fondo, célula inferior y en viga transversal superior**

4.10 Recomendaciones relativas al empleo de uniones atornilladas

Las uniones atornilladas no son demasiado habituales en puentes de carretera en España, salvo su empleo en elementos de arriostramiento provisionales o en elementos secundarios.

Sin embargo, sí suelen ser más frecuentes en otros países en los que la soldadura no se realiza con demasiadas garantías, y sobre todo en las uniones de obra.

La segunda parte de la tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 42) establece las categorías de fatiga para uniones con tornillos (detalles 8 a 15).

Tabla 42 **Categoría de fatiga de uniones con tornillos. Detalles 8 a 15 de tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9**

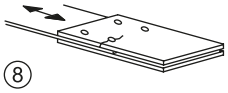
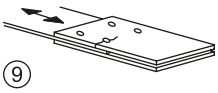
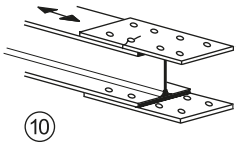
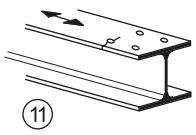
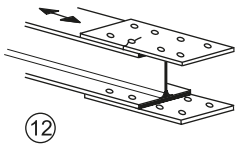
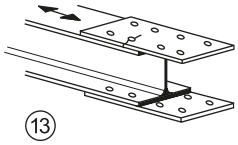
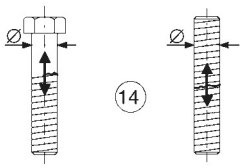
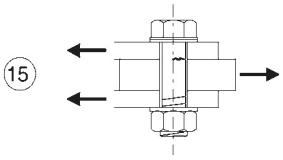
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos	
112	 ⑧	8) Unión simétrica con cubrejuntas doble y tornillos pretensados de alta resistencia.	8) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	En general, para uniones atornilladas (detalles 8 a 13): Distancia a los extremos $e_1 \geq 1{,}5\ d$ Distancia a los bordes $e_2 \leq 1{,}5\ d$ Espaciamiento $p_1 \geq 2{,}5\ d$ Espaciamiento $p_2 \leq 2{,}5\ d$ Para los detalles véase la Norma Europea EN 1993-1-8, figura 3.1
		8) Unión simétrica con cubrejuntas doble, tornillos pretensados y taladros inyectados.	8) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	
90	 ⑨	9) Unión con cubrejuntas doble y tornillos calibrados.	9) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	
		9) Unión con cubrejuntas doble, tornillos sin pretensar y taladros inyectados.	9) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	
90	 ⑩	10) Unión con cubrejuntas simple y tornillos pretensados de alta resistencia.	10) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	
		10) Unión con cubrejuntas simple, tornillos pretensados y taladros inyectados.	10) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	
	 ⑪	11) Elemento estructural con taladros sometido a esfuerzo normal y momento flector.	11) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta..	

Tabla 42 continúa >

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
80	 12	12) Unión con cubrejuntas simple y tornillos calibrados.	12) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta.
		12) Unión con cubrejuntas simple, tornillos sin pretensar y taladros inyectados.	12) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta.
50	 13	13) Unión simétrica con cubrejuntas simple o doble, tornillos sin pretensar y taladros de holgura ordinaria. Sin inversión de carga.	13) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta.
50	 14	14) Tornillos y espárragos traccionados con rosca laminada o mecanizada. Para diámetros grandes (tornillos de anclaje) se tendrá en cuenta el efecto del tamaño mediante k_s	14) El valor de $\Delta\sigma$ debe calcularse en las secciones traccionadas del tornillo, teniendo en cuenta los esfuerzos de flexión y tracción debidos a la unión, así como las tensiones de flexión debidas a otras causas. En tornillos pretensados, puede tenerse en cuenta la reducción de la carrera de tensiones.
	Efecto del tamaño para ϕ > 30 mm: $k_s = (30/\phi)^{0,25}$		
100 $m = 5$	 15	15) <u>Tornillos sometidos a cortadura simple o doble</u> sin rosca en las secciones bajo esfuerzo cortante – Tornillos calibrados. – Tornillos ordinarios sin inversión de carga (tornillos de los tipos 5.6, 8.8 o 10.9).	15) Para el cálculo de $\Delta\tau$ se utilizará la sección de la espiga.

Las principales diferencias entre los detalles 8 a 15 de la tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9 son las siguientes:

- Detalle 8 con categoría 112: aplica a las chapas de cubrejuntas de las uniones simétricas con doble cubrejuntas trabajando a cortadura con tornillos pretensados de alta resistencia (de calidades 8.8 o 10.9), uniones de categoría C acorde con UNE-EN 1993-1-8, o con tornillos pretensados de alta resistencia y taladros inyectados

  El cálculo de la variación tensional en los cubrejuntas se debe hacer con la sección bruta, sin descontar los taladros

- Detalles 9, 10 y 11 con categoría 90:

  - El detalle 9 aplica a las chapas de cubrejuntas de las uniones simétricas con doble cubrejuntas trabajando a cortadura con tornillos calibrados o con tornillos sin pretensar y taladros inyectados, uniones de categoría A acorde con UNE-EN 1993-1-8

    El cálculo de la variación tensional en los cubrejuntas se debe hacer con la sección bruta, sin descontar los taladros

  - El detalle 10 aplica a la chapa del cubrejuntas simple en uniones trabajando a cortadura con tornillo pretensados de alta resistencia, uniones de categoría C

acorde con UNE-EN 1993-1-8, o con tornillos pretensados de alta resistencia y taladros inyectados

El cálculo de la variación tensional en el cubrejuntas se debe hacer con la sección bruta, sin descontar los taladros

- El detalle 11 se refiere a una posible fisuración de una chapa del elemento principal con taladros trabajando en su plano. El cálculo de la variación tensional se debe hacer en este caso con la sección neta, descontando el área de los taladros

– Detalle 12 con categoría 80: aplica a la chapa del cubrejuntas simple en uniones atornilladas trabajando a cortadura con tornillos calibrados o con tornillos sin pretensar y taladros inyectados, uniones de categoría A acorde con UNE-EN 1993-1-8. El cálculo de la variación tensional en el cubrejuntas se debe hacer con la sección neta, descontando el área de los taladros

– Detalle 13 con categoría 50: aplica a la chapa de los cubrejuntas, ya sean simples o dobles, en uniones atornilladas trabajando a cortadura con tornillos sin pretensar y taladros de holgura ordinaria en los que no haya inversión de carga, uniones de categoría A acorde con UNE-EN 1993-1-8. El cálculo de la variación tensional en los cubrejuntas se debe hacer con la sección neta, descontando el área de los taladros

– Detalle 14 con categoría 50: detalle de tornillos o varillas roscadas trabajando a tracción. Se trataría de uniones de categoría D acorde con UNE-EN 1993-1-8. Este detalle analiza la fisuración en el vástago del tornillo o la varilla roscada, y si el diámetro es superior a 30 mm la categoría de 80 se debe multiplicar por el coeficiente de tamaño (reductor) $k_s = (30/\phi)^{0,25}$ siendo ϕ el diámetro del tornillo en mm

  Como se puede apreciar este detalle no es alto, y siempre que sea posible se debería intentar diseñar uniones con tornillos trabajando a cortadura sometidos a esfuerzos rasantes frente a uniones trabajando a tracción

– Detalle 15 con categoría 100: detalle de tornillos trabajando a cortadura simple o doble, en los que la rosca no llegue a la zona de los planos de cortadura. Se trataría de uniones de categoría A acorde con UNE-EN 1993-1-8. Este detalle es válido para tornillos calibrados o para tornillos ordinarios (de calidades 5.6, 8.8 o 10.9) sin pretensar, en los que no haya inversión de carga

  Este detalle es siempre preferible al detalle 14 con tornillos trabajando a tracción.

Por lo general, siempre que se recurra al empleo de uniones atornilladas en puentes de carretera, se deben emplear en la medida de lo posible uniones con tornillos de alta resistencia pretensados trabajando a cortadura (Figura 104 y Figura 105), uniones de categoría C acorde con UNE-EN 1993-1-8, con detalles de categoría de fatiga:

– 112 en los cubrejuntas de las uniones con doble cubrejuntas (detalle 8), o bien 90 en el cubrejuntas de las uniones con simple cubrejuntas (detalle 10).

– 90 en el elemento principal con taladros (detalle 11).



Figura 104 **Empalmes de alas y almas de vigas con tornillos pretensados**



Figura 105 **Uniones atornilladas pretensadas en celosías transversales**

4.11 Celosías y arriostramientos

En general, las celosías de arriostramiento horizontales se suelen disponer en secciones cajón (Figura 106) o secciones bijácena (Figura 107 y Figura 108) para generar un plano de rigidez que estabilice provisionalmente la sección metálica frente a las acciones horizontales hasta que se ejecute la losa superior mixta conectada a la sección parcial metálica. Lo más habitual es que se dispongan arriostrando las platabandas superiores y, en general, sólo trabajan durante el proceso constructivo en una fase temporal, por lo que no suelen estar

sometidas a acciones de fatiga y, en consecuencia, no es demasiado importante buscar la mejor categoría de fatiga posible.

Sin embargo, algunos de los elementos de arriostramiento transversal de las celosías horizontales suelen coincidir con las celosías verticales de la sección transversal dispuestos para evitar su distorsión (Figura 106), sobre todo en secciones cajón. En estos casos, ese elemento, que forma parte tanto de la celosía horizontal como de una celosía vertical, sí que estará sometido a solicitaciones de fatiga y será necesario cuidar sus detalles.

En alguna ocasión puede ser necesario recurrir al empleo de una celosía horizontal arriostrando la platabanda inferior de las vigas metálicas en una sección bijácena. En el caso de que este arriostramiento no sea provisional y esté proyectado para trabajar de forma definitiva, por ejemplo cerrando el circuito de torsión de la sección transversal, estará sometido a solicitaciones de fatiga, y será necesario cuidar sus detalles (Figura 109).

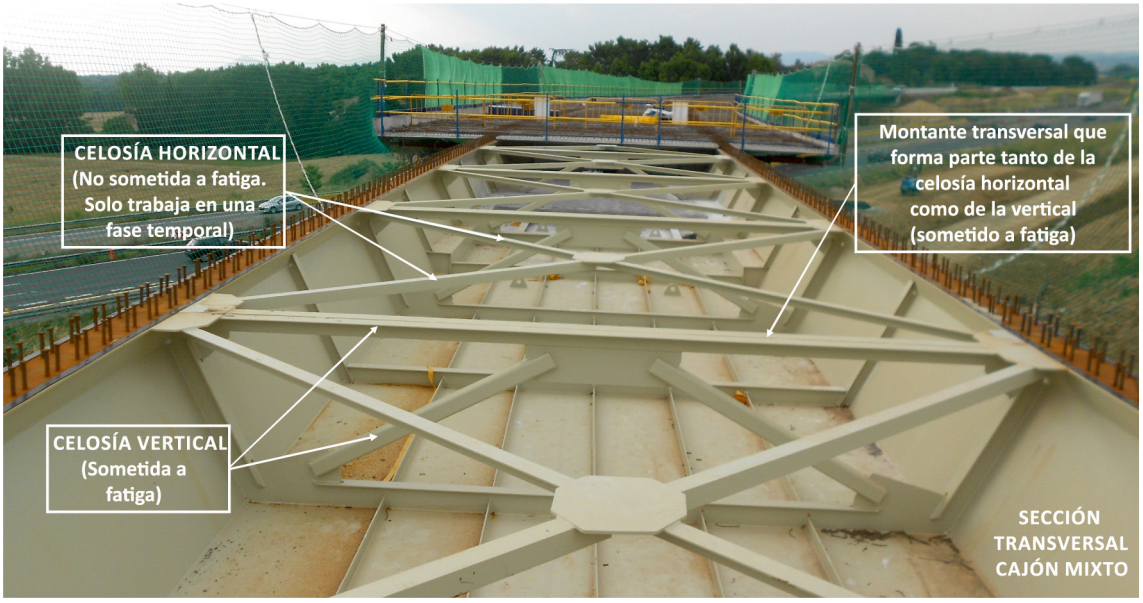


Figura 106 **Celosía horizontal de arriostramiento de las platabandas superiores y de las celosías verticales para evitar la distorsión en la sección cajón**



Figura 107 **Celosía horizontal de arriostramiento de las platabandas superiores y diafragma transversal en una sección bijácena distorsionable**

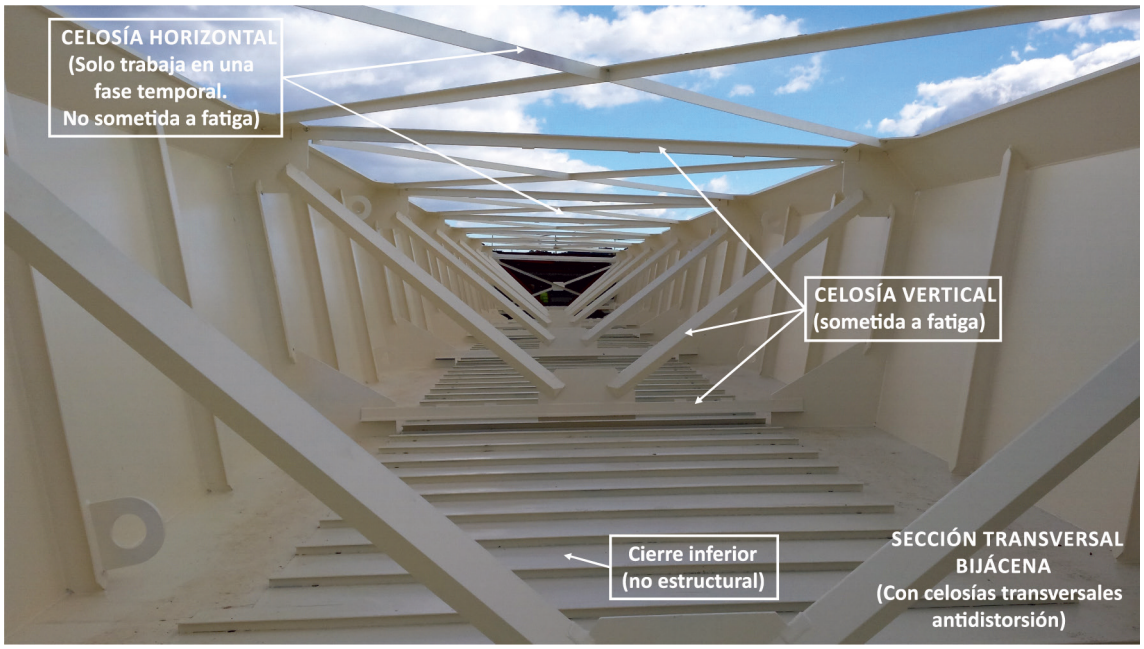


Figura 108 **Celosía horizontal de arriostramiento de las platabandas superiores y de celosías verticales para evitar la distorsión en una sección bijácena**



Figura 109 **Celosía horizontal de arriostramiento de platabandas inferiores en una sección bijácena**

4.11.1 Celosías horizontales

Los detalles de las cartelas soldadas a las platabandas principales, formando parte de una celosía horizontal, se han descrito en el apartado 4.6.3 pormenorizadamente. En este apartado se incidirá en los detalles más frecuentes que se suelen dar en las uniones de los perfiles de las celosías horizontales con las cartelas, indicando criterios para mejorar los detalles, para los casos en los que puedan ser susceptibles de condicionar a fatiga.

En las celosías horizontales es frecuente recurrir al empleo de perfiles angulares en L (simples o empresillados). El detalle típico de desmembrado del ala y su soldadura a tope contra la cartela y la soldadura en prolongación recta del alma a la cartela generan detalles de fatiga bastante bajos (40 el primero y 56 el segundo, ver Figura 110 y Figura 111), que pueden llegar a condicionar en el caso de que la celosía esté sometida a solicitaciones de fatiga.

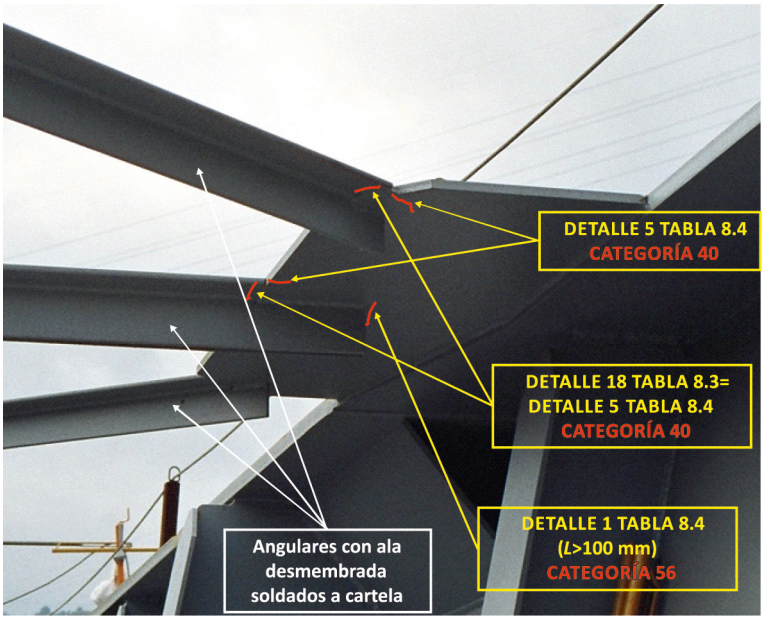


Figura 110 **Categorías de fatiga de angulares soldados a cartelas en celosías horizontales. Detalles con baja categoría de fatiga**

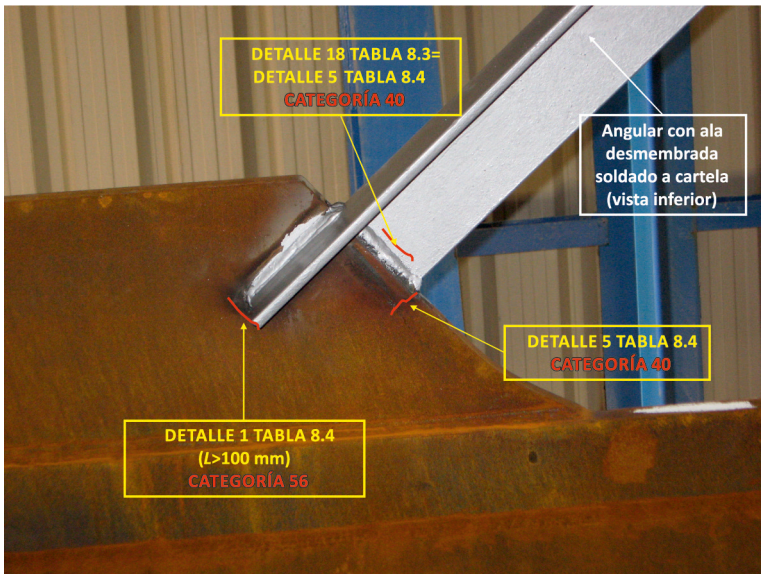


Figura 111 **Detalle de angulares soldados a cartelas, con baja categoría de fatiga**

Ahora bien, como se ha descrito anteriormente, aunque la categoría de fatiga no es elevada, estos detalles son adecuados en las celosías horizontales que se conciben para trabajar en una fase provisional y que realmente no están sometidas a fatiga (Figura 106 y Figura 107).

En el caso de que sí fuera necesario mejorar esos detalles, se podría recurrir al empleo alternativo del detalle 2 de la tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9, tal y como se describe en el apartado 4.11.2.

Tampoco es infrecuente recurrir al empleo de perfiles angulares (o UPN) empresillados (Figura 112 y Figura 107, perfil superior). La categoría de fatiga del elemento soldado a la presilla corresponde al detalle 5 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 de uniones por solape, con una categoría de 45. Si el elemento forma parte de una celosía vertical susceptible de estar sometida a solicitaciones de fatiga, este tampoco es un buen detalle, y conviene reemplazarlo por otro alternativo. Como alternativas a los perfiles empresillados, pueden emplearse perfiles con sección tubular o perfiles cerrados a base de dos angulares dispuestos en sección cuadrada o dos UPN cerrados materializando una sección rectangular, soldados en toda su longitud.

El cruce de dos angulares soldados directamente, con el desmembrado de uno al paso del otro, genera también detalles de fatiga mejorables, con categoría reducida (detalle 5 de la tabla 8.4 y detalle 18 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, con categoría 40) en la unión de las alas superiores (Figura 113), aunque como ya se ha comentado si este detalle se dispone en una celosía horizontal sin solicitaciones de fatiga, no sería necesario buscar un detalle alternativo que lo mejore.

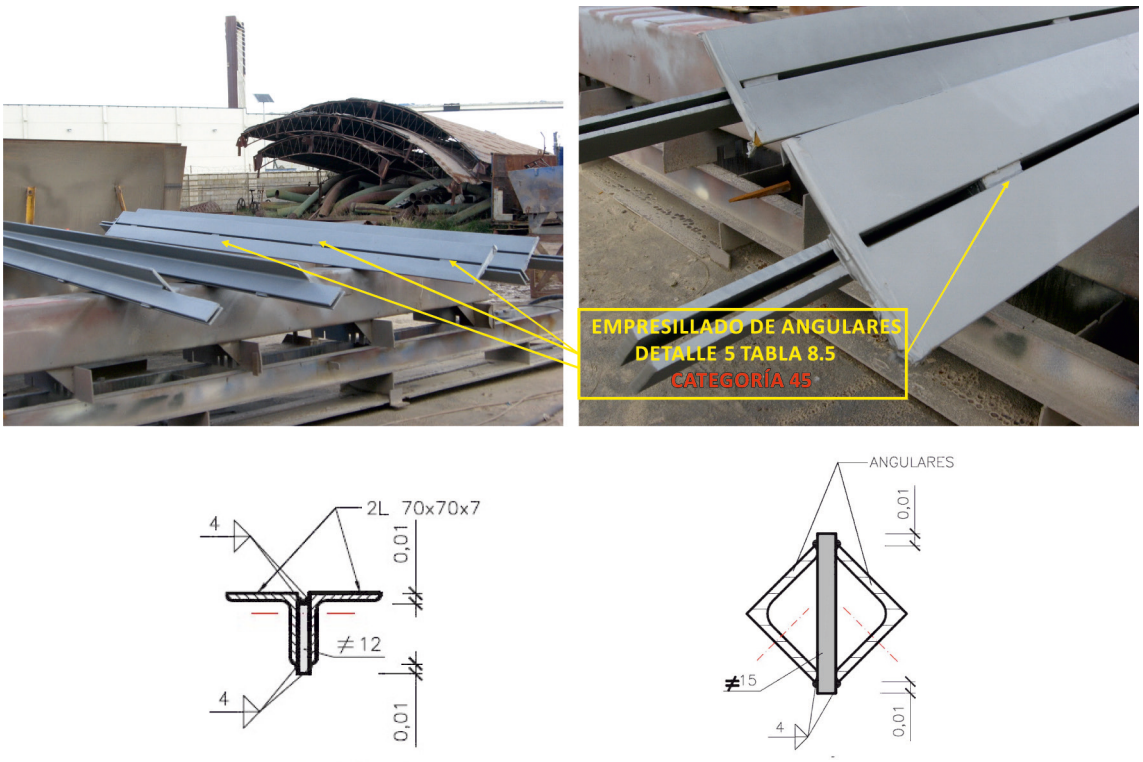


Figura 112 **Perfiles angulares empresillados. Detalle con categoría 45 (detalle 5 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9). Mal detalle**

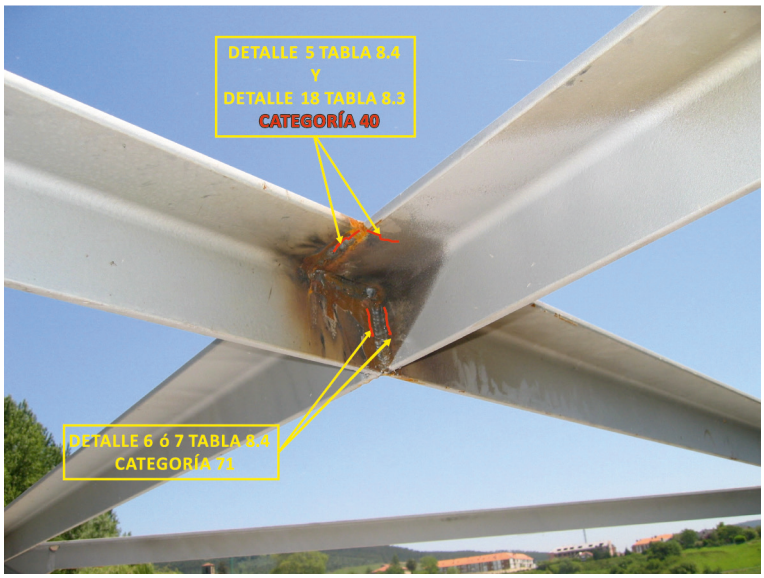


Figura 113 **Detalle de cruce de perfiles angulares**

4.11.2 Celosías verticales

Las celosías verticales dispuestas para controlar la distorsión de la sección transversal en secciones cajón generan una serie de detalles de encuentros entre los perfiles y las cartelas en los nudos que, si no se conciben y ejecutan con cuidado, pueden condicionar su dimensionamiento a fatiga.

La Figura 106 muestra una celosía vertical con diagonales con forma W, partiendo del nudo inferior y coincidiendo en el centro del montante superior. La Figura 114 muestra el caso de una celosía con las diagonales con forma de M, partiendo de los nudos superiores y uniéndose en el centro del montante transversal inferior.

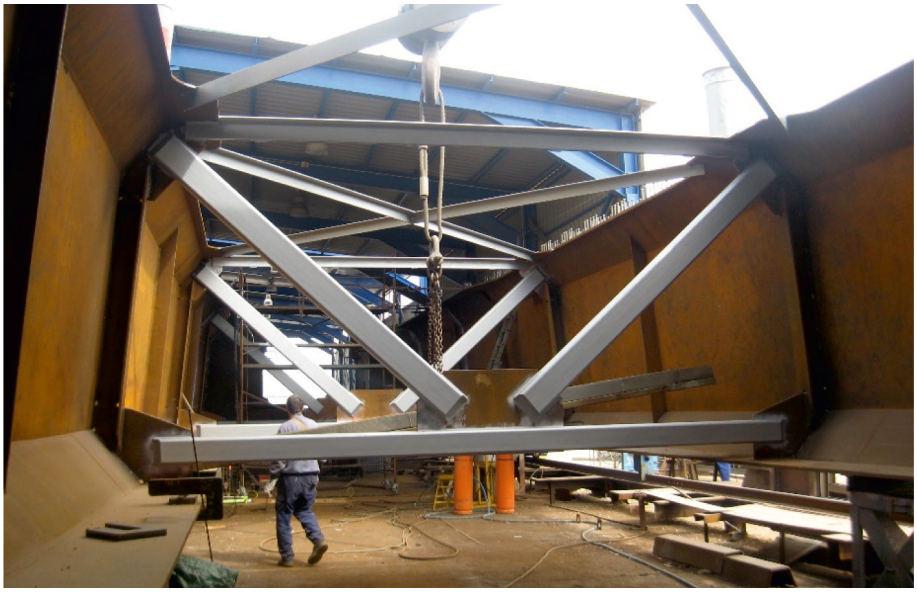


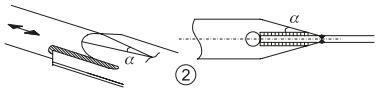
Figura 114 **Celosía vertical con diagonales en M en una sección bijácena**

En algún caso con secciones transversales cajón o bijácena poco anchas puede recurrirse al empleo de celosías con cruces de San Andrés (Figura 105), o incluso con una única diagonal.

El detalle que se genera en los nudos de unión de las diagonales o montantes exentos con las cartelas se debería diseñar, siempre que esté sometido a fatiga, evitando la soldadura por solape de un perfil con sección en UPN o en L sobre una cartela (Figura 102), ya que este detalle tiene una categoría de fatiga baja.

Como alternativa a soldar un perfil (con sección en UPN o en L) sobre una cartela, se podría concebir la unión del perfil con sección cerrada con una cartela acorde con el detalle 2 de la tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 43), que presenta una categoría de fatiga de 71 (Figura 115 y Figura 116) si el ángulo de corte del extremo del perfil es menor o igual a 45°, y de 63 si es mayor de 45°. Lógicamente, una vez que se decide realizar el corte del extremo en pico de flauta, se debe buscar un ángulo menor de 45° para lograr la mayor categoría de fatiga posible.

Tabla 43 **Detalle 2 de la tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9**

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
71	$\alpha \leq 45$		2) Uniones tubo-chapa con soldadura a lo largo de ranuras de inserción de la chapa en el tubo rematadas con taladros.	2) $\Delta\sigma$ se calcula para el tubo. La fisuración por cortante de la soldadura debería comprobarse usando el detalle 8, de la tabla 8.5.
63	$\alpha > 45°$			

El perfil cerrado podría tener sección tubular (cuadrada, rectangular o circular), o bien la sección cerrada se podría materializar mediante la soldadura continua de dos UPN o de 2 angulares.



Figura 115 **Diagonal soldada a cartela con extremo achaflanado. Detalle con categoría 71 o 63 (detalle 2 de tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9)**

Como alternativa a la soldadura sobre la cartela también se podría recurrir al empleo de uniones atornilladas, como se muestra en los detalles de la Figura 117, que si se ejecutan

adoptando las precauciones descritas en la Figura 104 y la Figura 105, con uniones con tornillos pretensados trabajando frente a esfuerzos cortantes, presentan categorías de fatiga elevadas.

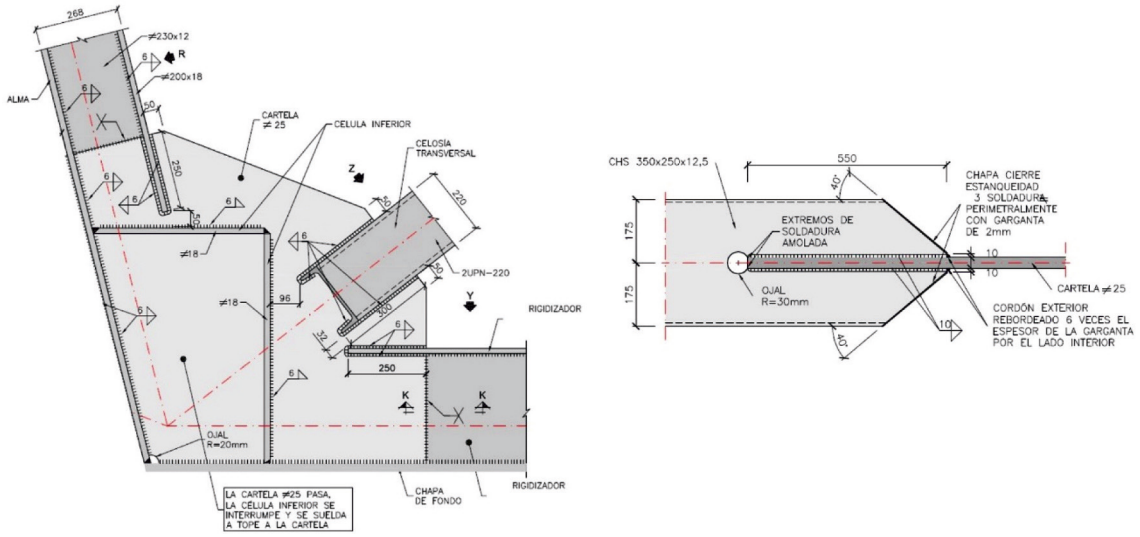


Figura 116 **Diagonal desmembrada con ojal en su extremo y con corte achaflanado, soldada a cartela. Detalle con categoría 71 (detalle 2 de tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9)**



Figura 117 **Uniones atornilladas en celosías transversales con tornillos pretensados**

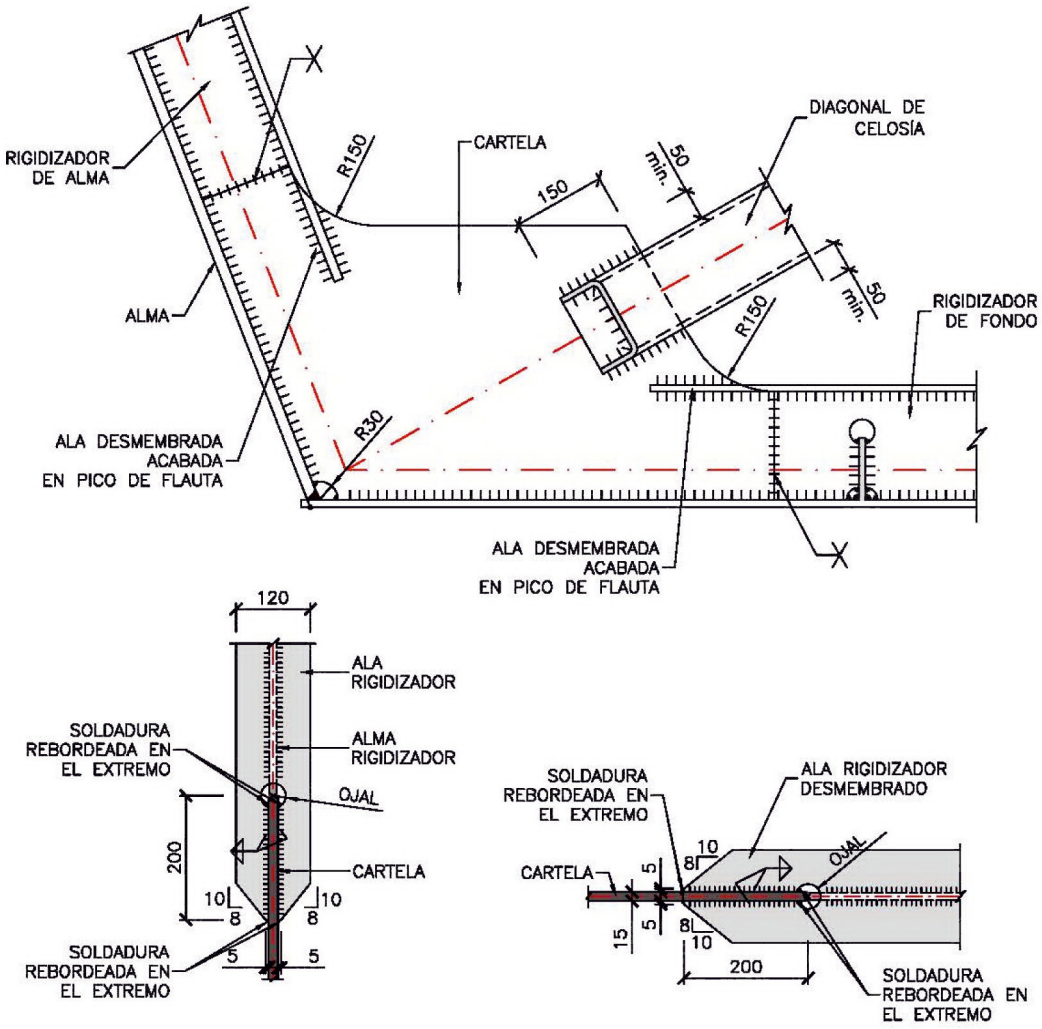
En las celosías verticales es habitual que los rigidizadores verticales y horizontales que forman parte de las celosías en secciones cajón, tengan que soldarse a las cartelas dispuestas en las esquinas para permitir la soldadura de las diagonales. La sección de estos rigidizadores suele ser un perfil en T, cuya alma se suelda a tope contra la cartela y el ala se desmembra con un ojal en el inicio del corte central, soldándose por ambos lados a la cartela (Figura 118).



Figura 118 **Desmembrado de las alas de los rigidizadores de alma y de fondo en una celosía y su unión con la cartela**

El detalle del acabado del extremo del ala desmembrada soldado contra la cartela corresponderá con uno de los detalles 1, 2 o 3 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (ver Tabla 31 de apartado 4.6.1) en función de la geometría del corte.

Si el ala del rigidizador se acaba con un corte recto, perpendicular a la cartela, el detalle de fatiga corresponderá con el detalle 1 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 31), que como ya se expuso en 4.6.1 es un detalle que hay que evitar siempre que sea posible por su baja categoría de fatiga (en general 56). La forma de mejorar este detalle es mediante el corte del extremo del rigidizador con un ángulo menor de 45º (por ejemplo con una pendiente de 8/10), de forma que el detalle pase a ser el detalle 2 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 31), mejorando la categoría de fatiga hasta 71 (Figura 119). En general no suele ser necesario tener que recurrir a realizar un acabado con corte curvo como el detalle 3 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 31), que tiene una categoría de fatiga de 80, por lo que se suele recurrir al empleo del detalle 2 que es más sencillo de ejecutar y controlar.



Detalle de desmembrado de ala de rigidizador vertical en el encuentro con cartela

Detalle de desmembrado de ala de rigidizador transversal en el encuentro con cartela

Figura 119 **Desmembrado del ala del rigidizador vertical y del rigidizador transversal del fondo del cajón en su unión con la cartela de la celosía**

Los croquis de la Figura 119 muestran cómo se debería ejecutar el detalle 2 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 con el desmembrado de las alas de los dos rigidizadores que acometen contra la cartela, con categoría 71, que en general suele ser suficiente. La pendiente del corte debe ser tal que el ángulo forme un corte del extremo del pico de flauta sea menor de 45, con acabado del corte en pico (ver Tabla 31). La ejecución del extremo del corte en pico es complicada de ejecutar, ya que además la soldadura en doble ángulo se debe rebordear en su extremo, por lo que es recomendable hacer el corte del extremo del ala con unos 5 mm rectos (pero no mucho más), que permitan el rebordeo de la soldadura en su extremo, que en general tendrá garganta reducida.

La soldadura del empalme del alma de los rigidizadores a la cartela conviene hacerla sin quiebros, con acuerdos circulares, de forma que se mejore el detalle de fatiga de la unión del extremo del alma a la cartela. La imagen izquierda de la Figura 120 muestra el detalle de las almas de los rigidizadores soldados contra cartelas con un quiebro en la geometría, lo cual equivale al detalle 18 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 (ver 4.6.3, Tabla 33) con una categoría de fatiga 40, mientras que en la imagen de la derecha de la Figura 120 muestra el detalle mejorado con un acuerdo curvo en la cartela logrando que la soldadura del alma del rigidizador tenga una transición suave, acorde con el detalle 19 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 (ver 4.6.3, Tabla 33), que coincide con el detalle 4 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (ver 4.6.3, Tabla 32) con una categoría de fatiga de 90.

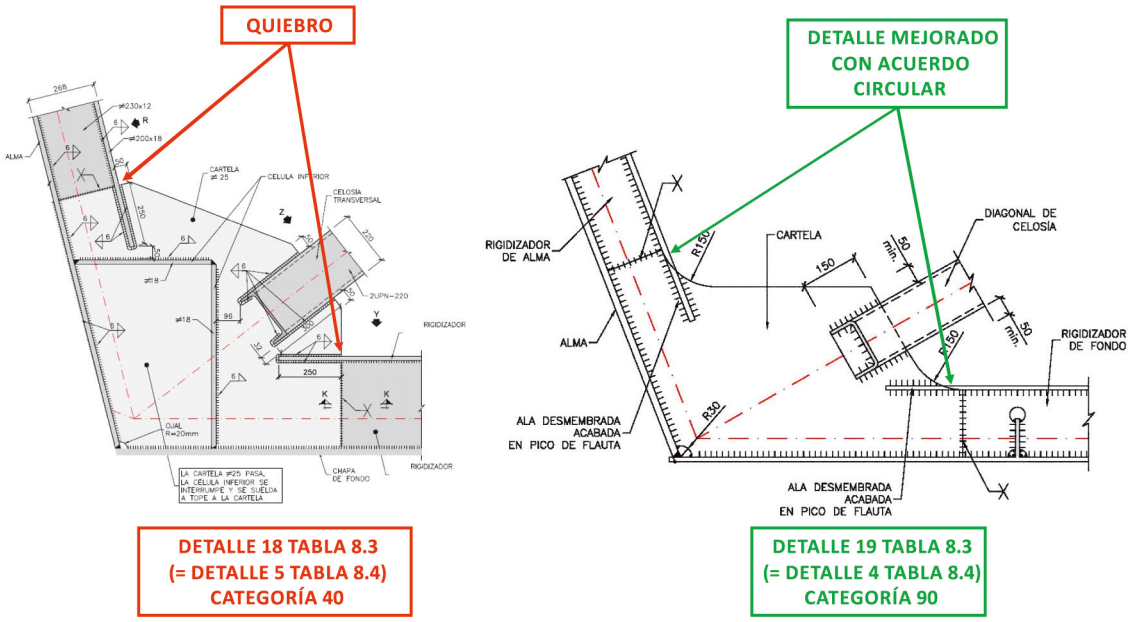


Figura 120 **Detalles de intersección de las almas de los rigidizadores verticales y transversales de fondo con la cartela de un nudo de una celosía**

El encuentro de las dos diagonales de la celosía, genera un nudo con el montante transversal superior en el caso de celosías con forma de W (Figura 106), o un nudo en su unión con el rigidizador transversal inferior (en el caso de secciones cajón) o con el montante transversal inferior en secciones bijácena (Figura 108 y Figura 114) en el caso de celosías con forma de M. Este nudo conforma una serie de detalles que conviene cuidar para lograr la mejor categoría posible a fatiga.

- Si el montante transversal es un tubo cerrado, el detalle tipo que resuelve el nudo sería realizar el desmembrado del tubo e introducir pasante una cartela central soldada por ambos lados (Figura 121). En los extremos de la cartela se deben disponer ojales que eviten la concentración de tensiones en la intersección de la cartela con el tubo. Los detalles de unión de las diagonales con la catela deben ejecutarse con el acabado en pico de flauta, tal y como se ha descrito en este apartado

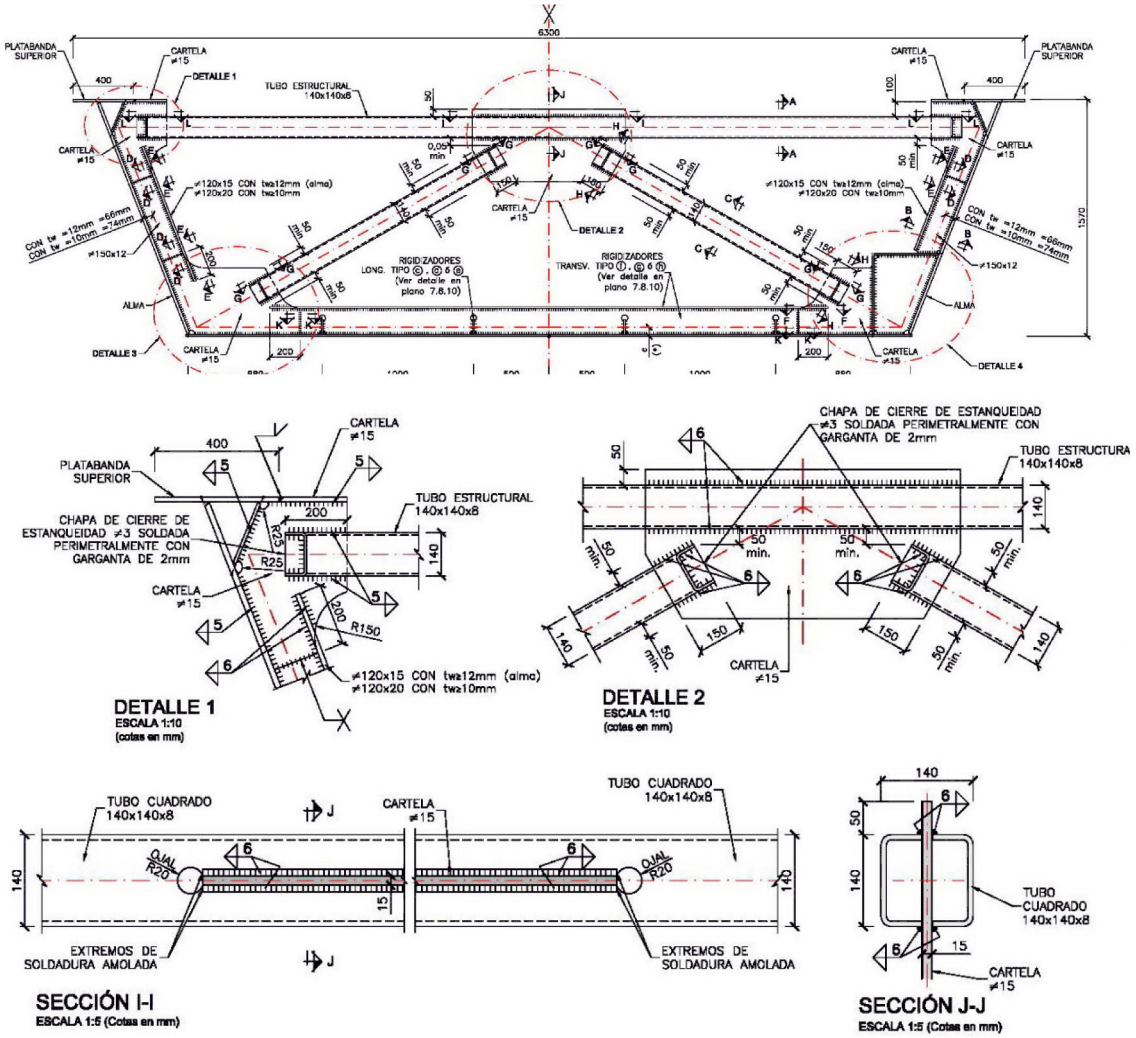


Figura 121 **Detalles del nudo que genera la confluencia del montante transversal superior con las diagonales en el caso de emplearse un tubo cerrado**

- En el caso de que el montante transversal tenga sección de doble T, que es el caso habitual del rigidizador transversal de fondo en una sección cajón, o cuando el montante transversal superior sea un rigidizador con sección en doble T, el nudo de unión con las dos diagonales requerirá soldar una cartela contra el montante (o el rigidizador transversal). El detalle más adecuado sería desmembrar el ala de la doble T y soldar la cartela contra el alma, con acuerdos circulares (Figura 122).

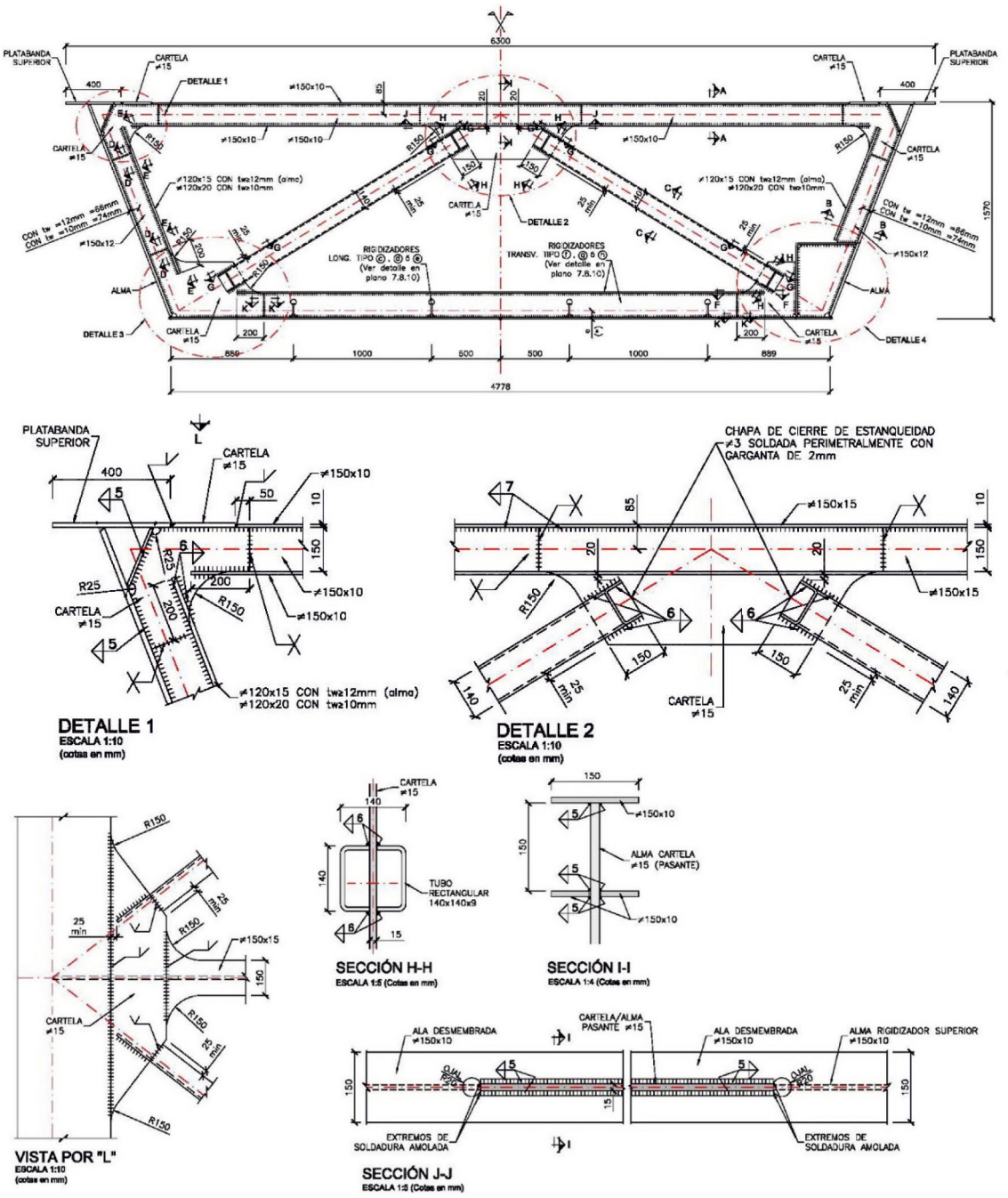


Figura 122 **Detalles del nudo que genera la confluencia del montante transversal superior con las diagonales en el caso de emplearse una sección en doble T**

- En el caso de que el montante transversal superior, formando parte de la celosía, se pueda dimensionarse con una sección en T simple, el detalle del empalme de la cartela central se simplifica, pudiendo prolongarse directamente el alma central con la geometría de la cartela, según se muestra en la Figura 123. En este caso será también necesario realizar acuerdos circulares en las confluencias de chapas

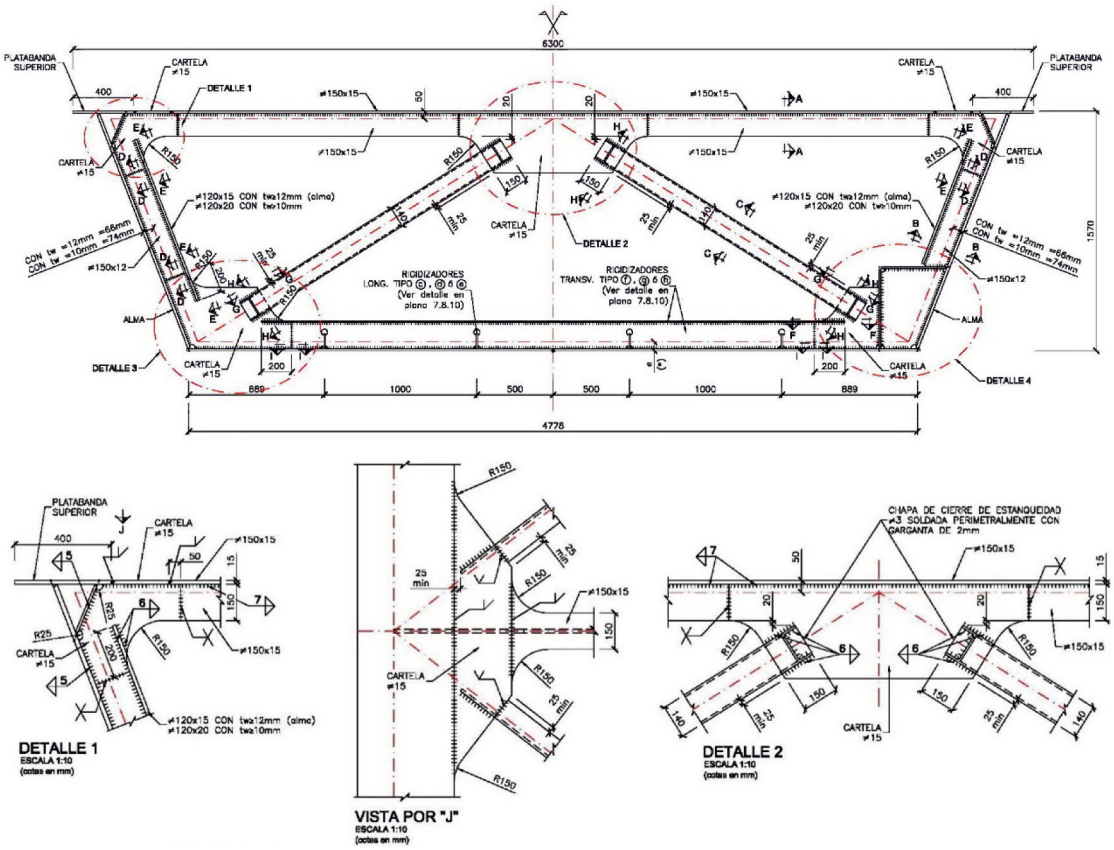


Figura 123 **Detalles del nudo que genera la confluencia del montante transversal superior con las diagonales en el caso de emplearse una sección en T simple**

Como se ha descrito en 4.6.3 las cartelas o perfiles que se suelden en el canto a una platabanda superior (o inferior) deberían ejecutarse siempre con acabados redondeados y amolados los extremos de las soldaduras, para que su categoría de fatiga sea la más alta posible (ver Figura 74).

4.11.3 Diafragmas transversales en secciones bijácena

La solución clásica de recurrir al empleo de diafragmas transversales en secciones bijácena mediante el empleo de un montante transversal soldado al rigidizador vertical del alma (ver Figura 107), genera una serie de detalles de fatiga que se han ido describiendo a lo largo de este capítulo (ver apartados 4.6.1 y 4.6.4). La Figura 124 resume los principales detalles que se generan en el encuentro del montante con el rigidizador transversal del alma.

En el apartado 4.6.1 se expusieron los criterios para conseguir la mejor categoría de fatiga posible en estos detalles.

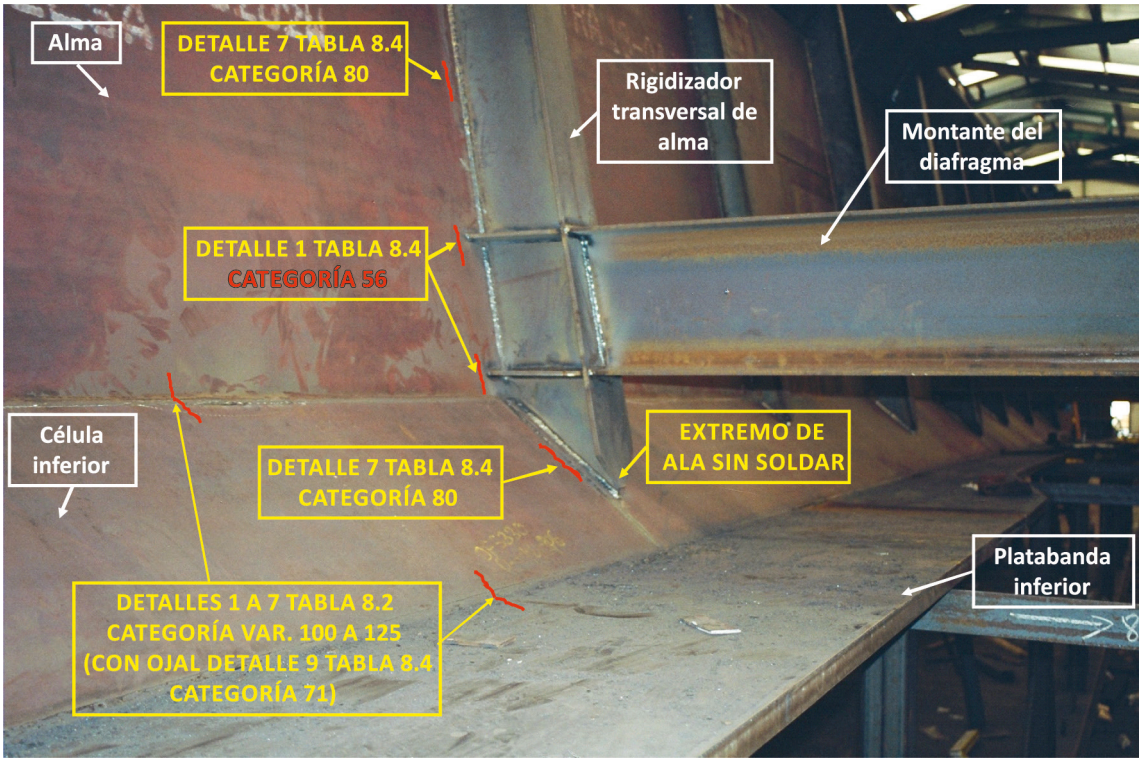


Figura 124 **Detalles típicos de fatiga en un diafragma de una sección bijácena**

4.12 Otras tipologías de tableros menos habituales

Aunque las tipologías más habituales en puentes metálicos y mixtos de carretera son los cajones y las secciones bijácena (o multijácena), no es del todo infrecuente que se den otras tipologías que presentan detalles y particularidades específicos frente al diseño a fatiga.

En los apartados siguientes se incluyen algunas recomendaciones relativas a tableros en celosía y a losas ortótropas.

4.12.1 Tableros en celosía

Los tableros en celosía no suelen ser frecuentes en puentes de carretera, salvo que la luz aumente lo suficiente como para que la solución empiece a ser competitiva respecto a las soluciones con alma llena, y, en general, con luces por debajo de los 100–120 m no suelen ser demasiado habituales.

En el caso más frecuente de emplear secciones cajón cuadradas o rectangulares armadas en los cordones y las diagonales, lo más normal es hacer coincidir las almas de cordones y diagonales en el mismo plano, cortando de una sola pieza el alma en los nudos. En este caso es necesario redondear la geometría del alma con radios amplios tal y como se ha descrito en el apartado 4.6.3, y como se muestra en la Figura 125.

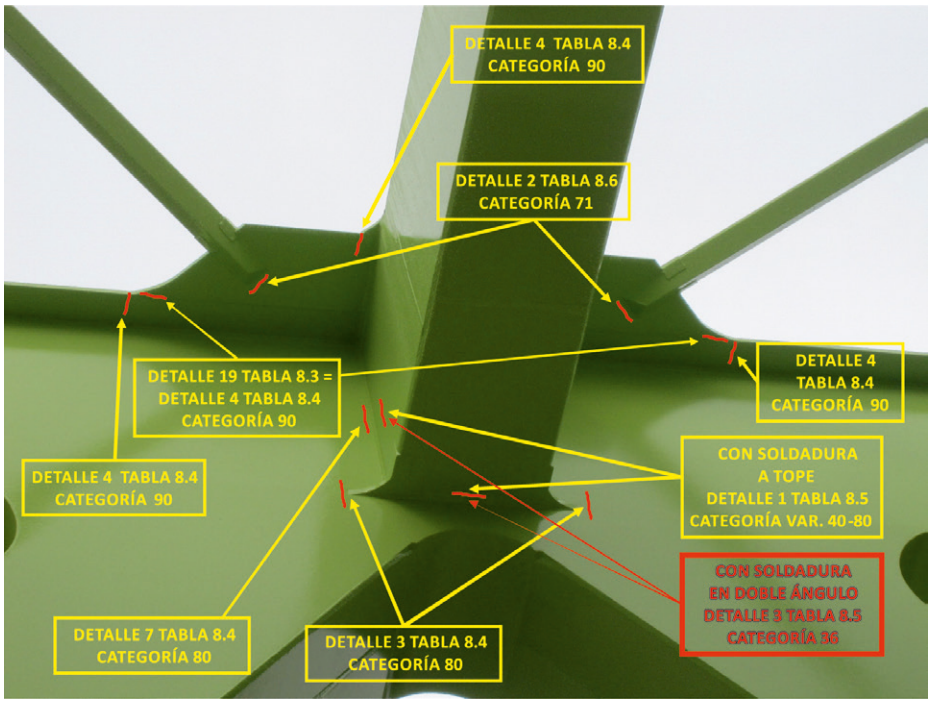


Figura 125 **Detalles típicos de fatiga en un nudo de una celosía**

Los encuentros que se suelen producir entre los montantes transversales o las celosías horizontales de arriostramiento con los cordones se han descrito con detalle en apartados previos, y no difieren conceptualmente nada frente a si estos detalles se dieran en una sección cajón o bijácena. La Figura 125 resume los principales detalles y su categoría de fatiga, con detalles que logran la mayor categoría posible en cada caso.

En celosías con elementos tubulares armados, será necesario adoptar todas las precauciones descritas en el apartado 4.5 con relación al empleo de chapas de respaldo en las uniones a tope, dado que en general no son accesibles para soldar ni inspeccionar más que por el lado exterior de la sección transversal.

Los detalles de rigidizadores transversales intermedios dispuestos en algún elemento, se deben ejecutar acorde con lo descrito en el apartado 4.6.4, y en el caso de que sea necesario recurrir al empleo de rigidizadores longitudinales o al empleo de un alma central se deben tener en cuenta las consideraciones descritas en el apartado 4.6.1.

4.12.1.1 Celosías con perfiles con sección tubular circular

Si los tableros en celosía no son demasiado habituales en puentes de carretera, quizás lo son menos las soluciones en celosía con perfiles laminados tubulares huecos. Aunque existen algunas realizaciones en esta tipología en puentes de carretera, se ha empleado con más frecuencia en pasarelas peatonales. En cualquier caso, las pasarelas peatonales no están sometidas a las mismas solicitaciones de fatiga que los puentes de carretera, y por lo tanto no serían de aplicación a estas los mismos criterios que a los puentes.

Aunque no se trate de una tipología demasiado frecuente en puentes de carretera, se incluyen en este apartado algunas recomendaciones relativas a la concepción de estos detalles específicos de fatiga.

La tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9 incluye los detalles 1 a 9, que son los principales que suelen darse en celosías tubulares con perfiles huecos (Tabla 44), mientras que la tabla 8.7 de UNE-EN 1993-1-9 define en los detalles 1 a 4 las categorías de fatiga de uniones de elementos tubulares en nudos (Tabla 45).

Tabla 44 **Detalles de fatiga en perfiles huecos. Detalles 1 a 9 de tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9**

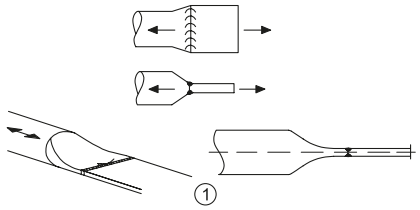
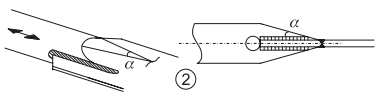
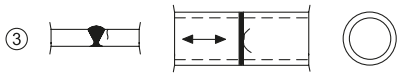
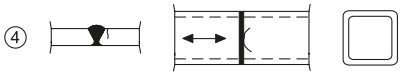
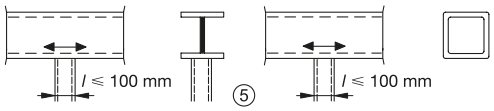
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
71		1) Uniones tubo-chapa con aplastamiento del extremo del tubo, biselado de bordes en X y soldadura a tope.	1) $\Delta\sigma$ se calcula para el tubo. Sólo para un diámetro del tubo inferior a 200 mm.
71 63	$\alpha \leq 45$ $\alpha > 45°$ 	2) Uniones tubo-chapa con soldadura a lo largo de ranuras de inserción de la chapa en el tubo rematadas con taladros.	2) $\Delta\sigma$ se calcula para el tubo. La fisuración por cortante de la soldadura debería comprobarse usando el detalle 8, de la tabla 8.5.
71		Soldaduras a tope con cordones frontales: 3) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles circulares huecos mediante soldaduras a tope.	Detalles 3) y 4): - Cordones con sobreespesor inferior al 10% de la anchura y transición gradual. - Ejecución de la soldadura en posición horizontal, comprobación mediante inspección, y ausencia de defectos fuera de las tolerancias especificadas por la Norma Europea EN 1090. - Para $t > 8$ mm, la categoría de detalle aumenta en dos escalones.
56		4) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles rectangulares huecos mediante soldaduras a tope.	
71		Acoplamientos mediante soldadura: 5) Perfiles huecos circulares o rectangulares unidos a otros perfiles mediante soldaduras en ángulo.	Detalle 5): - Soldaduras que no transmitan carga. - Dimensión paralela a la dirección de las tensiones $l \leq 100$ mm. - Para otros casos, véase la tabla 8.4.

Tabla 44 continúa >

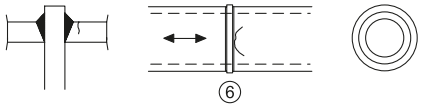
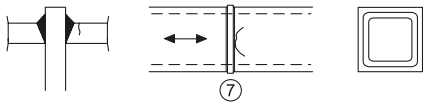
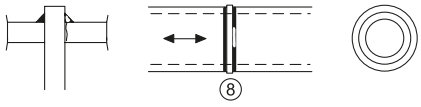
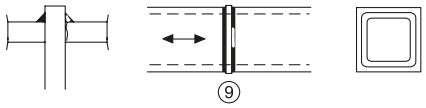
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
50	 ⑥	Empalmes en prolongación mediante soldadura: 6) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles circulares huecos mediante soldaduras a tope con chapa interpuesta.	Detalles 6) y 7): - Soldaduras que transmitan carga. - Comprobación de soldaduras mediante inspección, y ausencia de defectos fuera de las tolerancias especificadas por la Norma Europea EN 1090. - Para $t > 8$ mm, la categoría de detalle aumenta en un escalón.
45	 ⑦	7) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles rectangulares huecos mediante soldaduras a tope con chapa interpuesta.	
40	 ⑧	8) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles circulares huecos mediante soldaduras en ángulo con chapa interpuesta.	Detalles 8) y 9): - Soldaduras que transmitan carga. - Espesores de pared $t > 8$ mm.
36	 ⑨	9) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles rectangulares huecos mediante soldaduras en ángulo con chapa interpuesta.	

Tabla 45 **Detalles de fatiga de uniones en nudos en celosías. Detalles 1 a 4 de tabla 8.7 de UNE-EN 1993-1-9**

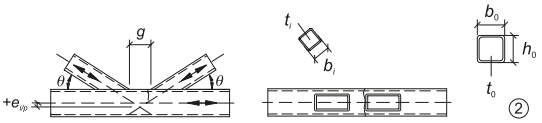
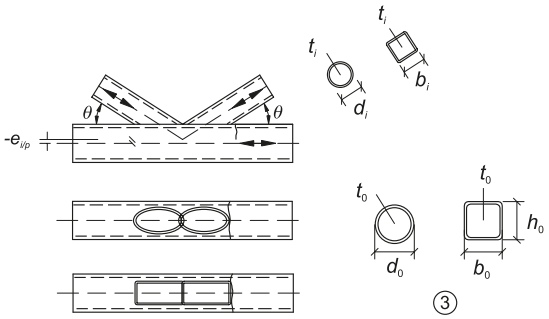
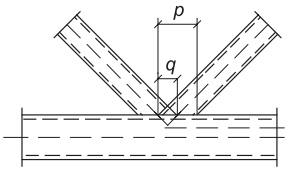
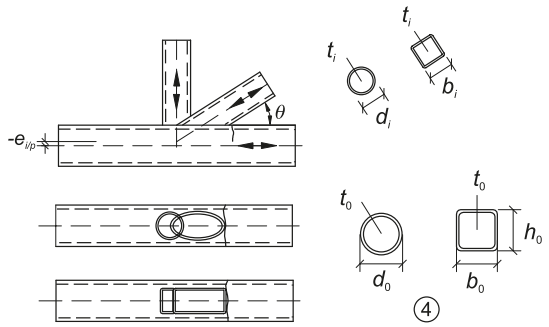
Categoría de detalle		Detalle constructivo	Requisitos
90 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2{,}0$	Uniones con separación: Detalle 1): Nudos en K y en N, perfiles circulares huecos  ①	Detalles 1) y 2): - Comprobaciones por separado de cordones y riostras. - Para valores del cociente t_0/t_i comprendidos entre 1 y 2, la categoría de detalle puede obtenerse por interpolación lineal. - Se admite soldadura en ángulo para riostras con espesor de pared $t \leq 8$ mm. $t_0, t_i \leq 8$ mm $35° \leq \theta \leq 50°$ $(b_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$ $(d_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$ $0{,}4 \leq b_i/b_0 \leq 1{,}0$ $0{,}25 \leq d_i/d_0 \leq 1{,}0$ $b_0 \leq 200$ mm $d_0 \leq 300$ mm $-0{,}5\,h_0 \leq e_{i/p} \leq 0{,}25\,h_0$ $-0{,}5\,d_0 \leq e_{i/p} \leq 0{,}25\,d_0$ $e_{0/p} \leq 0{,}02\,b_0$ o $e_{0/p} \leq 0{,}02\,d_0$ [$e_{0/p}$ es la excentricidad de alabeo] Detalle 2): $0{,}5\,(b_0 - b_i) \leq g \leq 1{,}1\,(b_0 - b_i)$ y $g \geq 2\,t_0$
45 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} = 1{,}0$		
71 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2{,}0$	Uniones con separación: Detalle 2): Nudos en K y en N, perfiles rectangulares huecos  ②	
36 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} = 1{,}0$		

Tabla 45 **continúa >**

<table>
<tr><th>Categoría de detalle</th><th colspan="2">Detalle constructivo</th><th>Requisitos</th></tr>
<tr><td>71
m = 5</td><td>$\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$</td><td rowspan="2">Uniones con solape: Detalle 3): Nudos en K y en N, perfiles circulares huecos
 
③</td><td rowspan="3">Detalles 3) y 4):
30% ≤ solape ≤ 100%
solape = (q/p) 100 [%]
- Comprobaciones por separado de cordones y riostras.
- Para valores del cociente t_0/t_i comprendidos entre 1 y 2, la categoría de detalle puede obtenerse por interpolación lineal.
- Se admite la soldadura en ángulo para riostras con espesor de pared t ≤ 8 mm.
t_0, $t_i \leq 8$ mm
$35° \leq \theta \leq 50°$
$(b_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$
$(d_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$
$0,4 \leq b_i/b_0 \leq 1,0$
$0,25 \leq d_i/d_0 \leq 1,0$
$b_0 \leq 200$ mm
$d_0 \leq 300$ mm
$0,5\,h_0 \leq e_i/p \leq 0,25\,h_0$
$0,5\,d_0 \leq e_i/p \leq 0,25\,d_0$
$e_{0/p} \leq 0,02\,b_0$ o $\leq 0,02\,d_0$
[$e_{0/p}$ es la excentricidad de alabeo]

Definiciones de p y q:
  </td></tr>
<tr><td>56
m = 5</td><td>$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$</td></tr>
<tr><td>71
m = 5</td><td>$\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$</td><td rowspan="2">Uniones con solape: Detalle 4): Nudos en K y en N, perfiles rectangulares huecos
 
④</td></tr>
<tr><td>50
m = 5</td><td>$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$</td></tr>
</table>

Como se ha expuesto a lo largo del resto de apartados de este capítulo, siempre es conveniente concebir las uniones de perfiles y los nudos de forma que se logren detalles con la mayor categoría de fatiga posible.

A continuación se exponen una serie de comentarios relativos al empalme de perfiles en celosías de la tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 44):

- El detalle 1 con categoría 71, mediante el aplastamiento del extremo del tubo y el empalme a tope con soldadura por los dos lados con una cartela no es demasiado habitual en puentes, pero presenta buena categoría de fatiga, aunque sólo es válido para tubos con diámetros inferiores a 200 mm
- El detalle 2 es más frecuente en las celosías transversales y horizontales en tableros con sección cajón que en tableros con la tipología de celosía, como se ha descrito en el apartado 4.11. Los comentarios allí incluidos serían todos de aplicación para el caso de emplear este detalle en un tablero en celosía metálica
- Los detalles 3 y 4 se refieren al empalme a tope con penetración completa de perfiles tubulares circulares (detalle 3 con categoría 71) o perfiles rectangulares o cuadrados (detalle 4 con categoría 56).

Este suele ser el detalle más habitual para el empalme de perfiles tubulares en celosías. En ambos casos se deben cumplir los requisitos siguientes:

- El sobreespesor de la soldadura debe ser inferior al 10%, y debe darse una transición gradual de los espesores, en el caso de tener distinto espesor. La transición debería ejecutarse acorde al detalle 7 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9
- La ejecución de la soldadura se debe realizar en posición horizontal, comprobando mediante inspección la ausencia de defectos fuera de las tolerancias establecidas en UNE-EN 1090-2. En el caso de que la soldadura no se haga en posición horizontal este detalle no sería de aplicación
- Para el caso de espesores de tubos mayores a 8 mm, la categoría de los detalles aumenta en dos escalones (categoría 80 en el detalle 4 y categoría 90 en el detalle 3).

De cualquier manera, y siempre que sea posible, si se recurre al empleo de chapa de respaldo por el interior de la unión (Figura 126), la soldadura entre tubos podrá asegurar una categoría de detalle equivalente al detalle 14 de la tabla 8.3 con categoría 71 (ver apartado 4.5.2).

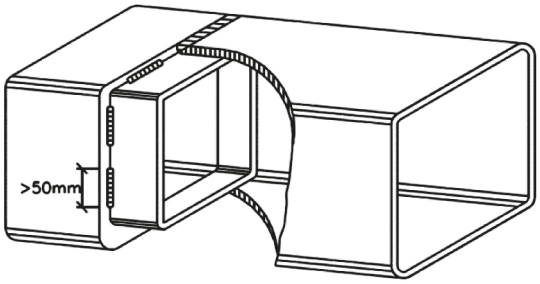


Figura 126 **Detalles de empalme de tubos con chapa interior de respaldo**

– El detalle 5 se refiere al empalme de un perfil tubular hueco unido a otro perfil mediante soldadura en ángulo. Este detalle se refiere a los casos de soldaduras que no transmiten carga, y cuando la dimensión paralela a la dirección del perfil principal solicitado a variación de tensiones (el horizontal de la figura incluida en el detalle 5 de la Tabla 44) es menor o igual a 100 mm. En otros casos, y sobre todo si la soldadura transmite esfuerzos, aplicarían los detalles de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, descritos en apartados previos

  Un ejemplo de este detalle podría ser, por ejemplo, la soldadura de elementos no estructurales, a un perfil principal de una celosía

– Los detalles 6 a 9 se refieren al empalme de perfiles tubulares (circulares o rectangulares) con chapas interpuestas. Las categorías de fatiga varían entre 50 y 36, por lo que deberían intentar evitarse, al presentar categorías de fatiga relativamente bajas. Siempre que sea posible se debería recurrir a los detalles 3 y 4 frente a los detalles 6 a 9 de la tabla 8.6

  Un caso que puede requerir este tipo de detalle es cuando sea necesario diseñar empalmes de tubos con chapas de testa atornilladas. Para soldar la chapa de testa

al perfil tubular, como se aprecia en la tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 44), siempre será preferible el detalle de soldadura a tope entre el perfil y la chapa de testa (detalles 6 o 7 con categorías 50 o 45) frente a los detalles con soldaduras en ángulo por el exterior del tubo (detalles 8 o 9 con categorías 40 o 36).

Por último, se hace referencia a los detalles relativos a las uniones en nudos soldados en celosías de la tabla 8.7 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 45). Los detalles 1 a 4 definen las categorías de fatiga de uniones en nudos en función de los espesores de los tubos a unir y de la geometría de la unión. Se trata de detalles complejos con muchas condiciones geométricas, y siempre que sea posible se debe intentar buscar geometrías y condiciones que logren la mayor categoría de fatiga de entre todas las posibles, que son:

- Detalle 1: máxima categoría 90 y mínima 45
- Detalle 2: máxima categoría 71 y mínima 36
- Detalle 3: máxima categoría 71 y mínima 56
- Detalle 4: máxima categoría 71 y mínima 50

4.12.2 Losas ortótropas

Los tableros con losa ortótropa no suelen ser demasiado habituales en puentes de carretera ya que presentan una serie de inconvenientes frente a las soluciones clásicas mixtas con losa superior de hormigón, como pueden ser:

- La losa ortótropa representa una cuantía importante de acero estructural, que tiene un coste relativo más elevado que la losa de hormigón armado conectada al tablero metálico (cajón o vigas).
- El acabado superficial de la losa ortótropa apenas permite ajustar la rasante y puede presentar ciertas deformaciones en la chapa superior del tablero inducidas por las soldaduras de los rigidizadores longitudinales y transversales. Este tipo de tableros, además, tiene normalmente espesores de pavimento muy reducidos y la regularidad del acabado de la chapa ortótropa superior puede llegar a afectar a la geometría de la superficie de la capa final de rodadura

  Los tableros con losa superior de hormigón permiten regularizar mucho mejor la rasante, y presentan menos problemas en este sentido

En general las losas ortótropas (Figura 127) se emplean en soluciones en las que estrictamente es necesario reducir mucho el peso propio de la estructura como suele ser en el caso de:

- Tableros de puentes levadizos, o basculantes, empleados habitualmente en puertos o zonas sobre vías fluviales o marítimas navegables, que requieren realizar la apertura frecuente del tablero
- Tableros de puentes atirantados o colgantes con grandes luces que requieran reducir las cargas permanentes

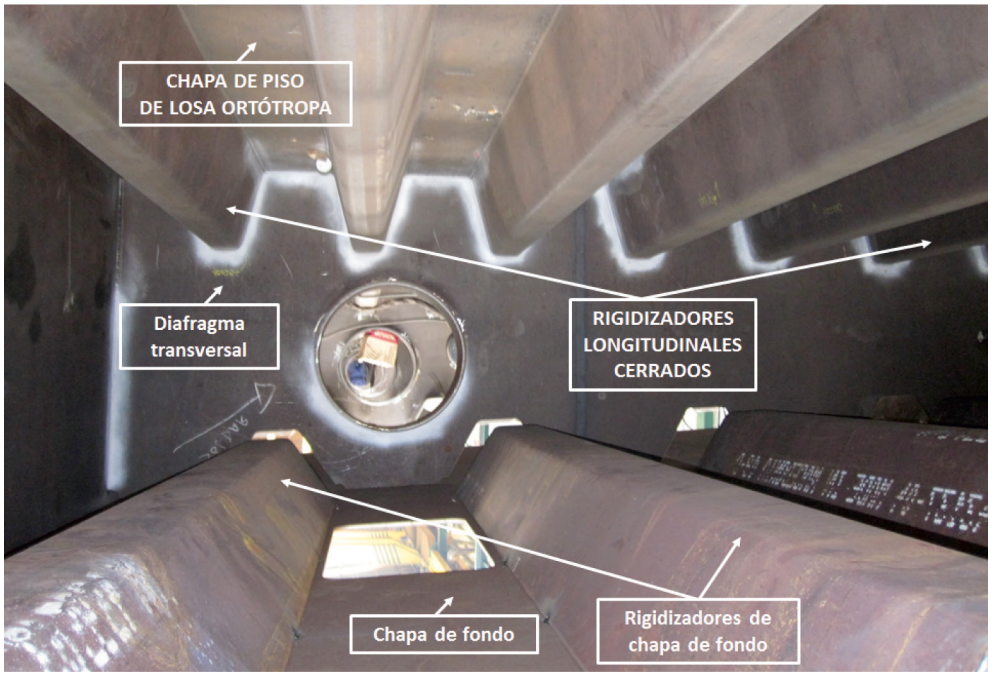
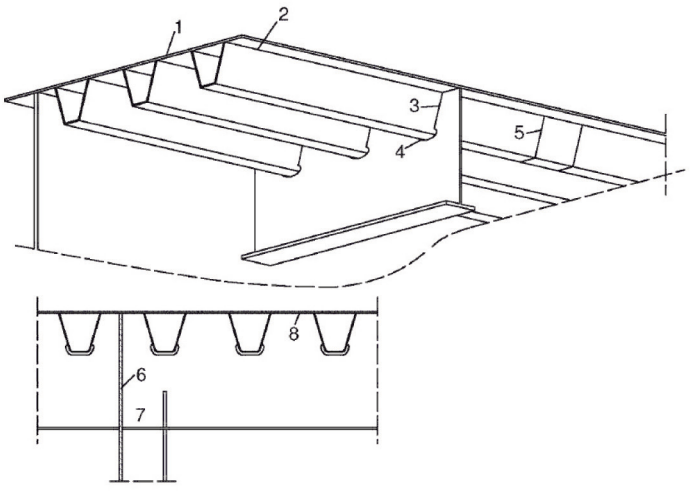


Figura 127 **Vista de una losa ortótropa con rigidizadores longitudinales cerrados**

4.12.2.1 Losas ortótropas con rigidizadores longitudinales cerrados

Este tipo de tableros presenta unas particularidades frente a la respuesta a fatiga que condiciona el diseño de sus detalles. En general es muy frecuente recurrir al empleo de rigidizadores longitudinales (largueros) cerrados con forma de bulbo u omega (Figura 127).

Los principales detalles de este tipo de losas ortótropas se definen en la figura C.1 de UNE-EN 1993-2, reproducida en la Figura 128.



1 chapa del tablero

2 conexión soldada del rigidizador a la chapa del tablero

3 conexión soldada del rigidizador al alma de la viga transversal

4 recorte en el alma de la viga transversal

5 empalme del rigidizador

6 empalme de la viga transversal

7 conexión soldada de la viga transversal a la viga principal o al pórtico transversal

8 conexión soldada del alma de la viga transversal a la chapa del tablero

Figura 128 **Detalles en losas ortótropas con largueros longitudinales cerrados (parte de Figura C.1 de UNE-EN 1993-2)**

La tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 muestra los principales detalles de fatiga en losas ortótropas con rigidizadores longitudinales cerrados. Para conseguir la categoría de fatiga definida para cada detalle en esa tabla, es necesario adoptar las precauciones de ejecución y respetar las tolerancias establecidas en el anexo C de UNE-EN 1993-2, y, en particular, las tolerancias y requisitos establecidos en las tablas C3, C4 y C5.

Los rigidizadores cerrados se deben ejecutar sin soldaduras longitudinales, plegando una chapa (Figura 129) y respetando los criterios establecidos para el conformado establecidos en 6.5 de UNE-EN 1090-2.

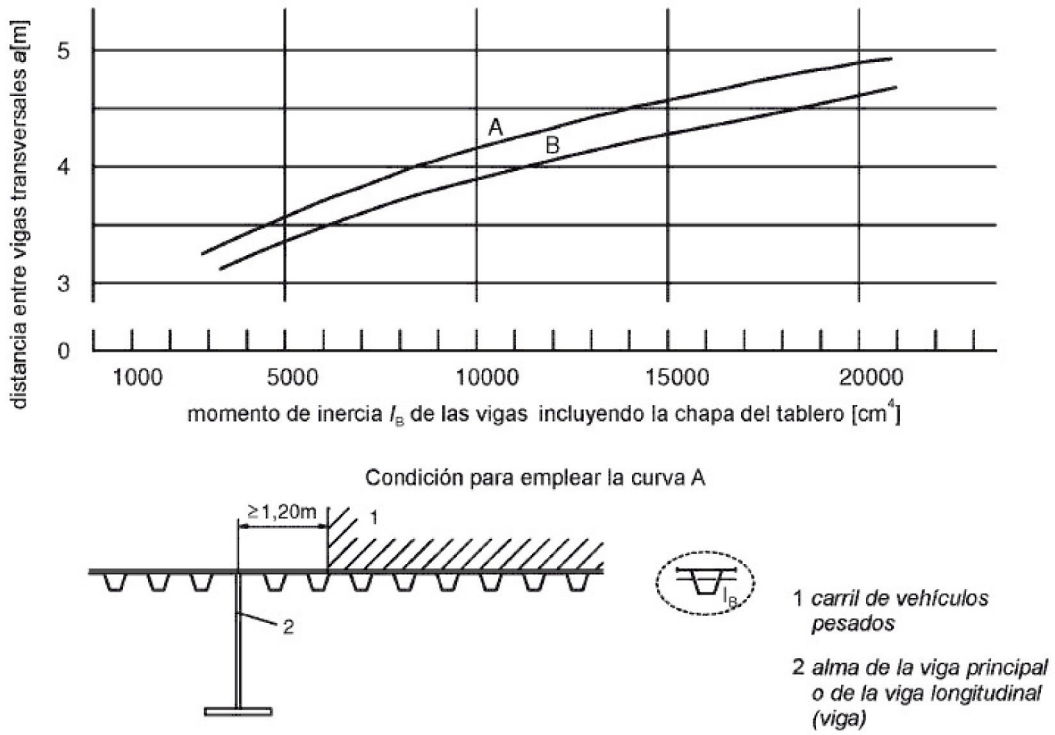


Figura 129 **Rigidizadores longitudinales plegados**

El apartado C1.2.2 de UNE-EN 1993-2 establece una serie de criterios mínimos para el espesor de la chapa de piso, y el espesor y la separación de los rigidizadores cerrados:

- La chapa de piso en el carril (o los carriles) de vehículos pesados del tablero debe tener un espesor t tal que:
  - $t \geq 14$ mm si la capa de pavimento tiene un espesor ≥ 70 mm
  - $t \geq 16$ mm si la capa de pavimento tiene un espesor ≥ 40 mm
- La separación e entre las almas de los rigidizadores longitudinales en su soldadura con la chapa de piso en la zona de carriles con vehículos pesados debe cumplir que:
  - $e/t \leq 25$, con un límite de $e \leq 300$ mm
- El espesor del rigidizador longitudinal t_{stiff} debe ser:
  - $t_{stiff} \geq 6$ mm

A su vez, la figura C.4 de UNE-EN 1993-2 (Figura 130) establece los criterios de rigidez mínima para los rigidizadores longitudinales en losas ortótropas.



NOTA a) La curva A se aplica a todos los rigidizadores no cubiertos por el punto b)
b) La curva B se aplica a los rigidizadores ubicados bajo el carril más cargado y dentro de los 1,20m junto al alma de una viga principal
c) La figura se aplica a todo tipo de rigidizadores

Figura 130 **Criterios de rigidez mínima para los rigidizadores longitudinales en losas ortótropas (Figura C.4 de UNE-EN 1993-2)**

Respetando estos criterios, las dimensiones más habituales empleadas en los rigidizadores longitudinales cerrados en losas ortótropas suelen ser las siguientes:

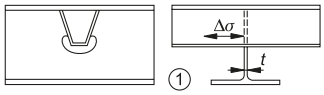
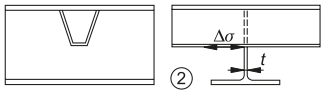
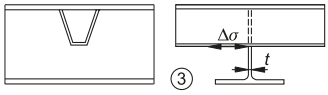
- separación máxima entre ejes de rigidizadores longitudinales: 600 mm, con 300 mm entre las soldaduras de sus extremos
- luz: suele rondar los 4 m
- canto: entre 275 y 350 mm
- espesor: de 8 o 10 mm (aunque se podría emplear el espesor de 6 mm, no suele ser recomendable, siendo preferible ir a un mínimo de 8 mm para evitar, en general, problemas de fatiga).

Los principales detalles de fatiga en losas ortótropas son los siguientes:

Soldadura del rigidizador longitudinal con el rigidizador transversal

El detalle del cruce y soldadura de los rigidizadores longitudinales con los transversales se define en los detalles 1 a 3 de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 46).

Tabla 46 **Detalles 1 a 3 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9. Cruces de rigidizadores longitudinales con transversales**

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

Los detalles 1 y 2 se refieren a rigidizadores longitudinales continuos. El detalle 1 aplica a rigidizadores longitudinales soldados a diafragmas o rigidizadores transversales con groeras en la parte inferior del rigidizador longitudinal (Figura 132 e imagen a) de la Figura 131), mientras que el detalle 2 sería igual que el 1 pero sin groera en el cruce con el rigidizador transversal (Figura 127 e imagen b) de la Figura 131).

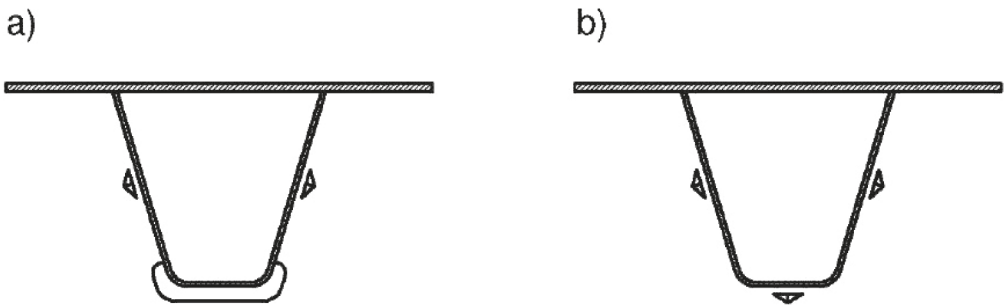


Figura 131 **Recorte de los rigidizadores transversales para el paso de los longitudinales (Figura C.11 de UNE-EN 1993-2)**



Figura 132 **Cruce de rigidizadores longitudinales con rigidizadores transversales con groeras. Detalle 1 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9**

En ambos casos, C.1.3.5.2(2) de UNE-EN 1993-2 establece que se debe evitar disponer ojales en la conexión de las almas de los rigidizadores cerrados con la chapa de piso.

Tanto el detalle 1 como el 2 de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 46) presentan una categoría de fatiga que varía entre 71 y 80, en función de si el espesor del elemento transversal *t* es mayor de 12 mm (categoría 71) o si es menor o igual de 12 mm (categoría 80).

Ahora bien, la carrera de tensiones en el rigidizador longitudinal se debe calcular en el caso del detalle 2 en la fibra inferior de la sección del rigidizador longitudinal, mientras que en el caso del detalle 1 se debe calcular en el punto del extremo de la groera inferior en su intersección con el rigidizador longitudinal, como se indica en la Figura 133.

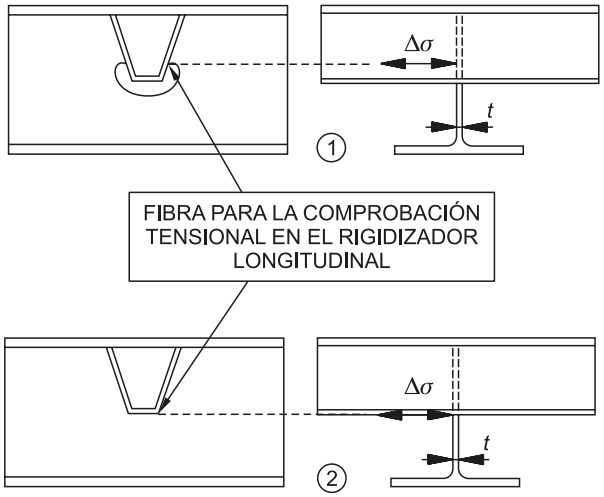


Figura 133 **Fibra para el cálculo de la variación de tensiones en el cruce de rigidizadores en losas ortótropas. Detalles 1 y 2 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9**

Del análisis de estos dos detalles se extrae la conclusión siguiente: a igualdad de secciones, la variación de tensiones en el rigidizador longitudinal, en el caso del detalle 1 será menor que

en el detalle 2, debido a que su fibra de control está más cerca del centro de gravedad de la sección.

Este hecho podría recomendar por lo tanto el empleo del detalle 1, con groera inferior, frente al detalle 2, sin groera inferior; ahora bien, ambos detalles requieren además adoptar las siguientes precauciones de ejecución:

- En el detalle 1 es necesario rebordear y verificar la continuidad de la soldadura en ángulo que se realiza entre el rigidizador longitudinal y el rigidizador transversal en los extremos de las groeras. Ese punto de quiebro puede convertirse en crítico si no se ejecuta bien y quedan entallas en la soldadura, por lo que en caso de adoptar el detalle 1, se deben extremar las medidas de control en la zona del rebordeo de la soldadura entre el rigidizador longitudinal y el transversal (Figura 134).

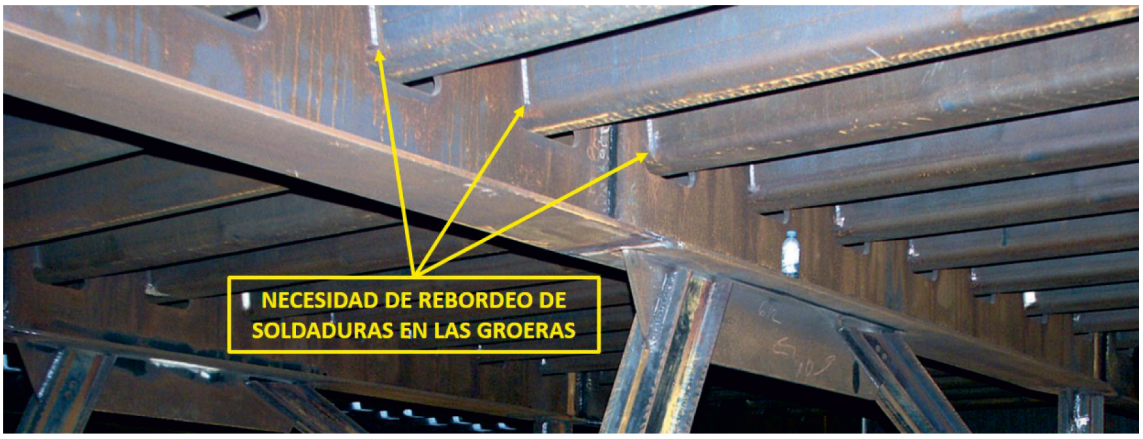


Figura 134 **Detalle 1 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9. Cruce del rigidizador longitudinal con soldadura en ángulo rebordeada en el extremo de la groera**

- En el detalle 2, al no existir groera inferior se evita la necesidad de rebordear las soldaduras, a costa de penalizar la variación de tensiones al tener que calcularlas en la fibra inferior del rigidizador longitudinal; ahora bien, también es necesario adoptar precauciones en el corte de la geometría del hueco en el rigidizador transversal, de forma que se ajuste muy bien en todo el perímetro de la sección del rigidizador longitudinal (Figura 135), respetando las tolerancias de la tabla C.4 de UNE-EN 1993-2

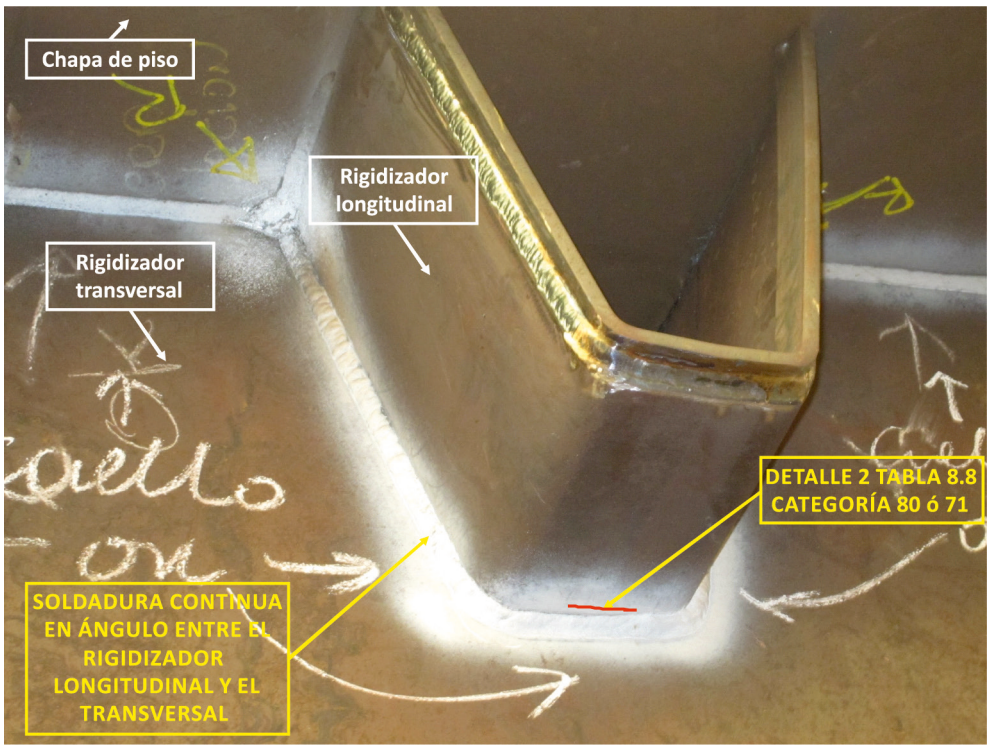


Figura 135 **Detalle 2 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9. Cruce del rigidizador longitudinal con soldadura en ángulo continua con el rigidizador transversal**

El detalle 3 de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 46) se refiere a rigidizadores longitudinales discontinuos, interrumpidos por los diafragmas o por los rigidizadores transversales que, en este caso, serían continuos. Este detalle se debe evitar, dado que presenta una categoría de fatiga muy baja, de 36, por lo que siempre será preferible diseñar los cruces de los rigidizadores longitudinales continuos a través de los transversales, con los detalles 1 o 2 frente al detalle 3.

Además, el detalle 3 sólo se podrá emplear cuando se cumplan las condiciones descritas en C.1.3.5.3 de UNE-EN 1993-2.

Detalle de empalme de rigidizadores longitudinales

El empalme de los rigidizadores longitudinales se define en los detalles 4 a 5 de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 47). En cuanto a estos detalles cabe observar lo siguiente:

Tabla 47 **Detalles 4 y 5 de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9, empalme de rigidizadores longitudinales cerrados**

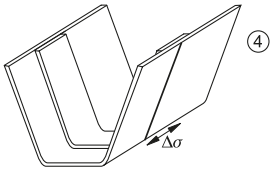
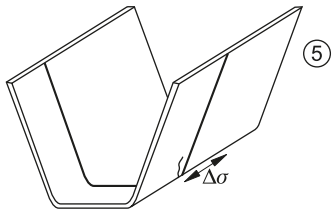
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
71		4) Empalme de largueros mediante soldadura a tope con penetración total y chapa dorsal.	4) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensiones normales del larguero.

Tabla 47 continúa >

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
112	Como los detalles 1, 2 y 4 de la tabla 8.3		5) Empalme de largueros mediante soldadura a tope sin chapa dorsal con soldeo por ambos lados y penetración total.	5) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensión directa del larguero. Puntos de soldadura en la zona a ocupar por la soldadura a tope.
90	Como los detalles 5 y 7 de la tabla 8.3			
80	Como los detalles 9 y 11 de la tabla 8.3			

- El detalle 4 representa el empalme de rigidizadores longitudinales con soldadura a tope con penetración completa y chapa de respaldo que, como en el caso de empalme de chapas planas, presenta una categoría de fatiga 71 (Figura 136). La chapa de respaldo debe ser completa y se debe doblar con la misma geometría interior de la sección del bulbo y ajustarla muy bien siguiendo los criterios descritos en el apartado 4.5.2



Figura 136 **Empalme de rigidizador longitudinal con chapa de respaldo (imagen del rigidizador en posición invertida en taller)**

- El detalle 5 establece la categoría de fatiga para el detalle de empalme de rigidizadores longitudinales realizados previo a su ajuste en el tablero con acceso a la soldadura por ambos lados sin necesidad de emplear chapa de respaldo en su interior. Este detalle no es muy habitual, ya que lo normal es que el empalme entre tramos de rigidizadores se establezca coincidiendo con las soldaduras *in situ* con el rigidizador ya ajustado en su posición soldado contra la chapa de piso, lo cual no permitiría el acceso a la raíz, y requeriría recurrir al detalle 4 mediante el empleo de chapa de respaldo. De cualquier manera, estos empalmes, ejecutados con soldadura por ambos lados del rigidizador presentan categorías de fatiga elevados, entre

112 y 80, análogos a los detalles de la tabla 8.3 de UNE EN 1993-1-9 para empalmes de chapas planas descritos en el apartado 4.5 de esta guía

La posición del empalme de los rigidizadores longitudinales en losas ortótropas, ya sea con el detalle 4 o con el detalle 5 de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9, se deben ejecutar cercanos al punto de inflexión del rigidizador, a una distancia de aproximadamente 0,2 l del rigidizador transversal (Figura 135), siendo l la luz del rigidizador longitudinal (separación entre rigidizadores transversales), de acuerdo con C.1.3.4(2) de UNE-EN 1993 2.

En el caso de que se vaya a realizar el empalme entre rigidizadores longitudinales de distinto espesor, la variación de espesor entre ellos no debe ser superior a 2 mm acorde con C.1.3.2(4) de UNE-EN 1993-2.

Para minimizar las tensiones residuales y que éstas no sean de tracción en la parte inferior del rigidizador longitudinal, el empalme de rigidizadores longitudinales se debe realizar conforme al siguiente procedimiento, descrito en el apartado C.1.3.4(3) y el detalle 6 de la tabla C.4 de UNE-EN 1993-2:

- En primer lugar, se deben soldar los dos tramos del rigidizador longitudinal a la chapa de respaldo
- En el detalle 4, sin groeras inferiores, se realiza la soldadura de unión entre rigidizadores apoyada en la chapa de respaldo, soldando en primer lugar la parte inferior de la sección y posteriormente las almas de los rigidizadores
- Finalmente se realiza la soldadura longitudinal del rigidizador con la chapa de piso en los 200 mm longitudinales adyacentes a la soldadura transversal más el tramo del rigidizador longitudinal a colocar *in situ*

El detalle 7 de la tabla C.4 de UNE-EN 1993-2 incluye los requisitos de tolerancias a respetar en dicha unión.

La necesidad de realizar, normalmente en obra, empalmes transversales en la chapa de piso, requiere llevar retranqueados los extremos de los rigidizadores longitudinales, dejando un tramo del rigidizador longitudinal (denominado habitualmente cupón o carrete) sin soldar (Figura 137). El detalle de empalme del rigidizador será doble, y al no haber acceso a su interior será necesario recurrir al detalle 4 de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 47) con el empleo de chapa de respaldo. La secuencia de soldeo debe ser la descrita en los párrafos previos.

La necesidad de realizar el empalme longitudinal de la chapa de piso (Figura 139), se puede planificar para realizarlo en taller, o si es necesario en obra. En taller su ubicación puede ser en cualquier lugar ya que se realizará siempre en primer lugar, previo a la colocación de los rigidizadores, y habrá, en general, acceso para soldar por ambos lados sin recurrir al empleo de chapa de respaldo, mientras que en obra la soldadura se debe colocar en una zona entre rigidizadores longitudinales para que haya acceso a la soldadura por el interior de la sección transversal (que debería diseñarse interiormente visitable) y por el exterior para lograr la mejor categoría del detalle posible –detalle 10 de tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 35)–.

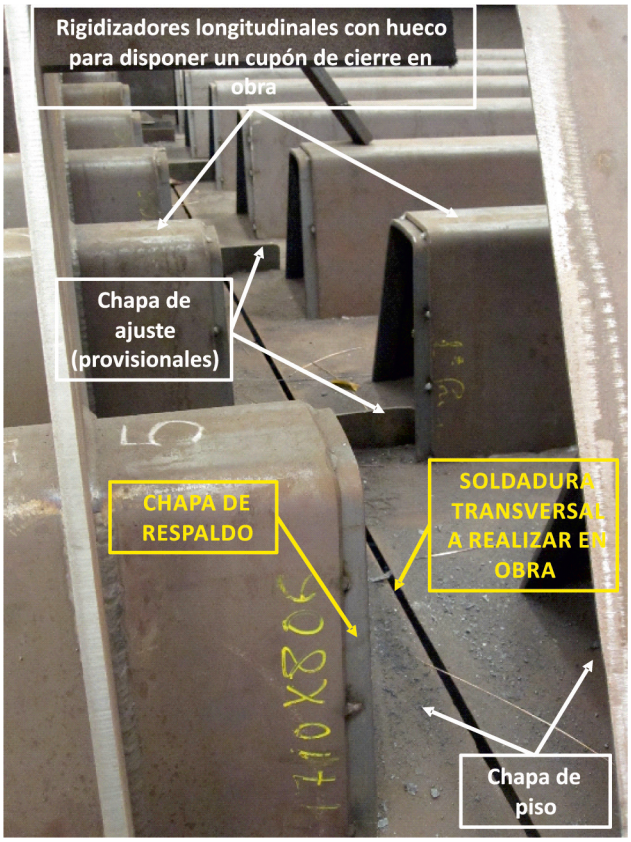


Figura 137 **Empalme con cupón de rigidizadores longitudinales en el cruce de una soldadura transversal de obra en la chapa de piso**

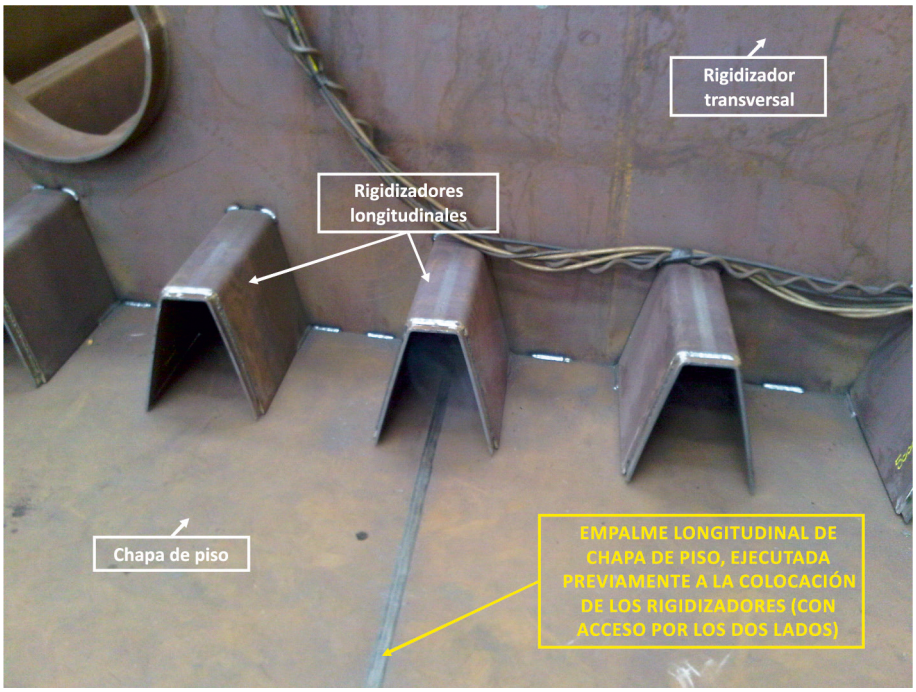
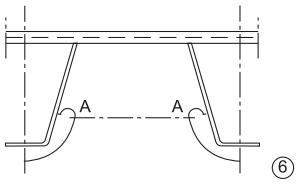


Figura 138 **Empalme longitudinal de chapa de piso (imagen en posición invertida al estar en la bancada del taller)**

El detalle 6 de fatiga de la tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 48) establece una categoría de 71 para el control de variación de tensiones en el alma del rigidizador transversal entre los huecos dejados para el paso del rigidizador longitudinal cuando se emplean groeras en su parte inferior.

Tabla 48 **Detalle 6 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9. Control del alma del rigidizador transversal**

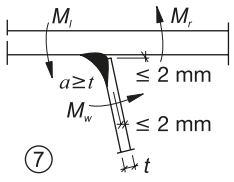
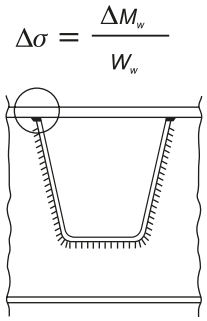
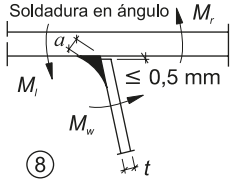
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
71		6) Sección crítica del alma de las viguetas debido a las groeras.	6) Comprobación basada en la carrera de tensiones de la sección crítica teniendo en cuenta el efecto Vierendeel. NOTA: Se puede utilizar la categoría de detalle 112 si la carrera de tensiones se calcula conforme a la Norma Europea EN 1993-2, apartado 9.4.2.2(3).

El apartado 9.4.2.2 de UNE-EN 1993-2 establece los criterios para la obtención de las tensiones en la sección crítica del detalle de fatiga 6.

Soldadura entre el rigidizador longitudinal y la chapa de piso

El detalle de la soldadura entre el rigidizador longitudinal y la chapa de piso se define en los detalles 7 y 8 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 49).

Tabla 49 **Detalles 7 y 8 de tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9. Soldadura del rigidizador longitudinal contra la chapa de piso**

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
71			Unión soldada entre chapas de tablero y largueros de sección trapezoidal o en V: 7) Soldaduras con penetración parcial con $a \geq t$.	7) Comprobación basada en la carrera de tensiones normales debidas a la flexión de la chapa.
50			8) Soldaduras en ángulo o soldaduras con penetración parcial fuera de los límites del detalle 7).	8) Comprobación basada en la carrera de tensiones normales debidas a la flexión de la chapa.

- El detalle 7 establece la categoría de fatiga 71 para una soldadura con penetración parcial, que es como se debe diseñar esta soldadura, para obtener la mejor categoría de fatiga posible

- Los requisitos y tolerancias para la ejecución de la soldadura con penetración parcial se establecen en los detalles 3 y 4 de la tabla C.4 de UNE-EN 1993-2, para soldaduras completamente automatizadas, o para soldaduras manuales o parcialmente automatizadas, respectivamente
- El detalle 8 establece la categoría de fatiga 50 para una soldadura en ángulo, inferior a la del detalle anterior

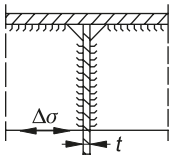
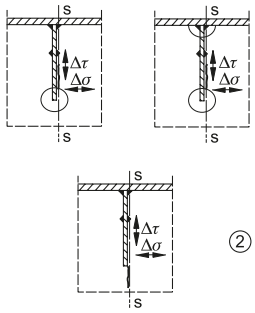
Los requisitos y tolerancias establecidos para la ejecución de la soldadura en ángulo se establecen en el detalle 5 de la tabla C.4 de UNE-EN 1993-2.

4.12.2.2 Losas ortótropas con rigidizadores longitudinales abiertos

En algunos casos se puede recurrir al empleo de losas ortótropas con rigidizadores longitudinales abiertos, aunque en general es una solución mucho menos frecuente que la de rigidizadores cerrados descritos en el apartado anterior.

Las categorías de fatiga en este caso se rigen por los detalles 1 y 2 de la tabla 8.9 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 50).

Tabla 50 **Detalles 1 y 2 de tabla 8.9 de UNE-EN 1993-1-9**

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$t \leq 12$ mm	 ①	1) Uniones de largueros longitudinales a viguetas.	1) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensiones normales del larguero.
71	$t > 12$ mm			
56		 ②	2) Uniones de largueros longitudinales continuos a viguetas. $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_s}{W_{net,s}}$ $\Delta\tau = \frac{\Delta V_s}{A_{w,net,s}}$ Comprobar también la carrera de tensiones entre largueros según la definición de la Norma Europea EN 1993-2.	2) Comprobación basada en la carrera equivalente de tensiones: $\Delta\sigma_{eq} = \frac{1}{2}\left(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^4}\right)$ resultante de combinar las carreras $\Delta\sigma$ de tensión normal y $\Delta\tau$ de tensión cortante del alma de la vigueta.

Los principales aspectos a reseñar de los detalles de fatiga en losas ortótropas con rigidizadores abiertos son los siguientes:

- Detalle 1: soldadura de los rigidizadores longitudinales a los rigidizadores transversales. El rigidizador longitudinal se interrumpe y el transversal es continuo. La categoría de fatiga de este detalle depende del espesor del rigidizador transversal t; si

$t \leq 12$ mm la categoría será 80 y si $t > 12$ mm la categoría de fatiga será 71. La carrera de tensiones se calcula en el rigidizador longitudinal

- Detalle 2: soldadura de los rigidizadores longitudinales a los rigidizadores transversales, con rigidizadores longitudinales continuos a través de los transversales. En este caso la categoría de fatiga se reduce hasta 56

En ambos casos se debe cumplir, respectivamente, con los requisitos y tolerancias de los detalles 11 y 13 de la tabla C.4 de UNE-EN 1993-2.

4.13 Tratamientos de mejora de la resistencia a fatiga de soldaduras

Con carácter adicional a las tablas anteriores, existen técnicas de tratamiento posteriores a la ejecución de una unión soldada que permiten aliviar las tensiones residuales generadas en las piezas unidas e incluso inducir tensiones de compresión que mejoren la respuesta a fatiga. Entre ellas destacan el amolado de los talones de soldadura, la refusión controlada con electrodo de tungsteno (TIG, *"tungsten inert gas"*) del talón de soldadura, o el endurecimiento plástico de las soldaduras por martilleo o granallado (*"peening"*).

El apartado 9.7 de UNE-EN 1993-2 remite al Anejo Nacional, que no define criterios adicionales, para encontrar las provisiones oportunas acerca de estas técnicas, no amparadas a efectos de cálculo (ver 3.1.1) salvo en el caso del amolado (recogido en las exigencias de varios detalles de las tablas anteriores).

5

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LA SENSIBILIDAD FRENTE A FATIGA EN PUENTES DE CARRETERA

5.1 Descripción de los estudios realizados

En este capítulo se resumen los resultados del estudio de sensibilidad realizado frente a fatiga de las diferentes variables analizadas en puentes de carretera, tanto del análisis longitudinal (estudiando variables como la tipología estructural, la sección transversal, el grado de hiperestatismo, la anchura del tablero y el número de carriles) como del análisis transversal y local (elementos secundarios). Como se verá más adelante, ambos análisis están relacionados, puesto que, por ejemplo, la anchura del tablero puede condicionar la geometría de la sección transversal y, con ello, las conclusiones del análisis longitudinal, mientras que, a la vez, los elementos transversales se verán influidos en su concepción y respuesta en función de la sección adoptada.

En este capítulo se incluye en primer lugar el análisis del comportamiento global longitudinal de la tipología estructural más habitual en puentes metálicos y mixtos de carretera: las vigas de alma llena, típicas tanto en pasos superiores con luces reducidas/medias como de viaductos con luces medias/altas. Las secciones transversales más comunes para esta tipología son los cajones cerrados y los tableros formados por dos vigas, también denominados bijácena, ambos mixtos conectados a la losa superior, y generalmente también ambos con doble acción mixta en las zonas de flexión negativa en la proximidad de los apoyos intermedios.

El análisis longitudinal incluido en este capítulo se ha restringido a tableros de carretera de anchura inferior a 12 m puesto que se ha comprobado que, por lo general y para tableros de canto estricto, una mayor anchura se traduce, especialmente, en una mayor importancia relativa de la sobrecarga uniformemente distribuida del modelo de carga general LM1 (UDL

definida en 4.3.2.1.b de UNE-EN 1991-2) frente a las cargas concentradas (sistema tándem TS definido en 4.3.2.1.a de UNE-EN 1991-2), como a los modelos de carga frente a fatiga (definidos en 4.6 de UNE-EN 1991-2 y descritos con detalle en el capítulo 3 de esta guía).

De cualquier manera, esto no quiere decir que se pueda obviar el análisis longitudinal frente a fatiga de tableros más anchos, puesto que hay casos particulares, como los tableros multiviga o multicajón, no cubiertos en los análisis realizados por su excepcionalidad, que sí pueden precisar verificaciones de fatiga ya que cada viga o cajón se comporta relativamente independiente de los adyacentes a efectos de las sobrecargas de fatiga, mientras que un tablero muy ancho con un cajón multicelular o con cantos mayores de los estrictos, no suele requerir comprobaciones de fatiga exhaustivas. Un tablero de gran anchura puede admitir diferentes secciones transversales y diversos esquemas resistentes en el plano de la sección, y la resistencia a fatiga se ve condicionada por ello.

En este capítulo se analizará, para cada sección tipo, la influencia de la luz (dentro de un rango convencional de 20 a 75 m) y del número de vanos (1, 3 o más), pasándose a estudiar la respuesta en términos comparativos de las diferentes secciones transversales típicas a igualdad de los demás factores. También se tratará la repercusión de las acciones de fatiga en las diferentes zonas del tablero (centro de vano en flexión positiva y apoyos intermedios en flexión negativa) y elementos principales (uniones de chapas de fondo o platabandas superiores, conexión, armadura pasiva).

Otras tipologías como las losas ortótropas o las celosías, menos habituales en puentes de carretera, quedan fuera del alcance del estudio realizado y se tratan con carácter más descriptivo y no tan numérico, llamando la atención sobre los aspectos más significativos de la concepción de los detalles del capítulo 4.

Concluido el análisis paramétrico longitudinal, se realiza el estudio de los elementos estructurales denominados secundarios (análisis transversal), responsables de la inyección de las cargas excéntricas (como es el tráfico pesado) en el mecanismo resistente global del tablero. Así, se examinarán las costillas transversales mixtas en tableros cajón con importantes voladizos laterales, y los puntales de complemento a esas costillas en los tableros cajón de gran anchura. El enfoque del estudio es muy parecido al del análisis global, pero prescindiendo del Método Simplificado, por su inaplicabilidad para cálculos locales y de elementos transversales.

5.2 Zonas analizadas

En el análisis global (longitudinal) de puentes cuyo comportamiento es esencialmente el de una viga se advierte una diferente sensibilidad ante la fatiga en función del área de estudio: zona de vano, apoyos intermedios y apoyos extremos. Cada zona se distingue por el predominio de diferentes esfuerzos y por el uso de distintas secciones transversales que condicionan la resistencia a fatiga. Debido a que las observaciones aquí expuestas son comunes tanto para tableros con sección cajón mixto y con sección bijácena mixta, se ha optado por no repetirlas en los apartados específicos de cada sección transversal tipo.

5.2.1 Centros de vanos

Las zonas centrales de vano se caracterizan por el predominio de momentos flectores positivos elevados y reducidos esfuerzos cortantes y torsores (en puentes rectos, sólo los causados por la sobrecarga). La sección transversal más común es la sección con simple acción mixta con un cajón o dos vigas metálicas conectadas a la losa superior, que responde de forma bruta sin fisurar frente a las sobrecargas. En estas condiciones, es habitual que el centro de gravedad de la sección resistente se encuentre muy cerca de la losa superior (o incluso en su interior), a escasa distancia de la parte superior de la subsección metálica y siempre lejos de la fibra inferior. En este caso, los detalles más susceptibles de verse afectados por la fatiga son los de mayor rango tensional:

- juntas transversales en las platabandas inferiores (o chapa de fondo).
- juntas transversales en las fibras inferiores de las almas
- unión del alma a la platabanda inferior (o chapa de fondo).
- soldaduras de las células inferiores (en caso de existir) al alma y a la platabanda inferior, y empalme entre las chapas de la célula

Los detalles más comunes para estos puntos se muestran en la Figura 139.

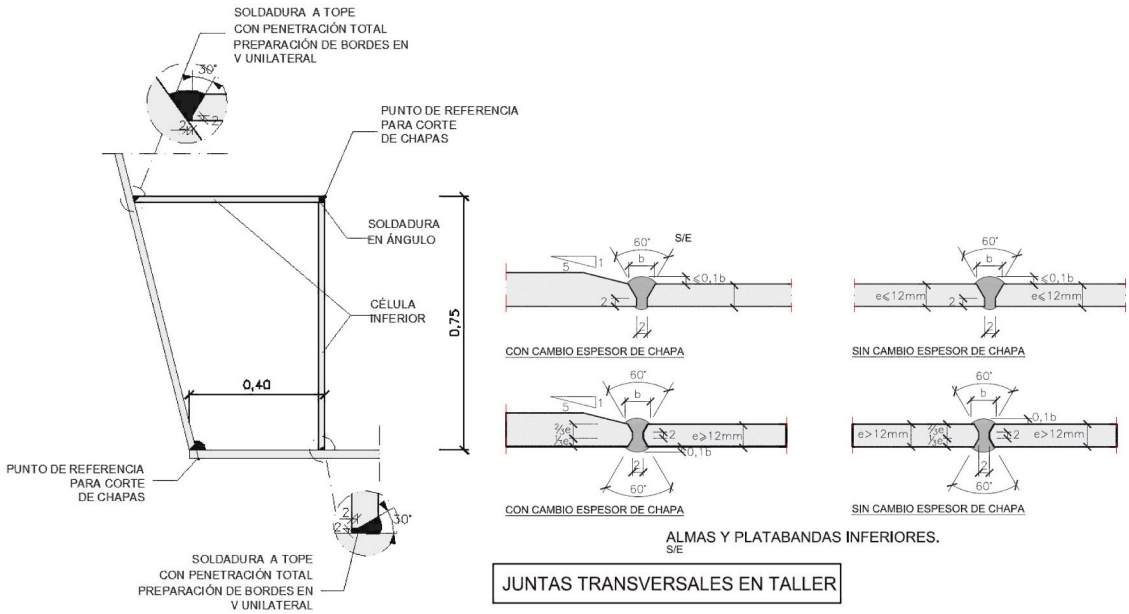


Figura 139 **Soldaduras longitudinales y transversales tipo en zona inferior de vigas**

5.2.2 Apoyos intermedios

Las zonas de apoyos intermedios (también denominadas secciones de pila) se caracterizan por el predominio de elevados momentos flectores negativos, esfuerzos cortantes y torsores (en puentes rectos, sólo los causados por la sobrecarga). La sección transversal más común es la sección con doble acción mixta, con losa superior conectada a las vigas o cajón

metálico, y con hormigón de fondo trabajando a compresión. En estos casos, la losa superior suele hallarse parcial o totalmente fisurada, y en cambio el hormigón inferior suele estar siempre comprimido respondiendo con su área bruta. En estas condiciones, es habitual que el centro de gravedad de la sección se encuentre relativamente cerca de la losa de fondo.

En este caso, los detalles más susceptibles de verse afectados por la fatiga son:

- juntas transversales en platabandas superiores
- juntas transversales en las zonas superiores de las almas
- unión del alma a la platabanda superior
- soldaduras de las células superiores (en caso de existir) al alma y a la platabanda superior

Los detalles más comunes para estos puntos se muestran en la Figura 140.

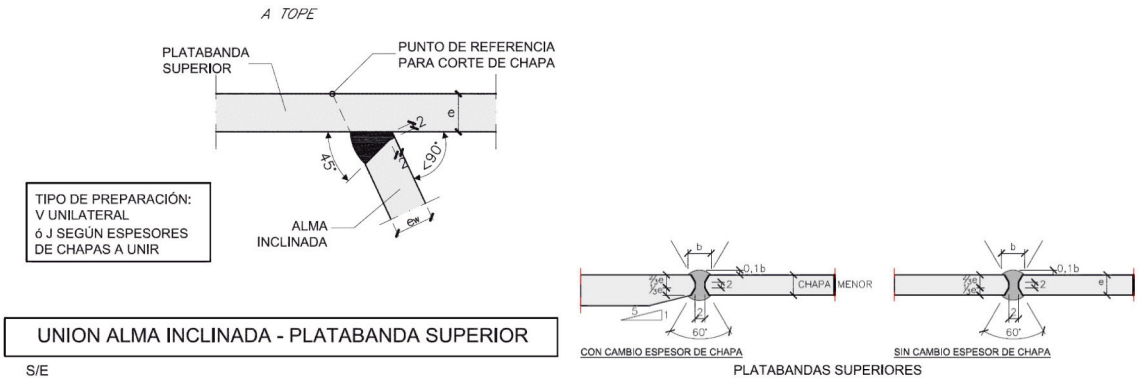


Figura 140 **Soldaduras longitudinales y transversales tipo en zona superior de vigas**

En estas zonas, en general, la pérdida de rigidez (incluso suponiendo la losa superior completamente fisurada) no es tan acusada como para que la variación de tensiones normales resultantes conduzca a categorías de detalle críticas (superiores a 71). Por tanto, un dimensionamiento centrado en las exigencias de ELS y ELU habitualmente suele ser suficiente para verificar la seguridad frente a fatiga.

Este resultado se basa en la posición de la fibra neutra de la sección, relativamente centrada, aunque se acerque a la zona de la losa de fondo, lo que implica que la distancia de la fibra neutra a la platabanda superior sea bastante menor que la distancia de ésta a la platabanda inferior en el caso de las secciones de centro de vano.

5.2.3 Apoyos extremos

Las zonas de los apoyos finales de un tablero se caracterizan por estar sometidas a flexiones muy bajas (o nulas en el propio apoyo), y en cambio por tener esfuerzos cortantes y momentos torsores elevados. Por tanto, las secciones trabajan fundamentalmente frente a tensiones tangenciales, por lo general menos exigentes que las tensiones normales en lo que a fatiga

se refiere porque las tensiones suelen ser reducidas y las categorías de referencia normalmente mayores (superiores a 100).

5.2.4 Zona de puntos de inflexión

En tableros continuos, las secciones situadas entre un sexto y un tercio de la luz del vano respecto al eje de los apoyos intermedios (dependiendo de si se trata de tableros de canto constante o variable, o de si se analiza el vano lateral o los interiores) se caracterizan por estar sometidas, por lo general, a momentos flectores reducidos bajo las acciones permanentes, motivo por el cual suelen denominarse puntos de inflexión. Es precisamente en el entorno de estas secciones donde suele empezar a disponerse el hormigón de fondo en los tableros con doble acción mixta, y donde se produce el cambio entre el canto constante y el variable en el caso de tableros con variación de canto lineal (acartelado).

Estas zonas de transición entre la flexión positiva y negativa precisan un análisis más cauto que el correspondiente a una sección de centro de vano o de apoyo intermedio, puesto que la losa del tablero puede estar parcialmente fisurada o apenas comprimida, y el hormigón de fondo, si existe, no es plenamente eficaz ya que su entrada en carga, por la conexión, es gradual desde su sección de inicio. Por tanto, las tensiones asociadas a las envolventes de flexión positiva o negativa causadas por el paso de los vehículos de fatiga (ya sea FLM3, FLM4 o FLM5) deberán evaluarse teniendo en cuenta la sección verdaderamente resistente en cada caso a partir del estado tensional acumulado bajo cargas permanentes.

En consecuencia, tanto las chapas de fondo como las platabandas superiores y las armaduras de la losa superior son susceptibles de condicionar frente a fatiga, al participar de la sensibilidad de las secciones de flexión positiva y negativa. Por otra parte, debido al tipo de dimensionamiento de la conexión, no parece probable que los pernos se vean afectados puesto que el cortante en estas secciones es menor que en los apoyos intermedios y la densidad de conexión, no mucho menor.

5.2.5 Armadura pasiva y dispositivos de empalme

En los tableros mixtos se emplea armadura pasiva longitudinal tanto en la losa superior (armado dimensionado en general por las exigencias de ELS y ELU) como en la losa de fondo en el caso de la doble acción mixta (armado necesario por cuantías mínimas, generalmente, pues la losa inferior trabaja normalmente siempre a compresión).

En situación de servicio, para la que se evalúa el ELU de fatiga, la armadura entra en juego aportando rigidez y resistencia cuando la losa en que se halla embebida se fisura, momento en el que el hormigón deja de colaborar. A la vista del comportamiento estructural de los tableros de puentes mixtos, la losa del tablero es susceptible de fisurarse en situación de servicio en las inmediaciones de los apoyos intermedios, donde predomina la flexión negativa con carácter permanente.

Por el contrario, en las zonas centrales de vano la losa del tablero no suele fisurarse en situación de servicio y las armaduras se hallan cerca de la fibra neutra, por lo que la tensión

soportada por las barras es muy baja y será raro que se produzca daño por fatiga, ni en las armaduras ni en los puntos de empalme.

Por tanto, será preciso centrar la atención en las secciones donde la armadura pasiva está sometida a mayores tensiones y oscilaciones tensionales. Asimismo, recordando que los dispositivos de empalme tienen una resistencia a fatiga notablemente inferior a la de las propias armaduras, también será necesario disponer los solapes en las secciones de menor solicitación, siempre que sea posible, alejándolos de las zonas sobre pilas con mayores solicitaciones de flexión negativa.

Otro aspecto importante a la hora de analizar la seguridad a fatiga de las armaduras y de los dispositivos de empalme es la correcta evaluación de la rigidez a flexión de la sección, para lo cual será preciso apoyarse en los estudios tensionales de ELS y en los diagramas momento–curvatura de la sección en cuestión. Sin duda, suponer la losa superior totalmente fisurada es conservador, pero puede serlo en exceso al verificar los empalmes.

A partir de los estudios desarrollados en el apartado 5.3, se aprecia que, en las tipologías convencionales para puentes de carretera (tableros de sección cajón o bijácena, ambos con doble acción mixta) y dentro del rango de luces analizado, la verificación a fatiga de las armaduras en las secciones de apoyo intermedio no suele condicionar frente a las comprobaciones generales de ELU y ELS. Es decir, el armado dispuesto por las exigencias de rotura y control de fisuración suele ser suficiente para resistir la fatiga.

Por el contrario, las verificaciones de fatiga en los dispositivos de empalme son más exigentes que las del armado en sí debido a su baja categoría.

5.3 Análisis longitudinal

5.3.1 Metodología

La metodología del análisis longitudinal realizado ha consistido en el encaje estricto de las secciones principales del tablero bajo las exigencias convencionales de ELS y ELU recogidas en UNE-EN 1991-2, UNE-EN 1993-1, UNE-EN 1993-2 y UNE-EN 1994-2, sin tener en cuenta la fatiga.

Posteriormente, se ha analizado la sensibilidad a la fatiga de las secciones previamente dimensionadas mediante la obtención de la categoría de fatiga óptima según un doble enfoque: el del Método Simplificado (Método de los Coeficientes λ de Daño Equivalente) y el del Método del Daño Acumulado. El doble enfoque tiene como objetivo la comparación entre los resultados obtenidos por los dos métodos con lo cual, dichos métodos, han sido aplicados en condiciones que permiten esta comparación.

Para este estudio se ha elegido analizar la chapa de fondo (tableros cajón) o la platabanda inferior (tableros bijácena) de secciones de centro de vano (por lo ya comentado en el apartado 5.2) ya que son las zonas que sufren mayor rango tensional.

Cada uno de los métodos (MS y MDA) ha sido aplicado para los posibles escenarios de tráfico, de acuerdo con la Tabla 3 y la Tabla 4:

- Tipo de tráfico:
  - Tráfico local (TL)
  - Tráfico de media distancia (TMD)
  - Tráfico de larga distancia (TLD)
- Frecuencia del tráfico:
  - 0,050 millones de vehículos pesados al año
  - 0,125 millones de vehículos pesados al año
  - 0,500 millones de vehículos pesados al año
  - 2,000 millones de vehículos pesados al año

5.3.1.1 Metodología de análisis por el Método del Daño Acumulado

En el caso del Método del Daño Acumulado (MDA), se han estudiado los resultados para los siguientes escenarios de tráfico:

- Considerando que el tráfico real quedase representado exclusivamente por el vehículo de fatiga FLM3 (de 480 kN), para cada una de las frecuencias de tráfico incluidas en el punto anterior (y en la Tabla 4). Lógicamente esto no es sino una simplificación, ya que el tráfico real nunca se compondrá exclusivamente por un único vehículo pesado como el FLM3 (que además es muy pesado), pero la consideración de este caso servirá para comparar los resultados obtenidos mediante el MDA con los obtenidos mediante el Método Simplificado, en el que sí es de aplicación el FLM3
- Considerando un tráfico medio diario, representado por el vehículo de fatiga FLM4 (con 5 vehículos pesados tipo, ver Tabla 3), adaptado a los tipos y frecuencias de tráfico referidos en el punto anterior (acorde con la Tabla 3 y la Tabla 4). Por ejemplo, se considerarán los vehículos del FLM4 con un tráfico local y una frecuencia de 0,05 millones de vehículos pesados al año, entre otros casos analizados

Para el paso de cada vehículo (representando un escenario de tráfico) se hace el registro de tensiones en el elemento analizado y el correspondiente cálculo del daño. Rescatando el desarrollo de carrera de tensión equivalente de 2.4.2, es posible establecer una correlación entre el MDA y el MS de la normativa. Conocido el daño en un detalle causado por el paso de una determinada composición de tráfico con una IMD, se puede deducir una categoría equivalente del detalle, es decir, un valor único de carrera de tensión que cause el mismo daño en 2 millones de ciclos aplicados. Este valor de carrera equivalente es el que se debe comparar con la categoría real del detalle (afectada por su coeficiente parcial). Así, si se supone una categoría concreta para un detalle y se analiza su seguridad por el MDA, se puede ver que, si el daño calculado es superior a 1, la categoría equivalente resultante será superior a la supuesta

al inicio del análisis, es decir, el detalle no cumple las condiciones de seguridad. Al revés, para un daño inferior a la unidad, la categoría equivalente será inferior a la supuesta, cumpliéndose así las condiciones de seguridad frente a fatiga.

Visto así, parece que existe una relación directa y biunívoca entre ambos métodos y que sería posible deducir analíticamente una carrera equivalente estricta para cada detalle en función del daño causado por el tráfico. Sin embargo, no es así: si se suponen dos categorías para un mismo detalle y se aborda su análisis por el MDA, los valores resultantes de daño conducirán a carreras equivalentes distintas. Esto se debe a la no linealidad de las curvas S–N, por la cual, a igualdad de oscilaciones tensionales, suponer una categoría u otra puede hacer que las carreras de tensión de los diferentes vehículos caigan en dominios diferentes (exponente m). Es decir, en función de la categoría inicialmente supuesta, una misma carrera puede hallarse en la región de m = 3 (daño acelerado), m = 5 (daño moderado) o m = ∞ (sin daño).

A partir de la evidencia anterior, se deduce la posibilidad de lanzar un cálculo iterativo para deducir la carrera equivalente exacta de un detalle asociada a una determinada composición de tráfico. Basta con suponer un detalle inicial lo suficientemente bajo como para provocar un daño numéricamente apreciable, deducir la categoría equivalente y tomarla como punto de partida de la siguiente iteración, así hasta converger (punto en el cual el daño acumulado es igual a la unidad). Alcanzada la convergencia, se obtiene la carrera de tensiones equivalente referida a 2 millones de ciclos, directamente comparable con la carrera de tensión equivalente óptima, $\Delta\sigma_{E,2}$, obtenida por el Método Simplificado.

5.3.1.2 Metodología de análisis por el Método Simplificado

La comparación entre las tensiones equivalentes obtenidas por el Método del Daño Acumulado y por el Método Simplificado solo es posible si, como se ha referido anteriormente, el Método Simplificado se aplica bajo determinadas condiciones.

En el caso del Método Simplificado (MS), aplicable sólo a los resultados de variaciones de tensiones obtenidos con el vehículo de fatiga FLM3, se han estudiado, al objeto de obtener los coeficientes de daño equivalente (λ), los resultados para los siguientes escenarios de tráfico:

- Considerando un tráfico medio diario coincidente con el que representa el vehículo de fatiga FLM3, para cada una de las frecuencias de tráfico incluidas en la Tabla 4
- Considerando un tráfico medio diario representado por los 5 vehículos tipo del FLM4 adaptado a los tipos y frecuencias de tráfico referidos más arriba, acorde con la Tabla 3 y la Tabla 4. Por ejemplo, se considerarán los vehículos del FLM4 con un tráfico local y una frecuencia de 0,05 millones de vehículos pesados al año

Sabiendo que el Método Simplificado solo se puede aplicar con las variaciones de tensiones asociadas al vehículo de fatiga FLM3, para poder realizar una comparación con los resultados de la aplicación del Método del Daño Acumulado, se procede a la obtención del valor del coeficiente de daño equivalente que tiene en cuenta la composición del tráfico λ_2 de la siguiente manera:

- Los valores obtenidos bajo el paso del vehículo de fatiga FLM3 resultan de la calibración del coeficiente de daño equivalente λ_2 (de acuerdo con el apartado 3.4.1.5 de esta guía) considerando Q_{m1} igual a 480 kN y N_{obs} igual a la frecuencia de tráfico en estudio (Tabla 4).
- Los valores obtenidos bajo el paso del vehículo de fatiga FLM3 pero representativos de los escenarios de tráfico equivalentes al representado por los vehículos del FLM4 acorde con la Tabla 3 y Tabla 4, resultan de la calibración del coeficiente de daño equivalente λ_2 (de acuerdo con el apartado 3.4.1.5 de esta guía) considerando los valores de Q_{m1} , N_{obs} y, por tanto, λ_2 reflejados en la Tabla 12

En los siguientes apartados, los resultados de un análisis por el Método Simplificado (con el vehículo de fatiga FLM3) calibrado de acuerdo con los escenarios de tráfico equivalentes al representado por los vehículos del FLM4 acorde con la Tabla 3 y Tabla 4, se designarán como FML3*.

La obtención, por el Método Simplificado y por el Método del Daño Acumulado, de las carreras de tensión equivalentes comparables, permitirá verificar la fiabilidad y seguridad del primero y se deducirá si las categorías teóricas resultantes son compatibles con las correspondientes a los detalles más comunes para cada zona analizada según las tablas de UNE-EN 1993-1-9.

5.3.2 Tableros cajón mixtos

5.3.2.1 Discusión conceptual

La sección transversal es responsable, con carácter general, del reparto de esfuerzos en la estructura y siempre de la distribución de tensiones en cada punto. La adopción de una determinada sección transversal, en tipología o geometría, no es una decisión única, pero tal elección tiene sus repercusiones en el dimensionamiento de los diferentes componentes de la sección y de los elementos transversales.

El cajón cerrado se caracteriza por el funcionamiento conjunto a flexión y torsión, lo que le permite resistir las acciones excéntricas de manera uniforme en toda la sección (igual tensión normal y tangencial en las almas homólogas), siempre y cuando el tablero cuente con elementos que impidan la distorsión distribuidos conforme a la normativa (generalmente, a distancias no mayores que 4 veces el canto).

A efectos de modelización, una viga en cajón cerrado puede idealizarse a partir de su directriz asignándole las constantes estáticas (área, inercias a flexión y a torsión) de cada tramo, y las acciones de tráfico pueden aplicarse como cargas gravitatorias (concentradas o distribuidas) y momentos torsores actuando a lo largo de la directriz.

5.3.2.2 Uso de la doble acción mixta

En tableros mixtos, tanto cajón como multijácena, es muy habitual el uso de doble acción mixta en la proximidad de los apoyos intermedios. Las secciones con losa de fondo son más

rígidas, compactas, dúctiles y económicas que las que sólo tienen simple acción mixta. Como se verá, el comportamiento a fatiga también se ve notablemente mejorado.

La esencia de la construcción mixta es que, en fibras donde predomina la compresión en el metal, es posible disponer hormigón conectado al acero para reducir los espesores sin comprometer la abolladura del metal. Así es habitual disponer hormigón de fondo situado en la zona de las secciones cercanas a los apoyos interiores, conectado al acero. El resultado de la doble acción mixta es una sección dúctil en ELU, de notable inercia en servicio (incluso si la losa superior se ha fisurado), con platabandas inferiores o chapa de fondo (de espesores moderados) en clase 1, que no abollan pese a estar comprimidas gracias a la conexión a la losa de fondo.

La experiencia resultante del diseño de viaductos con doble acción mixta apunta a que, en los tramos con losa de fondo, ni las zonas comprimidas (zona inferior de la sección) ni las traccionadas (zona superior) suelen verse condicionadas por la fatiga. Las fibras comprimidas no suelen entrar en tracción bajo el efecto de las carreras de tensión, mientras que las fibras traccionadas superiores del metal experimentan unas oscilaciones tensionales compatibles con los detalles habituales en tableros metálicos. Ello se debe a un doble efecto: la presencia de armadura pasiva longitudinal en la losa superior, que absorbe una parte importante de las tensiones normales de tracción, y la posición de la fibra neutra de la sección que, en este caso, se encuentra menos distante de la platabanda superior que, en una sección trabajando a flexión positiva con simple acción mixta, de la platabanda inferior.

A la inversa, en los tramos con simple acción mixta, donde predomina la flexión positiva, se comprueba que la unión transversal de chapas de fondo y la de las almas a la platabanda inferior son los detalles críticos precisamente porque la fibra neutra se halla, por lo general, en el entorno de la platabanda superior (muy cerca o incluso dentro de la losa superior), lo que se traduce en un importante brazo hasta la fibra inferior. Se comprobará que un diseño en el que no se analice la fatiga puede desembocar en categorías inalcanzables para los detalles habituales, por lo que se hace necesario disponer chapas más gruesas para rebajar las tensiones.

A la vista de lo anterior, unas secciones que requieren un tratamiento más minucioso son precisamente las de transición de simple a doble acción mixta (en las zonas de puntos de inflexión), caracterizadas por momentos flectores en situación permanente muy bajos y momentos flectores de las sobrecargas significativos, tanto positivos como negativos. Además, la losa de fondo no puede considerarse plenamente eficaz en sus primeros metros ya que las tensiones del metal requieren un recorrido hasta movilizar el hormigón por medio de la conexión. Por eso, se hace preciso evaluar correctamente la rigidez de la sección, es decir, la contribución de la losa inferior, así como la fisuración de la losa superior del tablero.

5.3.2.3 Tableros cajón isostáticos

5.3.2.3.1 Características básicas

Para analizar la influencia de la luz se han modelizado cajones isostáticos que se han dimensionado para las acciones en servicio conforme a UNE-EN 1991-2 y las exigencias de UNE-EN 1993 y UNE-EN 1994, sin considerar la fatiga. Los puentes analizados tienen las siguientes características:

- Luces de 20, 30, 45,5 y 60 metros
- El canto de la sección se ha fijado en 1/24 de la luz
- Losa de 10,60 metros de ancho y espesor variable entre 0,18 (borde) y 0,28 metros (eje de la sección).

Con el objeto de ajustar los espesores de chapa y así enfatizar la sensibilidad de la sección ante oscilaciones tensionales, se ha supuesto la existencia de aceras de 1,3 m que limitan a 2 el número de carriles virtuales completos (de manera que los vehículos pesados del modelo de carga general LM1 serán sólo los de los dos primeros carriles virtuales con 600 y 400 kN). Las secciones resultantes en centro de vano (Figura 141) tienen en común las platabandas superiores (irrelevante a efectos de fatiga), el alma ($\neq$ 10) y el ancho del fondo del cajón (3,50 m). La Tabla 51 recoge, para cada luz considerada, los cantos de metal y correspondientes espesores de chapa de fondo.

Tabla 51 **Características de tableros cajón mixtos isostáticos**

Luz [m]	Canto de metal [m]	Espesor de chapa de fondo [mm]
20	0,75	20
30	0,95	30
45,5	1,65	35
60	2,25	45

La sección transversal para un tablero cajón mixto isostático de 45,5 metros de luz se presenta la Figura 141

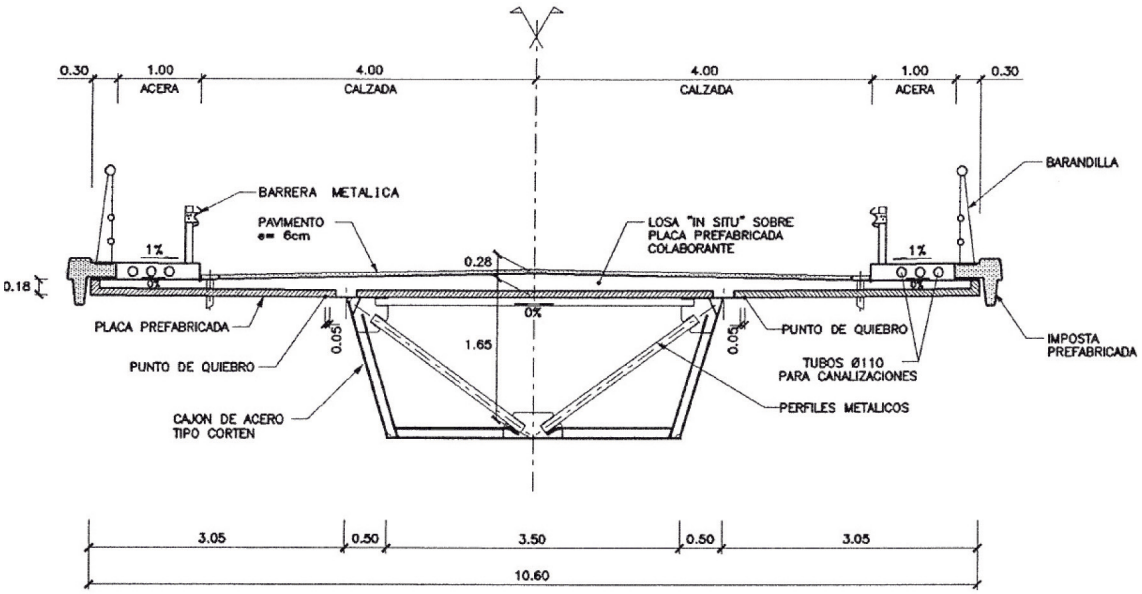


Figura 141 **Sección transversal por centro de vano de 45,5 m**

5.3.2.3.2 Sensibilidad a fatiga de las soldaduras transversales en las chapas de fondo

La experiencia apunta a que, en general, en tableros de más de 12 m (o de más de dos carriles), tanto de sección bijácena como cajón, el efecto de la fatiga no suele resultar condicionante. Sin embargo, por debajo de los 12 m sí es posible que alguna unión transversal (bien en posición, bien en espesores de chapa) sea crítica. Como ejemplo, se presenta a continuación un análisis de sensibilidad de la unión transversal de la chapa de fondo, en la sección de centro de vano (sección con simple acción mixta).

A la hora de determinar la seguridad de cada detalle, parece razonable pensar que la unión del alma a la platabanda, así como las juntas transversales, son de especial importancia (fallo grave), ya que su fallo implica la rotura de la sección, por lo que se empleará γ_{Mf} = 1,35. Por el contrario, las uniones transversales de las células inferiores (en caso de que existan) podrían abordarse como detalles cuyo fallo se considere leve, pues su función es la de prevenir la abolladura del alma sin contribuir a la resistencia de la sección de modo tan determinante como la platabanda inferior. Por lo tanto, podría admitirse en ese caso el empleo de γ_{Mf} = 1,15.

Los resultados de este análisis se han obtenido del ejemplo desarrollado en el apartado 6.1, con las siguientes características:

- Cajón isostático de 45,5 metros de luz
- Tablero de dos carriles
- Sección transversal de 11,50 metros de ancho y 1,65 metros de canto de metal más 0,28 metros de espesor medio de losa

En este análisis se estudia la influencia de la intensidad y tipo de tráfico en la categoría de detalle mínima necesaria para el cumplimiento de la seguridad frente a fatiga de la unión transversal de la chapa de fondo.

Con respecto a los gráficos incluidos en la Figura 142, Figura 143 y Figura 144 se aclaran los siguientes puntos:

- La comprobación de esta unión se hace según el Método Simplificado de UNE EN 1993-2
- Cada gráfico representa un tipo de tráfico distinto (tráfico local, media distancia y larga distancia).
- Las líneas negras incluidas en los gráficos de las figuras siguientes representan categorías mínimas de detalle necesarias para garantizar la seguridad frente a fatiga en la unión estudiada, a lo largo del puente. Dichas categorías se representan como carreras de tensión equivalentes de cálculo, obtenidas a partir de un análisis según el Método Simplificado aplicando los coeficientes de daño equivalente con un tráfico equivalente al que produciría el modelo de carga FLM4 para distintos escenarios

de tráfico (con λ_1 = 2,20 y λ_{max} = 2). Los valores de Q_{m1} y λ_2 son los recogidos en la Tabla 12. Los saltos en estas líneas corresponden a cambios de sección

Cada una de las líneas corresponde a una intensidad de tráfico distinta (por ejemplo, la línea negra continua indica cual es la categoría de detalle mínima correspondiente para una intensidad de 0,05 millones de vehículos pesados al año).

- Las líneas en colores representan distintas categorías de detalle (36, 50, 71 y 80), todas ellas minoradas por el coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35

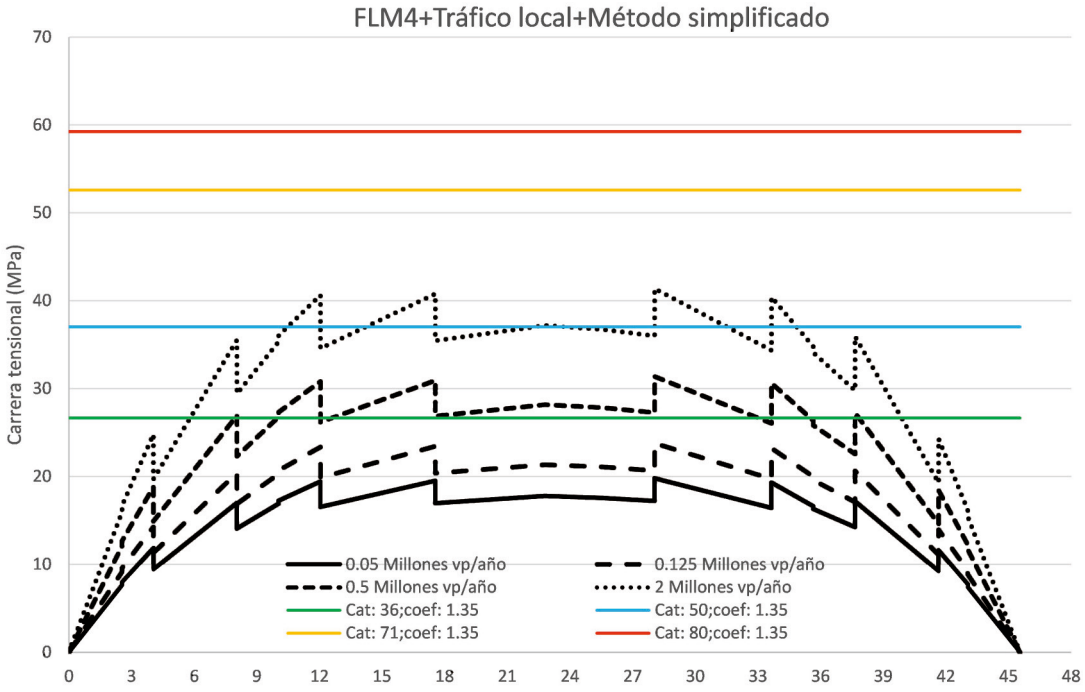


Figura 142 **Análisis de la chapa de fondo de un cajón isostático de 45,5 m de luz para FLM4 con un reparto de tráfico local y MS**

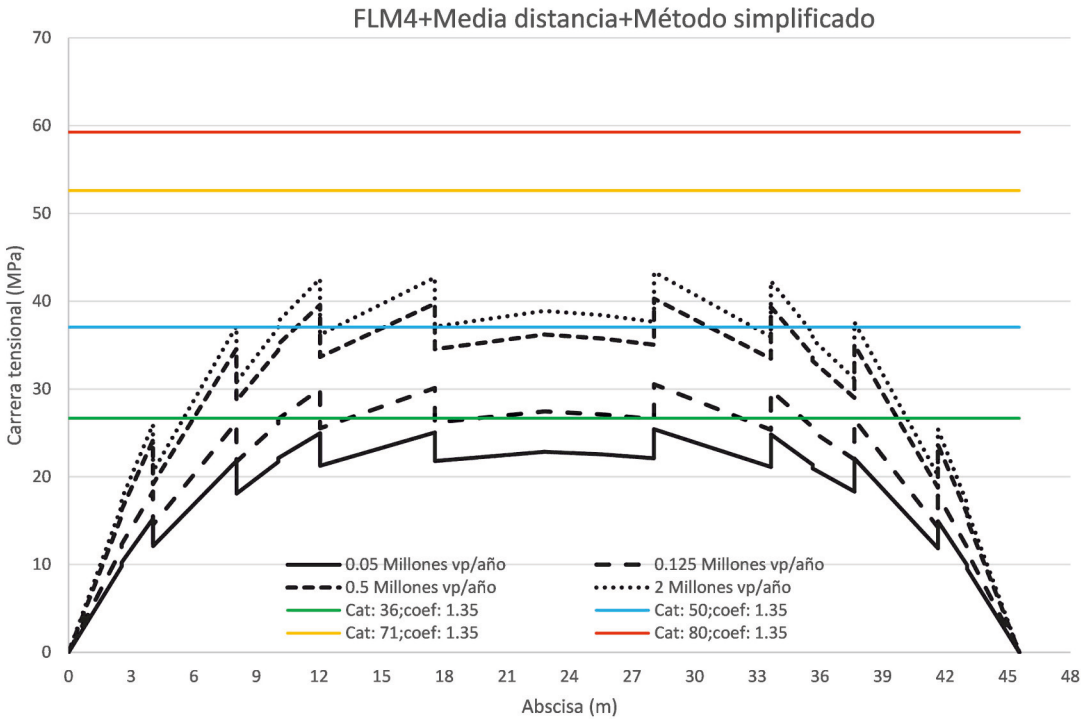


Figura 143 **Análisis de la chapa de fondo de un cajón isostático de 45,5 m de luz para FLM4 con un reparto de tráfico de media distancia y MS**

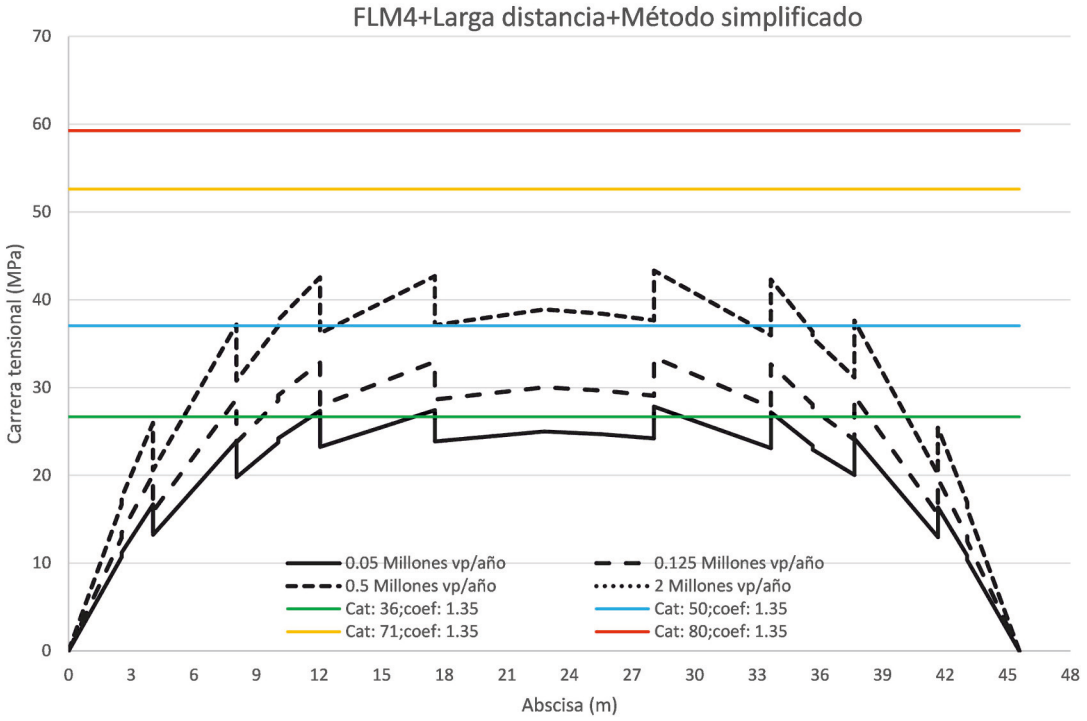


Figura 144 **Análisis de la chapa de fondo de un cajón isostático de 45,5 m de luz para FLM4 con un reparto de tráfico de larga distancia y MS**

De los gráficos presentados, puede observarse cómo, en función del escenario de tráfico, la categoría mínima necesaria oscila entre 36 (por ejemplo, para el escenario del tráfico local – Figura 142 –, la curva de la carrera tensional equivalente para una intensidad de 0,05 y 0,125 millones de vp/año no llega alcanzar a la curva de la categoría de detalle 36 minorada) y 71 (no existe ninguna curva en los distintos escenarios que llegue a alcanzar la recta correspondiente a la categoría de detalle de 71).

Además, se destaca que para el escenario de tráfico de media distancia y 2 millones de vp/año (Figura 143) y tráfico de larga distancia e intensidad igual o superior a 0,5 millones de vp/año (Figura 144) gobierna la limitación de λ_{max}, con lo cual en estos casos los resultados no se ven afectados del incremento del tráfico (en la Figura 144, la línea correspondiente a la intensidad de 0,5 millones de vp/año coincide con la de 2 millones de vp/año). Aquí queda evidenciada una de las limitaciones del Método Simplificado.

5.3.2.3.3 Exposición de resultados

La Tabla 52 resume los principales momentos en centro de vano. Por tratarse de un tablero isostático, los resultados son independientes de la sección transversal.

Tabla 52 **Momentos flectores en centro de vano**

Momento [kNm]	Vano [m]			
	20	30	45,5	60
M_d (ELU)	18020	36243	76436	127800
$M_{max,k}$ (LM1)	6676	11637	21272	32428
ΔM (FLM3)	1572	2736	4596	6336
ΔM (FLM4a)	957	1436	2170	2857
ΔM (FLM4b)	1305	2056	3292	4415
ΔM (FLM4c)	1588	2794	4679	6465
ΔM (FLM4d)	1189	2168	3686	5105
M (FLM4e)	1307	2438	4173	5779

Con los valores correspondientes a los modelos de carga de fatiga FLM3 y FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) se analizan las secciones resultantes conforme al Método Simplificado, obteniendo la categoría que garantiza para la chapa de fondo una vida útil de 100 años para diferentes intensidades de tráfico pesado (ver apartado 5.3.1) con el coeficiente parcial para la resistencia a fatiga, γ_{Mf} = 1,35.

En la Tabla 53 y en la Figura 145 se resumen las categorías de fatiga necesarias para cada luz tipo y escenario de tráfico, bajo un análisis por el Método Simplificado. Se destacan en rojo, en la Tabla 53, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 54).

Tabla 53 **Categoría necesaria en chapa de fondo, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	Vano [m] (MS)											
		20			30			45,5			60		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		67			61			53			42	
FLM3*		66	67	67	61	61	61	50	53	53	38	42	42
FLM3	0,500		67			61			53			42	
FLM3*		50	64	67	47	60	61	38	49	53	29	37	40
FLM3	0,125		57			54			44			33	
FLM3*		38	49	53	36	46	50	29	37	41	22	28	30
FLM3	0,050		48			45			36			27	
FLM3*		32	41	44	30	38	42	24	31	34	18	23	25

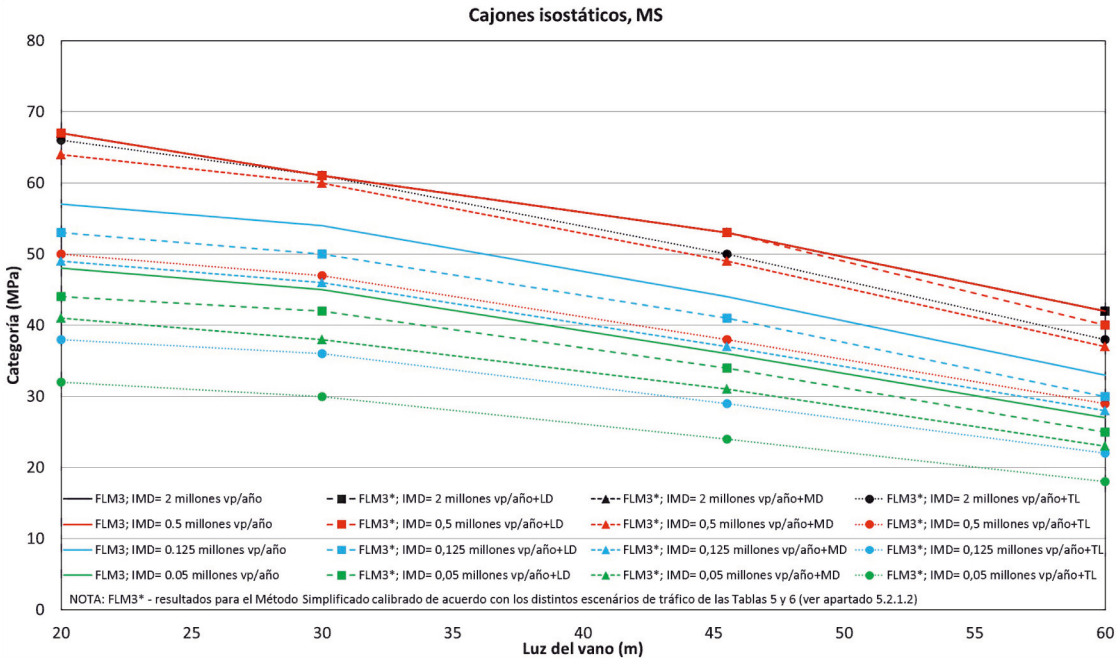


Figura 145 **Resumen del análisis de cajones isostáticos según el MS**

Con los valores correspondientes a los modelos de carga de fatiga FLM3 y FLM4 se analizan las mismas secciones resultantes, ahora conforme al Método del Daño Acumulado (MDA), obteniendo la categoría necesaria que garantiza para la chapa de fondo una vida útil de 100 años (con daño igual a 1) para diferentes intensidades de tráfico pesado (ver apartado 5.3.1) y coeficiente parcial de resistencia a fatiga, γ_{Mf} = 1,35.

En la Tabla 54 y en la Figura 146 se resumen las categorías de fatiga óptimas para cada luz tipo y escenario de tráfico, bajo un análisis por el Método del Daño Acumulado. Se subrayan, en la Tabla 54, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 54 **Categoría necesaria en chapa de fondo, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	Vano [m] (MDA)											
		20			30			45,5			60		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	77			75			65			53		
FLM4		56	70	78	56	70	76	48	60	66	39	49	54
FLM3	0,500	67			66			57			46		
FLM4		47	56	60	42	56	60	37	48	52	30	39	42
FLM3	0,125	51			59			43			35		
FLM4		35	43	46	32	42	40	27	37	40	22	29	32
FLM3	0,050	42			42			36			29		
FLM4		28	34	37	25	33	37	21	28	32	17	23	26

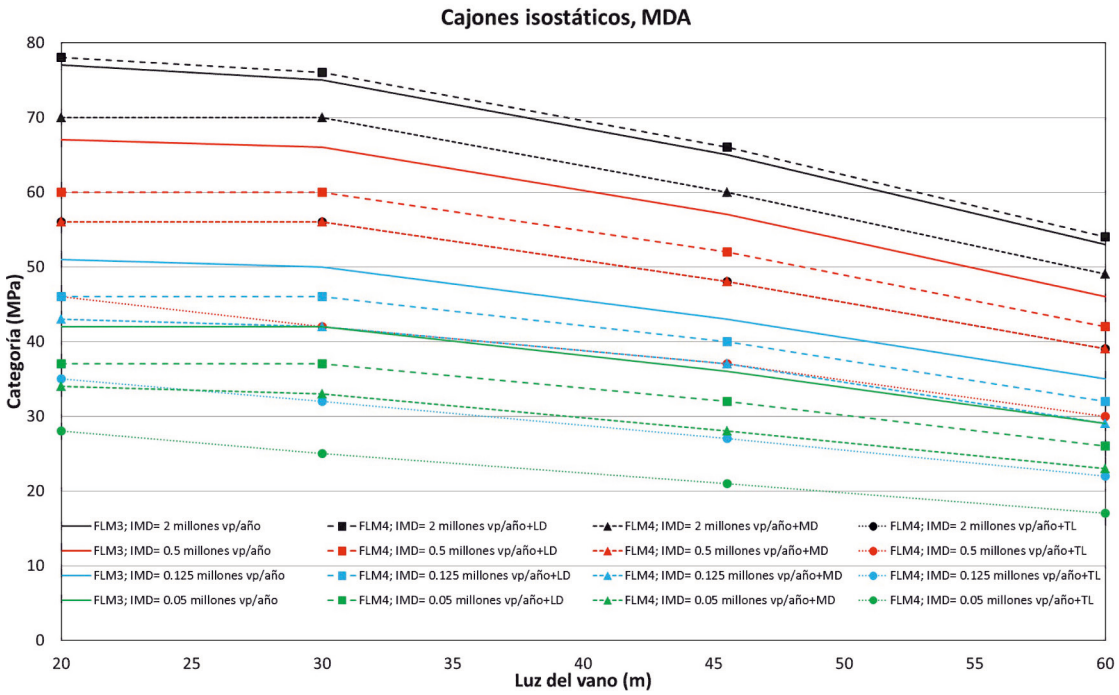


Figura 146 **Resumen del análisis de cajones isostáticos según el MDA**

5.3.2.3.4 Análisis de la seguridad a fatiga

Del análisis de las tablas y figuras asociadas al Método del Daño Acumulado (Tabla 54 y Figura 146) se aprecia que:

- Para cualquier luz estudiada y escenario de tráfico, un análisis mediante el MDA conduce a una categoría necesaria inferior a 80
- La categoría necesaria para el FLM3 es casi la misma que para el FLM4 en el escenario de máxima intensidad de tráfico ($2 \cdot 10^6$ vp/año) y mayor proporción de vehículos pesados (LD) (Tabla 54, valores subrayados). Además, a medida que se reduce la intensidad de vehículos pesados, la categoría que exige un tráfico exclusivo con el FLM3 es mayor que la del FLM4 con reparto de larga distancia. Es decir, la calibración del modelo de carga FLM3 parece reproducir las pésimas condiciones de tráfico registradas en las carreteras europeas, y es conservadora para las demás configuraciones
- Por último, conviene destacar que la categoría necesaria disminuye con la luz del vano. Parece un resultado razonable puesto que, a medida que aumenta la luz, es mayor la influencia de las sobrecargas distribuidas frente a las concentradas en el dimensionamiento, y los saltos en los espesores comerciales de chapa son mayores que el incremento en las tensiones

Por otra parte, si la verificación se abordara conforme al Método Simplificado usando como base tanto el modelo de fatiga FLM3 como el FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) en sus diferentes escenarios de intensidad y reparto de tráfico, se llegaría a categorías inferiores a 80 o a 71 e incluso a 50 (Tabla 53). Asimismo, también se aprecia una relación decreciente entre la luz del vano y la categoría necesaria.

Sin embargo, se deduce que, cuando gobierna la limitación de λ_{max}, el Método Simplificado conduce a unas categorías ligeramente inferiores a las requeridas por el Método del Daño Acumulado, tanto con un tráfico exclusivo de FLM3 como con el FLM4. En la Tabla 53 se destacan en rojo los casos en los cuales el MS se queda corto respecto al MDA. A la luz de este hecho, y como ya se expuso en los comentarios al Método Simplificado, cabe cuestionarse el sentido de λ_{max} y la calibración de sus valores. Dado que no parece que sea posible captar el daño causado por elevadas intensidades de tráfico o por mayores proporciones de vehículos pesados, sería posible solventar esta insuficiencia omitiendo esta limitación o bien corrigiendo λ_{max} mediante el factor $(N_{obs}/N_0)^{1/5}$. La segunda aproximación es mucho más afinada.

Al margen de lo anterior, en el rango de luces considerado, que es el habitual para cajones isostáticos, las categorías necesarias nunca superan 80 para un dimensionamiento con un canto estricto, por lo que una buena calidad de ejecución podría absorber esta divergencia entre métodos y hacer que la fatiga no sea condicionante.

5.3.2.4 Tableros cajón continuos de tres vanos

5.3.2.4.1 Características básicas

El análisis de tableros continuos puede abordarse según dos variables fundamentales: la relación entre el vano lateral frente al principal y la luz tipo del vano principal. Para ello se ha desarrollado el estudio de varios tableros cajón de canto estricto con 3 vanos, para los cuales se ha procedido al dimensionamiento y verificación conforme a UNE-EN 1991 y las exigencias de UNE-EN 1993 y UNE-EN 1994, sin tener en cuenta en primer término la fatiga. Dichos tableros presentan las siguientes características:

- Luces principales de 30, 45, 60 y 75 m y vanos laterales de longitud variable en proporciones de entre el 60% y el 100% del principal
- El canto de la sección se ha fijado en 1/24 de la luz máxima, con una losa de 12,35 m de ancho y 0,28 m de espesor y barreras de 0,65 m de anchura

En la Figura 147 se representa la sección transversal tipo empleada en el análisis para el caso de 45 m de luz y en centro de vano.

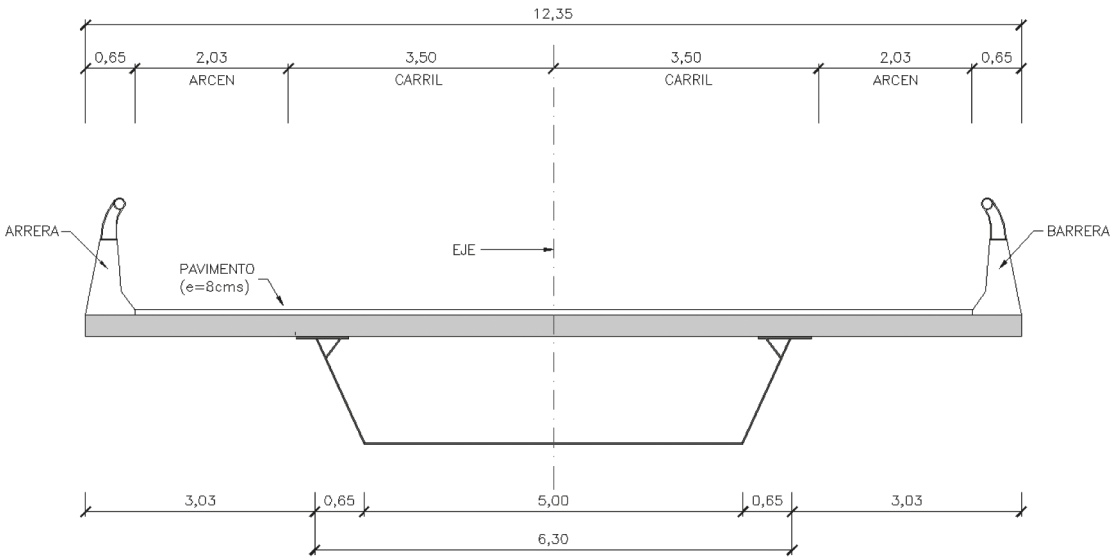


Figura 147 **Sección transversal tipo empleada en el análisis (caso del centro de vano de 45 m)**

A continuación se exponen los resultados obtenidos para el análisis de la chapa de fondo de las secciones de centros de vano (debido a la baja susceptibilidad de los apoyos intermedios como ya se mencionó en el apartado 5.2) para la consideración de luces del vano principal de 30, 45, 60 y 75 metros.

Con los valores correspondientes a los modelos de carga de fatiga FLM3 y FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) se analizan las secciones resultantes conforme al Método Simplificado, obteniendo la categoría que garantiza para la chapa de fondo una vida útil de 100 años para diferentes intensidades de tráfico pesado (ver apartado 5.3.1) y coeficiente parcial γ_{Mf} = 1,35.

Con los valores correspondientes a los modelos de carga de fatiga FLM3 y FLM4 se analizan las secciones resultantes conforme al Método del Daño Acumulado, obteniendo la categoría necesaria que garantiza para la chapa fondo una vida útil de 100 años (con daño igual a 1) para diferentes intensidades de tráfico pesado (ver apartado 5.3.1) y coeficiente parcial de resistencia a fatiga, γ_{Mf} = 1,35.

5.3.2.4.2 Vano principal de 30 m

La Tabla 55 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano de los vanos laterales y del vano principal en función de los diferentes valores de luz del lateral.

Tabla 55 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal de 30 m)**

Luz del vano principal de 30 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	18	20	22,5	30	18	20	22,5	30
M_d (ELU)	10582	13439	17278	30684	19726	19525	19065	16226
$M_{max,k}$ (LM1)	5931	6767	7821	11364	7615	7754	7917	8336
ΔM (FLM3)	1681	1846	2056	2680	1619	1696	1794	2095
ΔM (FLM4a)	983	1041	1115	1411	951	979	1014	1123
ΔM (FLM4b)	1371	1484	1618	2013	1316	1362	1420	1597
ΔM (FLM4c)	1729	1901	2117	2760	1654	1734	1836	2135
ΔM (FLM4d)	1261	1399	1571	2084	1283	1331	1391	1627
ΔM (FLM4e)	1359	1519	1718	2315	1391	1462	1550	1821

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 56 y la Figura 148 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 56, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 57).

Tabla 56 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	77			82			88			10		
FLM3*		74	77	77	81	82	82	88	88	88	110	110	110
FLM3	0,500	77			82			88			110		
FLM3*		56	72	77	61	79	82	68	87	88	86	110	110

Tabla 56 continúa >

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,125	65			71			78			98		
FLM3*		43	55	60	47	60	65	51	66	72	65	83	91
FLM3	0,050	54			59			65			82		
FLM3*		36	46	50	39	50	54	43	55	60	54	69	76

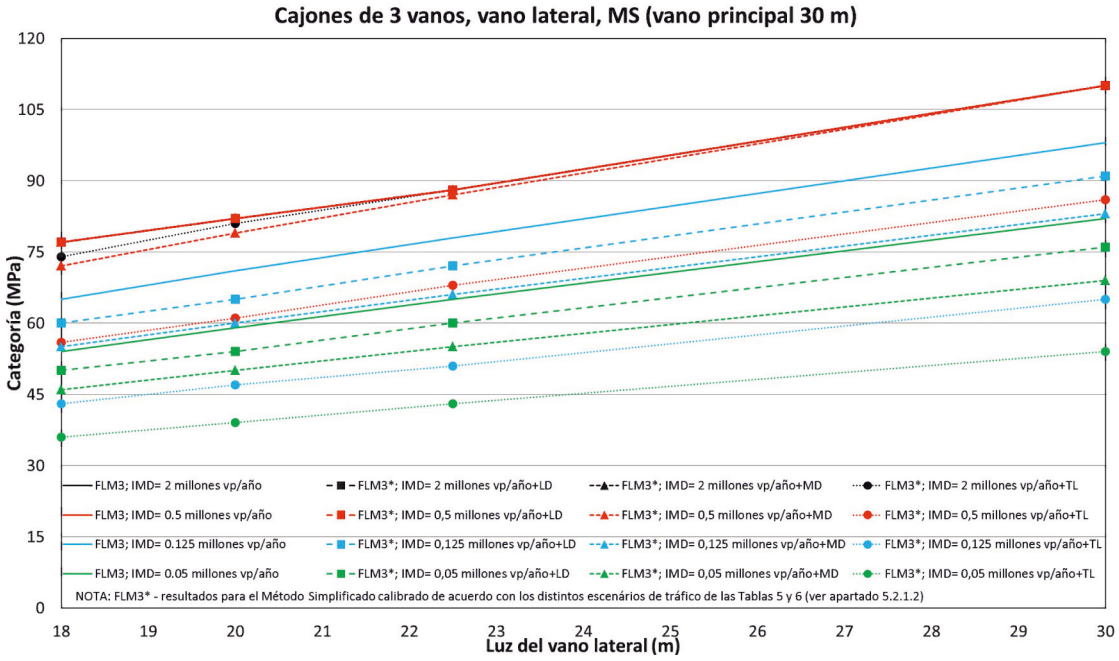


Figura 148 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 30 m)**

La Tabla 57 y la Figura 149 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 57, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 57 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	86			94			105			137		
FLM4		63	80	88	69	88	97	77	98	108	101	127	141
FLM3	0,500	75			82			91			119		
FLM4		50	63	68	54	70	75	58	78	83	76	101	109
FLM3	0,125	57			62			69			90		
FLM4		38	49	52	41	53	58	45	59	64	58	76	84
FLM3	0,050	47			52			58			75		
FLM4		31	38	42	33	41	46	36	46	51	46	50	67

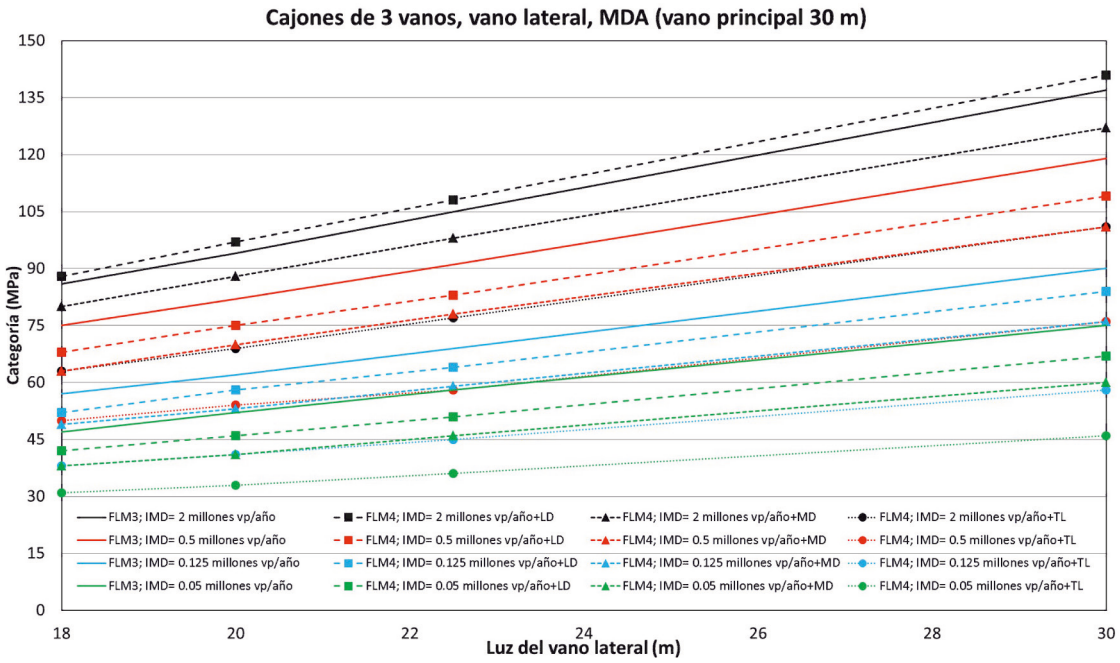


Figura 149 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 30 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 58 y la Figura 150 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 58, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 59).

Tabla 58 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	67			70			74			86		
FLM3*		67	67	67	70	70	70	74	74	74	86	86	86
FLM3	0,500	67			70			74			86		
FLM3*		52	66	67	54	70	70	57	74	74	67	86	86
FLM3	0,125	59			62			66			77		
FLM3*		39	50	55	41	53	58	43	56	61	51	65	71
FLM3	0,050	49			52			55			64		
FLM3*		33	42	46	34	44	48	36	46	51	42	54	59

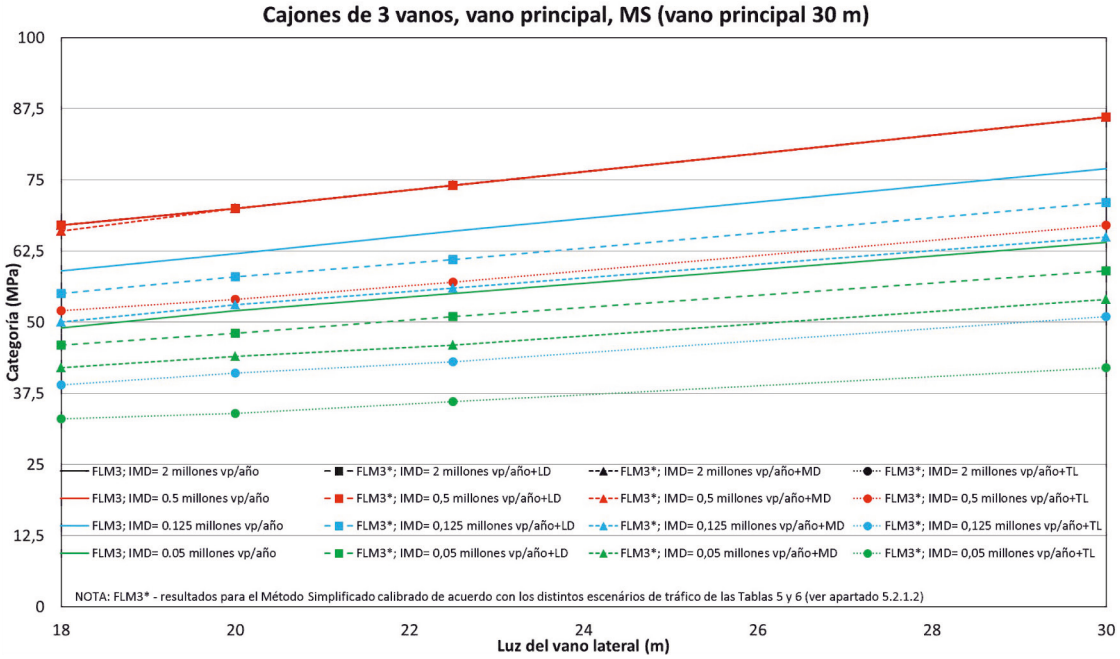


Figura 150 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 30 m)**

La Tabla 59 y Figura 151 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 59, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por el FLM4.

Tabla 59 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		83			87			92			107	
FLM4		62	76	85	64	80	89	68	85	94	79	99	109
FLM3	0,500		72			76			80			93	
FLM4		49	61	66	50	64	69	52	68	73	60	79	84
FLM3	0,125		55			57			61			71	
FLM4		37	47	51	39	49	53	41	52	56	46	59	65

Tabla 59 continúa >

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,050	46			48			51			59		
FLM4		30	37	41	31	38	42	32	40	45	36	47	52

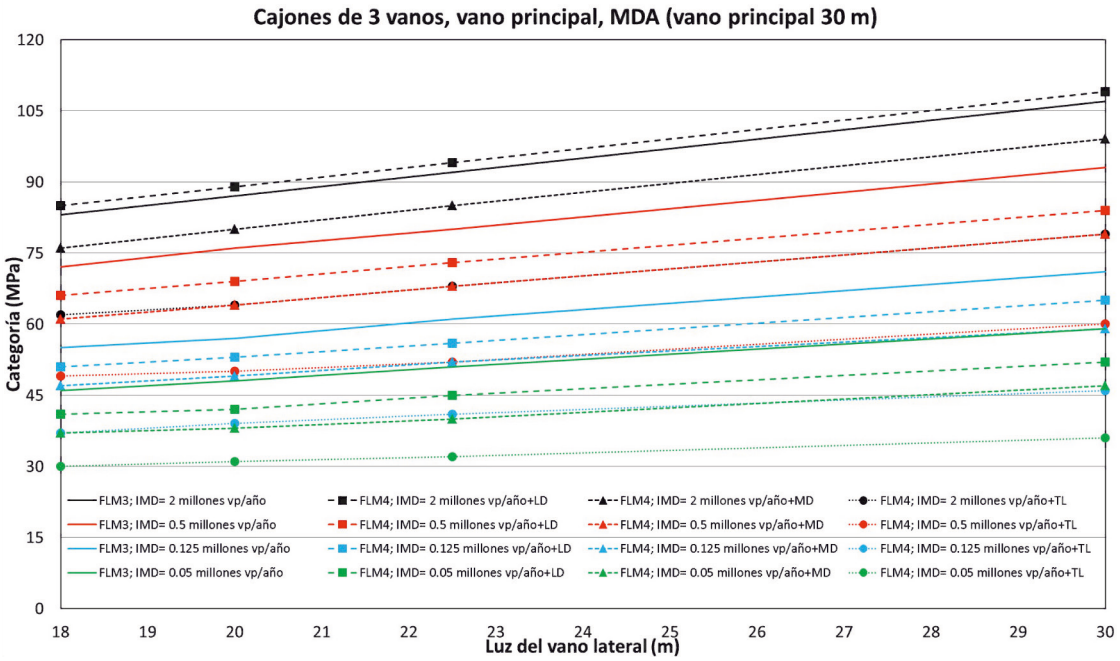


Figura 151 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 30 m)**

5.3.2.4.3 Vano principal de 45 m

La Tabla 60 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano de los vanos laterales y del vano principal en función de los diferentes valores de luz del lateral.

Tabla 60 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal 45 m)**

Luz del vano principal de 45 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	25	30	35	45	25	30	35	45
M_d (ELU)	15340	25361	36275	61604	38564	37901	36331	30288

Tabla 60 **continúa >**

Luz del vano principal de 45 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	25	30	35	45	25	30	35	45
$M_{max,k}$ (LM1)	9293	11818	14393	20265	13116	13561	13964	14661
ΔM (FLM3)	2756	3166	3575	4403	2716	2888	3082	3475
ΔM (FLM4a)	1382	1603	1749	2123	1390	1460	1531	1676
ΔM (FLM4b)	2057	2291	2573	3155	2021	2154	2287	2561
ΔM (FLM4c)	2786	3224	3661	4534	2781	2960	3143	3533
ΔM (FLM4d)	2130	2478	2821	3503	2151	2306	2464	2787
ΔM (FLM4e)	2338	2736	3142	3949	2423	2603	2785	3140

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 61 y la Figura 152 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 61, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 62).

Tabla 61 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	76			110			98			67		
FLM3*		76	76	76	110	110	110	98	98	98	65	67	67
FLM3	0,500	76			110			98			67		
FLM3*		60	76	76	86	110	110	75	96	98	49	63	67
FLM3	0,125	69			98			86			56		
FLM3*		45	58	64	65	83	92	56	73	80	37	48	52

Tabla 61 continúa >

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,050	57			82			72			47		
FLM3*		38	49	53	54	69	76	47	60	66	31	40	43

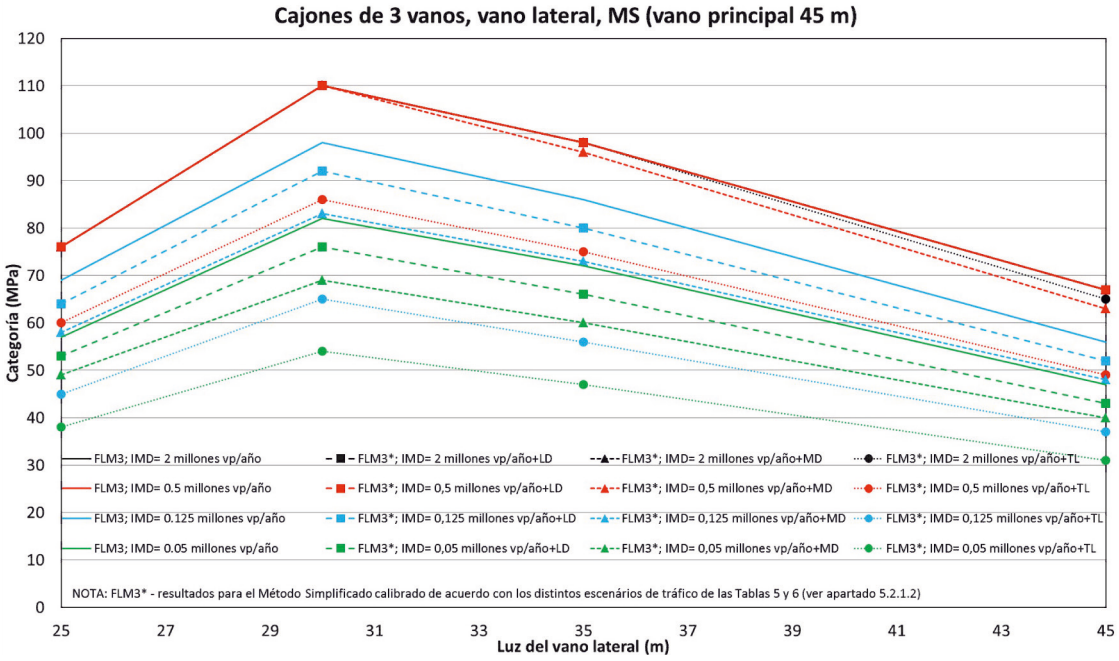


Figura 152 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 45 m)**

La Tabla 62 y la Figura 153 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 62, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 62 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	93			108			122			84		
FLM4		68	86	95	78	99	110	88	113	125	61	78	86
FLM3	0,500	82			94			106			73		
FLM4		52	68	73	60	78	85	68	89	96	47	62	67
FLM3	0,125	62			71			81			55		
FLM4		39	52	57	45	60	66	51	68	74	35	47	52
FLM3	0,050	52			60			67			46		
FLM4		31	40	45	35	47	52	39	53	59	27	36	41

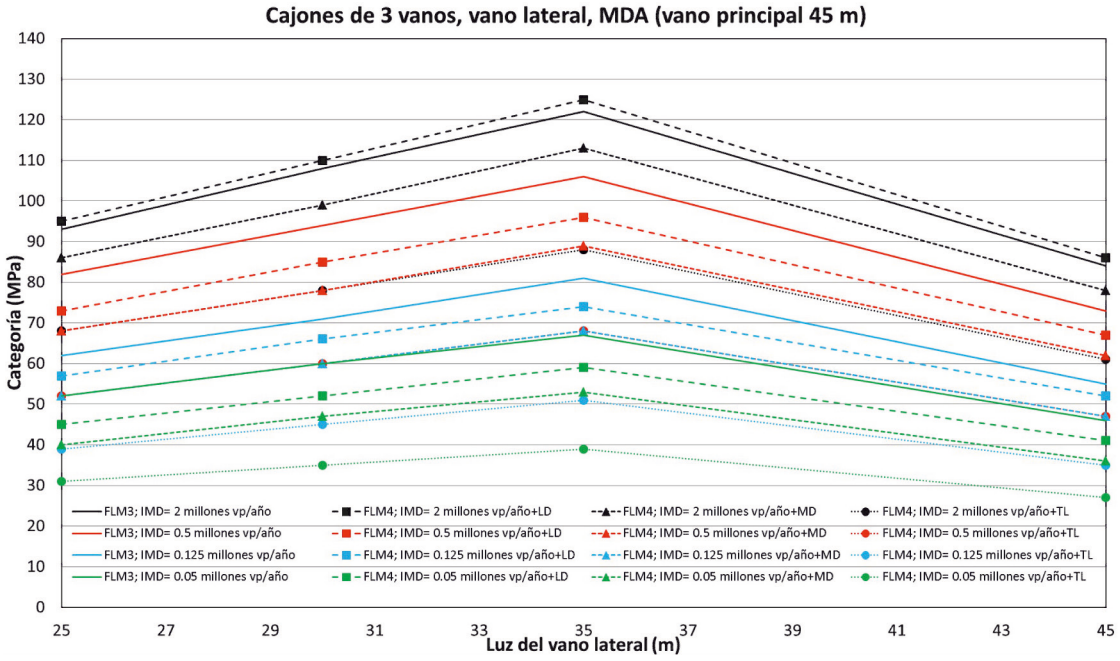


Figura 153 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 45 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 63 y la Figura 154 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado

5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 63, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 64).

Tabla 63 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	64			79			85			96		
FLM3*		62	64	64	76	79	79	81	85	85	92	96	96
FLM3	0,500	64			79			85			96		
FLM3*		47	60	64	58	74	79	62	79	85	69	89	96
FLM3	0,125	54			66			70			80		
FLM3*		35	46	50	44	56	61	47	60	66	53	68	74
FLM3	0,050	45			55			59			66		
FLM3*		29	38	41	36	47	51	39	50	55	44	56	62

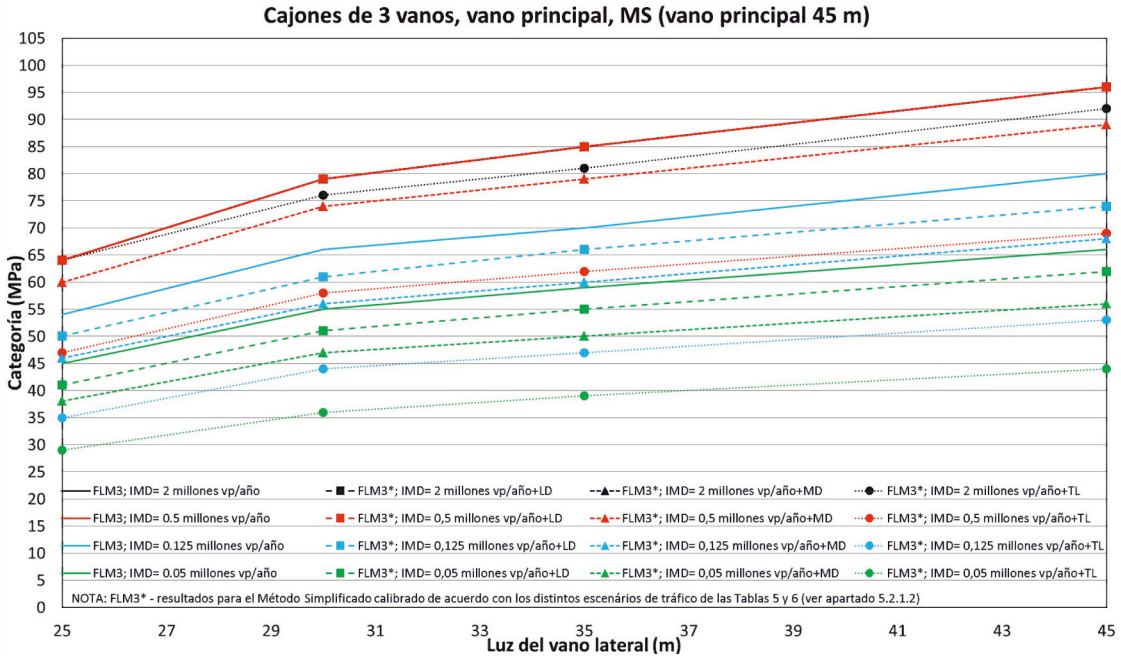


Figura 154 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 45 m)**

La Tabla 64 y la Figura 155 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1 de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente

a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 64, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por el FLM4.

Tabla 64 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		80			99			105			118	
FLM4		59	74	82	73	91	101	78	97	107	87	109	120
FLM3	0,500		70			86			92			103	
FLM4		45	59	64	56	73	79	58	78	84	67	87	95
FLM3	0,125		53			65			70			78	
FLM4		34	45	49	42	55	60	44	59	64	49	66	72
FLM3	0,050		44			54			58			65	
FLM4		27	35	39	33	43	48	34	46	51	38	51	57

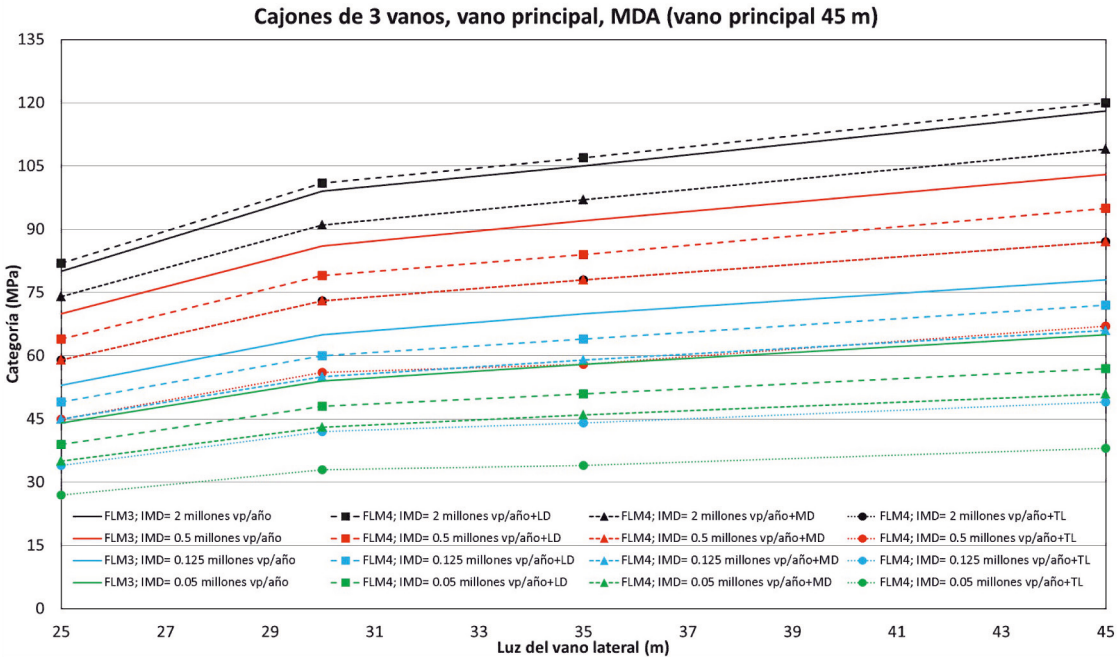


Figura 155 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 45 m)**

5.3.2.4.4 Vano principal de 60 m

La Tabla 65 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano de los vanos laterales y del vano principal en función de los diferentes valores de luz del lateral.

Tabla 65 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal 60 m)**

Luz del vano principal de 60 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	36	40	45	60	36	40	45	60
M_d (ELU)	29933	40655	54579	102870	63350	62402	60404	48653
$M_{max,k}$ (LM1)	15475	17866	20492	31256	20237	20657	21147	22425
ΔM (FLM3)	4107	4435	4880	6192	3967	4118	4313	4902
ΔM (FLM4a)	1956	2153	2310	2813	1885	1941	2012	2229
ΔM (FLM4b)	2952	3179	3463	4168	2877	2979	3100	3473
ΔM (FLM4c)	4225	4579	5016	6262	4034	4193	4393	5004
ΔM (FLM4d)	3264	3535	3873	4903	3183	3310	3469	3954
ΔM (FLM4e)	3660	3991	4406	5588	3602	3739	3913	4446

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 66 y la Figura 156 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 66, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 67).

Tabla 66 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	74			80			88			53		
FLM3*		74	74	74	78	80	80	84	88	88	47	53	53

Tabla 66 **continúa >**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,500		74			80			88			53	
FLM3*		56	72	74	59	76	80	64	82	88	36	46	50
FLM3	0,125		64			68			73			41	
FLM3*		42	54	59	45	58	63	48	62	68	27	35	38
FLM3	0,050		53			56			61			34	
FLM3*		35	45	50	37	48	53	40	52	57	23	29	32

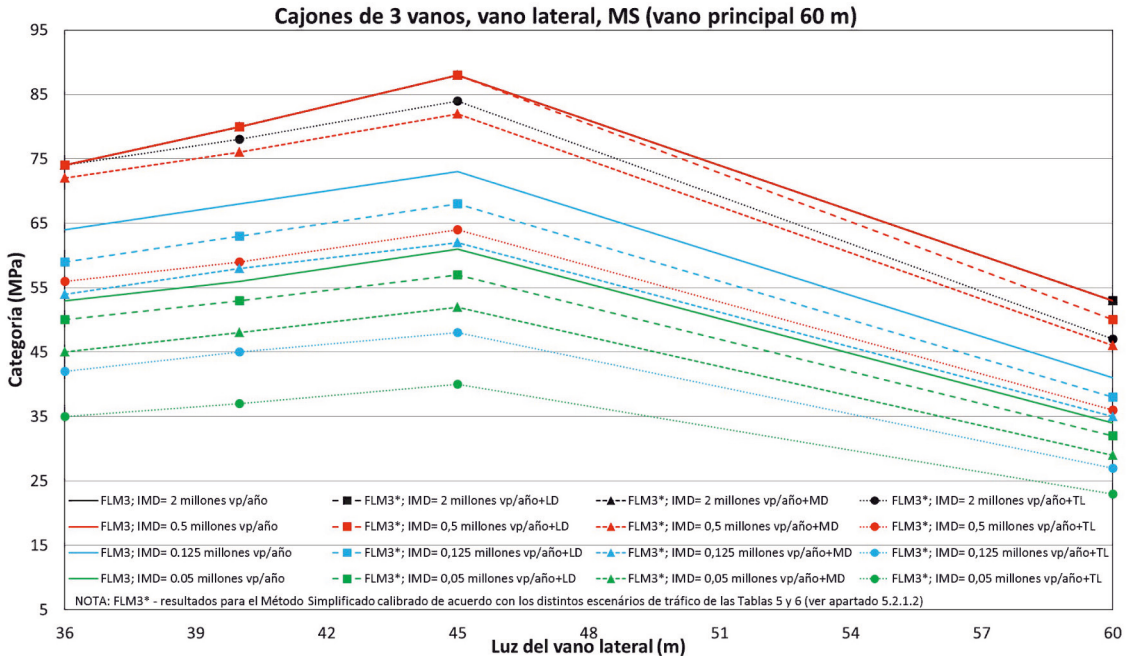


Figura 156 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 60 m)**

La Tabla 67 y la Figura 157 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 67, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 67 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		91			98			109			65	
FLM4	2,000	67	85	94	72	92	102	79	101	112	47	60	66
FLM3	0,500		80			86			95			57	
FLM4	0,500	51	67	73	56	73	79	61	80	86	36	47	52
FLM3	0,125		61			65			72			43	
FLM4	0,125	38	51	56	41	56	61	45	61	67	26	36	40
FLM3	0,050		50			54			60			36	
FLM4	0,050	29	40	45	32	43	48	35	47	53	21	28	32

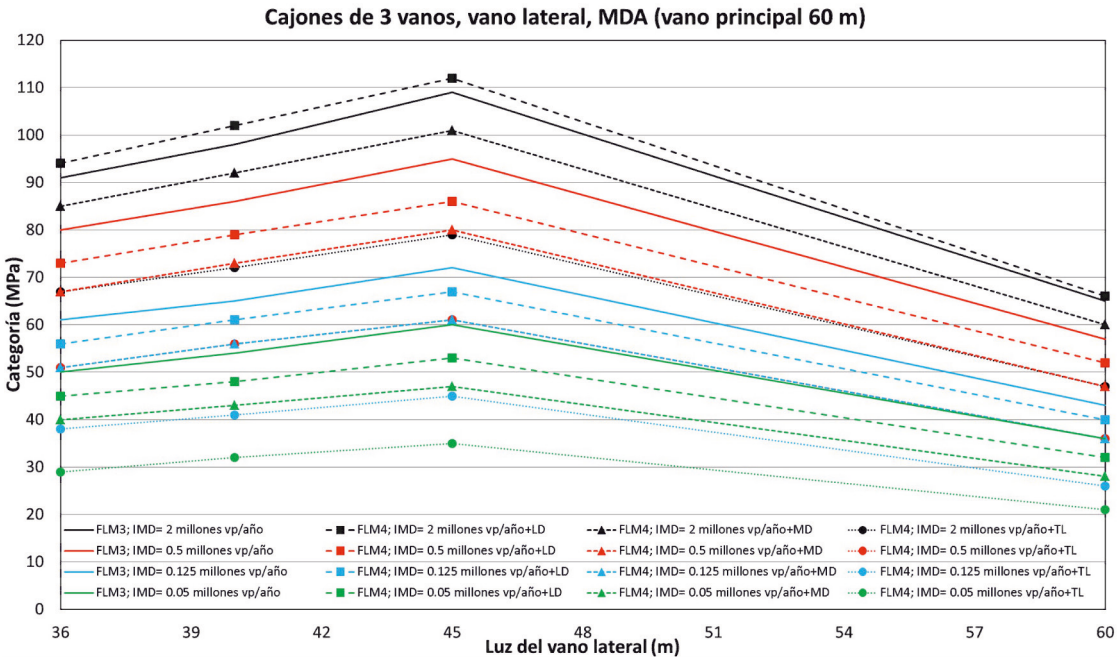


Figura 157 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 60 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 68 y la Figura 158 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado

5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 68, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 69).

Tabla 68 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	62			64			67			88		
FLM3*		55	62	62	57	64	64	60	67	67	78	88	88
FLM3	0,500	62			64			67			88		
FLM3*		42	54	59	44	56	62	46	59	64	59	76	84
FLM3	0,125	48			50			52			68		
FLM3*		32	41	45	33	43	46	35	44	49	45	58	64
FLM3	0,050	40			42			44			57		
FLM3*		26	34	37	27	35	39	29	37	41	38	48	53

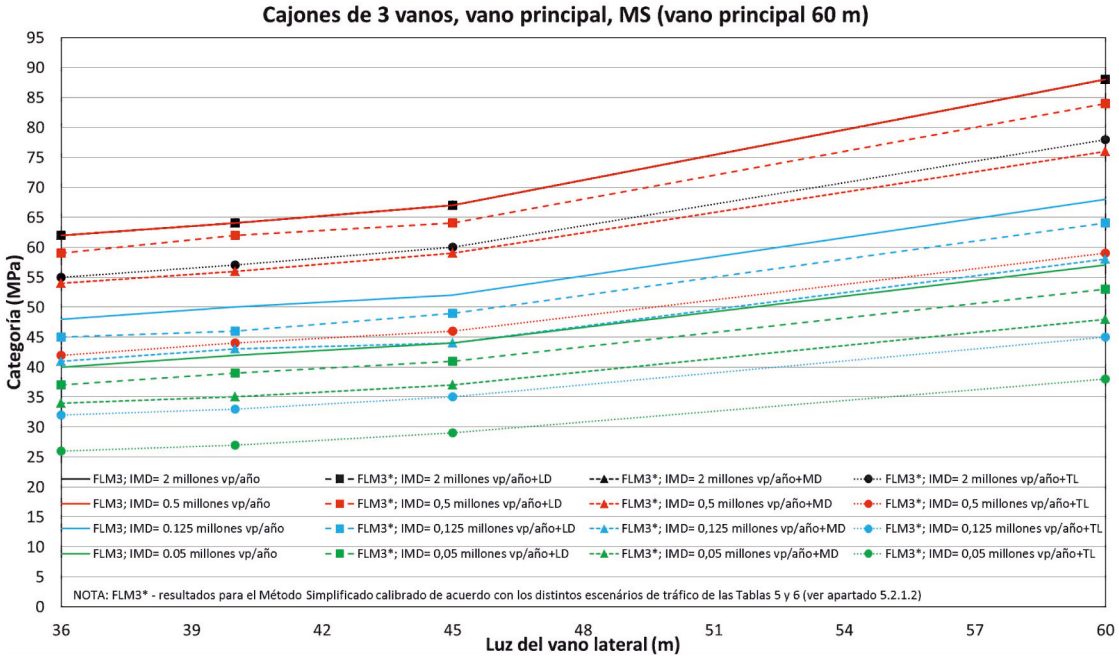


Figura 158 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 60 m)**

La Tabla 69 y la Figura 159 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente

a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 69, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por el FLM4.

Tabla 69 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		77			80			84			109	
FLM4		56	71	78	58	74	81	61	77	85	79	101	111
FLM3	0,500		67			70			73			95	
FLM4		43	56	62	45	58	64	47	61	67	62	80	88
FLM3	0,125		51			53			55			72	
FLM4		32	43	47	33	45	49	35	47	51	45	61	67
FLM3	0,050		43			44			46			60	
FLM4		25	33	37	26	35	39	27	36	41	34	47	53

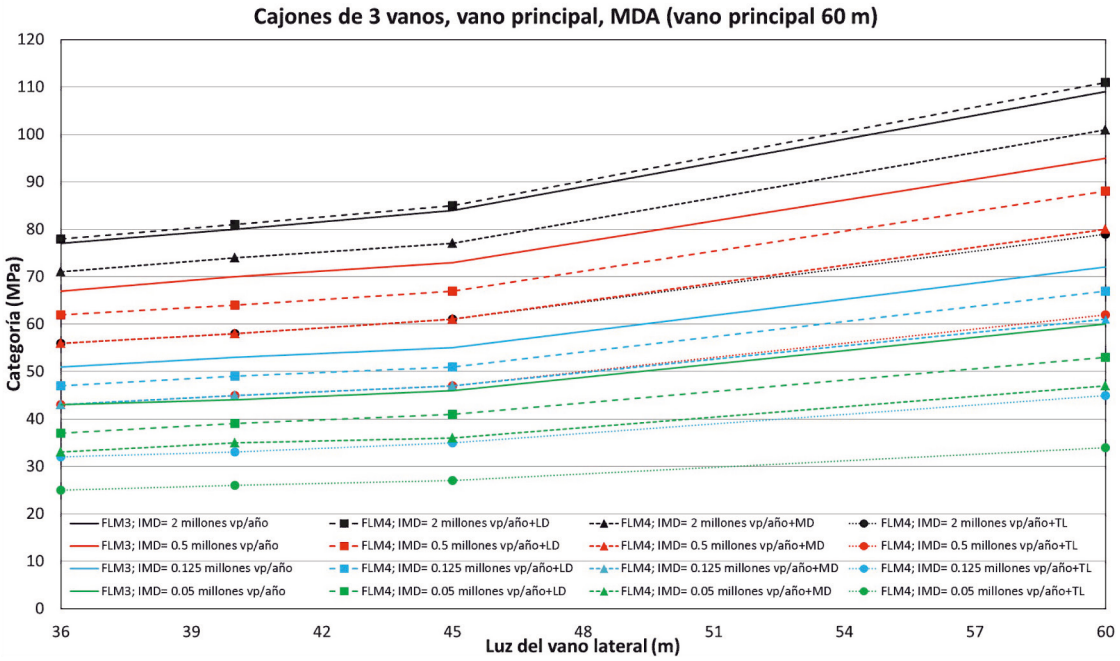


Figura 159 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 60 m)**

5.3.2.4.5 Vano principal de 75 m

La Tabla 70 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano de los vanos laterales y del vano principal en función de los diferentes valores de luz del lateral.

Tabla 70 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal 75 m)**

Luz del vano principal de 75 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	45	50	60	75	45	50	60	75
M_d (ELU)	43367	59382	94434	154750	94941	93394	87581	71644
$M_{max,k}$ (LM1)	21447	24911	32106	44226	28427	29040	30162	31628
ΔM (FLM3)	5380	5788	6605	7873	5163	5355	5746	6337
ΔM (FLM4a)	2284	2678	3018	3503	2351	2421	2564	2782
ΔM (FLM4b)	3632	3984	4585	5295	3646	3766	4010	4384
ΔM (FLM4c)	5418	5823	6767	8108	5264	5462	5864	6476
ΔM (FLM4d)	4235	4577	5285	6335	4159	4316	4637	5093
ΔM (FLM4e)	4804	5177	5998	7239	4696	4870	5221	5757

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 71 y la Figura 160 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 71, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 72).

Tabla 71 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	87			94			62			45		
FLM3*		84	87	87	88	94	94	55	62	62	37	45	45

Tabla 71 continúa >

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,500	87			94			62			43		
FLM3*		63	81	87	67	85	94	42	54	59	28	36	40
FLM3	0,125	73			76			48			33		
FLM3*		48	62	68	51	65	71	32	41	45	22	27	30
FLM3	0,050	61			64			40			27		
FLM3*		40	52	56	42	54	59	26	34	37	20	23	25

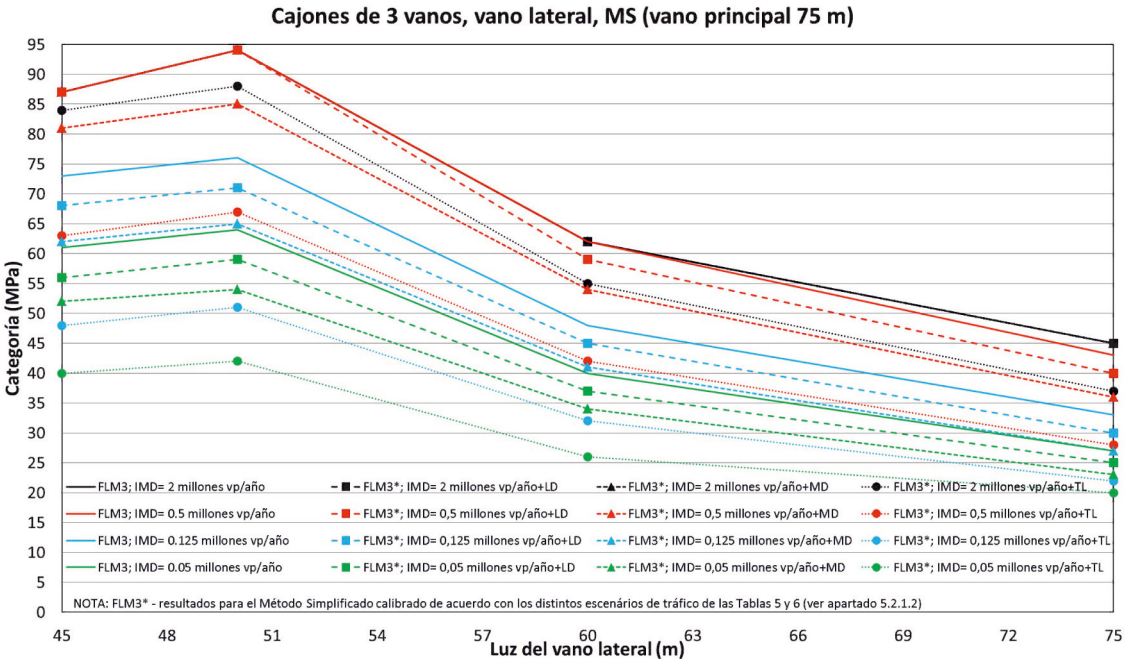


Figura 160 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 75 m)**

La Tabla 72 y la Figura 161 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 72, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 72 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 75 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	108			116			77			56		
FLM4		78	98	109	84	106	117	56	71	79	41	52	58
FLM3	0,500	94			101			67			49		
FLM4		60	78	85	65	84	92	43	56	62	32	41	45
FLM3	0,125	72			77			51			37		
FLM4		43	59	65	47	64	70	31	43	47	23	31	35
FLM3	0,050	60			64			42			31		
FLM4		33	46	52	36	49	56	24	33	38	18	24	27

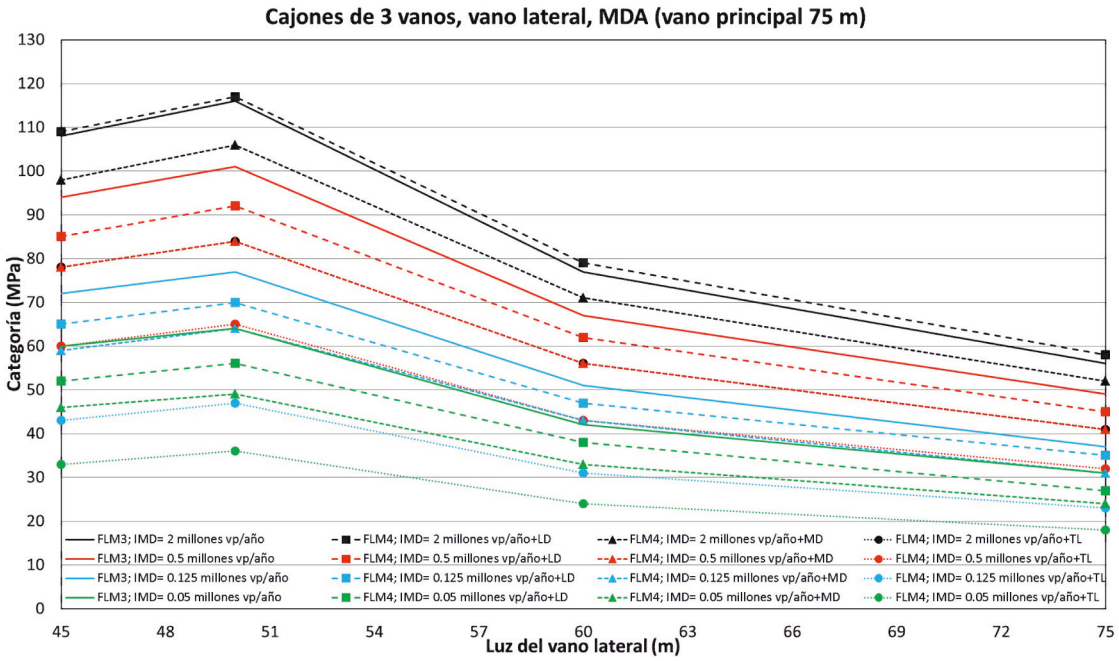


Figura 161 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 75 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 73 y la Figura 162 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado

5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 73, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 74).

Tabla 73 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 75 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	48			50			68			75		
FLM3*		40	48	48	42	50	50	56	68	68	62	75	75
FLM3	0,500	46			48			64			71		
FLM3*		30	39	43	32	41	45	42	54	59	47	61	66
FLM3	0,125	35			36			48			54		
FLM3*		23	30	33	24	31	34	32	41	45	36	46	51
FLM3	0,050	29			30			40			45		
FLM3*		20	25	27	20	26	28	27	34	37	30	38	42

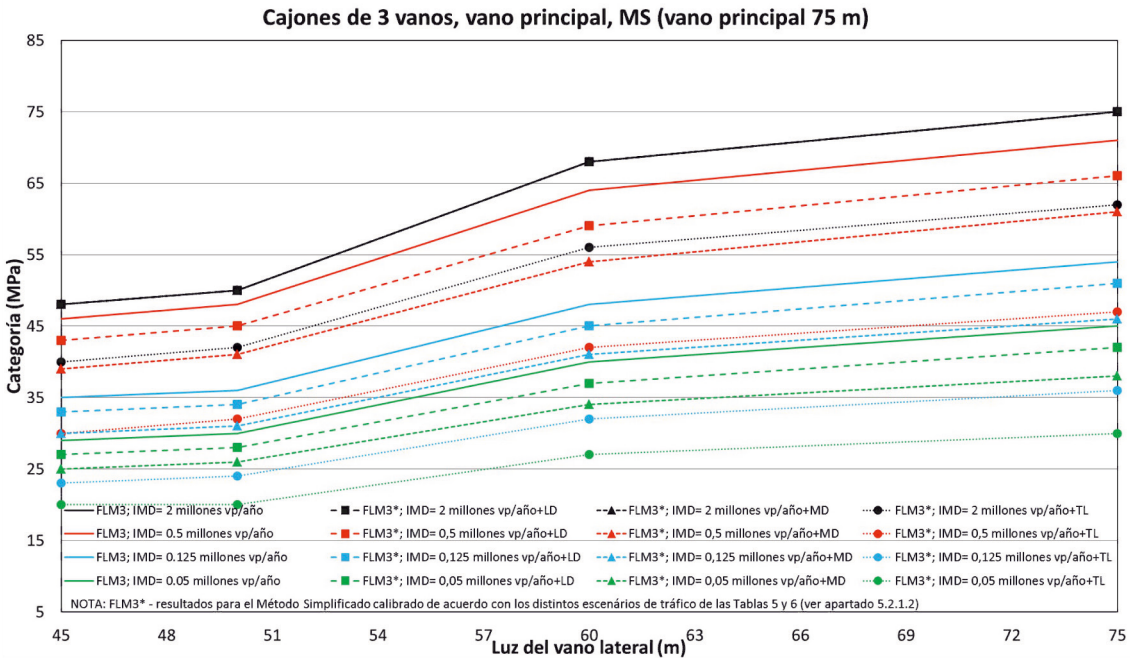


Figura 162 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 75 m)**

La Tabla 74 y la Figura 163 presentan la categoría necesaria para la chapa de fondo del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente

a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 74, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por el FLM4.

Tabla 74 **Categoría necesaria en chapa de fondo del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 75 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	60			62			83			93		
FLM4		44	55	61	46	58	64	61	77	85	68	86	95
FLM3	0,500	53			54			73			81		
FLM4		34	44	48	35	46	50	47	61	67	53	68	75
FLM3	0,125	40			41			55			62		
FLM4		25	34	37	26	35	38	34	47	51	38	52	57
FLM3	0,050	33			35			46			52		
FLM4		19	26	29	20	27	30	27	36	41	29	40	45

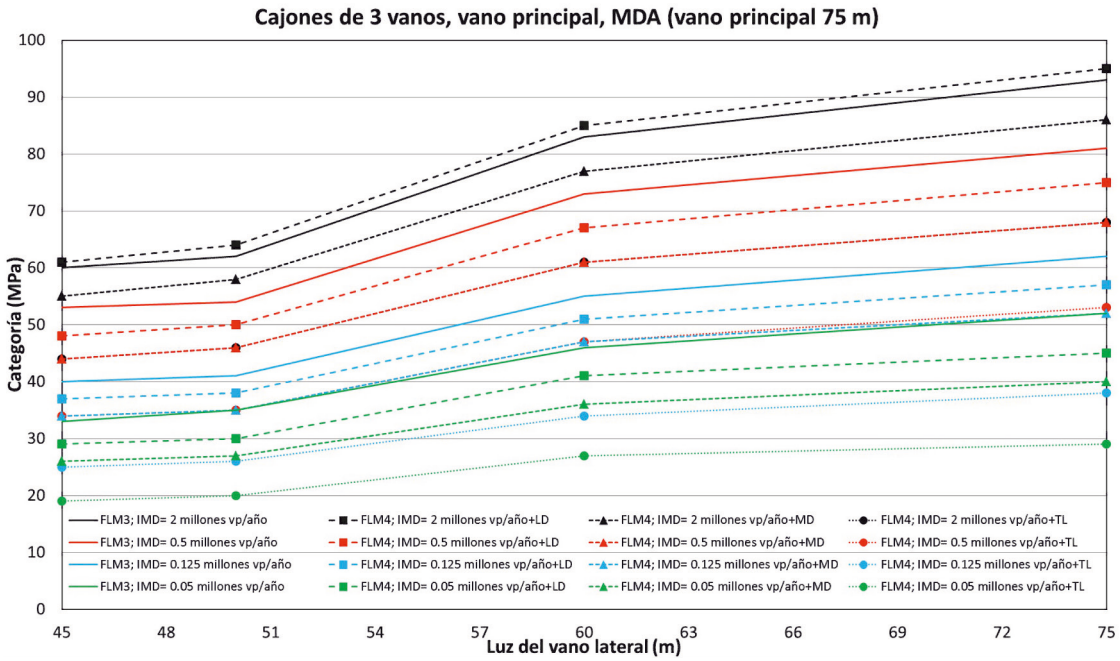


Figura 163 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 75 m)**

5.3.2.4.6 Análisis de la seguridad a fatiga

Las tablas anteriores (Tabla 55, Tabla 60, Tabla 65 y Tabla 70) resumen los principales momentos en centro de vano tanto de los vanos principales como de los laterales. Del análisis de dichas tablas se observa que:

- El cociente entre las oscilaciones de momentos flectores en centro de vano lateral y principal (debidas a los vehículos de fatiga) es superior a 1 y aumenta a medida que aumenta la relación de luces entre el vano lateral y el principal. Este aumento va desde un 103% para una relación de luces L_l / L_p (*luz del vano lateral/luz del vano principal*) de 0,60 hasta 125% para una relación de luces de 1
- Sin embargo, si observamos los resultados para el dimensionamiento de ELU sin considerar fatiga, hasta una relación L_l / L_p de 3/4, el cociente entre los respectivos momentos de dimensionamiento en centro de vano presenta una relación inversa a la anterior, es decir, el esfuerzo de cálculo del vano lateral es inferior al del vano principal (resultando en un cociente inferior a 1). Así, el vano lateral, en general más corto que el principal y con una sección generalmente menos robusta, puede llegar a ser más sensible a la fatiga que el principal

Se aprecia también, del análisis de las tablas donde se han reflejado las carreras de tensión equivalente según el MDA que:

- Para cualquier luz, la categoría necesaria para el FLM3 es la misma que para el FLM4 en el escenario de máxima intensidad de tráfico y mayor proporción de vehículos pesados (valores subrayados). A medida que se reduce la intensidad de vehículos pesados, la categoría que exige un tráfico exclusivo con el FLM3 es mayor que la del FLM4 con reparto de larga distancia. Es decir, la calibración del modelo de carga FLM3 parece reproducir las pésimas condiciones de tráfico registradas en las carreteras europeas, y es conservadora para las demás configuraciones
- También es destacable que, para un vano principal de luz dada, la categoría necesaria para el vano lateral es mayor que para el principal. Sin embargo, no puede inferirse una correlación clara entre la categoría y las luces de los vanos. Ello se debe a que, para luces centrales reducidas, es posible emplear la misma sección transversal para el vano lateral (independientemente de la variación de luces analizada en el vano lateral), mientras que para luces centrales mayores hay que ir aumentando el espesor de la chapa de fondo según aumenta la luz del vano lateral por las exigencias de ELS y ELU, y por tanto este hecho puede mitigar el efecto de la fatiga

Otro fenómeno reseñable es que las predicciones del MDA parecen ser más exigentes que los cálculos basados en el MS (se indican en rojo los valores que parecen quedar del lado de la inseguridad con este último). Al igual que en los tableros isostáticos, la limitación impuesta por el factor λ_{max} supone la imposibilidad de captar el efecto de altas intensidades y elevadas proporciones de tráfico pesado.

5.3.2.5 Tableros cajón continuos de múltiples vanos

5.3.2.5.1 Características básicas

En este apartado se ha desarrollado un estudio de varios tableros cajón de canto estricto con múltiples vanos tipo con luces iguales de 30, 45, 60 y 75 metros y vanos extremos de longitud variable en proporciones de entre el 60% y el 100% de los principales. Las características de las secciones transversales para cada tipo de vano corresponden a las obtenidas para las condiciones del apartado 5.3.2.4.

A continuación se exponen los resultados obtenidos para el análisis de las secciones de centro de vano (debido a la baja susceptibilidad de los apoyos intermedios como ya se mencionó en el apartado 5.2) para la consideración de luces principales de 30, 45, 60 y 75 metros.

5.3.2.5.2 Vano tipo de 30 m

La Tabla 75 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano en los vanos extremo, segundo (o penúltimo) y vano tipo intermedio en función de los diferentes valores de luz del primero, para una luz tipo de 30 metros.

Tabla 75 **Momentos flectores en centros de vano (luz tipo 30 m)**

Luz del vano principal de 30 m												
Momento [kNm]	Momento en centro del vano extremo				Momento en centro del vano segundo				Momento en centro del vano tipo			
	Luz del vano lateral [m]											
	18	20	22,5	30	18	20	22,5	30	18	20	22,5	30
M_d (ELU)	11367	14031	17676	30144	19403	19318	19109	17798	18885	18895	18914	19020
$M_{max,k}$ (LM1)	6262	7055	8047	11343	8341	8413	8524	8802	8942	8938	8934	8926
ΔM (FLM3)	1964	2056	2220	2759	2103	2101	2117	2191	2168	2169	2168	2168
ΔM (FLM4a)	1066	1105	1203	1436	1109	1121	1128	1157	1160	1162	1163	1176
ΔM (FLM4b)	1489	1558	1712	2053	1598	1599	1612	1671	1657	1656	1657	1655
ΔM (FLM4c)	1902	2019	2217	2783	2060	2059	2072	2221	2206	2204	2204	2200
ΔM (FLM4d)	1505	1616	1713	2188	1660	1657	1664	1690	1707	1709	1711	1715
ΔM (FLM4e)	1665	1719	1870	2417	1772	1778	1791	1877	1855	1853	1856	1857

5.3.2.5.3 Vano tipo de 45 m

La Tabla 76 resume los momentos flectores más significativos en los vanos extremo, segundo (o penúltimo) y vano tipo intermedio en función de los diferentes valores de luz del primero, para una luz tipo de 45 metros.

Tabla 76 **Momentos flectores en centros de vano (luz tipo 45 m)**

Luz del vano principal de 45 m												
Momento [kNm]	Momento en centro del vano extremo				Momento en centro del vano segundo				Momento en centro del vano tipo			
	Luz del vano lateral [m]											
	25	30	35	45	25	30	35	45	25	30	35	45
M_d (ELU)	17172	26665	36769	60603	37449	37483	36354	33895	36239	36281	36354	36599
$M_{max,k}$ (LM1)	10024	12450	14906	20391	14523	15016	15026	15728	15941	15935	15933	15936
ΔM (FLM3)	3108	3427	3770	4546	3417	3490	3521	3632	3574	3579	3581	3587
ΔM (FLM4a)	1541	1695	1867	2144	1673	1715	1692	1769	1730	1734	1737	1755
ΔM (FLM4b)	2246	2467	2698	3224	2477	2492	2499	2597	2605	2601	2609	2601
ΔM (FLM4c)	3086	3459	3812	4631	3441	3469	3509	3665	3670	3670	3670	3671
ΔM (FLM4d)	2464	2728	3027	3610	2742	2748	2807	2838	2857	2857	2856	2854
ΔM (FLM4e)	2776	3044	3360	4113	3046	3091	3105	3230	3228	3225	3224	3220

5.3.2.5.4 Vano tipo de 60 m

La Tabla 77 resume los momentos flectores más significativos en los vanos extremo, segundo (o penúltimo) y vano tipo intermedio en función de los diferentes valores de luz del primero, para una luz tipo de 60 metros.

Tabla 77 **Momentos flectores en centros de vano (luz tipo 60 m)**

Luz del vano principal de 60 m												
Momento [kNm]	Momento en centro del vano extremo				Momento en centro del vano segundo				Momento en centro del vano tipo			
	Luz del vano lateral [m]											
	36	40	45	60	36	40	45	60	36	40	45	60
M_d (ELU)	32732	43036	55227	$1x10^5$	61957	61504	60529	54953	59206	59263	59364	59863
$M_{max,k}$ (LM1)	16374	18977	21647	31423	22909	23116	23416	24222	24622	24622	24624	24649

Tabla 77 **continúa >**

Luz del vano principal de 60 m												
Momento [kNm]	Momento en centro del vano extremo				Momento en centro del vano segundo				Momento en centro del vano tipo			
	Luz del vano lateral [m]											
	36	40	45	60	36	40	45	60	36	40	45	60
ΔM (FLM3)	4612	4806	5196	6335	4885	4890	4928	5043	5040	5042	5042	5040
ΔM (FLM4a)	2152	2285	2440	2857	2284	2308	2320	2382	2302	2306	2310	2335
ΔM (FLM4b)	3188	3386	3635	4318	3414	3412	3444	3559	3563	3564	3563	3567
ΔM (FLM4c)	4584	4893	5255	6437	4893	4902	4937	5154	5125	5123	5119	5117
ΔM (FLM4d)	3612	3922	4132	5113	3858	3858	3885	4026	4049	4051	4051	4048
ΔM (FLM4e)	4126	4341	4674	5778	4373	4400	4431	4536	4583	4584	4582	4590

5.3.2.5.5 Vano tipo de 75 m

La Tabla 78 resume los momentos flectores más significativos en los vanos lateral, segundo (o penúltimo) y vano tipo intermedio en función de los diferentes valores de luz del primero, para una luz tipo de 75 metros.

Tabla 78 **Momentos flectores en centros de vano (luz tipo 75 m)**

Luz del vano principal de 75 m												
Momento [kNm]	Momento en centro del vano extremo				Momento en centro del vano segundo				Momento en centro del vano tipo			
	Luz del vano lateral [m]											
	45	50	60	75	45	50	60	75	45	50	60	75
M_d (ELU)	47583	63315	95293	$1{,}5{\cdot}10^5$	92454	91696	88025	81263	87997	88094	88383	89064
$M_{\max,k}$ (LM1)	22820	26635	33391	44505	32404	32707	32773	34283	34992	34996	35013	35063
ΔM (FLM3)	5936	6191	6962	8123	6287	6300	6323	6526	6509	6512	6509	6509
ΔM (FLM4a)	2670	2874	3198	3558	2872	2902	2819	2997	2874	2878	2887	2914
ΔM (FLM4b)	3984	4316	4804	5528	4294	4272	4328	4472	4498	4500	4498	4504
ΔM (FLM4c)	5948	6317	7065	8294	6307	6343	6463	6614	6634	6634	6625	6626
ΔM (FLM4d)	4727	5031	5598	6572	4974	4992	5113	5211	5246	5248	5246	5244
ΔM (FLM4e)	5360	5645	6360	7462	5687	5722	5789	5932	5931	5933	5932	5941

5.3.2.5.6 Análisis de la seguridad a fatiga

Si se analiza un tablero con varios vanos intermedios iguales, se aprecia que las oscilaciones de momentos flectores en vanos interiores (desde el segundo hasta el penúltimo) no son menores que en el vano central de un tablero de tres vanos de los estudiados anteriormente. En cuanto a los vanos laterales, la diferencia entre un tablero de tres y de múltiples vanos es escasa. Tales observaciones son independientes de la luz del vano lateral. Por tanto, en viaductos largos no será posible simplificar el estudio reduciendo el modelo a una estructura de tres vanos. Sin embargo, al mismo tiempo que se observan oscilaciones mayores en los vanos de los viaductos estudiados en este apartado (provocadas por los vehículos de fatiga) se observa que los momentos para dichos vanos para la sobrecarga LM1 y la envolvente de Estado Límite Último (ELU), es decir, los momentos de dimensionamiento, son también mayores. Así, aunque se hayan obtenido oscilaciones superiores en este análisis, esto no significa necesariamente que la fatiga sea más lesiva en los vanos (interiores) de viaductos largos debido a la existencia de mayores esfuerzos de dimensionamiento (lo que hace muy probable que la chapa de fondo tenga que ser mayor que en un tablero de tres vanos) y los correspondientes saltos en el espesor de las chapas pueden compensar las mayores oscilaciones y, por tanto, resultar en categorías similares a las de las tablas recogidas en 5.3.2.4.

5.3.3 Tableros bijácena mixtos

5.3.3.1 Discusión conceptual

Las secciones multijácena o multiviga mixtas son secciones abiertas constituidas por vigas doble T vinculadas transversalmente por la losa del tablero y celosías o diafragmas con travesaños transversales. Su funcionamiento conduce a un reparto desigual de esfuerzos en cada viga ante cargas excéntricas, de manera que las vigas más próximas a la zona de actuación de las cargas concentradas se ven más solicitadas que las más distantes.

Un tablero multiviga mixto suele modelizarse, en su aproximación más simple, como un emparrillado con vigas longitudinales que representan las vigas principales (que engloban el metal y su ancho tributario de losa), y vigas transversales que simulan el comportamiento a flexión transversal de la losa y los travesaños. Las cargas se aplican a partir de las reacciones de empotramiento perfecto obtenidas al impedir el desplazamiento vertical de las vigas. Estas reacciones, actuantes sobre las vigas principales, se reparten por la estructura en función de las rigideces relativas de las barras transversales del emparrillado. Así, las vigas principales trabajan fundamentalmente bajo momentos flectores y esfuerzos cortantes, siendo despreciables los momentos torsores. Debido al desigual reparto de esfuerzos entre almas de una misma sección transversal bajo acciones excéntricas, es habitual que, a igual distribución de vanos, los tableros multiviga se vean sometidos a mayores esfuerzos longitudinales que los cajones. Por el contrario, elementos como los rigidizadores de fondo desaparecen y otros como las celosías transversales suelen ser más livianos (suelen ser travesaños) al no tener que asegurar la indeformabilidad ante la distorsión.

El alcance de este estudio se limita a tableros bijácena continuos, ya que en general resulta bastante infrecuente encontrar vanos isostáticos con esta tipología.

5.3.3.2 Uso de la doble acción mixta

Un aspecto de especial importancia y frecuencia es el uso de doble acción mixta en tableros multiviga en la proximidad de los apoyos intermedios, de modo análogo al de las secciones cajón. Las secciones bijácena con hormigón de fondo pasan a funcionar como cajones, lo que permite reducir el desequilibrio de cargas en las vigas principales ante acciones excéntricas, reducir los giros de eje longitudinal y mejorar la compacidad y ductilidad de la sección en las zonas de negativos con doble acción mixta. Cuando se recurre a esta solución estructural, el modelo de cálculo combina el emparrillado en zonas de centros de vano, con el cajón cerrado en zonas de negativos con doble acción mixta. La unión de ambos se materializa mediante barras rígidas que simbolizan el diafragma de paso. Las cargas deberán aplicarse de la forma apropiada a cada situación.

Las observaciones acerca de la respuesta estructural de tableros bijácena de menos de 12 m de ancho con doble acción mixta son, en esencia, las mismas que para tableros cajón.

5.3.3.3 Tableros bijácena continuos de tres vanos

5.3.3.3.1 Características básicas

Al igual que con los cajones continuos, en este epígrafe se estudia la influencia de dos factores: la relación entre el vano lateral frente al principal y la luz del vano central. Para ello se ha desarrollado el estudio de varios tableros bijácena de canto estricto de tres vanos para los cuales se ha procedido al dimensionamiento y verificación conforme a UNE-EN 1991 y las exigencias de UNE-EN 1993 y UNE-EN 1994, sin considerar en un primer término la fatiga. Dichos tableros presentan las siguientes características (Figura 164):

- Luces principales de 30, 45, 60 y 75 m y vanos laterales de longitud variable en proporciones de entre el 60% y el 100% del principal (Tabla 79, Tabla 84, Tabla 89 y Tabla 94).
- El canto de la sección se ha fijado en 1/24 de la luz máxima, con una losa de 11,80 m de ancho y espesor variable entre 0,20 y 0,30 m y barreras laterales de 0,65 m de anchura

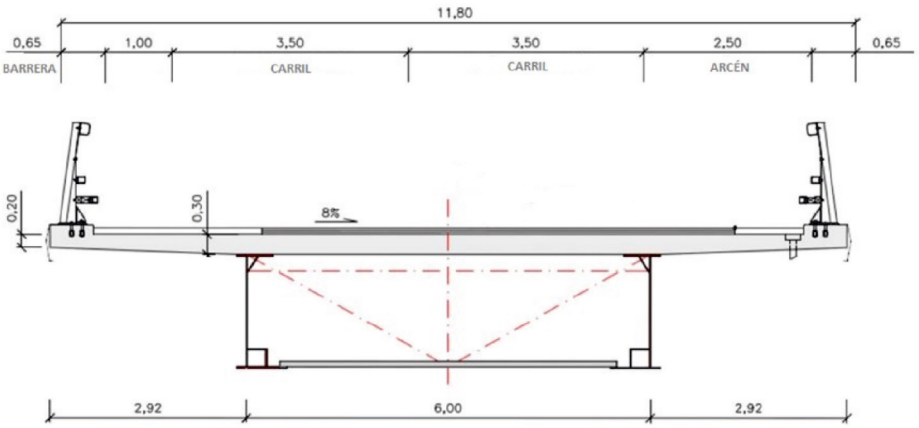


Figura 164 **Sección transversal de puente bijácena**

A continuación se exponen los resultados obtenidos para el análisis de la platabanda inferior de las secciones de centros de vano (debido a la baja susceptibilidad de los apoyos intermedios como ya se mencionó en el apartado 5.2) para la consideración de luces del vano principal de 30, 45, 60 y 75 metros.

Con los valores correspondientes a los modelos de carga de fatiga FLM3 y FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) se analizan las secciones resultantes conforme al Método Simplificado, obteniendo la categoría que garantiza para la platabanda inferior una vida útil de 100 años para diferentes intensidades de tráfico pesado (ver apartado 5.3.1) y coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35

Con los valores correspondientes a los modelos de carga de fatiga FLM3 y FLM4 se analizan las secciones resultantes conforme al Método del Daño Acumulado, obteniendo la categoría necesaria que garantiza para la platabanda inferior una vida útil de 100 años (con daño igual a 1) para diferentes intensidades de tráfico pesado (ver apartado 5.3.1) y coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35

5.3.3.3.2 Vano principal de 30 m

La Tabla 79 resume los momentos flectores más significativos en centro de l.

Tabla 79 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal 30 m)**

Luz del vano principal de 30 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	18	20	22,5	30	18	20	22,5	30
M_d (ELU)	6394	7885	9417	16645	11572	11392	11208	8952

Tabla 79 **continúa >**

Luz del vano principal de 30 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	18	20	22,5	30	18	20	22,5	30
$M_{max,k}$ (LM1)	3469	3923	4357	6407	4500	4574	4714	4944
ΔM (FLM3)	1132	1232	1322	1742	1138	1195	1276	1479
ΔM (FLM4a)	570	617	666	867	656	678	662	737
ΔM (FLM4b)	930	1007	1082	1381	1007	1038	1082	1185
ΔM (FLM4c)	1129	1235	1344	1745	1186	1236	1298	1508
ΔM (FLM4d)	833	916	984	1312	913	942	1005	1118
ΔM (FLM4e)	840	950	1162	1420	949	996	1057	1246

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 80 y la Figura 165 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 80, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 81).

Tabla 80 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	181			191			139			93		
FLM3*		174	181	181	188	191	191	139	139	139	93	93	93
FLM3	0,500	181			191			139			93		
FLM3*		132	170	181	142	183	191	106	137	139	72	92	93
FLM3	0,125	152			164			122			82		
FLM3*		100	129	141	108	139	152	81	104	113	55	70	77

Tabla 80 continúa >

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,050	126			136			102			69		
FLM3*		83	107	117	90	116	126	67	86	95	46	58	64

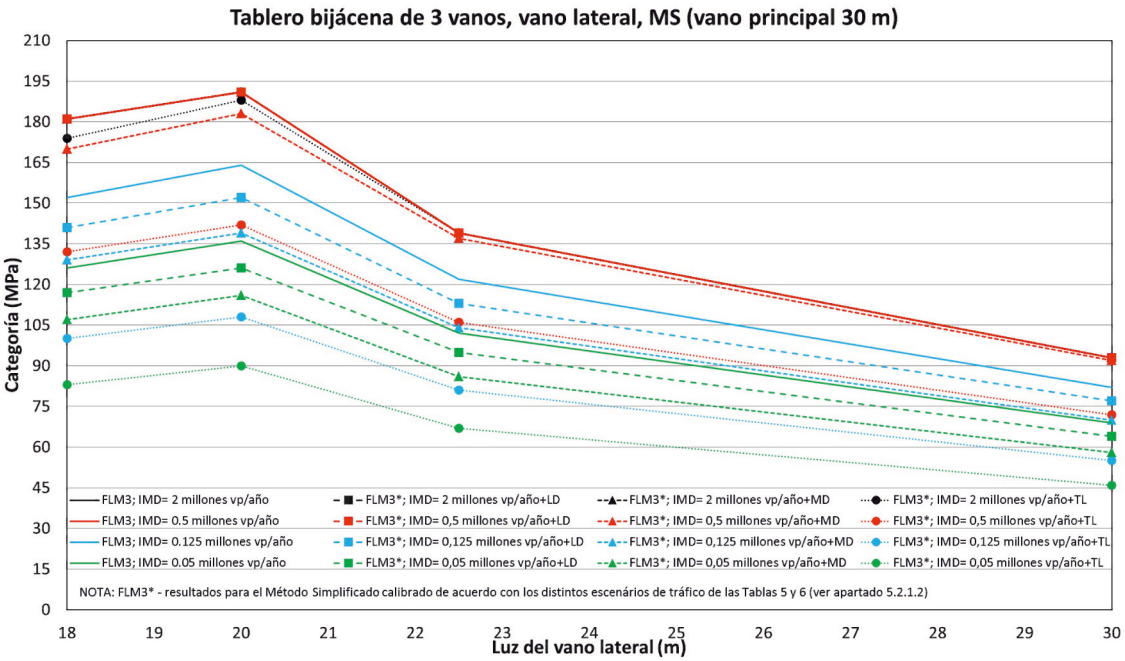


Figura 165 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 30 m)**

La Tabla 81 y la Figura 166 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 81, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 81 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	200			217			163			114		
FLM4		142	180	200	156	197	217	121	151	166	82	103	114
FLM3	0,500	174			189			143			100		
FLM4		107	143	152	118	157	168	92	120	130	62	82	89
FLM3	0,125	132			144			108			76		
FLM4		82	108	118	89	119	129	69	91	100	47	62	68
FLM3	0,050	110			120			90			63		
FLM4		64	84	93	70	92	102	54	71	79	37	49	54

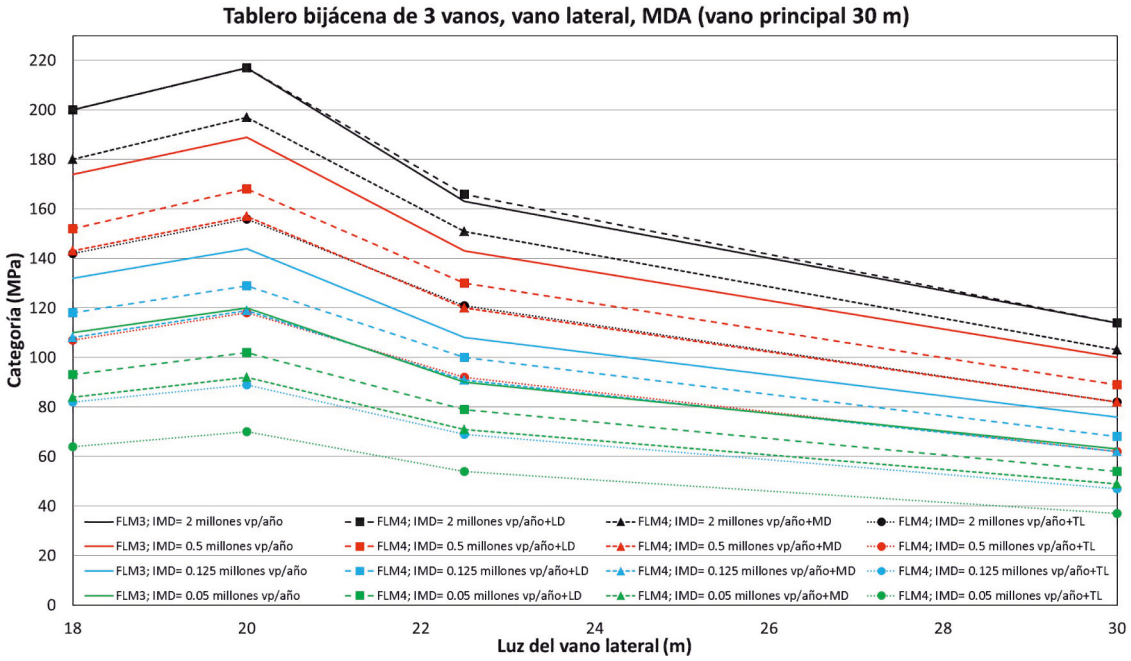


Figura 166 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 30 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 82 y la Figura 167 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el

apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 82, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 83).

Tabla 82 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		99			104			111			149	
FLM3*		99	99	99	104	104		111	111	111	149	149	149
FLM3	0,500		99			104			111			149	
FLM3*		77	99	99	81	104	104	86	110	111	115	148	149
FLM3	0,125		89			93			99			132	
FLM3*		59	75	82	62	79	86	66	84	92	87	111	123
FLM3	0,050		74			77			83			110	
FLM3*		49	63	69	51	66	72	55	70	77	73	94	102

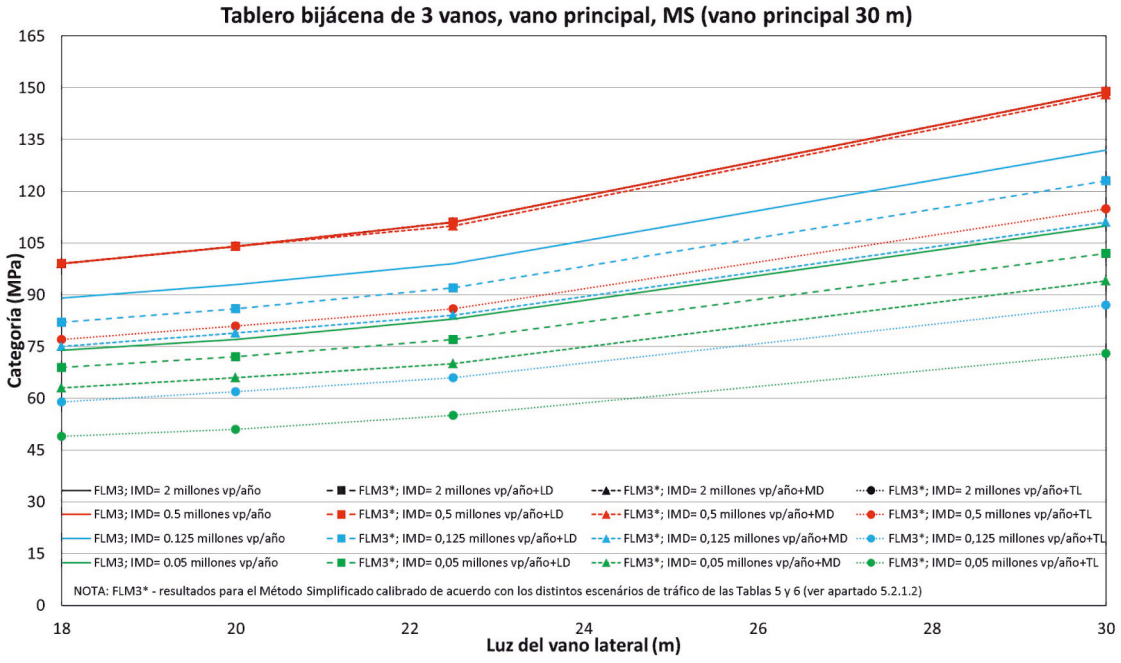


Figura 167 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 30 m)**

La Tabla 83 y la Figura 168 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el MDA. Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3,

se subrayan, en la Tabla 83, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 83 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 18 m			Lateral 20 m			Lateral 22,5 m			Lateral 30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	122			128			138			183		
FLM4	2,000	93	116	128	97	120	133	102	126	140	134	169	187
FLM3	0,500	107			112			120			160		
FLM4	0,500	71	93	99	74	97	103	77	102	109	102	135	145
FLM3	0,125	81			85			91			121		
FLM4	0,125	56	71	76	58	73	79	59	77	84	77	102	111
FLM3	0,050	68			71			76			101		
FLM4	0,050	44	56	61	45	58	63	46	60	67	59	79	88

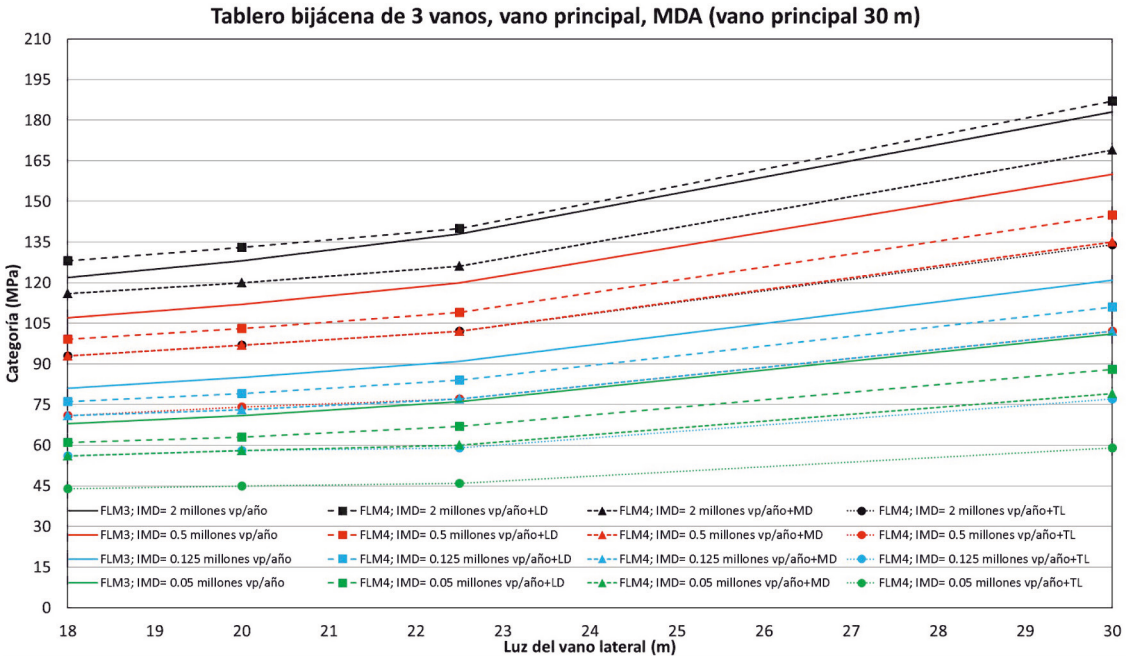


Figura 168 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 30 m)**

5.3.3.3.3 Vano principal de 45 m

La Tabla 84 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano de los vanos laterales y del vano principal en función de los diferentes valores de luz del lateral.

Tabla 84 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal 45 m)**

Luz del vano principal de 45 m								
Momento [kNm]	Momento en centro del vano lateral				Momento en centro del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	25	30	35	45	25	30	35	45
M_d (ELU)	9136	14106	19383	32277	21044	20404	19154	14765
$M_{max,k}$ (LM1)	5325	6644	7868	11116	7580	7821	8037	8595
ΔM (FLM3)	1634	1929	2223	2795	1990	2088	2206	2476
ΔM (FLM4a)	806	954	1100	1341	973	1030	1087	1206
ΔM (FLM4b)	1297	1503	1704	2089	1553	1644	1738	1929
ΔM (FLM4c)	1635	1927	2237	2831	2037	2153	2277	2514
ΔM (FLM4d)	1224	1442	1674	2144	1547	1654	1762	1986
ΔM (FLM4e)	1328	1594	1881	2428	1730	1853	1977	2217

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 85 y la Tabla 85 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 85, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 86).

Tabla 85 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	143			141			109			83		
FLM3*		143	143	143	141	141	141	109	109	109	80	83	83

Tabla 85 continúa >

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,500	143			141			109			83		
FLM3*		113	143	143	109	140	141	82	106	109	60	78	83
FLM3	0,125	130			125			95			69		
FLM3*		86	110	121	83	106	116	63	80	88	46	59	64
FLM3	0,050	108			105			79			58		
FLM3*		72	92	101	69	89	97	52	67	73	38	49	54

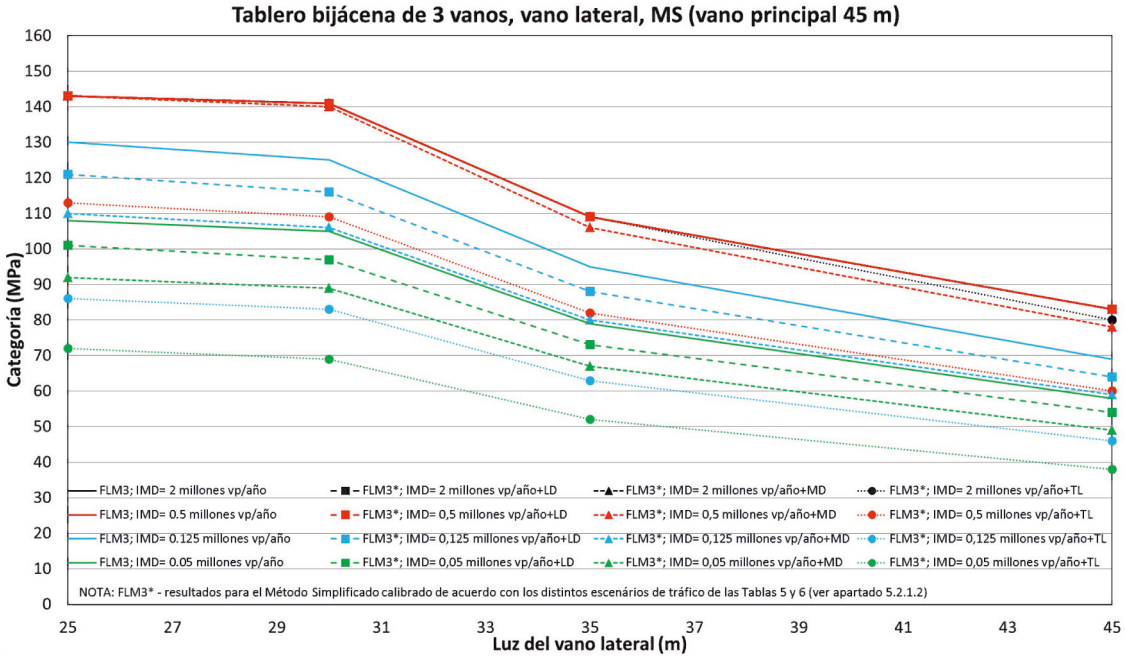


Figura 169 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 45 m)**

La Tabla 86 y la Figura 170 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 86, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 86 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 40 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		176			173			133			102	
FLM4		127	160	177	125	157	173	97	122	134	75	94	103
FLM3	0,500		154			152			117			89	
FLM4		96	127	137	95	125	135	73	97	104	57	75	80
FLM3	0,125		117			115			89			68	
FLM4		73	96	105	71	95	103	55	73	80	42	56	62
FLM3	0,050		97			96			74			57	
FLM4		56	75	83	56	74	82	43	57	64	33	44	49

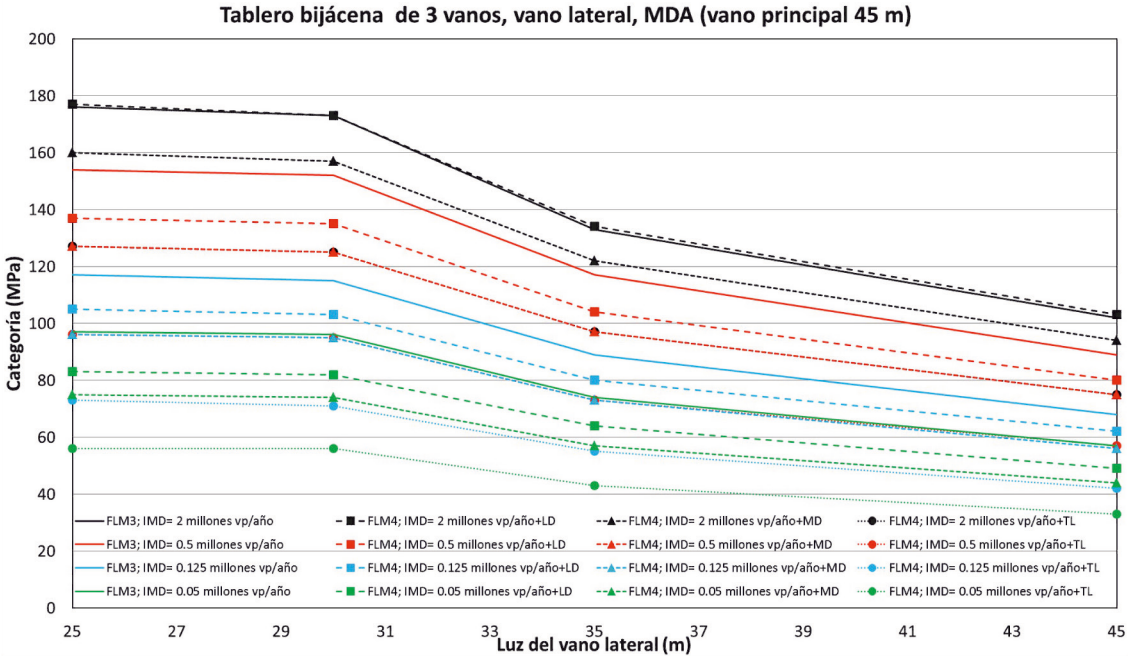


Figura 170 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 45 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 87 y la Figura 171 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado

5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 87, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 88).

Tabla 87 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		87			102			108			173	
FLM3*		84	87	87	98	102	102	103	108	108	166	173	173
FLM3	0,500		87			102			108			173	
FLM3*		64	82	87	74	95	102	78	100	108	126	161	173
FLM3	0,125		73			85			90			144	
FLM3*		48	62	68	56	72	79	59	76	83	95	122	134
FLM3	0,050		61			71			75			120	
FLM3*		40	52	57	47	60	66	50	64	70	79	102	112

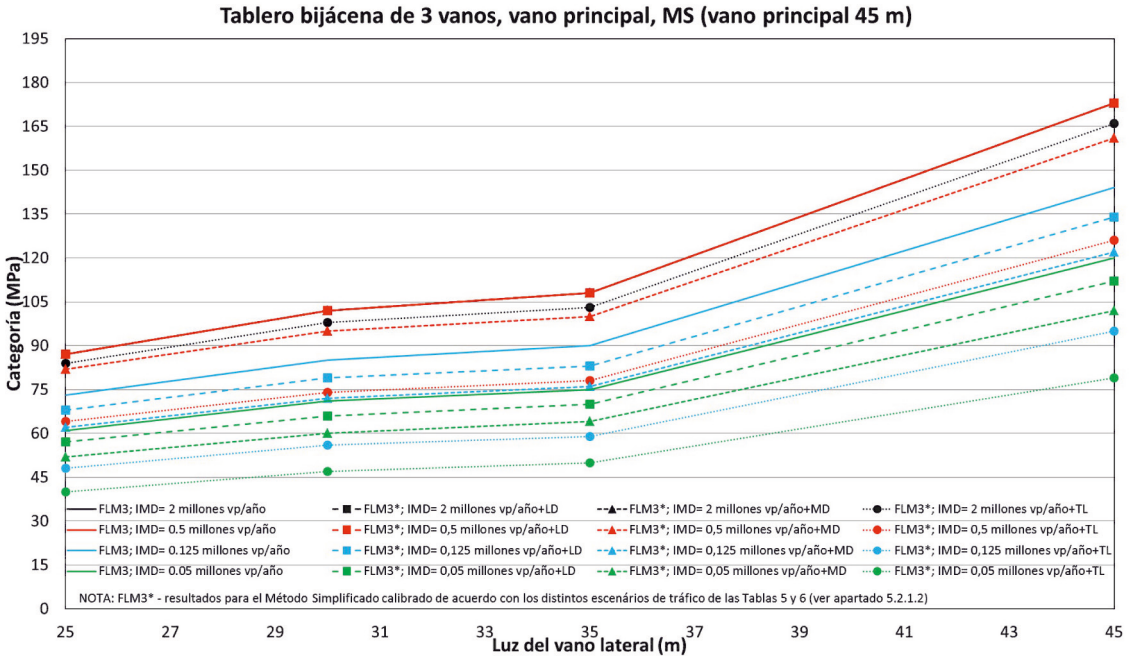


Figura 171 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 45 m)**

La Tabla 88 y la Figura 172 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el MDA. Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 88, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente

al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 88 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 30 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	107			125			132			213		
FLM4		79	100	108	94	117	129	100	124	136	159	196	217
FLM3	0,500	94			110			116			186		
FLM4		60	80	85	71	94	100	76	99	106	121	157	170
FLM3	0,125	71			83			88			141		
FLM4		45	60	66	63	71	77	56	75	82	89	119	130
FLM3	0,050	59			69			75			118		
FLM4		34	46	52	41	55	62	44	59	65	69	93	104

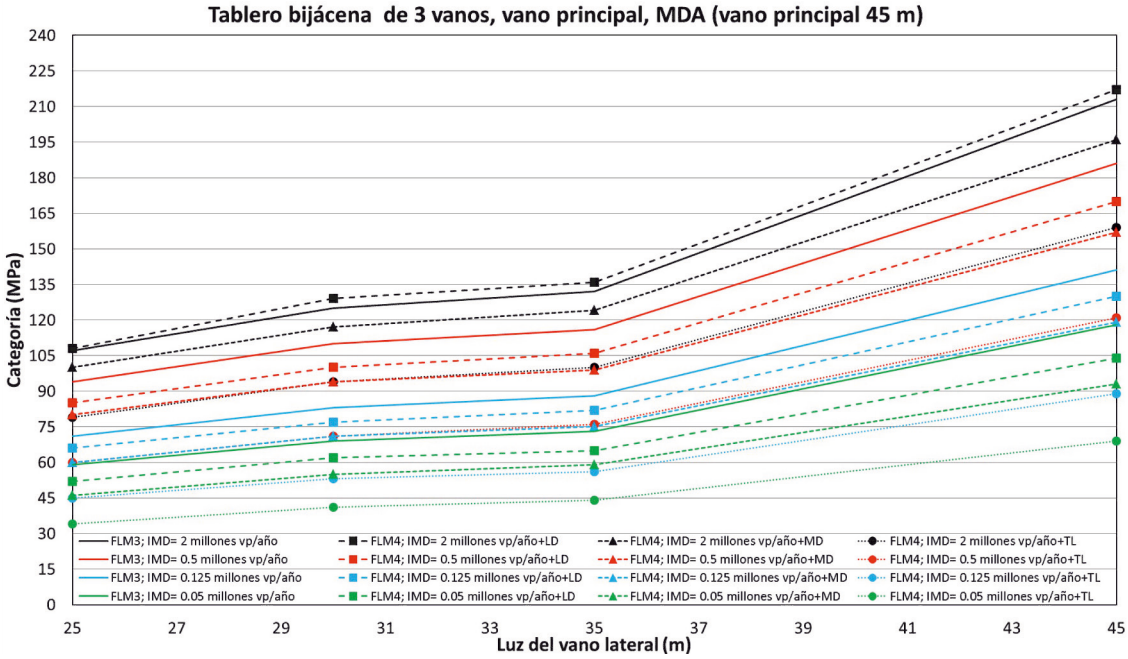


Figura 172 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 45 m)**

5.3.3.3.4 Vano principal de 60 m

La Tabla 89 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano de los vanos laterales y del vano principal en función de los diferentes valores de luz del lateral.

Tabla 89 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal 60 m)**

Luz del vano principal de 60 m								
Momento [kNm]	Momento en centro de vano del vano lateral				Momento en centro de vano del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	36	40	45	60	36	40	45	60
M_d (ELU)	16759	21752	28693	53505	33027	32973	30333	21144
$M_{max,k}$ (LM1)	8585	9675	11130	1671	11438	11952	11932	12615
ΔM (FLM3)	2479	2835	2975	3735	2885	3083	3120	3522
ΔM (FLM4a)	1168	1314	1351	1677	1380	1665	1483	1662
ΔM (FLM4b)	1812	2074	2104	2703	2198	2324	2348	2596
ΔM (FLM4c)	2479	2895	2997	3792	2931	3127	3174	3594
ΔM (FLM4d)	1885	2262	2299	2936	2312	2469	2507	2841
ΔM (FLM4e)	2073	2495	2552	3293	2595	2765	2800	3155

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 90 y la Figura 173 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 90, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 91).

Tabla 90 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	158			121			105			67		
FLM3*		157	158	158	119	121	121	100	105	105	60	67	67

Tabla 90 **continúa >**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,500	158			121			105			67		
FLM3*		119	153	158	90	116	121	76	98	105	55	58	64
FLM3	0,125	137			104			87			52		
FLM3*		90	116	127	68	88	96	58	74	81	34	44	48
FLM3	0,050	114			86			73			44		
FLM3*		75	97	106	57	73	80	48	62	68	29	37	40

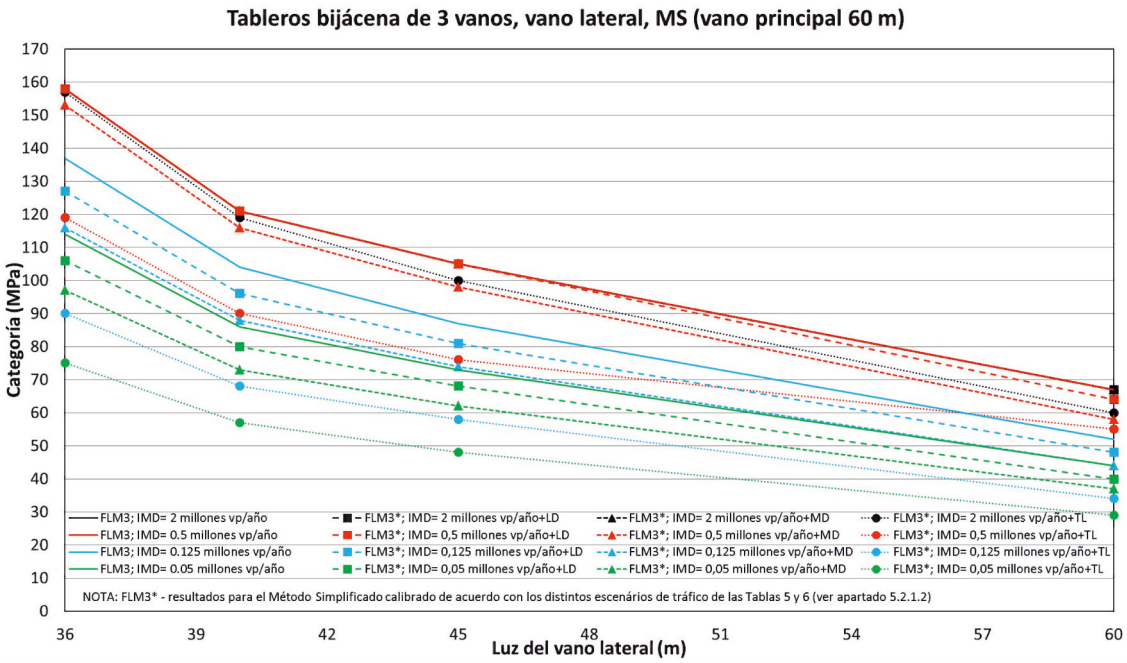


Figura 173 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 60 m)**

La Tabla 91 y la Figura 174 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 91, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 91 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	193			150			128			83		
FLM4		139	176	192	110	138	152	92	118	130	60	76	85
FLM3	0,500	170			131			113			73		
FLM4		105	140	150	84	110	120	71	93	101	46	60	66
FLM3	0,125	129			99			86			55		
FLM4		78	106	116	61	84	92	52	71	78	34	46	51
FLM3	0,050	107			83			71			46		
FLM4		61	82	92	47	65	73	40	55	62	26	36	40

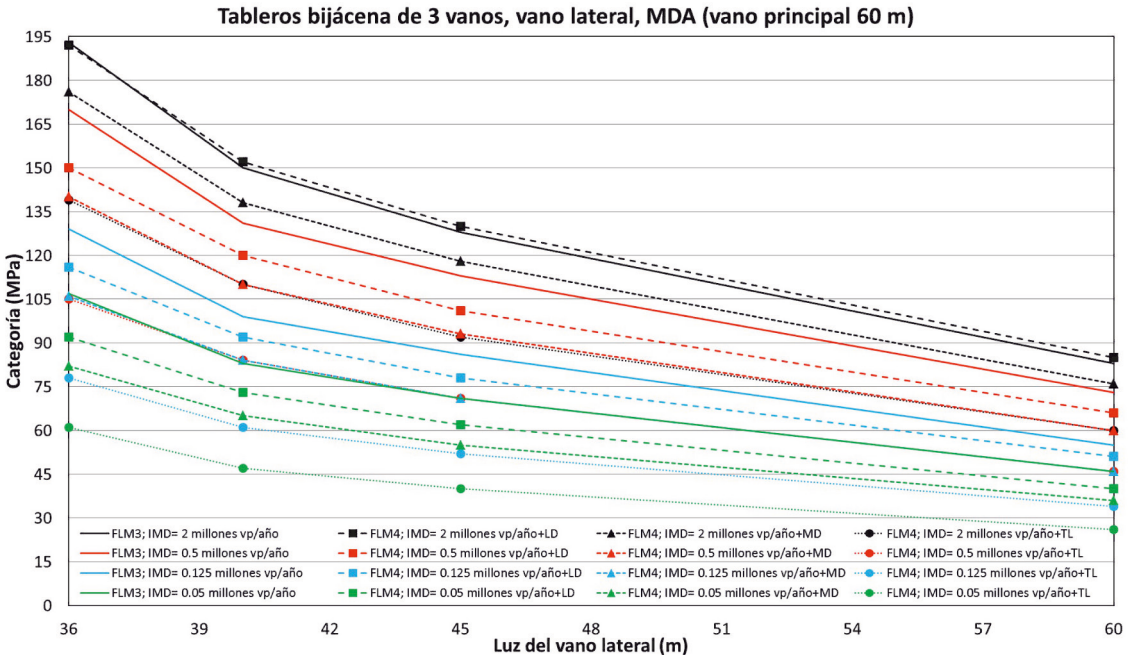


Figura 174 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 60 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 92 y la Figura 175 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el

apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 92, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 93).

Tabla 92 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	86			92			101			165		
FLM3*		77	86	86	82	92	92	90	101	01	147	165	165
FLM3	0,500	86			92			101			165		
FLM3*		58	75	82	63	80	88	68	88	96	111	143	157
FLM3	0,125	67			71			78			128		
FLM3*		44	57	62	47	61	67	52	67	73	85	09	19
FLM3	0,050	56			60			65			07		
FLM3*		37	48	52	40	50	55	43	55	61	70	90	99

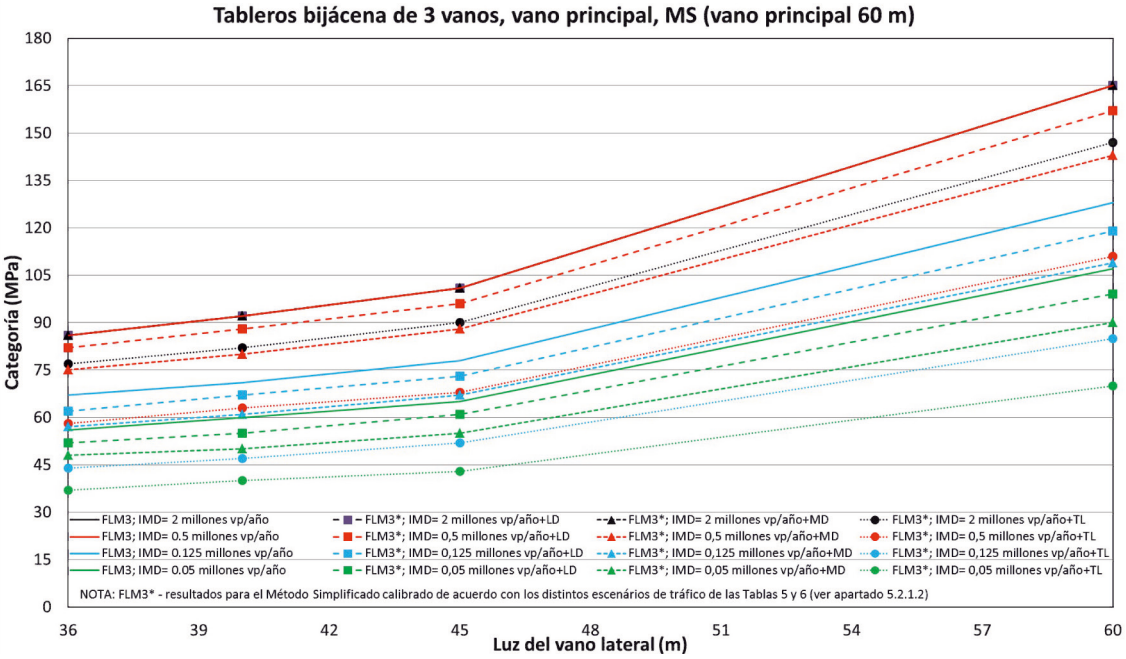


Figura 175 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 60 m)**

La Tabla 93 y la Tabla 93 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el MDA. Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se

subrayan, en la Tabla 93, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 93 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	Vano principal 60 m											
		Lateral 36 m			Lateral 40 m			Lateral 45 m			Lateral 60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	107			114			124			204		
FLM4		79	98	108	84	104	115	93	115	126	151	188	208
FLM3	0,500	93			99			109			178		
FLM4		60	78	85	64	84	91	70	92	99	115	151	164
FLM3	0,125	70			75			82			135		
FLM4		44	60	65	49	63	69	52	70	76	84	114	125
FLM3	0,050	59			63			69			112		
FLM4		34	46	52	39	50	55	40	54	60	65	88	99

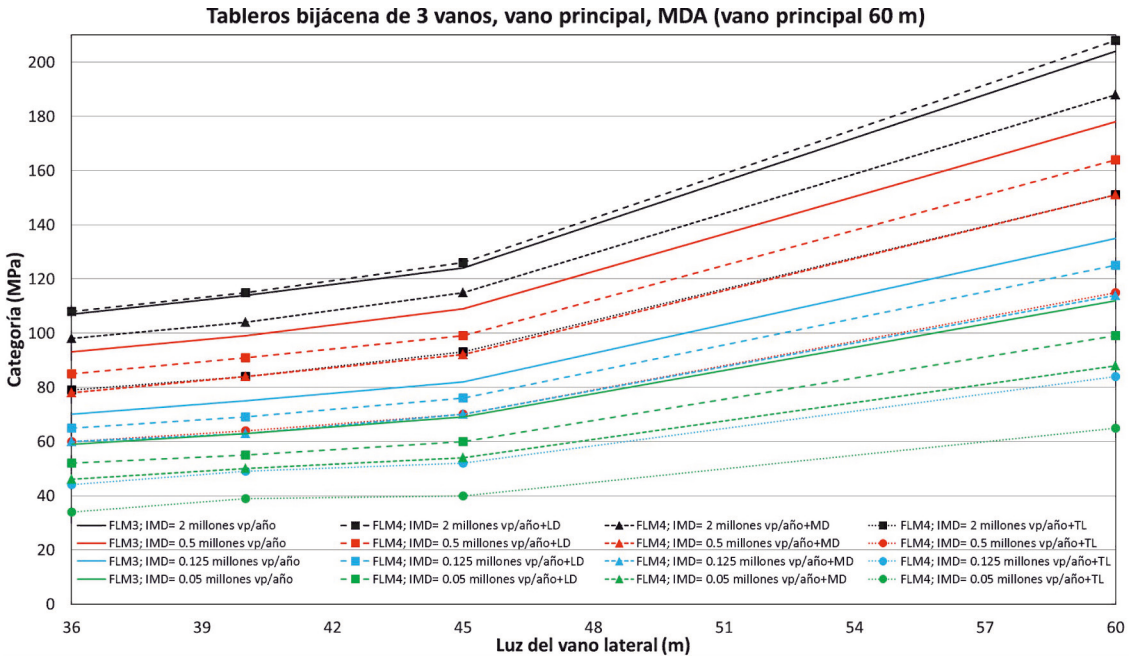


Figura 176 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 60 m)**

5.3.3.3.5 Vano principal de 75 m

La Tabla 94 resume los momentos flectores más significativos en centro de vano de los vanos laterales y del vano principal en función de los diferentes valores de luz del lateral.

Tabla 94 **Momentos flectores en centros de vano (luz principal 75 m)**

Luz del vano principal de 75 m								
Momento [kNm]	Momento en centro de vano del vano lateral				Momento en centro de vano del vano principal			
	Luz del vano lateral [m]							
	45	50	60	75	45	50	60	75
M_d (ELU)	23379	31466	48277	79274	47874	46372	41419	29130
$M_{max,k}$ (LM1)	11684	13390	16535	23161	15744	16080	16692	17480
ΔM (FLM3)	3280	3549	4114	4859	3736	3865	4129	4535
ΔM (FLM4a)	1563	1682	1680	2102	1747	1804	1920	2087
ΔM (FLM4b)	2440	2638	2876	3326	2742	2821	2982	3233
ΔM (FLM4c)	3394	3689	4213	4906	3806	3939	4250	4635
ΔM (FLM4d)	2605	2822	3268	3829	3008	3114	3334	3634
ΔM (FLM4e)	2920	3197	3723	4373	3360	3473	3705	4062

Exposición de resultados para el vano lateral

La Tabla 95 y la Figura 177 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 95, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 96).

Tabla 95 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	131			107			83			58		
FLM3*		126	131	131	100	107	107	74	83	83	52	58	58

Tabla 95 **continúa >**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MS (luz del vano principal de 60 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	0,500	131			107			83			58		
FLM3*		95	122	131	76	97	107	56	72	79	39	51	55
FLM3	0,125	110			87			65			45		
FLM3*		72	93	102	58	74	81	43	55	60	30	38	42
FLM3	0,050	91			73			54			38		
FLM3*		60	77	85	48	62	67	36	46	50	25	32	35

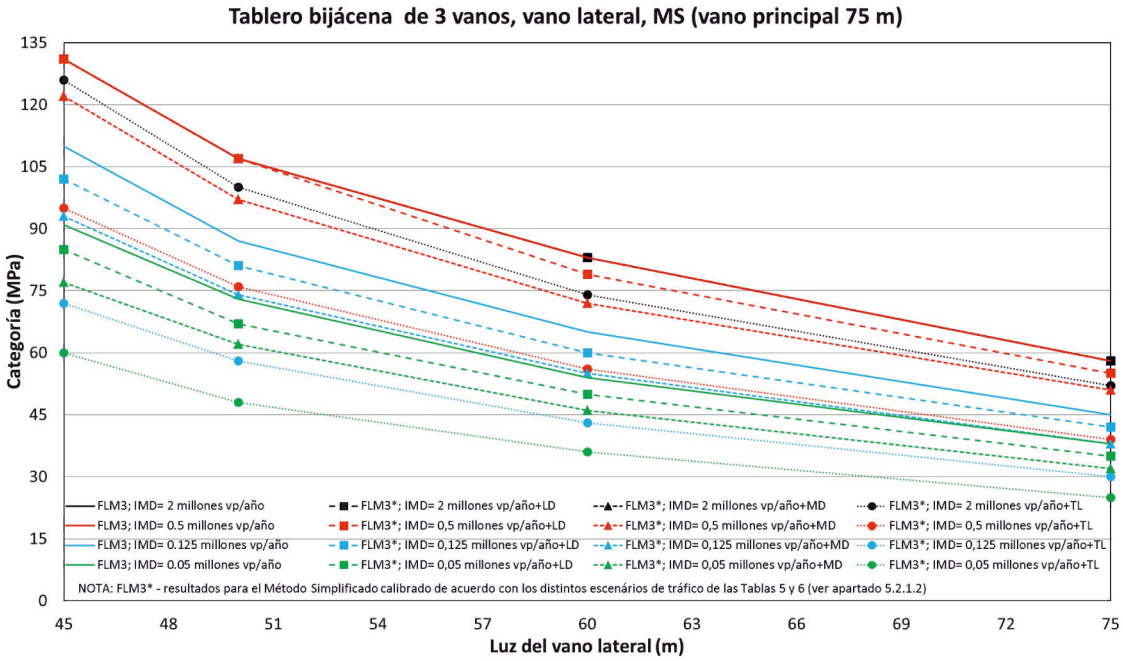


Figura 177 **Resumen del análisis del vano lateral por el MS (vano principal de 75 m)**

La Tabla 96 y la Figura 178 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano lateral en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con el Método del Daño Acumulado (MDA). Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3, se subrayan, en la Tabla 96, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 96 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano lateral, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 75 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	163			132			103			72		
FLM4	2,000	121	152	168	98	124	137	75	95	104	52	66	73
FLM3	0,500	142			115			89			63		
FLM4	0,500	92	121	130	75	98	106	58	75	82	40	52	57
FLM3	0,125	108			87			68			48		
FLM4	0,125	68	92	100	55	75	82	41	57	63	29	40	44
FLM3	0,050	90			73			57			40		
FLM4	0,050	52	71	80	42	58	65	31	44	50	22	31	35

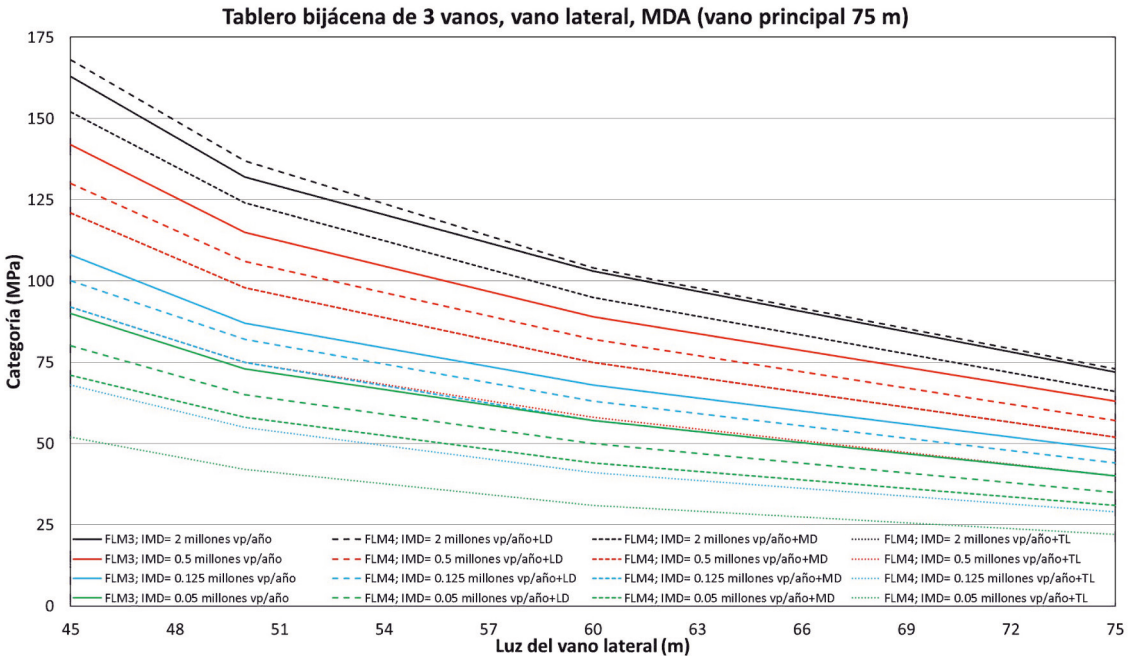


Figura 178 **Resumen del análisis del vano lateral por el MDA (vano principal de 75 m)**

Exposición de resultados para el vano principal

La Tabla 97 y la Figura 179 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para el vehículo FLM3* (ver apartado 5.3.1.2) de acuerdo con el Método Simplificado (MS). Análogamente a lo presentado en el

apartado 5.3.2.3, se destacan en rojo, en la Tabla 97, los casos en los que el MS se queda corto respecto a lo obtenido por el MDA (Tabla 98).

Tabla 97 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MS y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MS (luz del vano principal de 75 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	78			81			93			148		
FLM3*		65	78	78	67	81	81	77	93	93	133	148	148
FLM3	0,500	75			77			88			148		
FLM3*		49	63	69	51	65	72	58	75	82	100	129	141
FLM3	0,125	56			59			67			115		
FLM3*		37	48	53	39	50	55	44	57	62	76	98	107
FLM3	0,050	47			49			56			96		
FLM3*		31	40	44	32	42	45	37	47	52	64	82	89

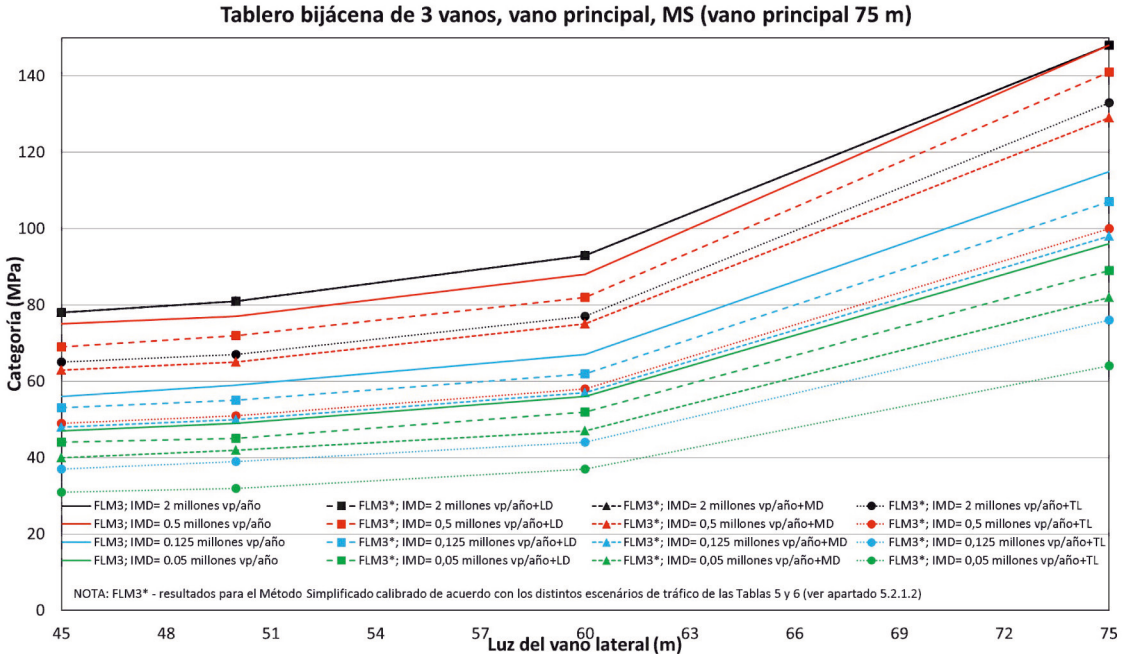


Figura 179 **Resumen del análisis del vano principal por el MS (vano principal de 75 m)**

La Tabla 98 y la Figura 180 presentan la categoría necesaria para la platabanda inferior del vano principal en función de su luz y del escenario de tráfico, tanto para un tráfico correspondiente al representado por el vehículo FLM3 como para los diferentes repartos del FLM4 (ver apartado 5.3.1.1) de acuerdo con MDA. Análogamente a lo presentado en el apartado 5.3.2.3,

se subrayan, en la Tabla 96, los casos en los que la consideración del tráfico correspondiente al FLM3 resulta en valores de la carrera de tensión equivalente inferiores a los resultantes de un análisis considerando un tráfico compuesto por los vehículos del FLM4.

Tabla 98 **Categoría necesaria en platabanda inferior del vano principal, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	VANO PRINCIPAL, MDA (luz del vano principal de 75 m)											
		Lateral 45 m			Lateral 50 m			Lateral 60 m			Lateral 75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000		97			101			115			184	
FLM4	2,000	72	90	99	75	93	103	84	107	118	133	169	188
FLM3	0,500		85			88			100			160	
FLM4	0,500	55	72	78	57	74	81	65	85	93	103	134	147
FLM3	0,125		64			67			76			121	
FLM4	0,125	40	54	59	42	56	62	47	65	71	75	102	112
FLM3	0,050		54			56			63			101	
FLM4	0,050	31	42	47	32	44	49	37	50	56	58	79	89

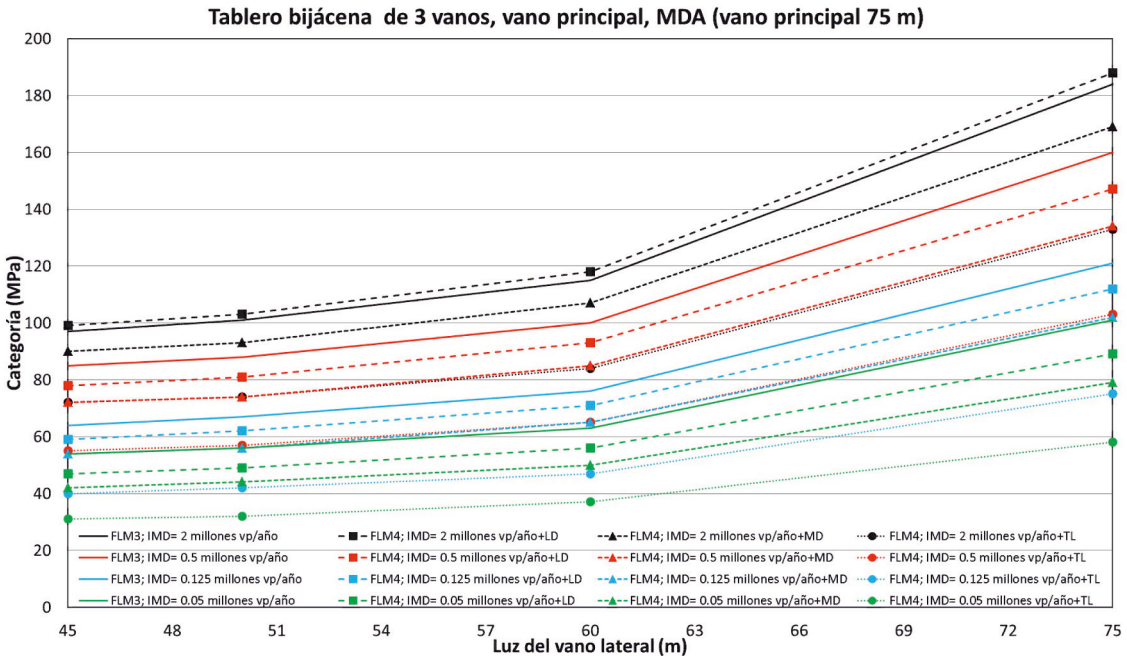


Figura 180 **Resumen del análisis del vano principal por el MDA (vano principal de 75 m)**

5.3.3.3.6 Análisis de la seguridad a fatiga

Las tablas anteriores (Tabla 79, Tabla 84, Tabla 89 y Tabla 94) resumen los principales momentos en centro de vano tanto de los vanos principales como de los laterales. Del análisis de dichas tablas se observa que:

- Los valores de las oscilaciones de momentos flectores debidas a los vehículos de fatiga obtenidas para los vanos laterales son muy semejantes a las obtenidas para los vanos principales
- El cociente entre los valores de los esfuerzos de los vanos laterales y principales correspondientes a la sobrecarga LM1 y a la combinación de Estado Límite Último, para una relación de luces L_l / L_p (*luz del vano lateral/luz del vano principal*) de hasta 2/3, es inferior a 1, es decir, los esfuerzos de dimensionamiento de los vanos laterales son inferiores a los de los vanos principales resultando, así, secciones menos robustas en los primeros
- Como ejemplos de lo anterior:
  - Para vanos laterales de luz de hasta 2/3 de la luz del vano principal, el cociente entre las oscilaciones (debido a los vehículos de fatiga) del vano lateral y del vano principal difieren entre un 10 y un 15%, mientras que los esfuerzos de dimensionamiento de los primeros son del orden de la mitad de los esfuerzos de dimensionamiento de los segundos. Así, se concluye que, teniendo los vanos laterales secciones transversales menos robustas que los principales pero estando bajo oscilaciones de tensiones de fatiga del mismo orden que las de los segundos, los vanos laterales pueden llegar a ser más sensibles frente a la fatiga que los vanos principales
  - En el caso mucho menos habitual de una relación de luces igual a 1, aunque, en general, las oscilaciones de los vanos laterales sean superiores a las de los vanos principales (dentro del rango referido anteriormente) los esfuerzos de dimensionamiento en los primeros son del orden del doble de los esfuerzos de dimensionamiento de los segundos siendo, en este caso, el vano principal el más vulnerable frente a fatiga

Se aprecia también, del análisis de las tablas donde se han reflejado las carreras de tensión equivalente según el MDA que:

- Para cualquier luz, la categoría necesaria para el FLM3 es la misma que para el FLM4 en el escenario de máxima intensidad de tráfico y mayor proporción de vehículos pesados (valores subrayados). A medida que se reduce la intensidad de vehículos pesados, la categoría que exige un tráfico exclusivo con el FLM3 es mayor que la del FLM4 con reparto de larga distancia. Es decir, la calibración del modelo de carga FLM3 parece reproducir las pésimas condiciones de tráfico registradas en las carreteras europeas, y es conservadora para las demás configuraciones
- También es destacable que, para un vano principal de luz dada, la categoría necesaria para el vano lateral es mayor que para el principal. Sin embargo, no puede inferirse una correlación clara entre la categoría y las luces de los vanos. Ello se debe

a que, para luces reducidas, es posible emplear la misma sección transversal para el vano lateral en todo su rango de variación, mientras que para luces mayores hay que ir aumentando el espesor de la chapa de fondo por las exigencias de ELS y ELU, lo que puede mitigar el efecto de la fatiga

Otro fenómeno reseñable es que las predicciones del MDA parecen ser más exigentes que los cálculos basados en el MS (se indican en rojo los valores que parecen quedar del lado de la inseguridad). Al igual que en los tableros antes analizados, la limitación impuesta por el factor λ_{max} supone la imposibilidad de captar el efecto de altas intensidades y elevadas proporciones de tráfico pesado.

5.3.4 Comparación entre sección cajón y bijácena. Conclusiones finales

Como ya se anticipó, y por pura lógica estructural, los tableros con sección bijácena (o multijácena) son más sensibles a fatiga que los cajones debido a la mayor dificultad para repartir en sentido transversal las cargas concentradas. Esto se puede comprobar al comparar las carreras de tensión obtenidas en el análisis a fatiga por el Método del Daño Acumulado (MDA) en el centro del vano lateral de un tablero cajón continuo y de un tablero bijácena continuo, en ambos casos de tres vanos, para una misma luz del vano principal de 45 m (Tabla 99), empleando los colores negro y azul para las categorías correspondientes a la sección en cajón y a la sección bijácena, respectivamente.

Tabla 99 **Comparación de categorías necesarias en chapa de fondo del vano lateral en sección cajón y en platabanda inferior del vano lateral en sección bijácena, para tablero continuo de 3 vanos y luz del vano principal de 45 m, MDA y γ_{Mf} = 1,35**

Vehículo de fatiga	N_{obs} (10^6 vp/año)	SECCIÓN CAJÓN. VANO LATERAL, MDA (luz del vano principal de 45 m)											
		Lateral 25 m			Lateral 30 m			Lateral 35 m			Lateral 45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2,000	93/176			108/173			122/133			84/102		
FLM4		68/127	86/160	95/177	78/125	99/157	110/173	88/97	113/122	125/134	61/75	78/94	86/103
FLM3	0,500	82/154			94/152			106/117			73/89		
FLM4		52/96	68/127	73/137	60/95	78/125	85/135	68/73	89/97	96/104	47/57	62/75	67/80
FLM3	0,125	62/117			71/115			81/89			55/68		
FLM4		39/73	52/96	57/105	45/71	60/95	66/103	51/55	68/73	74/80	35/42	47/56	52/62
FLM3	0,050	52/97			60/96			67/74			46/57		
FLM4		31/56	40/75	45/83	35/56	47/74	52/82	39/43	53/57	59/64	27/33	36/44	41/49

El análisis de la Tabla 99 permite comprobar lo afirmado anteriormente: las categorías de detalle que garantizan, para iguales condiciones de tráfico, una vida útil de 100 años (con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35) para la platabanda inferior del tablero bijácena son superiores a las correspondientes al tablero cajón (ambos continuos de 3 vanos y con luz del vano principal de 45 metros).

Este estudio pone de manifiesto que, en todo el rango de vanos analizado y dentro del contexto de estudio (tableros de canto estricto), la fatiga puede ser claramente determinante frente a un diseño basado en las verificaciones de ELS y ELU sin tener en cuenta la fatiga en numerosos escenarios de tráfico realistas y razonables para las carreteras españolas. Este resultado es mucho más acusado en el caso de las secciones bijácena, en las cuales sólo para las intensidades más bajas y situaciones de tráfico local, los detalles óptimos son compatibles con el dimensionamiento estricto. Sin embargo, para los cajones, es posible alcanzar intensidades medias de tráfico pesado y repartos con mayor proporción de camiones sin que la fatiga sea crítica.

Otro aspecto relevante es que los vanos laterales, por lo general con secciones menos robustas que los principales, suelen ser más sensibles a la fatiga, es decir, precisan de categorías de detalle más elevadas. Ello se debe a que la oscilación de momentos debida a las acciones de fatiga es del mismo orden o incluso mayor que en los vanos interiores a causa del efecto de la flexión negativa, de un orden de magnitud comparable a la positiva, mientras que en el caso del dimensionamiento en ELU, la flexión negativa en las zonas centrales de vano es insignificante ya que la carga permanente mitiga este tipo de efectos debido a la sobrecarga, y la exigencia en el caso del dimensionamiento en Estado Límite Último es mayor en los vanos principales que en los vanos laterales. Así, y estando los vanos laterales sometidos a oscilaciones de tensiones de fatiga iguales o superiores a las de los vanos principales pero estando constituidos por secciones transversales normalmente menos robustas, son, en general, más vulnerables frente a la fatiga que los vanos centrales tipo.

5.4 Análisis transversal

En los apartados siguientes se incluye un breve análisis frente a fatiga de los principales elementos transversales más habituales en puentes con sección cajón, o bijácena, mixtos de carretera, completando el análisis longitudinal incluido en 5.3.

Se analizará la respuesta frente a fatiga de las costillas laterales mixtas en tableros con voladizos de losa de 4,75 m, y en el caso de voladizos con mayor dimensión se estudiará la configuración de jabalcones laterales compuestos por una costilla superior mixta conectada a la losa y un puntal inclinado. En ambos casos se analizará la influencia de la separación de los elementos transversales entre 4, 5, 6 y 8 m.

5.4.1 Metodología

Como ya se adelantó en 5.1, para analizar frente a fatiga los elementos transversales se debe recurrir al Método del Daño Acumulado, aplicando el modelo FLM4 (o el FLM5, si hay datos), dado que el FLM3 (asociado al Método Simplificado) está concebido, como ya se explicó,

para el análisis longitudinal de tableros y porque conduciría a resultados muy conservadores en elementos transversales. Nótese que el FML3 es un vehículo muy pesado y concentrado, mientras que el FLM4 permite suponer diferentes repartos de tráfico pesado realista en función de la categoría de la carretera (Tabla 4).

5.4.2 Secciones transversales con costillas

5.4.2.1 Sección tipo analizada

En el caso de tableros con dos carriles y arcenes laterales de dimensiones convencionales, con ancho de losa superior entre 10-12 m, la sección transversal se puede resolver con un cajón mixto (o una doble viga) de anchura superior habitualmente menor de 6 m y con voladizos de la losa superior de hasta 3 m.

Cuando el tablero requiere alojar tres o más carriles, y el ancho de la losa superior rebasa los 12-13 m, es habitual recurrir al empleo de secciones transversales en cajón (o bijácena) mixtas, con amplios voladizos de losa, que cuando rebasan los 3-3,5 m, suelen resolverse mediante el empleo de costillas transversales metálicas o mixtas conectadas a la losa, de forma que la losa flecte en sentido longitudinal entre costillas, y sean las costillas las que inyecten los esfuerzos transversales en la sección longitudinal del cajón (o bijácena).

La Figura 181 muestra un ejemplo de sección transversal con tres carriles y arcenes convencionales, con tipología de cajón mixto de 15,20 m de anchura con amplios voladizos de losa, en este caso de 4,75 m, con costillas mixtas laterales y riostra central de continuidad coincidente con las celosías transversales.

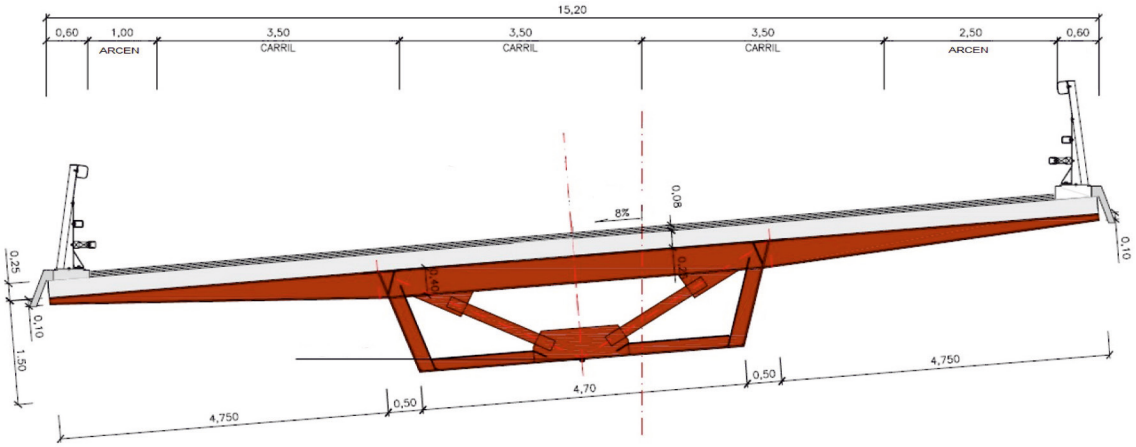


Figura 181 **Sección tipo de un tablero con costillas transversales**

La disposición de costillas coincide normalmente con la de celosías transversales con el objeto de inyectar las cargas excéntricas en el flujo tensional global de la sección. Por tanto, es normal encontrar interejes de costillas de 4 a 6 m. Una separación mayor no suele ser recomendable ya que se incurriría en un sobredimensionamiento tanto de la losa del tablero, que debe flectar en sentido longitudinal entre costillas, como en el de las propias costillas.

En los siguientes apartados se verificarán costillas de 4,75 m de vuelo, con separaciones de 4, 5, 6 y 8 m (aunque 8 m sea por otros motivos una separación excesiva, como se ha expuesto) y con sección en doble T con viga armada conectada a la losa superior.

5.4.2.2 Modelo de cálculo

Para la verificación de las costillas se recomienda (a falta de modelos más complejos) efectuar un reparto isostático de la carga de cada eje del vehículo pesado entre las dos costillas adyacentes. Este enfoque es ligeramente conservador al prescindir de la rigidez a flexión de la losa superior como placa continua, es decir, suponiendo que la carga de un eje situado entre dos costillas sólo se distribuye entre ellas. Bajo esta hipótesis, es posible plantear un modelo de vigas biapoyadas que reproduzca la cadencia entre costillas, y pasear cada vehículo pesado tipo, con su distribución real de ejes, a lo largo del modelo. Cada apoyo del modelo representa una costilla, y la pésima reacción en él corresponderá a la carga equivalente que cada vehículo transmite a esa costilla.

La Figura 182 ilustra el paso del vehículo FLM3 en sendos modelos de losa con intereje de 8, 6, 5 y 4 m, y lo mismo se ha hecho con el resto de los vehículos del modelo de carga FLM4.

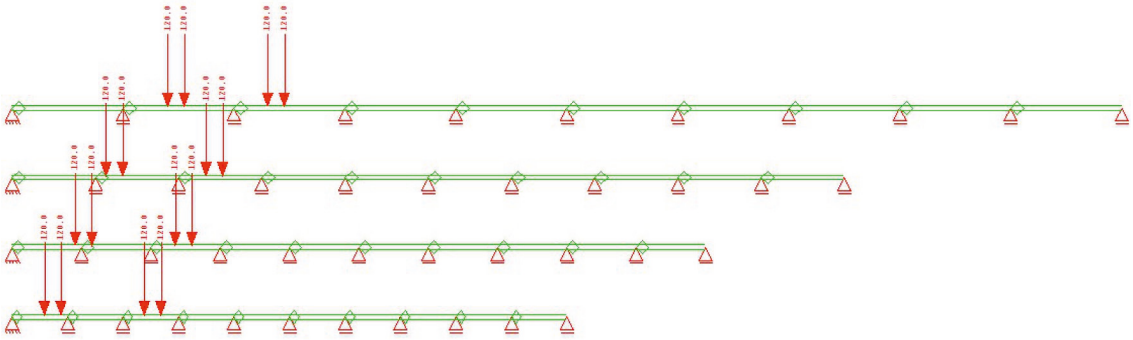


Figura 182 **Modelo de vigas biapoyadas con separaciones de 8, 6, 5 y 4 m**

La Tabla 100 resume las pésimas reacciones por costilla en función del intereje, para cada vehículo tipo.

Tabla 100 **Reacciones pésimas por costilla**

Vehículo	Carga total [kN]	R_{max} [kN] intereje 4 m	R_{max} [kN] intereje 5 m	R_{max} [kN] intereje 6 m	R_{max} [kN] intereje 8 m
FLM3	480	204,0	211,2	216,0	264,0
FLM4 (a)	200	130,0	135,3	146,7	160,5
FLM4 (b)	310	201,0	219,9	234,7	253,5
FLM4 (c)	490	210,9	222,9	231,4	278,3
FLM4 (d)	390	150,1	162,1	169,7	204,5
FLM4 (e)	450	138,3	157,5	173,9	219,9

Conocida la pésima reacción por costilla, se analiza el voladizo, teniendo en cuenta que, en primer lugar, la reacción obtenida corresponde a los ejes de los vehículos (es decir, habrá que dividir dicha carga en dos fuerzas separadas 2 m en transversal, que es la separación entre ruedas) y, en segundo lugar, que la posición más excéntrica que puede ocupar la rueda exterior es a 0,50 m del bordillo, por pura definición de carril virtual (Figura 183).

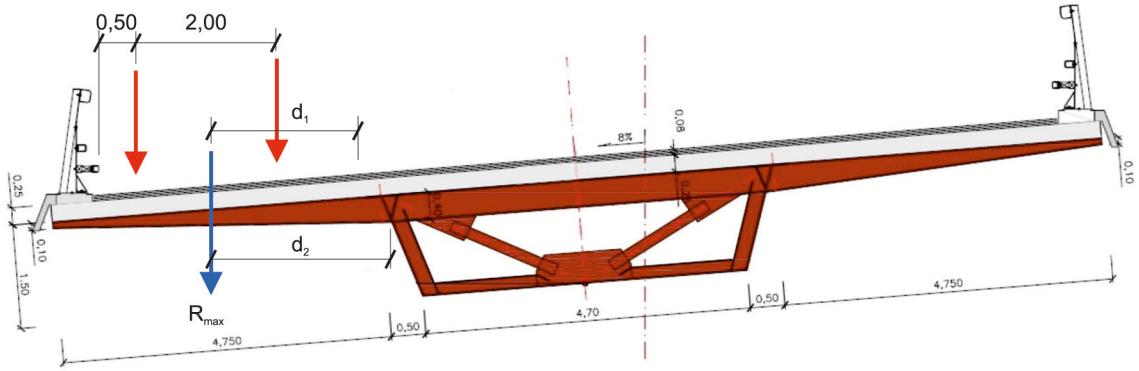


Figura 183 **Posición pésima de las cargas para análisis de costillas transversales**

5.4.2.3 Dimensionamiento de la sección

Previamente a la verificación de fatiga se ha dimensionado la sección de arranque de una costilla de 4,75 m (valor habitual en tableros de 3 carriles) conforme a las exigencias de ELS y ELU de los Eurocódigos. Conviene destacar que el ancho eficaz de la losa (y, por tanto, la armadura pasiva colaborante) es el correspondiente a la formulación de UNE-EN 1992. Este enfoque permitirá deducir para qué escenarios de tráfico las comprobaciones de fatiga implican un dimensionamiento más exigente que si se omitiera dicho fenómeno. Los resultados del dimensionamiento estricto para los modelos de carga 1 y 2 definidos en UNE-EN 1991-1-2, se muestran en la Tabla 101.

Tabla 101 **Dimensionamiento estricto de costillas en ELS y ELU**

Intereje [m]	M_d [kNm]	V_d [kN]	Canto metal [mm]	Plat. sup.	Alma	Plat. inf.	Arm. pasiva transv. sup.	Conexión
4	-2936	1325	400	≠250x15	≠20	≠470x35	Ø20/0,10+ Ø16/0,20	2Ø22 /0,15
5	-3248	1455	420			≠540x35		
6	-3537	1575	440			≠550x35		
8	-4081	1797	500			≠580x35		

5.4.2.4 Secciones críticas para fatiga

Las secciones críticas son cualesquiera en las que se produzca una discontinuidad, bien por cambio de chapas, bien por encuentros con elementos longitudinales (platabanda superior y alma del cajón).

Así, los puntos que, como mínimo, requieren un control detallado son (ver Figura 184):

- La unión de la platabanda superior de la costilla con la platabanda superior longitudinal del cajón, sometida a tensiones normales (detalle 1a).
- La unión de la platabanda superior con el alma de la costilla, analizada a tensiones normales y con posibles ojales (detalle 1b).
- La unión de la platabanda inferior de la costilla con el alma del cajón, sometida a tensiones normales (detalle 2a).
- La unión de la platabanda inferior con el alma de la costilla, analizada a tensiones normales y con posibles ojales (detalle 2b).
- La platabanda superior de la costilla, al tener pernos que la conectan a la losa (detalles 3a y 3b).
- La unión del alma de la costilla a la del tablero, sometida a tensiones tangenciales y normales (detalle 4).
- Cualquier otra sección donde se produzca un cambio de chapas y, por tanto, una soldadura
- Asimismo, el encuentro de platabandas superiores tiene una repercusión local en el análisis longitudinal de la platabanda superior (detalle 5).

Cuando en un mismo punto coincidan diferentes detalles, se examinará el más restrictivo.

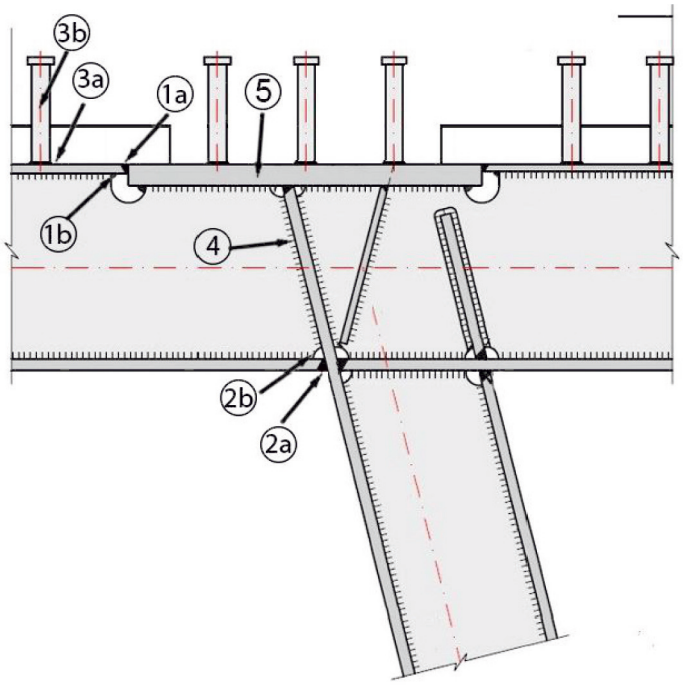


Figura 184 **Detalle de la unión de una costilla (lado izquierdo) a la parte superior del cajón**

Las asignación de categorías para estos detalle es la siguiente:

- Detalle 1a: la unión de la platabanda superior de la costilla a la platabanda superior longitudinal del cajón, presentará la problemática descrita en el apartado 4.6.3. Para conseguir un detalle adecuado la soldadura 1a se debería ejecutar acorde con el detalle 4 de la tabla 8.4 y el detalle 19 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, con el adecuado radio en la platabanda de la costilla para lograr una categoría 90

  En caso de la costilla y el cajón tengan platabandas de distinto espesor conviene tener en cuenta las reflexiones incluidas en 4.6.3

  La posible presencia de un ojal en el alma (detalle 1b) obligaría a bajar la categoría del detalle hasta 71, acorde con el detalle 9 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9, lo que requeriría sobredimensionar la platabanda superior de la costilla en esa zona.

- Detalle 4: soldadura del alma de la costilla al alma del cajón: categoría 80 de acuerdo con el detalle 8 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9

- Detalle 2a: la unión de la platabanda inferior de la costilla al alma del cajón tiene una categoría 80 de acuerdo con el detalle 1 de la tabla 8.5 (ver 4.8.2), mientras que si se ejecuta un ojal en el extremo del alma (detalle 2b) la categoría bajaría a 71, acorde con el detalle 9 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9

- Detalles 3a y 3b: categoría 80 para la platabanda (de acuerdo con el detalle 9 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9) y 90 para el perno (de acuerdo con el detalle 10 de la Tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9).

- Detalle 5: soldadura del alma a la platabanda superior (de acuerdo con el detalle 6 o 7 de la tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9). Se trata de un detalle de fatiga en la platabanda superior de la sección transversal y dependerá de sus esfuerzos, cuestión analizada en otros apartados, pero que no depende de los esfuerzos o el dimensionamiento del elemento transversal. Por este motivo no se analiza en este punto

5.4.2.5 Comprobaciones a fatiga

Las comprobaciones de fatiga se han efectuado para la acción del modelo de carga FLM4 en función del tipo de tráfico (local, media y larga distancia, acorde con la Tabla 3), considerando el número de vehículos pesados por año en función de la categoría de la carretera definida en la Tabla 4, en función del intereje entre costillas (4, 5, 6 y 8 m), y aplicando el criterio de verificación de integridad asegurada, considerando la rotura del detalle con consecuencias de fallo graves (γ_{Mf} = 1,35).

Cabría preguntarse si el detalle de soldadura de la platabanda inferior de la costilla (detalle 2a), verdaderamente necesita verificación, ya que la costilla trabaja en flexión negativa y la platabanda inferior de la costilla se encuentra comprimida bajo acciones permanentes y la sobrecarga de tráfico sólo puede comprimirlo aún más, por lo que parece difícil que se pueda propagar una fisura por fatiga (ver 2.2.2.2).

Para el análisis a fatiga se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- El cálculo de tensiones normales en cada fibra se ha abordado por la fórmula clásica de Navier, suponiendo la sección mixta de la costilla completamente fisurada, del lado de la seguridad
- Las tensiones tangenciales en la sección se han obtenido, del lado de la seguridad, dividiendo el cortante entre el área del alma en vez de considerar el área de las dos soldadura en ángulo
- El esfuerzo rasante en los pernos (fuerza por unidad de longitud) se ha calculado de forma elástica mediante la fórmula de Colignon (producto de cortante por momento estático dividido entre inercia). La tensión en cada perno se deduce dividiendo el rasante entre el área resistente por unidad de longitud. A este respecto, la hipótesis de sección bruta para el cálculo del rasante, más conservadora e irreal, implica trabajar con el momento estático de la losa (homogeneizada a acero) y de los redondos, mientras que para la sección fisurada sólo los redondos aportan momento estático. En ambos casos, se trabajará con la inercia correspondiente. Se comprueba que no hay gran diferencia en la verificación del daño en los pernos entre una hipótesis u otra
- El ancho eficaz de la losa (y, por tanto, de la armadura pasiva colaborante) es el correspondiente a la formulación de UNE-EN 1992

En la Tabla 102, que analiza los detalles de unión de platabandas superiores (1a y 1b), de almas (4) y la unión de la platabanda inferior al alma del cajón (2a y 2b) recogidos en la Figura 184, se resumen las categorías mínimas necesarias (ya afectadas de los respectivos coeficientes γ_{Ff} y γ_{Mf} y directamente comparables con las categorías de detalle) para que, con el dimensionamiento estricto anterior, se satisfaga el Estado Límite de Fatiga en cada detalle para el modelo de carga FLM4 en sus diferentes composiciones de tráfico e intensidad. Se indican en rojo aquellas categorías que superan la máxima posible de cada detalle.

Tabla 102 **Categoría mínima en platabandas y alma para FLM4 y γ_{Mf} = 1,35**

Intereje [m]	IMD (10^6 vp/año)	Plat. sup. (1a, 1b)			Alma (4)			Plat. inf. (2a, 2b)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	56	74	78	56	74	78	60	80	85
	0,500	48	56	60	48	56	60	52	61	65
	0,125	<36	44	47	37	44	47	38	48	50
	0,050	<36	<36	37	<36	37	39	<36	37	40

Tabla 102 continúa >

Intereje [m]	IMD (10^6 vp/año)	Plat. sup. (1a, 1b)			Alma (4)			Plat. inf. (2a, 2b)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
5	2,000	59	78	81	57	75	79	64	84	88
	0,500	50	59	63	48	57	61	54	64	68
	0,125	37	46	49	37	45	47	40	50	53
	0,050	<36	36	39	<36	37	39	<36	39	42
6	2,000	60	77	80	58	75	78	65	83	87
	0,500	51	59	62	50	57	61	55	64	67
	0,125	38	46	48	38	45	47	41	50	52
	0,050	<36	36	38	<36	38	39	<36	39	42
8	2,000	63	78	86	61	75	83	68	84	93
	0,500	50	62	66	48	60	64	54	68	72
	0,125	38	48	51	38	46	49	41	52	55
	0,050	<36	37	41	<36	39	41	<36	40	44

Las categorías de cada detalle de las distintas uniones se analizan a continuación:

- La unión de la platabanda superior de la costilla a la platabanda superior longitudinal cajón, presentará la problemática descrita en el apartado 4.6.3. Para conseguir un detalle adecuado de la soldadura 1a de la Figura 184 se debería ejecutar la platabanda superior de la costilla acorde con el detalle 4 de la tabla 8.4 y el detalle 19 de la tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, con el adecuado radio en la platabanda de la costilla para lograr una categoría 90

  En caso de que la costilla y el cajón tengan platabandas de distinto espesor conviene tener en cuenta las reflexiones incluidas en 4.6.3

  La posible presencia de un ojal en el alma (detalle 1b de la Figura 184), obligará a bajar la categoría del detalle hasta 71, acorde con el detalle 9 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9, lo cual puede que obligue a sobredimensionar la platabanda superior de la costilla en esa zona

- Para la unión del alma de la costilla al alma del cajón (detalle 4 de la Figura 184): categoría 80 de acuerdo con el detalle 8 de la tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9

- Para la unión de la platabanda inferior de la costilla al alma del cajón (detalles 2a de la Figura 184): categoría 80 en el extremo de la platabanda inferior de la costilla de acuerdo con el detalle 1 de la tabla 8.5 (ver 4.8.2), mientras que si se ejecuta un ojal en el extremo del alma (detalle 2a de la Figura 184), la categoría bajaría a 71, acorde con el detalle 9 de la tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9

En caso de ser preciso modificar las secciones, se constata que la variable que más influye (y que resulta más económica) en la seguridad de los detalles sometidos a tensiones normales es la armadura pasiva transversal de la losa superior, pues con ligeros aumentos (pasando a Ø25 a 0,10) es posible disponer, en cualquier escenario, la misma sección transversal que en el dimensionamiento de ELS y ELU.

Por su parte, la Tabla 103 recoge el daño en la platabanda superior de la costilla y en la conexión a la losa, para las secciones procedentes del dimensionamiento estricto anterior bajo la acción del modelo de carga FLM4 en sus diferentes composiciones de tráfico e intensidad. Se indican en rojo los casos en que el daño es superior a la unidad.

En este caso se ha optado por evaluar directamente el daño puesto que la categoría de cada detalle está claramente definida, según se indicó más arriba: 80 para la platabanda y 90 para el perno, cada una con su correspondiente coeficiente parcial de resistencia a fatiga, γ_{Mf}. No se ha estudiado ningún fenómeno de interacción ya que no parece haber reglas claras al respecto cuando se recurre al MDA.

Tabla 103 **Daño en platabanda superior y en pernos para FLM4**

Intereje [m]	IMD (10^6 vp/año)	Plat. Sup, 3a. (cat. 80, γ_{Mf} = 1,35)			Pernos, 3b (cat. 90, $\gamma_{Mf,s}$ = 1,00)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	0,282	1,194	1,701	1,130	4,149	5,897
	0,500	0,070	0,299	0,425	0,283	1,037	1,474
	0,125	0,018	0,075	0,106	0,071	0,259	0,475
	0,050	0,007	0,030	0,043	0,028	0,104	0,147
5	2,000	0,350	1,422	1,976	1,369	4,837	6,651
	0,500	0,087	0,355	0,494	0,342	1,209	1,663
	0,125	0,022	0,089	0,123	0,086	0,302	0,416
	0,050	0,009	0,036	0,049	0,034	0,121	0,166
6	2,000	0,332	1,303	1,771	1,651	5,336	7,081
	0,500	0,083	0,326	0,443	0,413	1,334	1,770
	0,125	0,021	0,081	0,111	0,103	0,334	0,443
	0,050	0,008	0,033	0,044	0,041	0,133	0,177
8	2,000	0,340	1,516	2,221	2,343	9,159	13,620
	0,500	0,085	0,379	0,555	0,586	2,290	3,405
	0,125	0,021	0,095	0,139	0,146	0,572	0,851
	0,050	0,009	0,038	0,056	0,059	0,229	0,340

En caso de ser preciso modificar las secciones, se aprecia que la variable que más influye (y que resulta más económica) en la seguridad de los detalles sometidos a tensiones normales es la armadura pasiva transversal de la losa superior, pues con ligeros aumentos (pasando a Ø25 a 0,10) es posible disponer, en cualquier escenario, la misma sección transversal que en el dimensionamiento de ELS y ELU.

Asimismo, la conexión se revela como un aspecto crítico a fatiga en este estudio, ya que, por ejemplo, el paso de 2 a 3 pernos o de 150 a 100 mm de separación supone dividir entre más de 25 el daño (relación de áreas elevada a 8) y permitiría cumplir las exigencias de seguridad a fatiga en todas las composiciones e intensidades de tráfico analizadas.

5.4.3 Secciones con costillas y puntales

5.4.3.1 Sección tipo analizada

Cuando la anchura de la sección aumenta por encima de los 15-16 m y se mantiene un único cajón central, suele ser necesario tener que recurrir al empleo de costillas laterales con puntales (o jabalcones) inclinados, de forma que se eviten costillas con cantos demasiado elevados, resolviendo el problema de la flexión transversal mediante un mecanismo de flexo–tracción en la costilla superior y de compresión en el puntal inclinado.

El uso de costillas y puntales es común en tableros con 4 carriles. En el ejemplo analizado la distribución de la plataforma de 25,3 m de anchura es la siguiente:

- Barreras exteriores de 0,65 m (en cada lado)
- 3 metros de arcén exterior (en cada lado)
- 4 carriles de 3,5 metros
- 1,5 metros de arcén interior (en cada lado) y 1 metro de mediana

En este tipo de secciones la separación entre almas en la parte superior del cajón está en el entorno de los 8,5 metros, lo que deja unas costillas de unos 8,5 metros como máximo. También es frecuente que el puntal no llegue al extremo de la costilla, sino que quede un ligero voladizo final con el objetivo de reducir la flexión en el centro de la costilla así como el esfuerzo axil en el puntal (Figura 185).

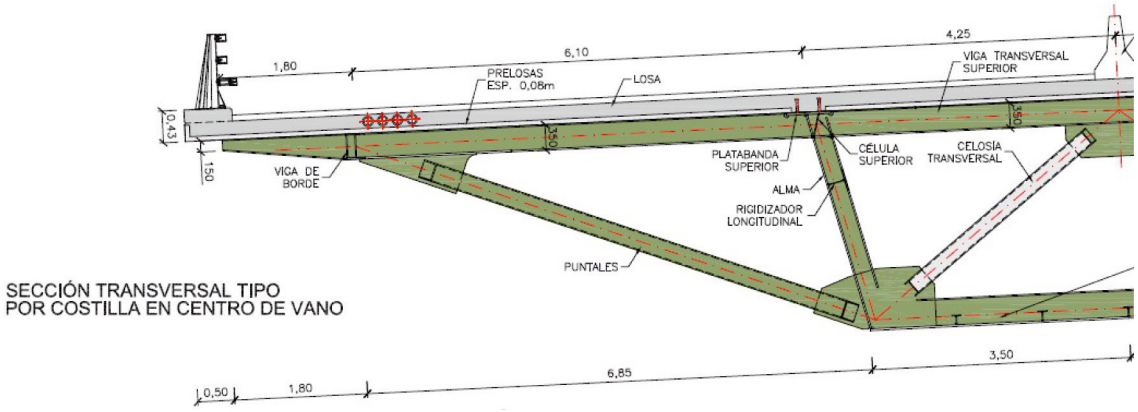


Figura 185 **Semi-sección tipo de un tablero con costillas transversales y puntales**

Asimismo, también es posible vincular longitudinalmente las costillas mediante una viga de borde que permita ayudar a repartir las cargas concentradas entre varias costillas (Figura 185).

5.4.3.2 Modelo de cálculo

Como en el caso de costillas simples, la separación entre estos elementos transversales obedece a los mismos principios, siendo la única modificación las condiciones de apoyo y funcionamiento estructural del conjunto debido a la existencia de puntales, cuya presencia supone la aparición de momentos flectores positivos (y negativos) en la costilla y esfuerzos axiles de tracción en la costilla y compresión en el puntal, frente a los momentos negativos sin axil que se producirían si estuviera en ménsula, siendo axiles tanto mayores cuanto menor sea el canto de la sección del cajón y más inclinado esté el puntal.

Al contrario que en el caso de las costillas aisladas, el sistema es hiperestático, y se hace preciso generar un modelo de cálculo como el de la Figura 186 que reproduzca, tanto en geometría como en rigidez, el funcionamiento conjunto con los puntales.

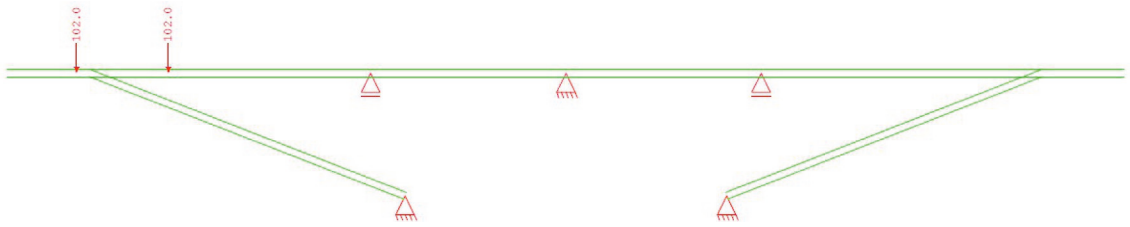


Figura 186 **Modelo representativo del funcionamiento de costilla con puntal**

Para analizar estos elementos a fatiga se recurrirá al modelo de carga FLM4 como ya se ha descrito previamente.

Las cargas aplicadas, que resultan de las mismas hipótesis y metodología de cálculo usadas en el estudio anterior, corresponden en este caso a las reacciones obtenidas y representadas en la Tabla 100, para cada intereje y para cada vehículo pesado tipo, teniendo en cuenta que la reacción obtenida corresponde a los ejes de los vehículos (es decir, habrá que dividir dicha

carga en dos fuerzas separadas 2 m en transversal, que es la separación entre ruedas). De nuevo, se acomete el análisis basado en las comprobaciones de ELS y ELU con el modelo de carga LM1, ajeno a consideraciones de fatiga.

5.4.3.3 Dimensionamiento de las secciones tipo

En los siguientes apartados se desarrolla un caso concreto pero bastante representativo, con las siguientes características:

- Canto de metal de 2,65 metros (para un vano de 86 metros)
- Cajón de 7,0 metros de ancho inferior y 8,5 m de ancho superior
- Anchura total del tablero 25,30 metros
- Puntales vinculados a las costillas a 0,50 + 1,80 metros del borde del tablero (Figura 185).

Como en el caso de las costillas simples analizadas en 5.4.2, se han estudiado 4 posibles separaciones del conjunto costilla + puntal: 4, 5, 6 y 8 m, aunque las distancias más habituales no suelen superar los 6 m.

El dimensionamiento estricto cumpliendo los ELS y ELU, considerando el ancho eficaz de la losa (y, por tanto, la armadura pasiva colaborante) como se hizo en el caso de costillas sencillas, arroja las siguientes secciones transversales en cada elemento del conjunto costilla + puntal (Tabla 104, Tabla 105, 5.4.2.3).

Tabla 104 **Dimensionamiento estricto de sección de arranque de costillas en ELS y ELU**

Intereje [m]	Canto metal [mm]	Plat. sup.	Alma	Plat. inf.	Arm. pasiva transv. sup.	Conexión
4	360	≠250x15	≠20	≠340x20	Ø20/0,10	2Ø22/0,15
5	500	≠250x20	≠20	≠410x25	Ø25/0,10	
6	500	≠250x20	≠20	≠420x25	Ø25/0,10	
8	625	≠250x20	≠15	≠420x25	Ø25/0,10	

Tabla 105 **Dimensionamiento estricto de sección central de costillas en ELS y ELU**

Intereje [m]	Canto metal [mm]	Plat. sup.	Alma	Plat. inf.	Arm. pasiva transv. sup.	Conexión
4	360	≠300x20	≠15	≠420x25	Ø12/0,10	2Ø22/0,20
5	500	≠250x10	≠10	≠410x25	Ø12/0,10	
6	500	≠250x10	≠10	≠420x25	Ø12/0,10	
8	625	≠250x10	≠10	≠420x25	Ø12/0,10	

Tabla 106 **Dimensionamiento estricto de puntales en ELS y ELU**

Intereje [m]	Sección
4	Tubo h=b=350 mm; e=15 mm
5	Tubo h=b=400 mm; e=15 mm
6	Tubo h=b=400 mm; e=15 mm
8	Tubo h=b=450 mm; e=15 mm

5.4.3.4 Secciones críticas para fatiga

Recuperando la definición de sección crítica referida anteriormente, los puntos que, como mínimo, requieren un control detallado son (ver Figura 184):

- La unión de la platabanda superior de la costilla con la platabanda superior longitudinal del cajón, sometida a tensiones normales (detalle 1a).
- La unión de la platabanda superior con el alma de la costilla, analizada a tensiones normales y con posibles ojales (detalle 1b).
- La unión de la platabanda inferior de la costilla con el alma del cajón, sometida a tensiones normales (detalle 2a).
- La unión de la platabanda inferior con el alma de la costilla, analizada a tensiones normales y con posibles ojales (detalle 2b).
- La platabanda superior de la costilla cerca del tablero, al tener pernos que la conectan a la losa (detalles 3a y 3b).
- La unión del alma de la costilla a la del tablero, sometida a tensiones tangenciales y normales (detalle 4).
- El encuentro de platabandas superiores tiene una repercusión local en el análisis longitudinal de la platabanda superior (detalle 5, Figura 184).

y además:

- Cualquier otra sección donde se produzca un cambio de chapas y, por tanto, una soldadura (detalle 6, Figura 187).
- La unión de los puntales con las cartelas, generalmente diseñada como un corte rasgado en el puntal y una soldadura en ángulo (detalle 7, Figura 182 y Figura 188).
- La platabanda superior de la costilla a mitad de longitud, al tener pernos que la conectan a la losa (detalle 8a y 8b, Figura 187).

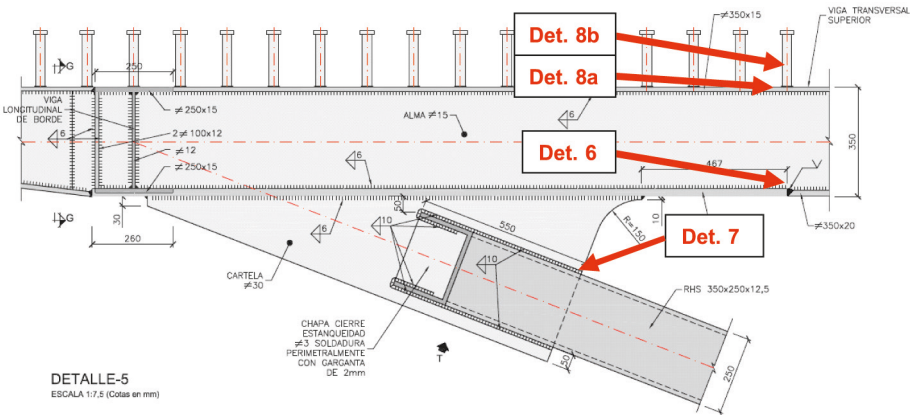


Figura 187 **Detalle de un cambio de espesor de la platabanda inferior de una costilla en flexión positiva y de la unión de un puntal con la cartela**

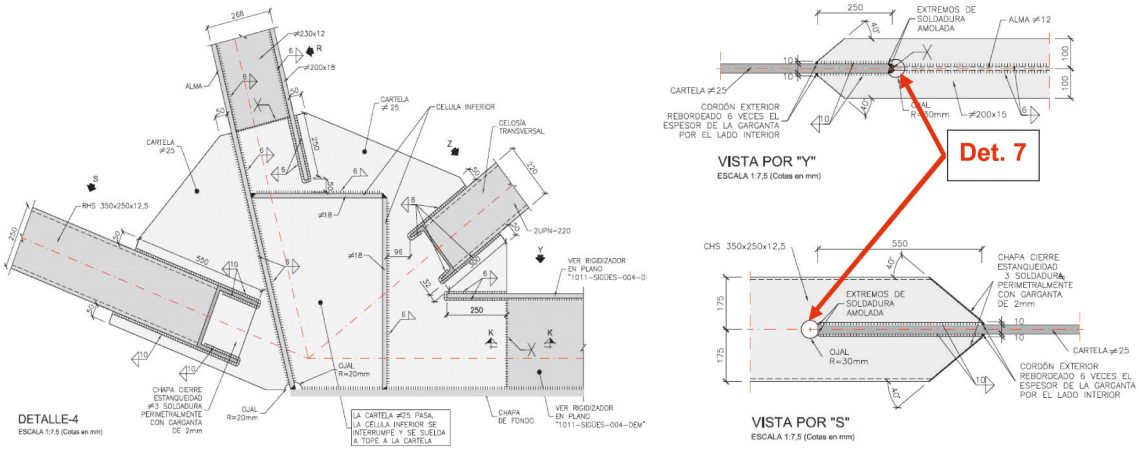


Figura 188 **Vista en detalle de la unión de un puntal con la cartela**

5.4.3.5 Comprobaciones a fatiga

Mediante el modelo de cálculo planteado (Figura 181) y efectuando un paseo transversal de cada vehículo tipo, es posible conocer la envolvente de esfuerzos (cortantes, flectores y axil) en todas las secciones y así efectuar el cálculo de las tensiones normales y tangenciales en cualquier punto para el análisis de la seguridad a fatiga.

El análisis justificado de la categoría de cada punto de estudio, así como los criterios de cálculo para el correcto estudio y dimensionamiento se encuentran en la Tabla 107 y Tabla 108.

Tabla 107 **Justificación de la categoría del detalle en cada punto estudiado. Detalles 1a, 1b, 2a, 2b, 3a y 3b**

Detalle	Tensiones	Categoría	Observaciones
1a	$\sigma = \frac{M_y}{I_{y,fis}} z_{sup} + \frac{N}{A}$	40 a 90	Detalles 4 (cat. 90 a 50) o 5 (cat. 40), tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (influencia de la transición)
1b	$\sigma = \frac{M_y}{I_{y,fis}} z_{sup} + \frac{N}{A}$	80 (sin ojal) 71 (con ojal)	Detalles 8 y 9, tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (influencia del ojal)
2a	$\sigma = \frac{M_y}{I_{y,fis}} z_{inf} + \frac{N}{A}$	80	Detalle 1, tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 (lo normal es que l sea menor de 50 mm, y por tanto la cat. sea 80)
2b	$\sigma = \frac{M_y}{I_{y,fis}} z_{inf} + \frac{N}{A}$	80 (sin ojal) 71 (con ojal)	Detalles 8 y 9, tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9 (influencia del ojal)
3a	$\sigma = \frac{M_y}{I_{y,fis}} z_{inf} + \frac{N}{A}$	80	Detalle 9, tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (influencia del perno)
3b	$\tau = \frac{\frac{V_z \, S_{armadura}}{I_{y,fis}}}{A_{pernos/m}}$	90	Daño en el perno: Detalle 10, tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9

NOTA 1: La tensión normal en platabandas superior e inferior se calculará con las propiedades de sección fisurada y esfuerzos concomitantes.

NOTA 2: Por coherencia con la verdadera respuesta del elemento, el esfuerzo rasante en los pernos debería calcularse con las propiedades de sección fisurada.

Tabla 108 **Justificación de la categoría del detalle en cada punto estudiado. Detalles 4, 5, 6, 7, 8a y 8b**

Detalle	Tensiones	Categoría	Observaciones
4	$\tau = \frac{V_z}{A_{alma}}$	80	Detalle 8, tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 Conservadoramente, la tensión tangencial puede calcularse en el alma en vez de en las soldaduras en ángulo
5	Análisis global	40 a 90	Daño en la platabanda longitudinal: Detalles 4 (cat. 90 a 50) o 5 (cat. 40), tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (influencia de la transición)

Tabla 108 continúa >

Detalle	Tensiones	Categoría	Observaciones
6	$\sigma = \frac{M_y}{I_{y,bruta}} z_{inf} + \frac{N}{A}$	80	Detalle 11, tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 Las tensiones normales se calculan con las propiedades de sección bruta (si la losa está comprimida por los momentos flectores positivos) y con esfuerzos axiles concomitantes (de tracción)
7	$\sigma = \frac{N}{A}$	71	Detalle 2, tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9 con $\alpha < 45^{o}$ Las tensiones normales se calculan para el puntal
8a	$\sigma = \frac{M_y}{I_{y,bruta}} z_{sup} + \frac{N}{A}$	80	Detalle 9, tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9 (influencia del perno) La tensión normal en la platabanda superior se calculará con las propiedades de sección bruta (si la losa está comprimida por los momentos flectores positivos) y con esfuerzos axiles concomitantes (de tracción)
8b	$\tau = \frac{\frac{V_z \, S_{Losa+armadura}}{I_{y,bruta}}}{A_{pernos/m}}$	90	Daño en el perno: Detalle 10, tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9 Por coherencia con la verdadera respuesta del elemento, el esfuerzo rasante en los pernos debería calcularse con las propiedades de sección bruta

Las comprobaciones de fatiga incluidas en la Tabla 109 a Tabla 112 se han efectuado para la acción del modelo de carga FLM4 en función del tipo de tráfico (local, media y larga distancia, acorde con la Tabla 3), considerando el número de vehículos pesados por año en función de la categoría de la carretera definida en la Tabla 4, en función del intereje entre costillas (4, 5, 6 y 8 m), y aplicando el criterio de verificación de integridad asegurada considerando la rotura del detalle con consecuencias de fallo graves (γ_{Mf} = 1,35).

Cabría preguntarse, al igual que en el apartado 5.4.2.5, si el detalle de soldadura de la platabanda inferior de la costilla (detalle 2a), así como el detalle 7 de soldadura del puntal a las cartelas superior o inferior, verdaderamente necesita verificación frente a fatiga, ya que ambos detalles trabajan comprimidos bajo acciones permanentes y la sobrecarga de tráfico sólo puede comprimirlos aún más, por lo que parece difícil que se pueda propagar una fisura por fatiga (ver 2.2.2.2).

En la Tabla 109 se resumen las categorías mínimas necesarias para que, con el dimensionamiento estricto anterior, se satisfaga el ELU de fatiga en cada detalle de la sección de unión de la costilla con el cajón para el modelo de carga FLM4 en sus diferentes composiciones y frecuencias de tráfico analizadas. Se indican en rojo aquellas categorías que superan la máxima posible de cada detalle. Como se puede comprobar, en casi todos los casos se cumple con los detalles analizados, teniendo en cuenta que en ocasiones condiciona la posible presencia de un ojal (detalle 1b frente al detalle 1a), mientras que el detalle 2b cumple siempre.

Tabla 109 **Categoría mínima en platabandas y alma para FLM4 y γ_{Mf} = 1,35**

Intereje [m]	IMD (10^6 vp/año)	Plat. sup. (1a, 1b)			Alma (4)			Plat. inf. (2a, 2b)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	57	76	80	50	67	71	43	57	60
	0,500	49	57	62	44	51	55	37	43	47
	0,125	36	45	48	<36	40	43	<36	<36	36
	0,050	<36	<36	38	<36	<36	<36	<36	<36	<36
5	2,000	41	53	56	40	52	54	<36	<36	<36
	0,500	<36	41	43	<36	40	42	<36	<36	<36
	0,125	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
6	2,000	41	53	55	42	54	57	<36	<36	<36
	0,500	<36	41	43	<36	42	44	<36	<36	<36
	0,125	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
8	2,000	46	57	63	41	51	55	<36	<36	<36
	0,500	37	46	49	<36	41	43	<36	<36	<36
	0,125	<36	<36	38	<36	<36	<36	<36	<36	<36
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36

En los pocos casos que no cumple, sería preciso modificar la sección respecto de lo estrictamente dimensionado, bien aumentando ligeramente la cuantía de la armadura pasiva transversal de la losa superior (que suele resultar la opción más ventajosa económicamente), bien dando mayores dimensiones a las chapas en cuestión.

Por su parte, la Tabla 110 recoge el daño en la platabanda superior y en la conexión en las proximidades de la unión de la costilla con el cajón (para las secciones procedentes del dimensionamiento estricto) bajo la acción del modelo de carga FLM4 en sus diferentes composiciones y frecuencias de tráfico analizadas.

En este caso se ha optado por evaluar directamente el daño puesto que la categoría de cada detalle está claramente definida: 80 para la platabanda y 90 para el perno, cada una con su correspondiente coeficiente parcial de resistencia a fatiga, γ_{Mf}. Indicar, de nuevo, que no se ha estudiado ningún fenómeno de interacción ya que no hay reglas claras al respecto cuando se recurre al MDA. Se destacan en rojo los pocos casos de incumplimiento que requerirían un aumento del número de conectadores.

Tabla 110 **Daño en platabanda superior y en pernos para FLM4**

Intereje [m]	IMD (10^6 vp/año)	Plat. Sup, 3a. (cat. 80, γ_{Mf} = 1,35)			Pernos, 3b (cat. 90, $\gamma_{Mf,s}$ = 1,00)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	0,123	0,738	1,230	0,477	1,751	2,488
	0,500	0,031	0,185	0,308	0,119	0,438	0,622
	0,125	0,008	0,046	0,077	0,030	0,109	0,156
	0,050	0,003	0,018	0,031	0,012	0,044	0,062
5	2,000	0,000	0,000	0,000	0,117	0,413	0,567
	0,500	0,000	0,000	0,000	0,029	0,103	0,142
	0,125	0,000	0,000	0,000	0,007	0,026	0,035
	0,050	0,000	0,000	0,000	0,003	0,010	0,014
6	2,000	0,000	0,000	0,000	0,200	0,647	0,858
	0,500	0,000	0,000	0,000	0,050	0,162	0,215
	0,125	0,000	0,000	0,000	0,013	0,040	0,054
	0,050	0,000	0,000	0,000	0,005	0,016	0,021
8	2,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,068	0,101
	0,500	0,000	0,000	0,000	0,004	0,017	0,025
	0,125	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,006
	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,003

En lo referente a las secciones intermedias, entre el puntal y la unión con el cajón, sometidas a flexión positiva y tracción, la fibra más susceptible de sufrir daño es toda junta transversal que se practique en la platabanda inferior. Se constata que las tensiones tangenciales apenas inducen daño. Asimismo, la doble comprobación en las fibras con pernos queda satisfecha mediante el uso de Ø22 siendo la única variable su espaciamiento.

Tabla 111 **Categoría mínima en platabanda inferior y alma para FLM4 y γ_{Mf} = 1,35**

Intereje [m]	IMD (10^6 vp/año)	Alma (4)			Plat. sup. (8)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	<36	<36	38	52	69	73
	0,500	<36	<36	<36	45	52	56
	0,125	<36	<36	<36	<36	41	43
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36
5	2,000	<36	<36	<36	50	65	68
	0,500	<36	<36	<36	41	50	53
	0,125	<36	<36	<36	<36	39	41
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36
6	2,000	<36	44	45	51	66	68
	0,500	<36	<36	<36	44	50	53
	0,125	<36	<36	<36	<36	<36	<36
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36
8	2,000	<36	40	44	51	63	69
	0,500	<36	<36	<36	40	51	54
	0,125	<36	<36	<36	<36	39	41
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36

En cuanto al puntal, es habitual el empleo de secciones huecas rematadas en un pico de flauta que muerde sendas cartelas que entroncan con la costilla y el cajón (Figura 182 y Figura 183). Este detalle precisa un ojal en las alas del puntal para que el final de la cartela no suponga un punto de concentración de tensiones, tal y como se describió en 4.11.2. Precisamente es este detalle (de categoría 71) el que condiciona la verificación de la sección, y no la soldadura en ángulo del perfil a las cartelas (de categoría mayor). En función del escenario de tráfico, el dimensionamiento a fatiga puede llegar a ser más exigente que el de ELS y ELU. En la Tabla 112 se resumen las categorías estrictas requeridas en los puntales para el modelo de tráfico FLM4 y las secciones referidas en laFigura 183. En rojo se indican las categorías incompatibles con el detalle habitual, que requeriría el sobredimensionamiento por fatiga del perfil del puntal.

Tabla 112 **Categoría mínima en puntales para FLM4 y γ_{Mf} = 1,35**

IMD (10^6 vp/año)	Intereje 4 m			Intereje 5 m			Intereje 6 m			Intereje 8 m		
	TL	MD	TL	MD	LD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
2,000	56	74	78	53	69	72	56	72	75	59	73	80
0,500	48	56	60	44	53	56	48	55	58	46	58	62
0,125	<36	44	47	<36	41	43	<36	43	45	<36	45	48
0,050	<36	<36	37	<36	<36	<36	<36	<36	36	<36	<36	38

Hay que llamar la atención sobre el ángulo del puntal. Cuanto más tendido sea, obligado por un cajón con menor canto, mayor será el axil de compresión que lleve, lo cual puede obligar a secciones desproporcionadas. En esos casos, puede ser más razonable recurrir a secciones transversales con cajones multicelulares o a tableros con varios cajones o con sección multi-jácena, que permitan reducir el voladizo, eliminando así la necesidad del empleo de costillas y puntales inclinados.

6 EJEMPLOS

En este último capítulo se incluyen dos ejemplos de aplicación en los que se detallan pormenorizadamente las verificaciones a fatiga de los principales elementos, en el primer caso en un tablero isostático con sección cajón mixto y en el segundo caso en un tablero continuo de tres vanos con sección bijácena y doble acción mixta.

6.1 Puente isostático mixto con sección cajón

En este ejemplo se desarrolla en detalle el caso de un tablero isostático con sección cajón mixta y canto constante. El análisis cubrirá el resumen del dimensionamiento cumpliendo el resto de estados límite y el análisis a fatiga de los principales elementos.

6.1.1 Definición geométrica

6.1.1.1 Alzado y sección transversal

El puente analizado presenta las características siguientes:

- Luz de 45,5 m
- Sección transversal de 10,60 m de anchura total, con calzada de 8,00 m y aceras de 1,00 m, más 0,30 m para albergar las barandillas
- Tablero constituido por un cajón metálico en acero S355 de 1,65 m de canto de metal, ancho superior 4,50 m (más vuelos de platabandas de 0,20 m a cada lado), ancho inferior 3,50 m y losa superior de hormigón armado conectada al cajón de 0,28 m de espesor en el eje de la sección y 0,18 m en los bordes de los vuelos

En la Figura 189 y la Figura 190 se representan el alzado y la sección transversal, respectivamente, del puente.

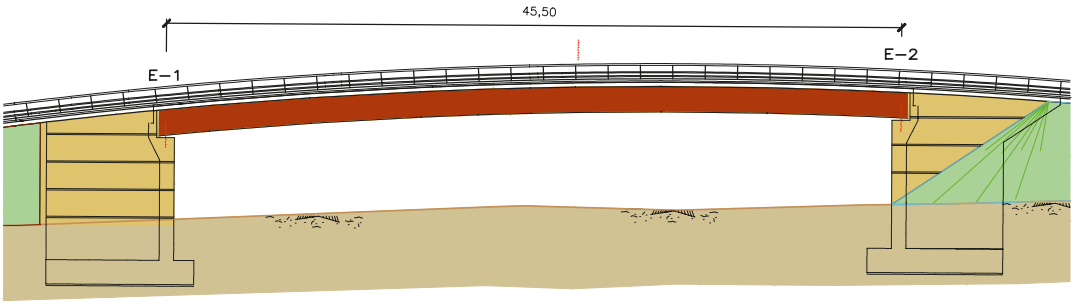


Figura 189 **Alzado**

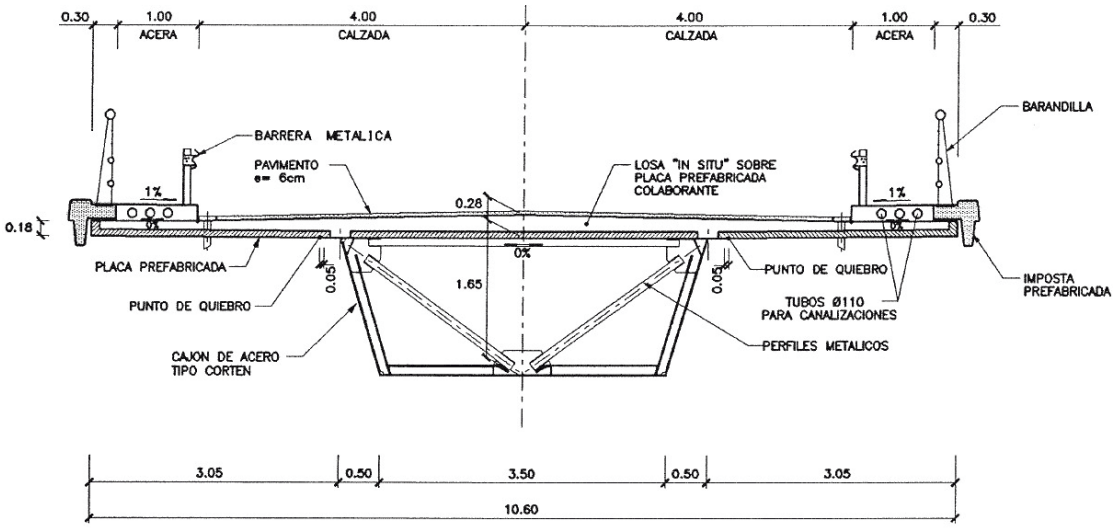


Figura 190 **Sección transversal**

6.1.1.2 Estructura metálica principal

La definición de las chapas principales del cajón metálico, resultante del dimensionamiento cumpliendo ELS y ELU (salvo fatiga), es la que se resume a continuación, y se ilustra con la Figura 191 y la Figura 192:

- Platabandas superiores: 2 chapas de 400 mm de ancho y espesor variable entre 15 mm en apoyos y 25 mm en centro de vano
- Almas con espesor de 15 mm en 2,50 m desde el eje de apoyo, 12 mm en los siguientes 7,50 m, 10 mm en los siguientes 7,50 m y 8 mm en los 5,25 m a cada lado del eje de simetría en el centro del vano
- Chapa de fondo con espesor de 15 mm en 4,00 m desde el eje del apoyo, 20 mm en los siguientes 4,00 m, 25 mm en los 4,00 m siguientes, 30 mm en los 6,00 m siguientes y 35 mm en los últimos 4,75 m junto al eje de simetría en el centro del vano
- Célula superior de 10 mm de espesor en toda la longitud

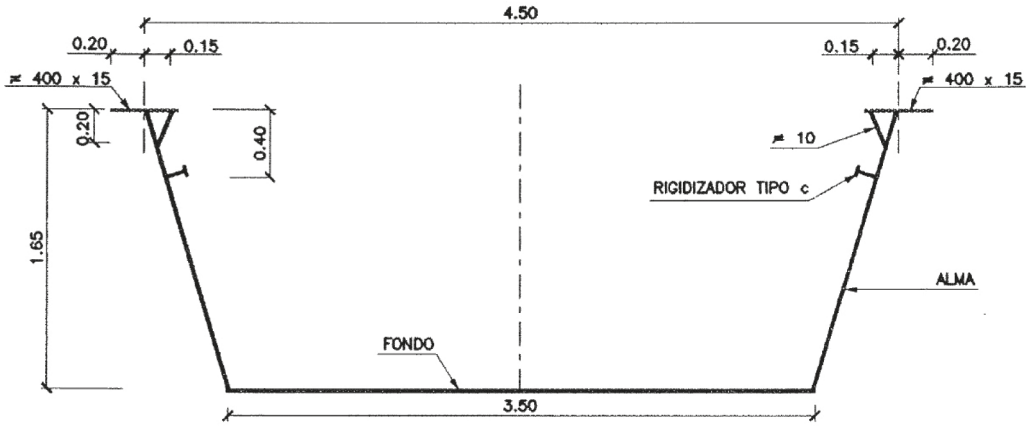


Figura 191 **Sección tipo del cajón**

Para evitar la distorsión del cajón metálico, se disponen celosías transversales tipo M cada 5,05 m (Figura 187).

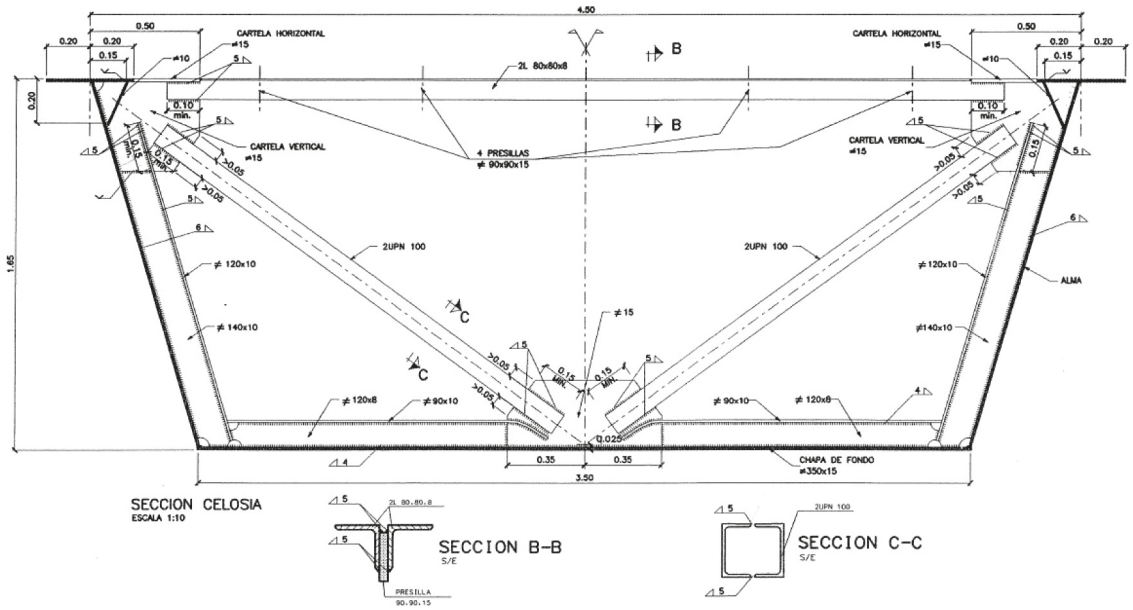


Figura 192 **Definición de celosías**

Debido a la moderada anchura del tablero, la losa superior flecta transversalmente apoyada en las platabandas superiores, y se ejecuta sobre prelosas prefabricadas de ancho completo, como suele ser habitual en este tipo de tableros.

6.1.2 Acciones consideradas

Se presentan a continuación las acciones aplicadas sobre la estructura:

Peso propio:

- Peso propio de metal: 150 kp/m^2, lo que se traduce en 15,9 kN/m actuando sobre sección metálica. Este peso incluye no sólo el de las chapas principales sino también el de los rigidizadores de almas y fondo, celosías verticales y horizontales y mamparos de apoyos
- Peso propio de la losa: teniendo en cuenta el espesor de 0,28 m en el centro y 0,18 m en los extremos, se obtiene un área de 2,438 m^2, es decir, 60,95 kN/m

  La losa se ejecuta en dos fases:

  - En primer, lugar se colocan las prelosas de ancho completo y se hormigona la zona de losa ubicada entre las platabandas superiores, hasta lograr la conexión con el cajón metálico inferior. Este peso actúa sobre sección metálica
  - El resto de la losa, los voladizos, se hormigona sobre sección parcialmente mixta: cajón inferior y losa entre platabandas superiores

Cargas muertas:

- Carga muerta nominal (actuando sobre la estructura mixta completa):
  - Aceras en 2 lados con 1,30 m de ancho, 0,25 m de espesor y 25 kN/m^3 de peso específico del hormigón armado:

    $$2 \cdot 1{,}30 \cdot 0{,}25 \cdot 25 = 16{,}25 \text{ kN/m}$$

  - Barandillas e impostas en 2 lados, con peso estimado de 8 kN/m por cada lado. Se obtiene una carga total de 16 kN/m
  - Barreras interiores en 2 lados con peso de 1,5 kN/m. Se obtiene una carga total de 3 kN/m
  - Pavimento con 8 m de ancho, 0,06 m de espesor y 23 kN/m^3 de peso específico:

    $$8 \cdot 0{,}06 \cdot 23 = 11{,}04 \text{ kN/m}$$

  Carga muerta nominal total: 46,29 kN/m
- Incremento de pavimento: 50% acorde con 5.2.3(3) del borrador del Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-1 actuando sobre la estructura mixta: 5,52 kN/m

Sobrecarga de tráfico:

- Sobrecarga LM1: se toma como carril virtual 1 una banda de 3 m desde el bordillo derecho. El ancho de calzada de 8 m permite otro carril virtual de 3 m y un área remanente adicional de 2 m

- Sobrecarga uniforme en el carril virtual 1 de 9 kN/m² en 3 m: se aplica como una carga vertical y un torsor respecto del eje del cajón, debido a la excentricidad del centro del carril virtual de 2,5 m:

  Carga vertical : $9\ kN/m^2 \cdot 3\ m = 27\ kN/m$

  Torsor asociado = $27\ kN/m\ (4-1{,}5)m = 67{,}5\ kNm/m$

- Sobrecarga uniforme en el carril virtual 2 de 2,5 kN/m² en 3 m: se aplica como una carga vertical y un torsor respecto del eje del cajón, debido a la excentricidad del centro del carril virtual de –0,5 m:

  Carga vertical: $2{,}5\ kN/m^2 \cdot 3m = 7{,}5\ kN/m$

  Torsor asociado = $7{,}5\ kN/m\ (4-3-1{,}5)m = -3{,}75\ kN/m$

- Sobrecarga uniforme en el área remanente: se aplica como una carga vertical de 2,5 kN/m² en los 2 m remanentes y su torsor asociado, debido a la excentricidad del centro área remanente de –3,0 m:

  Carga vertical: $2{,}5\ kN/m^2 \cdot 2m = 5\ kN/m$

  Torsor asociado = $5\ kN/m\ (-3{,}0)m = -15\ kNm/m$

- Combinación de sobrecarga uniforme para pésimo flector y pésimo cortante, cargando los dos carriles virtuales y el área remanente:

  Carga vertical: $27 + 7{,}5 + 5 = 39{,}5\ kN/m$

  Torsor asociado = $67{,}5 - 3{,}75 - 15 = 48{,}75\ kNm/m$

– Combinación de sobrecarga uniforme para pésimo torsor, cargando sólo el carril virtual 1:

  Carga vertical: $27\ kN/m$

  Torsor asociado = $67{,}5\ kNm/m$

- Vehículo pesado en carril virtual 1: cada uno de los dos ejes se aplica como una carga vertical de 300 kN y su torsor asociado respecto del eje del cajón:

  Carga vertical (por eje) : $300\ kN$

  Torsor asociado = $300\ (4-1{,}5)\ m = 750\ kNm/m$

- Vehículo pesado en carril virtual 2: cada uno de los dos ejes se aplica como una carga vertical de 200 kN y su torsor asociado respecto del eje del cajón:

  Carga vertical (por eje) : $200\ kN$

  Torsor asociado = $200\ (4-3-1{,}5) = -100\ kNm/m$

- Combinación de vehículo pesado para pésimo flector y pésimo cortante: cargando los carriles virtuales 1 y 2

  Carga vertical (por eje) : $200\ kN$

  Carga vertical (por eje) : $300 + 200 = 500kN$

  Torsor asociado = $750-100 = 650\ kNm/m$

- Combinación de vehículo pesado para pésimo torsor: cargando sólo el carril virtual 1

$$\text{Carga vertical (por eje)} : 300 \text{ kN}$$

$$\text{Torsor asociado} = 750 \text{ kNm/m}$$

Modelo de fatiga:

– Sobrecarga de fatiga FLM3, asociada al análisis simplificado mediante el Método del Daño Equivalente: cada uno de los cuatro ejes (ver Figura 13) se aplica como una carga vertical de 120 kN y su torsor asociado, aplicado en el carril virtual 1:

$$\text{Carga vertical (por eje)} : 120 \text{ kN}$$

$$\text{Torsor asociado} = 120\ (4 - 1{,}5) = 300 \text{ kNm/m}$$

Estas cargas sólo pueden ocupar una posición en el tablero (posiciones mutuamente excluyentes).

6.1.3 Resumen de esfuerzos

En los gráficos siguientes se incluyen los resultados de los esfuerzos de los momentos flectores y cortantes en los casos de carga fundamentales y de las envolventes (Figura 193, Figura 194, Figura 195, Figura 196, Figura 197 y Figura 198):

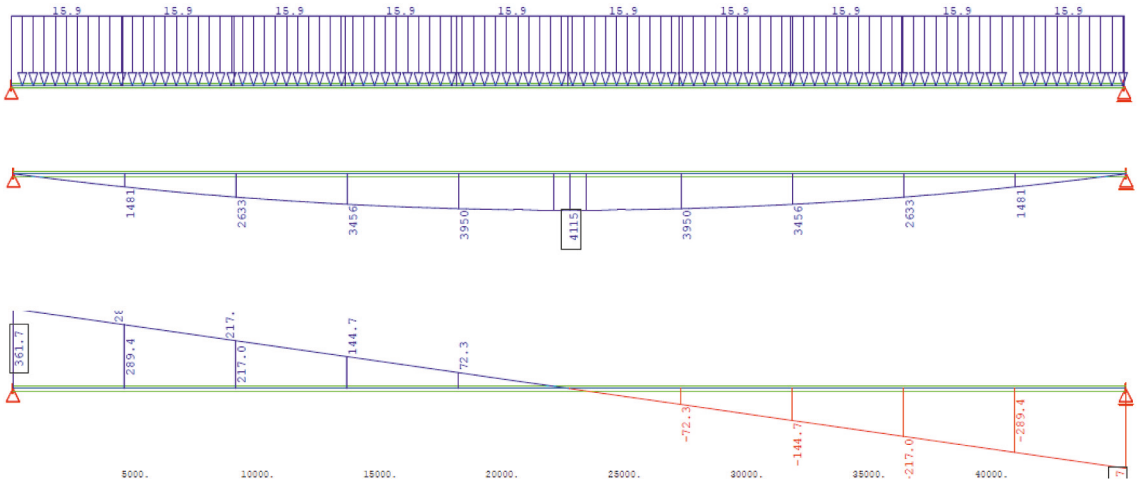


Figura 193 **Peso de metal: carga aplicada, flectores y cortantes**

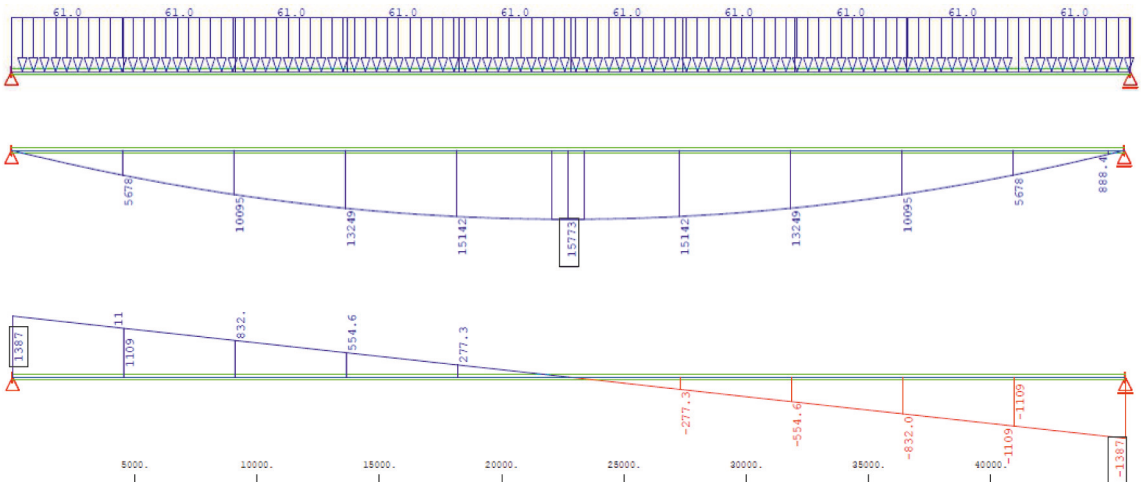


Figura 194 **Peso de losa: carga aplicada, flectores y cortantes**

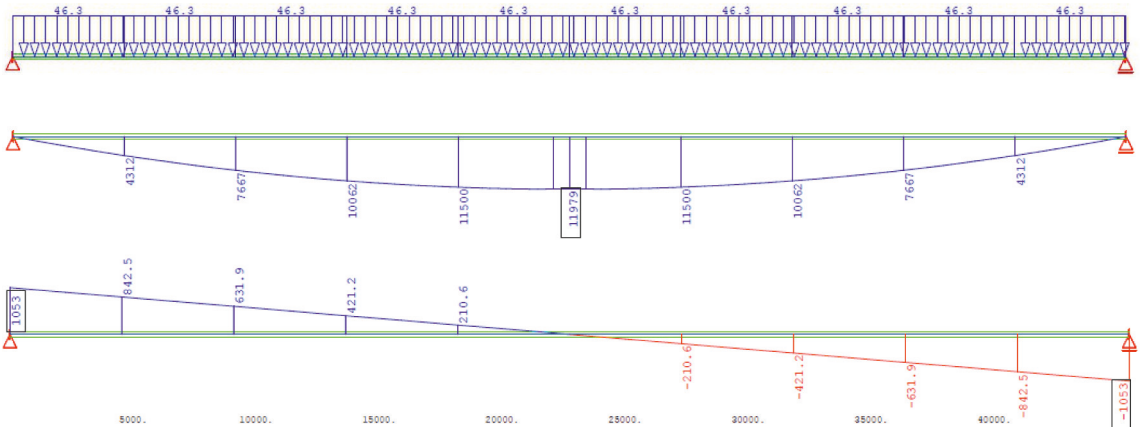


Figura 195 **Carga muerta nominal: carga aplicada, flectores y cortantes**

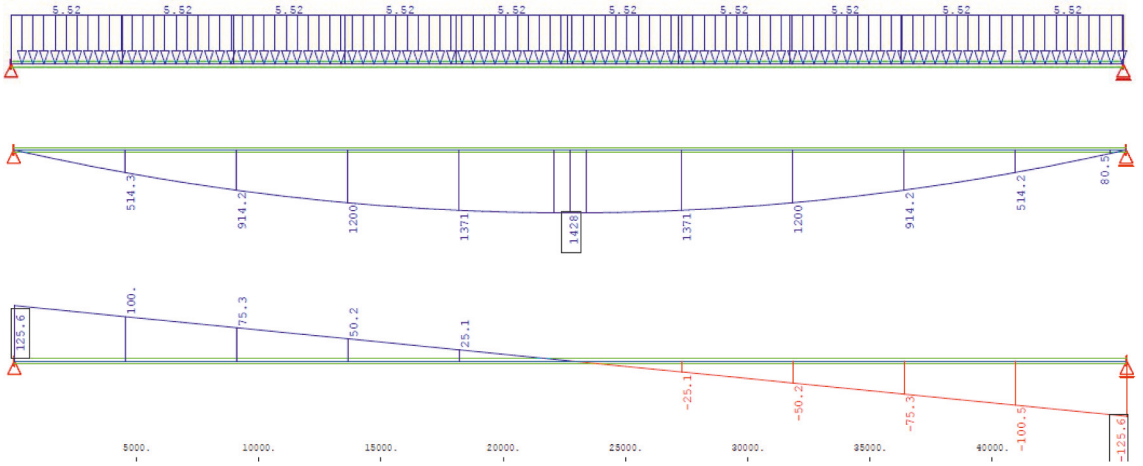


Figura 196 **Incremento de pavimento: carga aplicada, flectores y cortantes**

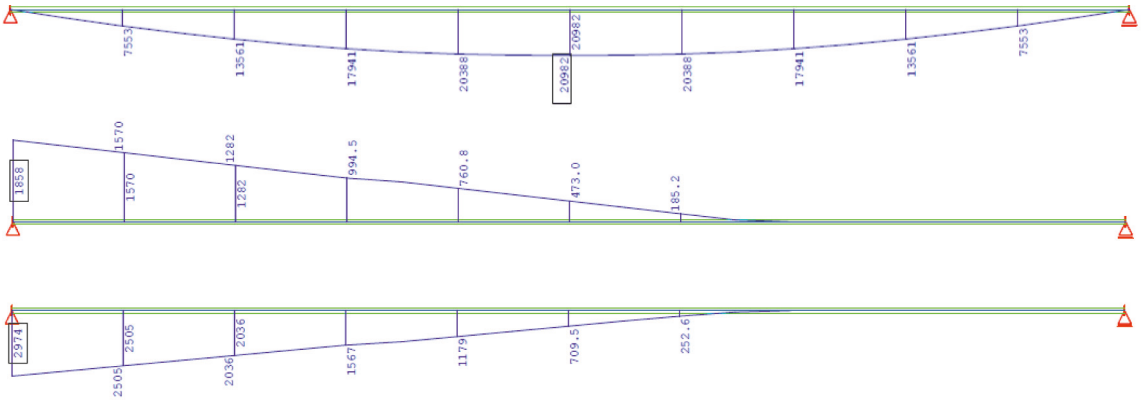


Figura 197 **Sobrecarga LM1: envolventes de flectores, cortantes y torsores**

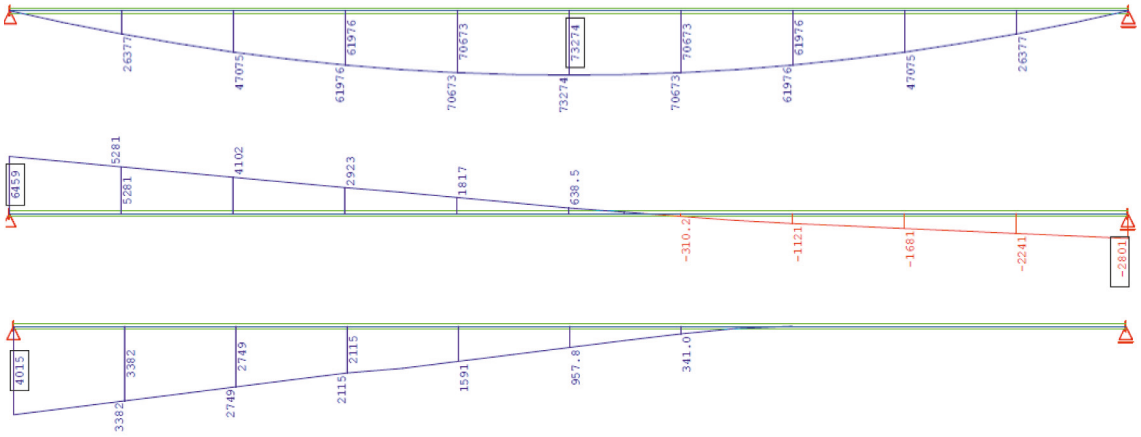


Figura 198 **ELU: envolventes de flectores, cortantes y torsores**

6.1.4 Verificaciones seccionales básicas

A continuación se resumen las principales verificaciones a nivel resistente en ELU y de control tensional en ELS. Para el cálculo de tensiones normales se tendrán en cuenta tanto la secuencia constructiva como las redistribuciones de tensiones a nivel interno seccional por efectos reológicos.

6.1.4.1 Sección de centro de vano

Verificación del Estado Límite Último:

- Esfuerzos solicitantes de cálculo en ELU:
  - Momento flector: $M_{y,Ed}$ = 73 274,0 kNm
  - Cortante: $V_{z,Ed}$ = 638,5 kN
  - Torsor: $M_{x,Ed}$ = 830,1 kNm

- Cortante de cálculo equivalente por alma:

$$V_{z,Ed} \text{ por alma} = \frac{638,5}{2\,\text{almas}} + \frac{830,1}{2 \cdot 4} = 423,01 \text{ kN}$$

- Esfuerzos resistentes:
  - $M_{y,Rd}$ = 81 500,0 kNm
  - $V_{z,Rd}$ = 2 100,0 kN (por alma)

Conclusión de las verificaciones del ELU de flexión y cortante en la sección de centro de vano: la sección cumple para los esfuerzos de cálculo considerados aisladamente $M_{y,Ed}$ y $V_{z,Ed}$, y además no hay que estudiar la interacción flector–cortante, al ser $V_{z,Ed} < 0,5\ V_{z,Rd}$, luego se verifica el ELU.

Verificación del Estado Límite de Servicio:

- Tensión normal en la chapa de fondo en combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = 262,0 MPa < $f_y / \gamma_{M,ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2

- Tensión normal en platabandas superiores en combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = –278,8 MPa: | $\sigma_{Ed,ser}$ | < $f_y / \gamma_{M.ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2

- Además se cumple también con 7.3(2) de UNE-EN 1993-2, en la que se establece que la variación de tensiones producida por la combinación frecuente de acciones:

  $\Delta\sigma_{frec} < 1,5\ f_y / \gamma_{M,ser}$

6.1.4.2 Sección de apoyos

Verificación del Estado Límite Último:

- Esfuerzos solicitantes de cálculo en ELU:
  - Momento flector:

    $M_{y,Ed}$ = 0 kNm
  - Cortante máximo y torsor concomitante:

    $V_{z,Ed,\max}$ = 6 459,0 kN y $M_{x,Ed,Conc}$ = 3 181,0 kNm
  - Torsor máximo y cortante concomitante:

    $M_{x,Ed,\max}$ = 4 015,0 kNm y $V_{z,Ed,Conc}$ = 5 388,0 kN
- Cortante de cálculo equivalente por alma:

$$V_{z,Ed} \text{ por alma} = \frac{6\,459,0}{2\,\text{almas}} + \frac{3\,181,0}{2 \cdot 4} = 3\,621,13 \text{ kN}$$

- Esfuerzos resistentes:

$$V_{z,Rd} = 4\,040{,}0 \text{ kN (por alma)}$$

Conclusión de las verificaciones del ELU de cortante en la sección de apoyos: la sección cumple para los esfuerzos de cálculo considerados.

Verificación del Estado Límite de Servicio:

- Tensión tangencial en el alma en la combinación de acciones característica:

$\tau_{Ed,ser} = V_{z,Ed,ser} / A_w = 108{,}38$ MPa $< f_y / (\sqrt{3}\ \gamma_{M,ser}) = 206{,}7$ MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2

6.1.4.3 Conexión

- Características de los pernos conectadores:
  - Acero S235J2 + C450
  - $f_y > 350$ MPa y $f_u > 450$ MPa
  - Ø = 22 mm
  - $h = 180$ mm
- Hormigón de la losa: $f_{ck} = 30$ MPa
- Resistencia de un perno:

$P_{Rd} = 109{,}47$ kN acorde con la expresión (6.18) de UNE-EN 1994-2

con $\gamma_v = 1{,}25$ acorde con Anejo Nacional de 6.6.3.1(1) de UNE-EN 1994-2

- Axil parcial que es necesario conectar en la sección de centro de vano: 49 000,0 kN, correspondiente a la losa y sus redondos (la fibra neutra plástica se halla entre la platabanda superior y el alma).
- Número total de pernos por alma: 224 unidades, repartidas en 22,75 m (medio vano), lo que se traduce en un valor medio de unos 10 pernos por metro y alma. Su disposición real será de forma afín a la envolvente de cortantes, sumando el efecto adicional de la torsión y coordinando su implantación con las prelosas (para el desarrollo de este ejemplo se trabajará con el valor medio en las comprobaciones de fatiga).

6.1.5 Análisis longitudinal a fatiga por el Método Simplificado

A continuación se recogen las envolventes de esfuerzos correspondientes al paseo del vehículo de fatiga FLM3 (4.6.4 de UNE-EN 1991-2 y apartado 3.2.3 de esta guía) por el carril virtual 1 (Figura 199). Posteriormente se analizan en detalle las secciones fundamentales a fatiga por el MS, y se generaliza el estudio a todo el tablero.

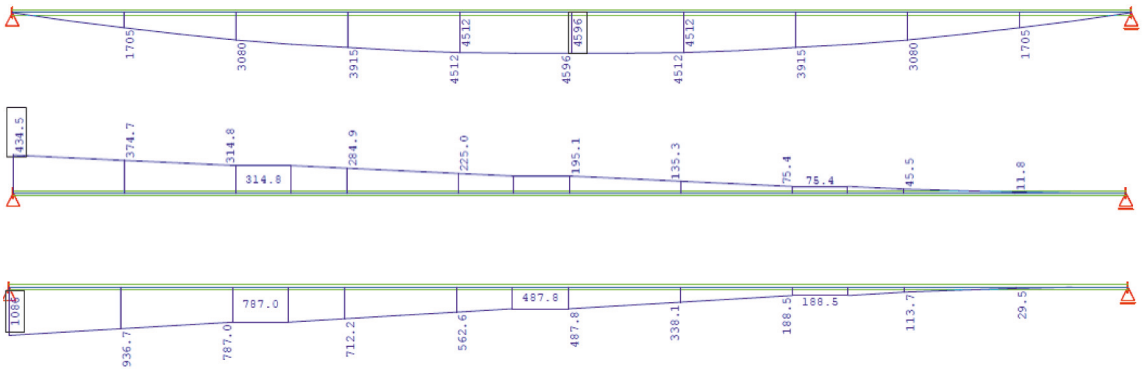


Figura 199 **Sobrecarga FLM3: envolventes de flectores, cortantes y torsores**

6.1.5.1 Sección de centro de vano

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal en la chapa de fondo en centro de vano, situada a 186,5 cm de la cara superior de la losa. Sólo se examinarán las tensiones normales porque las tensiones tangenciales son despreciables

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

    $I_{y,G}$ = 30 498 148,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 55,13 cm (desde la cara superior de la losa)
- Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3 (concomitantes):
  - Momento flector: $\Delta M_{y,FLM3}$ = 4 596,0 kNm
  - Cortante: $\Delta V_{z,FLM3} \sim$ 0 kN
  - Torsor: $\Delta M_{x,FLM3} \sim$ 0 kNm
- Oscilación tensional normal en la fibra de control, debida al FLM3:

$$\Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)=\frac{4\,596{,}0\left(1{,}865-0{,}5513\right)}{30\,498\,148\cdot10^{-8}}10^{-3}=19{,}80\ \text{MPa}$$, con γ_{Ff} = 1,0

Coeficiente de daño equivalente:

De acuerdo con 3.4.1.3:

- Coeficiente λ_1: conforme a la figura 9.5 de UNE-EN 1993-2 para secciones de vano (Figura 25):

$$\lambda_1 = 2{,}55 - 0{,}70\,\frac{L-10}{70} = 2{,}55 - 0{,}70\,\frac{45{,}5-10}{70} = 2{,}195$$

- Coeficiente λ_2: depende del escenario de tráfico, de acuerdo con la expresión (35) (expresión (9.10) de UNE-EN 1993-2).

  En la Tabla 113 se reflejan todos los valores posibles suponiendo, por un lado, circulación exclusiva del vehículo FLM3 ($Q_{m1} = 480$ kN) y, por otro, la calibración del FLM3 con un tráfico equivalente del modelo FLM4 con sus 3 posibles repartos de composición de tráfico, larga distancia, media distancia y tráfico local, acorde con la Tabla 3 (tabla 4.7 de UNE-EN 1991-2), y cada caso con distintas intensidades de tráfico, acorde con la Tabla 4 (tabla 4.5 (n) de UNE-EN 1991-2).

Tabla 113 **Coeficiente λ_2 para modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario	FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
Q_{m1} [kN]	480,00	445,40	406,98	316,69
N_{obs} [10^6 veh/año]	λ_2			
0,05	0,6310	0,5855	0,5350	0,4163
0,125	0,7579	0,7032	0,6426	0,5000
0,50	1,0000	0,9279	0,8479	0,6598
2,00	1,3195	1,2244	1,1188	0,8706

- Coeficientes λ_3 y λ_4: se toman iguales a la unidad al proyectar para 100 años de vida útil (9.5.2(5) de UNE-EN 1993-2) y suponer circulación exclusiva de vehículos pesados por el carril virtual 1 (9.5.2(6) de UNE-EN 1993-2). De todas formas, como ya se explicó en 3.4.1.7 y en la Tabla 14, suponer, como indica UNE-EN 1991-2, un 10% del tráfico pesado circulando por el carril virtual 2 (ver 3.2) implica que λ_4 = 1,02, admitiendo que el tráfico que adelanta es de igual peso que el más excéntrico

- Coeficiente λ_{max} = 2,00 conforme a la figura 9.6 de UNE-EN 1993-2 para secciones de vano (Figura 26).

El valor del coeficiente λ se obtiene acorde con la expresión (34), que vuelve a reproducirse más abajo. En la Tabla 114 se indican subrayados los casos en los que condiciona el valor del límite superior λ_{max}

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4 \qquad \lambda \leq \lambda_{max}$$

Tabla 114 **Coeficiente λ para modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} [10^6 veh/año]	0,05	1,3850	1,2851	1,1743	0,9137
	0,125	1,6635	1,5436	1,4104	1,0975
	0,50	2,0000	2,0000	1,8611	1,4482
	2,00	2,0000	2,0000	2,0000	1,9109

Categoría mínima resultante para cada escenario:

Aplicando el Método Simplificado descrito en 3.4.1, se deduce la expresión (65), de las expresiones (28) y (30), el valor de la categoría del detalle mínima $\Delta\sigma_C$ a exigir al elemento de estudio:

$$\Delta\sigma_C \geq \left(\gamma_{Mf}\ \gamma_{Ff}\ \Delta\sigma_{E,2} = \gamma_{Mf}\ \lambda\ \Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)\right) \tag{65}$$

con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35, correspondiente al criterio de evaluación a fatiga con integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 5).

En la Tabla 115 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima $\Delta\sigma_C$ para las distintas composiciones de tráfico analizadas.

Tabla 115 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} [10^6 veh/año]	0,05	37,02	34,35	31,39	24,42
	0,125	44,46	41,26	37,70	29,34
	0,50	53,46	53,46	49,75	38,71
	2,00	53,46	53,46	53,46	51,08

Como se puede comprobar de los resultados de la Tabla 115, en este caso, el resultado de la categoría mínima de fatiga requerida para cualquier composición de tráfico analizado, lleva a valores siempre inferiores a 54, por lo que en general, y siempre que se tengan en cuenta las

recomendaciones de detalles incluidas en el capítulo 4, el dimensionamiento frente a fatiga no condicionará frente a las verificaciones previas realizadas para el resto de Estados Límite.

6.1.5.2 Generalización de la verificación en todo el vano

En este punto se analiza la unión transversal en la chapa de fondo para el resto de secciones del vano, repitiendo el mismo proceso anterior en función de la sección resistente en cada punto. En la Figura 200, Figura 201 y Figura 202 se muestra, para distintas composiciones de tráfico, el producto $\lambda \Delta\sigma\,(\gamma_{Ff} Q_k)$ frente a la categoría del detalle minorada, $\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$, para diferentes valores de la categoría del detalle $\Delta\sigma_C$ = 36, 50, 71 y 80.

La Figura 200 muestra los resultados de la aplicación del MS para una composición de tráfico equivalente al FLM4 con tráfico local (ver Tabla 3), y de forma análoga la Figura 201 muestra los resultados para una composición de tráfico equivalente al FLM4 con tráfico de media distancia (Tabla 3), mientras que la Figura 202 lo hace para tráfico de larga distancia (acorde con la Tabla 3).

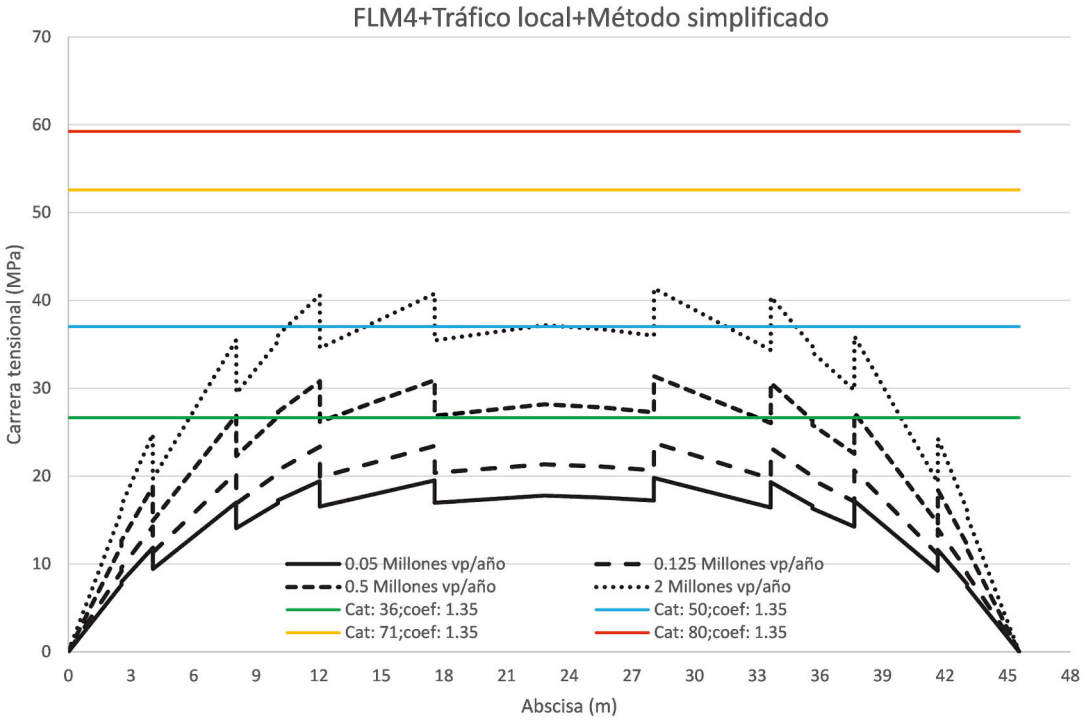


Figura 200 **Análisis de la chapa de fondo para FLM4 con un reparto de tráfico local y MS**

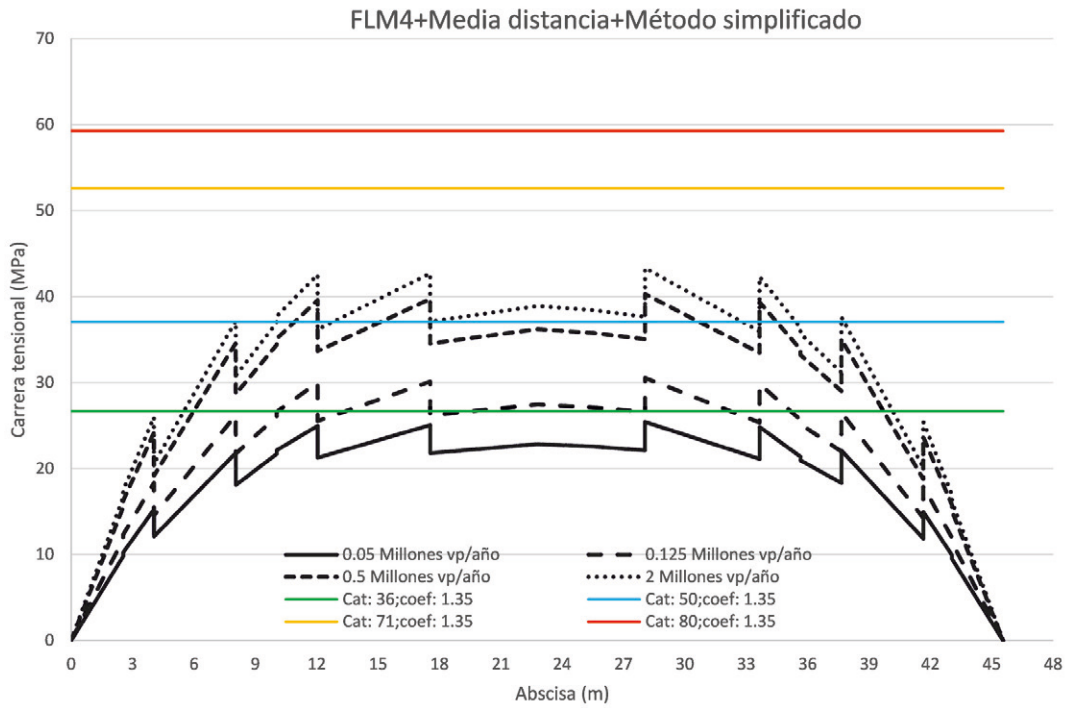


Figura 201 **Análisis de la chapa de fondo para FLM4 con un reparto de tráfico de media distancia y MS**

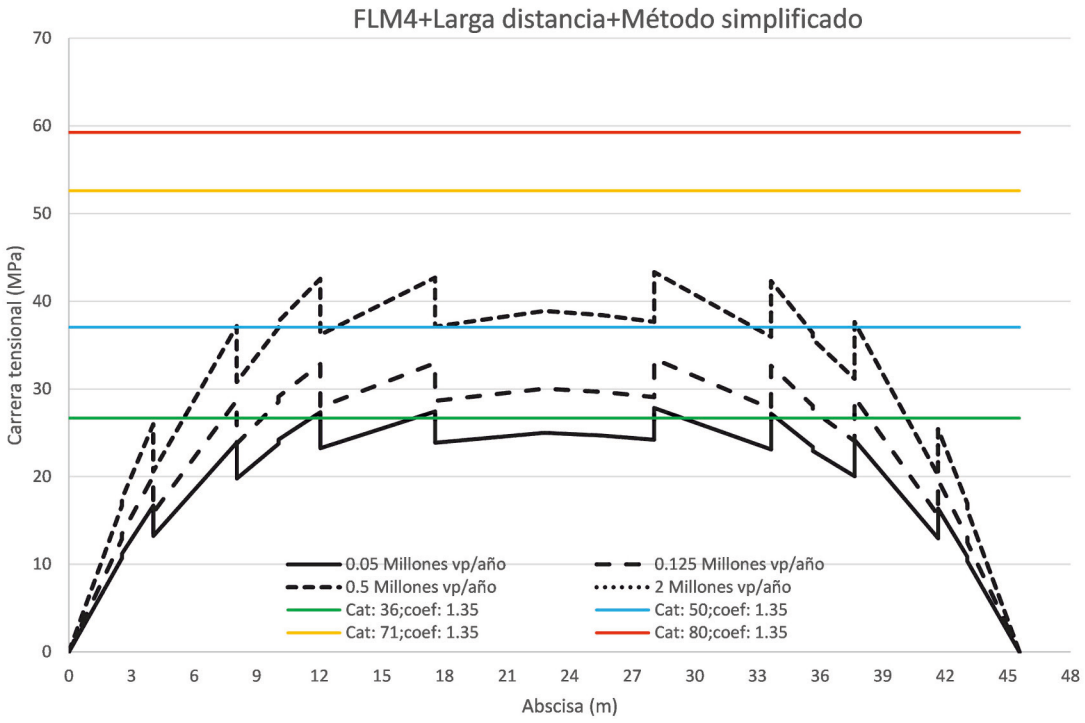


Figura 202 **Análisis de la chapa de fondo para FLM4 con un reparto de tráfico de larga distancia y MS**

En los tres gráficos anteriores se observa cómo en ningún caso se requiere una categoría de fatiga superior a 71, por lo que en general, tal y como se ha descrito en el capítulo 4, el dimensionamiento frente a fatiga no condicionará frente a las verificaciones previas realizadas para el resto de Estados Límite.

Conviene llamar la atención sobre la necesidad de comprobar no sólo la sección de centro de vano, con mayores momentos flectores que el resto, sino también las secciones con cambio de espesores de chapas, que aunque no sean las de mayores esfuerzos solicitantes, al producirse el cambio de espesor pueden llegar a requerir categorías de detalle superiores a las de centro de vano, como se aprecia en los picos de los gráficos de las tres figuras anteriores, que corresponden con secciones con cambio de espesor de chapas.

6.1.5.3 Sección de apoyo: tensiones tangenciales

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:

  Alma de canto = 165 – 2,5 – 1,5 = 161 cm, con espesor de 15 mm

- Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3 (concomitantes):
  - Momento flector: $\Delta M_{y,FLM3}$ = 0 kNm
  - Cortante: $\Delta V_{z,FLM3}$ = 434,5 kN
  - Torsor: $\Delta M_{x,FLM3}$ = 1 086,0 kNm
- Cortante solicitante equivalente por alma:

$$V_{z,FLM3}\,\text{por alma} = \frac{434,5}{2\,\text{almas}} + \frac{1\,086,0}{2 \cdot 4} = 353\,\text{kN}$$

- Oscilación tensional tangencial en la fibra de control, debida al FLM3:

$$\Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right) = \frac{2\,837,0\,\left(1,965 - 0,38\right)}{10\,117\,775 \cdot 10^{-8}}\,10^{-3} = 44,43\,\text{MPa}$$, con γ_{Ff} = 1,0

  admitiendo una distribución rectangular donde sólo el alma resiste tensiones tangenciales

Coeficiente de daño equivalente:

Se calcula de forma análoga que para la sección de centro de vano.

En este caso el valor de λ_{max} será de 2,079, acorde con la imagen derecha de la Figura 26 (Figura 9.6 de UNE-EN 1993-2).

Categoría mínima resultante para cada escenario:

Aplicando el Método Simplificado del daño equivalente descrito en 3.4.1, se deduce la expresión (66), con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35 (integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9).

$$\Delta\tau_C \geq \left(\gamma_{Mf}\ \gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2} = \gamma_{Mf}\ \lambda\ \Delta\tau\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)\ \right) \tag{66}$$

En el peor de los casos, la categoría requerida $\Delta\tau_c$ será de:

$$\Delta\tau_C \geq 1{,}35 \cdot 2{,}079 \cdot 14{,}60\ \text{MPa} = 40{,}97\ \text{MPa}$$

Dado que las categorías habituales para uniones de rasante entre la platabanda y el alma presentan detalles con categoría de fatiga mucho mayores (ver apartado 4.7 y Tabla 35), en este caso el Estado Límite Último de fatiga tampoco resulta condicionante.

6.1.5.4 Sección de apoyo: conexión

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

    $I_{y,G}$ = 18 180 663,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 39,88 cm (desde la cara superior de la losa)
  - Momento estático de la losa (S_{losa}) respecto al centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada (con $n_0 = E_s/E_c \approx 7$):

$$S_{Losa} = \frac{A_{Losa}}{n_0}\left(z_{G,\text{sup}} - z_{G,Losa}\right) = \frac{\left(10{,}60 \cdot 0{,}25\right)}{7}\left(0{,}3988 - 0{,}125\right) = 0{,}1814\ \text{m}^3$$

- Cortante equivalente por alma en apoyos: 353 kN, como ya se vio previamente
- Oscilación de esfuerzo rasante en la interfaz losa-platabanda superior:

$$\Delta r = \frac{\Delta V\ S_{Losa}}{I_{y,G}} = \frac{353 \cdot 0{,}1814}{0{,}18180663} = 302{,}2\ \text{kN/m en cada alma}$$

- Oscilación de tensión tangencial en el vástago de los pernos: admitiendo la distribución plástica de 10 pernos Ø22 por metro y alma, la sección resistente es de:

$$10\ \pi\ \frac{22^2}{4} = 3\,801\ \text{mm}^2/\text{m}$$

con lo cual la tensión tangencial es de:

$$\Delta\tau\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)=\frac{302,2}{3\,801}=0,0795\ \text{kN/mm}^2=79,5\ \text{MPa}$$

Coeficiente de daño equivalente:

De acuerdo con 3.4.2.3:

- Coeficiente $\lambda_{v,1}$ = 1,55 para pernos en vanos de hasta 100 m
- Coeficiente $\lambda_{v,2}$: depende del escenario de tráfico, de acuerdo con 6.8.6.2(4) de UNE-EN 1994-2, según la expresión (43).

  En la Tabla 116 se reflejan todos los valores posibles suponiendo, por un lado, circulación exclusiva del FLM3 (Q_{m1} = 480 kN) y por otra la calibración con tráfico del modelo FLM4 con sus 3 posibles repartos de intensidad de tráfico, larga distancia, media distancia y tráfico local, acorde con la Tabla 3 (tabla 4.7 de UNE-EN 1991-2), y cada caso con distintas intensidades de tráfico, acorde con la Tabla 4 (tabla 4.5 (n) de UNE-EN 1991-2).

Tabla 116 **Coeficiente $\lambda_{v,2}$ para modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario	FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
Q_{m1} [kN]	480,00	445,40	406,98	316,69
N_{obs} [10^6 veh/año]	$\lambda_{v,2}$			
0,05	0,7499	0,7145	0,6719	0,5627
0,125	0,8409	0,8012	0,7535	0,6310
0,50	1,0000	0,9529	0,8960	0,7504
2,00	1,1892	1,1331	1,0656	0,8924

- Coeficientes $\lambda_{v,3}$ y $\lambda_{v,4}$: se toman iguales a la unidad al proyectar para 100 años de vida útil (6.8.6.2(4) de UNE-EN 1994-2 y 9.5.2 (5) de UNE-EN 1993-2) y suponer circulación exclusiva sólo por el carril virtual 1 (6.8.6.2(4) de UNE-EN 1994-2 y 9.5.2 (6) de UNE-EN 1993-2).

El valor del coeficiente λ_v se obtiene a partir de la expresión (42), que vuelve a reproducirse más abajo. Este valor se regoge en la Tabla 117. Recordemos que para pernos conectadores UNE-EN 1994-2 no plantea la utilización de un coeficiente λ_{max}

$$\lambda_v = \lambda_{v,1}\times\lambda_{v,2}\times\lambda_{v,3}\times\lambda_{v,4}$$

Tabla 117 **Coeficiente λ_v para modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} [10^6 veh/año]	0,05	1,1623	1,1075	1,0415	0,8722
	0,125	1,3034	1,2419	1,1679	0,9781
	0,50	1,5500	1,4769	1,3888	1,1631
	2,00	1,8433	1,7564	1,6516	1,3832

Categoría mínima resultante para cada escenario:

Se calcula de acuerdo con la expresión (67), a partir de las expresiones (39) y (41).

$$\Delta\tau_C \geq \left(\frac{\gamma_{Mf,s}\ \gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2}}{\eta_E} = \frac{\gamma_{Mf,s}\ \lambda_v\ \Delta\tau(\gamma_{Ff}\ Q_k)}{\eta_E} \right) \tag{67}$$

con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga $\gamma_{Mf,s}$ = 1,00, de acuerdo con 6.8.2(1) del Anejo Nacional de UNE-EN 1994-1-1, y con η_E = 1,0.

En la Tabla 118 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima $\Delta\tau_c$ para las distintas composiciones de tráfico analizadas.

Tabla 118 **Categoría mínima del detalle $\Delta\tau_C$ [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} [10^6 veh/año]	0,05	92,40	88,05	82,80	69,34
	0,125	103,62	98,73	92,85	77,76
	0,50	123,23	117,41	110,41	92,47
	2,00	146,54	139,63	131,30	109,96

Conforme a estos resultados, la fatiga puede resultar condicionante en bastantes casos (se indican subrayados) puesto que la categoría de fatiga de los pernos conectadores es 90 (detalle 10 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.9); por tanto, una distribución plástica uniforme de la conexión con 10 pernos por metro y alma es insuficiente para la sección de apoyo extremo. De cualquier manera, una distribución razonable de pernos llevaría a disponer en la zona de apoyos (con una longitud del cuarto del vano aproximadamente) entre el 60 y 70% de la capacidad de la conexión (entre 12 y 14 pernos/m y alma), y en la zona de centro de vano (la mitad del vano aproximadamente) entre el 40 y 30% de la capacidad de la conexión (entre 8 y 6 pernos/m y alma). De esta manera la distribución de pernos conectadores se adaptaría mejor a la ley de rasantes elásticos.

Por pura proporcionalidad entre la categoría teórica requerida (Tabla 119), y la categoría normativa de los pernos conectadores, 90 MPa, el redimensionamiento para cada caso arroja los siguientes valores (Tabla 119). Como se puede apreciar, sólo en los casos de mayor intensidad de tráfico ($2{\cdot}10^6$ vehículos pesados al año) puede llegar a ser necesario aumentar los 14 pernos/alma y metro que se obtendrían del dimensionamiento sin tener en cuenta la fatiga (valores subrayados).

Tabla 119 **Distribución de pernos por metro y alma**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} [10^6 veh/año]	0,05	12	10	10	<10
	0,125	12	12	12	<10
	0,50	14	14	14	12
	2,00	18	16	16	14

6.1.6 Análisis longitudinal a fatiga por el Método del Daño Acumulado

En la Tabla 120 se resumen los esfuerzos críticos en las secciones de centro de vano y de apoyo para el paseo, por un lado, del vehículo FML3, y por otro, de los 5 vehículos integrantes del FLM4 (ver 3.2.4 y Tabla 3) por el carril virtual 1. Posteriormente se analizan en detalle dichas secciones a fatiga por el MDA.

Tabla 120 **Resumen de esfuerzos pésimos para FLM3 y FLM4**

Vehículo		FLM3	FLM4a	FLM4b	FLM4c	FLM4d	FLM4e
Carga (kN)		480	200	310	490	390	450
Vano	ΔM_y [kNm]	4596	2174	3292	4679	3686	4173
Apoyo	ΔV_z [kN]	434,5	192,6	280,7	430,0	338,9	372,5
	ΔM_x [kNm]	1086,0	481,6	701,8	1075,0	847,2	931,3

6.1.6.1 Sección de centro de vano

Características de la sección:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

$$I_{y,G} = 30\,498\,148{,}0 \text{ cm}^4 \text{ (referido a } E_s = 2{,}1{\cdot}10^5 \text{ MPa)}$$

- Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

  $z_{G,sup}$ = 55,13 cm (desde la cara superior de la losa).

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal en la chapa de fondo en centro de vano, situada a 186,5 cm de la cara superior de la losa. Sólo se examinarán las tensiones normales porque las tensiones tangenciales son despreciables.

Curva de fatiga:

Para la evaluación del daño acumulado se parte de un detalle con una categoría de fatiga teórica de 56 (del lado de la seguridad ya que en general los detalles de empalme de chapa de fondo deben tener al menos categoría 71 u 80), y de un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35, supuesta integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9.

En este caso, con una categoría de fatiga teórica de 56, los puntos singulares de la curva S-N de fatiga (Figura 17), afectados ya por el coeficiente parcial γ_{Mf} = 1,35 serán los siguientes, calculados acorde con 3.3.2.1:

- para 2 millones de ciclos, categoría del detalle (minorada por γ_{Mf}):

$$\Delta\sigma_C = \frac{56}{1{,}35} = 41{,}48 \text{ MPa}$$

- para 5 millones de ciclos, límite de fatiga bajo amplitud constante (minorado por γ_{Mf}). Punto de cambio de pendiente de la curva S–N de m = 3 a m = 5:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0{,}7368\,\Delta\sigma_C = 30{,}56 \text{ MPa}$$

- para 100 millones de ciclos, umbral de daño (minorado por γ_{Mf}). Punto de cambio de pendiente de la curva S–N de m = 5 a $m \to \infty$:

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0{,}5493\,\Delta\sigma_D = 0{,}4047\,\Delta\sigma_C = 16{,}79 \text{ MPa}$$

A partir de estos puntos, y aplicando la propiedad de la expresión (21), es posible determinar el número de ciclos resistentes N_R para cada una de las carreras de tensión $\Delta\sigma$:

- Si $\Delta\sigma \geq \Delta\sigma_D$, tramo con m = 3 y:

$$N_R = 5\cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma}\right)^{1/3} = 2\cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma}\right)^{1/3}$$

- Si $\Delta\sigma_D \geq \Delta\sigma \geq \Delta\sigma_L$, tramo con m = 5 y:

$$N_R = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma} \right)^{1/5} = 100 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma} \right)^{1/5}$$

- Si $\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$, $N_R \rightarrow \infty$ y por tanto esa carrera de tensión ($\Delta\sigma$) no produce daño alguno

Carrera tensional normal en la fibra de control y número de ciclos de rotura:

Al tratarse de un vano isostático, cada paso de un vehículo pesado genera un ciclo de variación de tensión máxima, cuando se alcanza el valor de $M_{y,\max}$, coincidiendo con la carga del vehículo pesado en el centro del vano.

La carrera de tensión $\Delta\sigma$ ($\gamma_{Ff} Q_k$) que producirá cada vehículo de fatiga tipo definido en la Tabla 120, en el vano isostático, se obtiene según la expresión (68) y su resultado se incluye en la Tabla 121.

$$\Delta\sigma \left(\gamma_{Ff} \, Q_k \right) = \frac{M_y}{I_{yG}} z_{G,\text{inf}} \tag{68}$$

donde:

M_y momento flector producido en el centro del vano por el vehículo analizado

I_{yG} momento de inercia de la sección mixta del centro de vano homogeneizada

$z_{G,inf}$ distancia de la fibra inferior del cajón al centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada

En la Tabla 121 se resume, para cada vehículo tipo analizado, el cálculo de su carrera de tensión $\Delta\sigma$ ($\gamma_{Ff} Q_k$), el número de ciclos que produciría en cada caso la rotura por fatiga N_R, y el valor del daño que produciría una carrera de cada vehículo ($D = 1/N_R$).[4]

4 Hay que remarcar que el análisis del MDA se está haciendo presuponiendo un tráfico tipo en composición e intensidad, ante la ausencia de datos reales de tráfico. En todos los casos, con los vehículos tipo analizados, las carreras de tensión individuales (Tabla 121) quedan por debajo del Límite de Fatiga de Amplitud Constante (D). En el caso de que el tráfico real quedase perfectamente representado por el tráfico tipo analizado, y se pudiera asegurar que nunca a lo largo de la vida útil se llegara a producir una carrera de tensión por encima de $\Delta\sigma_D$, acorde con 1.3.3.3 de UNE-EN 1993-1-9, en estos casos no habría daño y la vida del detalle sería ilimitada. Por tanto, si se tiene la plena y absoluta certeza de que todas las carreras son inferiores a D, la curva de fatiga se simplifica pasando a un tramo horizontal a partir de este punto (línea discontinua en la Figura 17). A la inversa, si al menos una carrera supera este límite, la curva de fatiga es la de tres ramas para tener en cuenta, como ya se explicó en 2.3, el daño adicional causado por las carreras de orden inferior, inicialmente inocuas, a medida que la fatiga progresa.
En general, la situación de que a lo largo de la vida útil se produzca al menos una posibilidad de superar el límite de $\Delta\sigma_D$ es más que razonable, por ejemplo con el paso esporádico de algún vehículo especial con cargas importantes, por lo tanto el ejemplo se desarrollará calculando los daños producidos por las carreras incluidas en la Tabla 121, aunque todas ellas queden por debajo del valor $\Delta\sigma_D$.

Tabla 121 **Cálculo del daño unitario generado por cada vehículo analizado**

Vehículo	$\Delta\sigma\,(\gamma_{Ff}Q_k)$ [MPa]	Control	m	N_R [10^6]	$D = 1/N_R$
FLM3	19,80	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (16,79/19,804)^5 = 43,8210	2,28·10^{-8}
FLM4a	9,185	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4b	13,933	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4c	19,804	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (16,79/19,804)^5 = 43,7775	2,28·10^{-8}
FLM4d	15,601	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4e	17,662	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (16,79/17,662)^5 = 77,5844	1,29·10^{-8}

Cálculo del daño acumulado:

A partir de los daños producidos por cada carrera, es posible determinar el daño acumulado para cada escenario de tráfico del FLM3 y FLM4 en sus tres composiciones de tráfico (Tabla 3), con distintas intensidades de tráfico anual (Tabla 4) y una vida útil de 100 años, simplemente aplicando la expresión (54).

En la Tabla 122 se subrayan los casos en los que el daño resultaría superior a la unidad, incumpliendo a fatiga con la categoría del detalle teórico 56 del que se partió para desarrollar el ejemplo. El resto de casos, en los que el daño es menor de la unidad, cumplirían con holgura a fatiga con ese detalle tipo.

Tabla 122 **Daño acumulado para todos los escenarios de tráfico con $\Delta\sigma_C$ = 56**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	0,114	0,064	0,037	0,009
	0,125	0,285	0,159	0,094	0.022
	0,50	1,140	0,636	0,375	0,089
	2,00	4,561	2,542	1,499	0,357

Obtención de la categoría de fatiga óptima:

Sería posible tantear diferentes valores de categoría para que, en cada escenario de tráfico, se lograra un daño igual a la unidad. También es posible deducirla analíticamente sabiendo que, en este caso, ninguna oscilación tensional entra en el dominio de m = 3. El factor

de corrección de la categoría inicialmente supuesta es, aproximadamente, la raíz quinta del daño. Así, la Tabla 123 muestra las categorías de fatiga óptimas en cada caso, o sea, las que llevan a que el daño acumulado sea igual a uno.

Tabla 123 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	36	32	28	21
	0,125	43	40	37	27
	0,50	65	52	48	37
	2,00	65	66	60	48

Se puede comprobar como en todos los casos, la categoría del detalle se queda bastante por debajo de 71, con lo cual, en general no condicionará nunca el empalme de chapas de fondo, si se respetan los criterios de concepción, ejecución y control establecidos en el capítulo 4.

Comparando estos valores (Tabla 123) con los obtenidos aplicando el Método Simplificado del daño equivalente (ver Tabla 115 en 6.1.5.1), se aprecia que, en aquellos casos en los que gobierna el límite de λ_{max} (Tabla 114), las categorías obtenidas mediante el MS son inferiores a las del MDA, mientras que en el resto de casos el ajuste entre ambos métodos es bastante bueno llevando a valores muy similares.

6.1.6.2 Sección de apoyo: conexión

Se analizará la conexión en la zona de apoyos, sometida a los cortantes equivalentes por alma indicados en la Tabla 124.

Tabla 124 **Resumen de cortantes equivalentes por alma en la sección de apoyo para FLM3 y los distintos vehículos del FLM4**

Vehículo		FLM3	FLM4a	FLM4b	FLM4c	FLM4d	FLM4e
Carga (kN)		480	200	310	490	390	450
Apoyo	$\Delta V_{z,equiv}$ [kN]	353	156,5	228,08	349,34	275,35	302,66

Características de la sección:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

$$I_{y,G} = 18\,180\,663{,}0 \text{ cm}^4 \text{ (referido a } E_s = 2{,}1{\cdot}10^5 \text{ MPa)}$$

- Momento estático de la losa (S_{losa}) respecto al centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada (con $n_0 = E_s / E_c \approx 7$):

$$S_{Losa} = \frac{A_{Losa}}{n_0}\left(z_{G,\text{sup}} - z_{G,Losa}\right) = \left(\frac{10{,}60 \cdot 0{,}25}{7}\right)\left(0{,}3988 - 0{,}125\right) = 0.1814 \text{ m}^3$$

Carrera tensional tangencial $\Delta\tau$:

- Oscilación de esfuerzo rasante en la interfaz losa–platabanda superior:

$$\Delta r = \frac{\Delta V_{z,equiv}\, S_{Losa}}{I_{y,G}} \text{ kN/m en cada alma}$$

- Oscilación de tensión tangencial en el vástago de los pernos:

  admitiendo la distribución plástica de 10 pernos Ø22 por metro y alma, la sección resistente es de:

$$10\pi\frac{22^2}{4} = 3\,801 \text{ mm}^2/\text{m}$$

  con lo cual la tensión tangencial será de:

$$\Delta\tau\left(\gamma_{Ff}\, Q_k\right) = \frac{\Delta r \text{ kN/m}}{3\,801 \text{ mm}^2/\text{m}} 10^3 \text{ MPa}$$

En la Tabla 125 se resume, para cada vehículo tipo analizado, la variación del rasante para la sección de apoyo y la carrera de tensiones tangenciales en los pernos conectadores.

Tabla 125 **Rasantes y tensiones tangenciales en pernos conectadores en sección de apoyo para los vehículos analizados**

Vehículo		FLM3	FLM4a	FLM4b	FLM4c	FLM4d	FLM4e
Carga (kN)		480	200	310	490	390	450
Apoyo extremo	$V_{z,\,equiv}$ [kN]	353	156,5	228,08	349,34	275,35	302,66
	Δr [kN/m]	302,2	156,15	227,59	348,52	274,73	301,98
	$\Delta\tau$ [MPa]	79,50	35,25	51,37	78,668	62,01	68,16

Número de ciclos de rotura:

En la Tabla 126 se resume, para cada vehículo tipo analizado, a partir de la tensión tangencial en la conexión, el daño que provocaría una carrera de cada vehículo. Se recuerda que la curva de fatiga de los pernos (Figura 20) tiene pendiente m = 8 y la categoría del detalle ($\Delta\tau_c$ = 90 MPa, detalle 10 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.9) está referida a 2 millones

de ciclos, con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga $\gamma_{Mf,s}$ = 1,00 (acorde con 6.8.2(1) del Anejo Nacional de UNE-EN 1994-1-1).

Tabla 126 **Cálculo del daño unitario generado por cada vehículo analizado en los pernos conectadores**

Vehículo	$\Delta\tau\,(\gamma_{Ff}\,Q_k)$ [MPa]	N_R [10^6]	$D = 1/N_R$
FLM3	79,50	$2\,(90/79{,}50)^8 = 5{,}3955$	$1{,}853\cdot10^{-7}$
FLM4a	35,25	$2\,(90/35{,}25)^8 = 3611{,}58$	$2{,}769\cdot10^{-10}$
FLM4b	51,37	$2\,(90/51{,}37)^8 = 177{,}539$	$5{,}633\cdot10^{-9}$
FLM4c	78,68	$2\,(90/78{,}68)^8 = 5{,}8621$	$1{,}706\cdot10^{-7}$
FLM4d	62,01	$2\,(90/62{,}01)^8 = 39{,}380$	$2{,}600\cdot10^{-8}$
FLM4e	68,16	$2\,(90/68{,}16)^8 = 18{,}4813$	$5{,}410\cdot10^{-8}$

Cálculo del daño acumulado:

A partir de los daños producidos por cada carrera, es posible determinar el daño acumulado para cada escenario de tráfico del FLM3 y FLM4 en sus tres composiciones de tráfico (Tabla 3), con distintas intensidades de tráfico anual (Tabla 4) y una vida útil de 100 años, aplicando la expresión (54).

En la Tabla 127 se resume el resultado del daño acumulado, y se subrayan los casos en los que el daño resultaría superior a la unidad, incumpliendo a fatiga con la categoría del detalle 90. El resto de casos, en los que el daño es menor de la unidad, cumplirían con holgura a fatiga.

Tabla 127 **Daño acumulado para todos los escenarios de tráfico (pernos en apoyo)**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	0,927	0,475	0,292	0,065
	0,125	2,316	1,187	0,731	0,163
	0,50	9,265	4,747	2,923	0,652
	2,00	37,060	18,989	11,692	2,608

Como sucedió al aplicar el Método Simplificado (6.1.5.4), conforme a estos resultados (Tabla 127), la fatiga puede resultar condicionante en bastantes casos (se indican subrayados), aunque se ha supuesto de forma conservadora una distribución plástica uniforme de la conexión con 10 pernos por metro y alma, lo cual, como ya se comprobó con el MS, es insuficiente para la sección de apoyo extremo. De cualquier manera, una distribución razonable de pernos llevaría a

disponer en la zona de apoyos (con una longitud del cuarto del vano aproximadamente) entre el 60 y 70% de la capacidad de la conexión (entre 12 y 14 pernos/m y alma), y en la zona de centro de vano (la mitad del vano aproximadamente) entre el 40 y 30% de la capacidad de la conexión (entre 8 y 6 pernos/m y alma). De esta manera la distribución de pernos conectadores se adaptaría mejor a la ley de rasantes elásticos.

Distribución óptima de pernos según fatiga por MDA:

Para la obtención de la distribución óptima de pernos que cumpla de forma estricta en cada caso con el MDA, se debería aplicar un factor de corrección multiplicador de la cuantía de pernos de partida (10 pernos por alma y metro) de la raíz octava del daño. Así se llegaría a las siguientes cuantías estrictas (Tabla 128).

Tabla 128 **Cuantía estricta de pernos en apoyo (por metro y alma)**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	10	10	< 10	< 10
	0,125	12	12	10	< 10
	0,50	14	14	12	10
	2,00	16	16	14	12

Comparando estos valores con los resultantes del Método Simplificado (Tabla 119), se aprecia que el MDA permite afinar ligeramente la cuantía necesaria. Por tanto, el MS es conservador pero muy ajustado.

6.2 Puente bijácena continuo de tres vanos

En este ejemplo se desarrolla en detalle el caso de un tablero bijácena de tres vanos y canto constante con cartabón en las zonas de apoyos intermedios y doble acción mixta en los tramos de canto variable. El análisis cubrirá el resumen del dimensionamiento cumpliendo el resto de estados límite y el análisis a fatiga de los principales elementos.

6.2.1 Definición geométrica

6.2.1.1 Alzado y sección transversal

El puente analizado tiene las siguientes características:

- Distribución de luces: 40 + 60 + 40 m
- Sección transversal de 11,80 m de anchura total, con plataforma de 10,50 m (arcenes de 1,00 y 2,50 m y dos carriles de 3,50 m) más bordillos de 0,65 m

- Sección bijácena, acero en chapas principales S355J2+N, con 1,70 m de canto de metal en la zona de canto constante, que pasa a 2,70 m en el eje de apoyos en pilas. La zona de canto variable presenta transición lineal en 10 m de longitud a cada lado de pila

  La losa superior tiene 11,80 m de ancho, flectando transversalmente apoyada en las platabandas superiores, y se ejecuta sobre prelosas prefabricadas de ancho completo, como suele ser habitual en este tipo de tableros. Tiene un espesor de 0,30 m entre las almas (separadas 6 m) y 0,20 m en extremos de voladizos

  Se dispone hormigón de fondo, materializando doble acción mixta en 16 m a cada lado del eje de las pilas, con espesor variable entre 0,25 y 0,50 m cerrando la sección y materializando una sección cajón.

En la Figura 203 y la Figura 204 se representan el alzado y las secciones transversales, respectivamente, del puente.

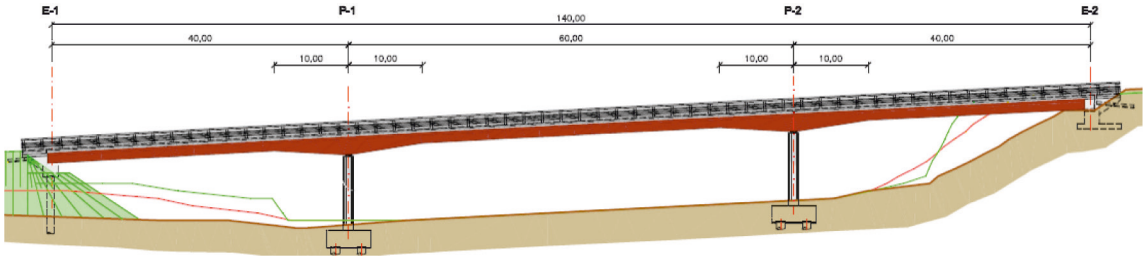


Figura 203 **Alzado**

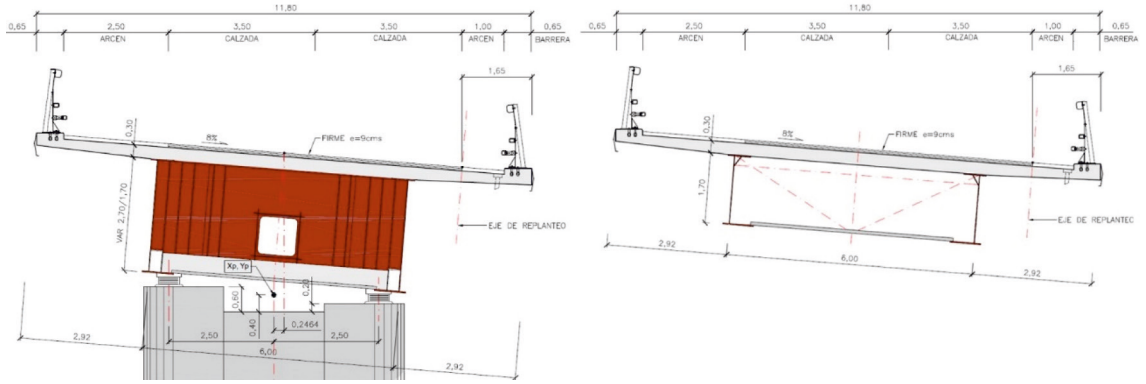


Figura 204 **Sección sobre pila (izquierda) y sección en centros de vano (derecha)**

6.2.1.2 Estructura metálica principal

La definición de chapas principales resultante del proyecto de la estructura cumpliendo el resto de Estados Límite es la que se ilustra en la Figura 205.

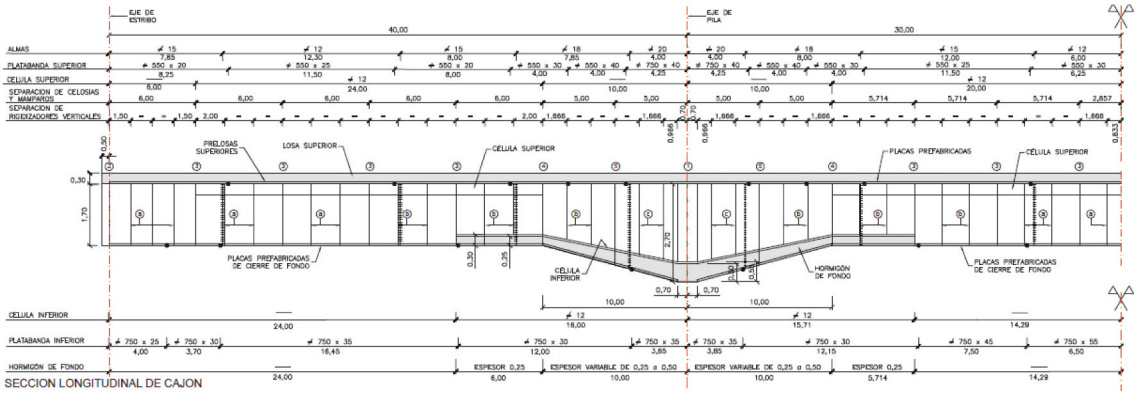


Figura 205 **Definición de estructura metálica**

Para arriostrar las dos vigas se disponen celosías transversales tipo M con un perfil a modo de travesaño inferior. Su separación es variable entre 6, 5,70 y 5 m (Figura 206).

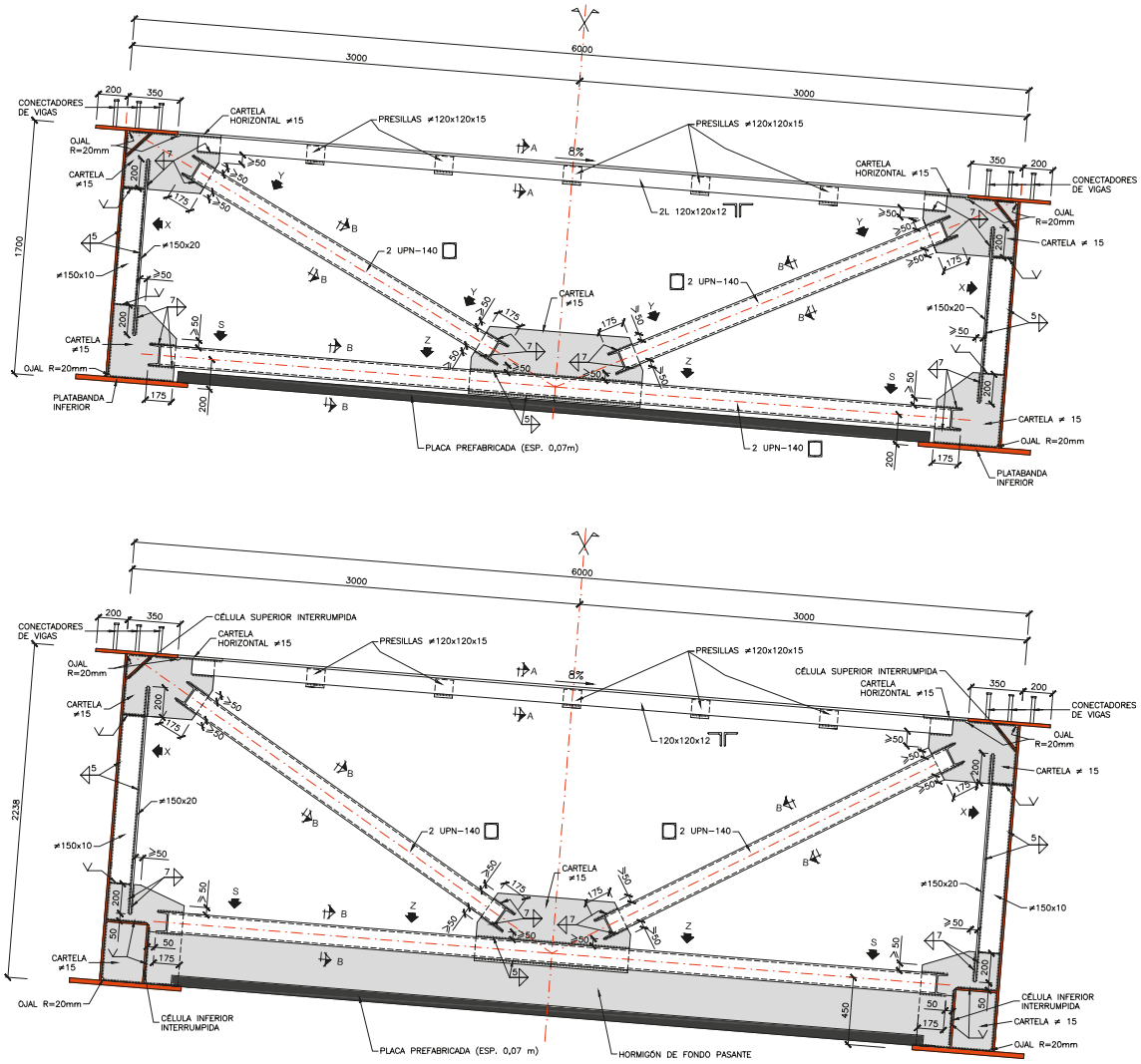


Figura 206 **Definición de celosías tipo**

6.2.2 Acciones consideradas

Las acciones aplicadas sobre la estructura se presentan a continuación:

Peso propio:

- Peso propio de metal: Se ha considerado del lado de la seguridad a efectos de cálculo un peso de 180 kp/m^2 en la zona de canto constante más 25 kp/m^2 en la de canto variable, lo que se traduce en 21,24 kN/m para canto constante y 24,19 kN/m para variable. En la zona bijácena la mitad se aplicará a cada alma, y en la zona cajón con doble acción mixta, se aplica la totalidad de la carga a la sección completa

  El montaje de la estructura metálica comprende dos fases: izado de los vanos laterales más 10 m del vano principal, y montaje del tramo central de canto constante (40 m) simplemente apoyado en los extremos de los voladizos de 10 m. Tras ello, el metal se suelda y pasa a trabajar en continuo para el resto de acciones

- Peso propio del hormigón de fondo: la losa inferior tiene 5,4 m de ancho y espesor variable entre 0,25 m y 0,50 m, lo que significa una carga lineal distribuida de 33,75 a 67,50 kN/m. En la zona bijácena se aplicará la mitad en cada alma. Por otra parte, se disponen unas prelosas inferiores de cierre no estructurales entre las platabandas inferiores para permitir el acceso por el interior para hacer la sección inspeccionable y visitable, en las zonas donde no hay hormigón de fondo conectado a la estructura metálica. Sus dimensiones son de 5 m de ancho por 0,07 m de espesor, por lo que cada alma recibe una carga de 4,375 kN/m

- Peso propio de la losa superior: el área es de 3,27 m^2, con 0,30 m de espesor entre almas y 0,20 m en los extremos de voladizos, es decir, 81,75 kN/m sobre el metal

  El peso de la losa se analizará en dos fases: una primera en la que se colocan las prelosas y se hormigona sobre sección metálica resistente la zona de espacio entre los extremos de las platabandas superiores (6,40 m de ancho y 0,30 m de espesor), para su conexión a la estructura metálica, y otra en la que se ejecutan en segunda fase el hormigón *in situ* de los voladizos (siendo la sección resistente la subsección mixta con la losa hormigonada en la primera fase).

Cargas muertas:

- Carga muerta nominal (actuando sobre la estructura mixta):

  - Bordillos en los 2 lados:

    $$2 \cdot 0{,}14 \cdot 0{,}65 \cdot 25 = 4{,}55 \text{ kN/m}$$

  - Barreras e impostas en 2 lados con peso estimado de 1,50 kN/m (del lado de la seguridad):

    $$2 \cdot 1{,}5 = 3{,}0 \text{ kN/m}$$

  - Pavimento, con 10,5 m de anchura, 9 cm de espesor, y 23 kN/m^3 de peso específico:

    $$10{,}5 \cdot 0\,,09 \cdot 23 = 21{,}74 \text{ kN/m}$$

Carga muerta nominal total: 29,29 kN/m (se aplica la mitad por alma en la zona bijácena).

- Incremento de pavimento: 50% acorde con 5.2.3(3) del borrador del Anejo Nacional de UNE-EN 1991 1-1 actuando sobre la estructura mixta: 10,87 kN/m

Sobrecarga de tráfico:

- Sobrecarga LM1: se toma como carril virtual 1 una banda de 3 m desde el bordillo derecho, con el objeto de penalizar el alma derecha (nótese que tal decisión es convencional, pues el problema es simétrico). El ancho de calzada de 10,5 m permite otros dos carriles virtuales y un área remanente de 1,5 m

  - Sobrecarga uniforme en carril virtual 1: se aplica como una carga vertical y un torsor, debido a una carga de 9 kN/m^2 en 3 m:

    $$\text{Carga vertical: } 9\ \text{kN/m}^2 \cdot 3\text{m} = 27\ \text{kN/m}$$

    $$\text{Torsor asociado} = 27\ \text{kN/m}\ (5{,}25 - 1{,}5)\text{m} = 101{,}25\ \text{kN/m}$$

    En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga distribuida en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

    $$\text{Alma derecha}: \frac{27}{2} + \frac{101{,}25}{6} = 30{,}375\ \text{kN/m}$$

    $$\text{Alma izquierda}: \frac{27}{2} - \frac{101{,}25}{6} = -3{,}375\ \text{kN/m}$$

  - Sobrecarga uniforme en carril virtual 2: se aplica como una carga vertical y un torsor, debido a una carga de 2,5 kN/m^2 en 3 m:

    $$\text{Carga vertical: } 2{,}5\ \text{kN/m}^2 \cdot 3\text{m} = 7{,}5\ \text{kN/m}$$

    $$\text{Torsor asociado} = 7{,}5\ \text{kN/m}\ (5{,}25 - 3 - 1{,}5)\text{m} = 5{,}625\ \text{kNm/m}$$

    En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga distribuida en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

    $$\text{Alma derecha}: \frac{7{,}5}{2} + \frac{5{,}625}{6} = 4{,}6875\ \text{kN/m}$$

    $$\text{Alma izquierda}: \frac{7{,}5}{2} - \frac{5{,}625}{6} = 2{,}8125\ \text{kN/m}$$

  - Sobrecarga uniforme en carril virtual 3: se aplica como una carga vertical y un torsor, debido a una carga de 2,5 kN/m^2 en 3 m:

    $$\text{Carga vertical: } 2{,}5\ \text{kN/m}^2 \cdot 3\text{m} = 7{,}5\ \text{kN/m}$$

    $$\text{Torsor asociado} = 7{,}5\ \text{kN/m}\ (5{,}25 - 6 - 1{,}5)\text{m} = -16{,}875\ \text{kNm/m}$$

En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga distribuida en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

$$\text{Alma derecha}: \frac{7{,}5}{2} - \frac{16{,}875}{6} = 0{,}9375\ \text{kN/m}$$

$$\text{Alma izquierda}: \frac{7{,}5}{2} + \frac{16{,}875}{6} = 6{,}5625\ \text{kN/m}$$

- Sobrecarga uniforme en zona remanente de 1,5 m: se aplica como una carga vertical y un torsor, debido a una carga de 2,5 kN/m2 en 1,5 m:

  Carga vertical: $2{,}5\ \text{kN/m}^2 \cdot 1{,}5\text{m} = 3{,}75\ \text{kN/m}$

  Torsor asociado = $3{,}75\ \text{kN/m}\ (5{,}25 - 9 - 0{,}75)\text{m} = -16{,}875\ \text{kNm/m}$

  En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga distribuida en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

$$\text{Alma derecha}: \frac{3{,}75}{2} - \frac{16{,}875}{6} = -0{,}9375\ \text{kN/m}$$

$$\text{Alma izquierda}: \frac{3{,}75}{2} + \frac{16{,}875}{6} = 4{,}6875\ \text{kN/m}$$

Las cargas anteriormente definidas son concomitantes entre sí y pueden ocupar cualquier extensión y posición en el tablero.

- Vehículo pesado en carril virtual 1: cada uno de los dos ejes se aplica como una carga vertical de 300 kN y su torsor asociado respecto del eje del cajón:

  Carga vertical (por eje): 300 kN

  Torsor asociado = $300\ (5{,}25 - 1{,}5) = 1125\ \text{kNm/m}$

  En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga concentrada en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

$$\text{Alma derecha}: \frac{300}{2} + \frac{1\,125}{6} = 337{,}5\ \text{kN/m}$$

$$\text{Alma izquierda}: \frac{300}{2} - \frac{1\,125}{6} = -37{,}5\ \text{kN/m}$$

- Vehículo pesado en carril virtual 2: cada uno de los dos ejes se aplica como una carga vertical de 200 kN y su torsor asociado respecto del eje del cajón:

  Carga vertical (por eje): 200 kN

  Torsor asociado = $200\ (5{,}25 - 3 - 1{,}5) = 150\ \text{kNm/m}$

En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga concentrada en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

$$\text{Alma derecha}: \frac{200}{2} + \frac{150}{6} = 125\ \text{kN/m}$$

$$\text{Alma izquierda}: \frac{200}{2} - \frac{150}{6} = 75\ \text{kN/m}$$

- Vehículo pesado en carril virtual 3: cada uno de los dos ejes se aplica como una carga vertical de 100 kN y su torsor asociado respecto del eje del cajón:

  Carga vertical (por eje): 100 kN

  Torsor asociado = 100 (5,25 −6 −1,5) = −225 kNm/m

  En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga concentrada en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

$$\text{Alma derecha}: \frac{100}{2} - \frac{225}{6} = 12{,}5\ \text{kN/m}$$

$$\text{Alma izquierda}: \frac{100}{2} + \frac{225}{6} = 87{,}5\ \text{kN/m}$$

Las cargas así definidas son concomitantes entre sí y sólo pueden ocupar una posición en el tablero (posiciones mutuamente excluyentes).

Modelo de fatiga:

- Sobrecarga FLM3: asociada al análisis simplificado mediante el Método del Daño Equivalente: cada uno de los cuatro ejes (ver Figura 13) se aplica como una carga vertical de 120 kN y su torsor asociado, aplicado en el carril virtual 1:

  Carga vertical (por eje): 120 kN

  Torsor asociado = 120 (5,25 −1,5) = 450 kNm/m

  En la zona bijácena, esta acción se aplicará como una carga concentrada en cada una de las almas (derecha e izquierda), con los siguientes valores:

$$\text{Alma derecha}: \frac{120}{2} + \frac{450}{6} = 135\ \text{kN/m}$$

$$\text{Alma izquierda}: \frac{120}{2} - \frac{450}{6} = -15\ \text{kN/m}$$

Estas cargas sólo pueden ocupar una posición en el tablero (posiciones mutuamente excluyentes).

6.2.3 Resumen de esfuerzos

En los gráficos siguientes se incluyen los resultados de los esfuerzos de los momentos flectores y cortantes en los casos de carga fundamentales y de las envolventes (Figura 207 a Figura 218). Se representa el vano lateral de 40 m y la mitad del vano central hasta el eje de simetría del tablero, recordando que en la zona bijácena las cargas se aplican a cada alma, y en la zona cajón con doble acción mixta, se aplica la totalidad de la carga a la sección completa.

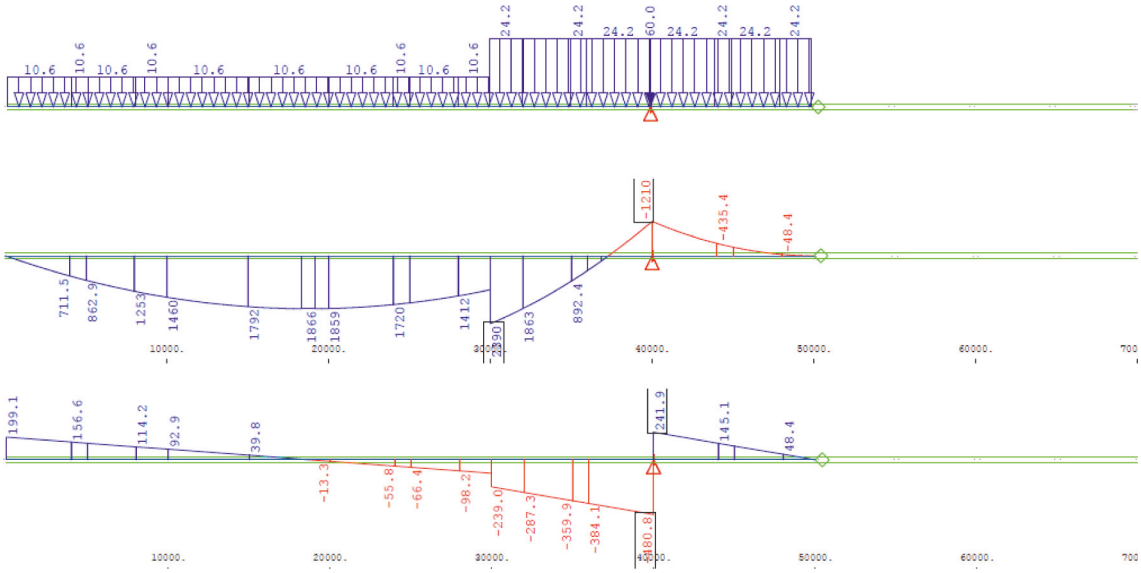


Figura 207 **Peso de metal (fase 1): carga aplicada, flectores y cortantes**

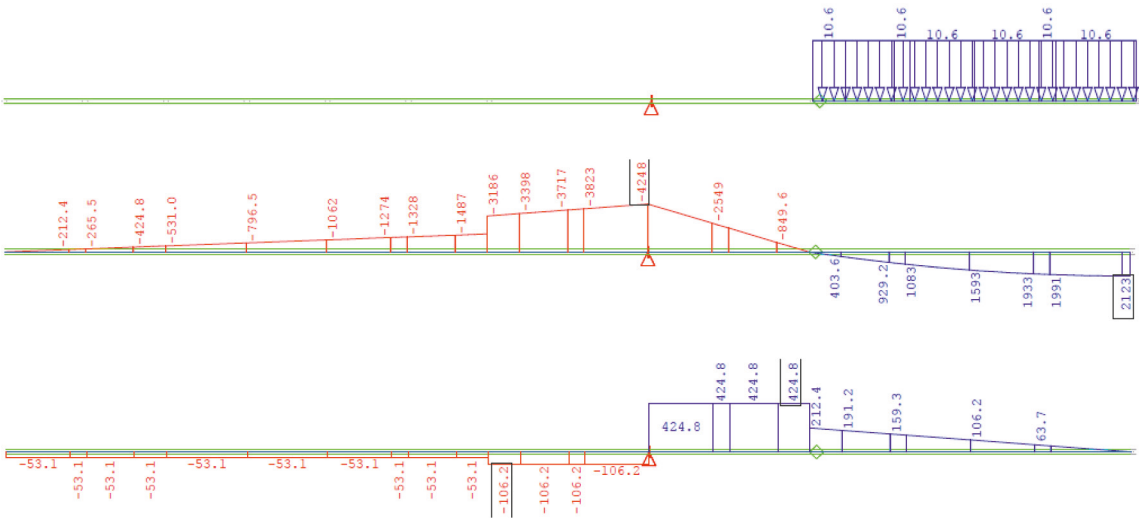


Figura 208 **Peso de metal (fase 2): carga aplicada, flectores y cortantes**

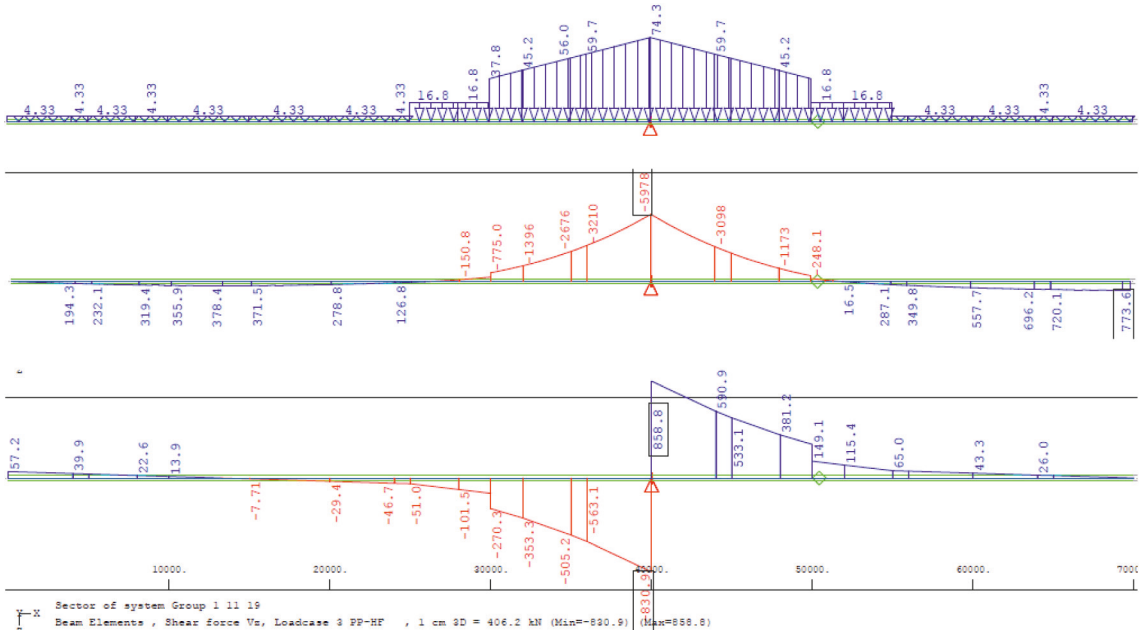


Figura 209 **Peso de hormigón de fondo: carga aplicada, flectores y cortantes**

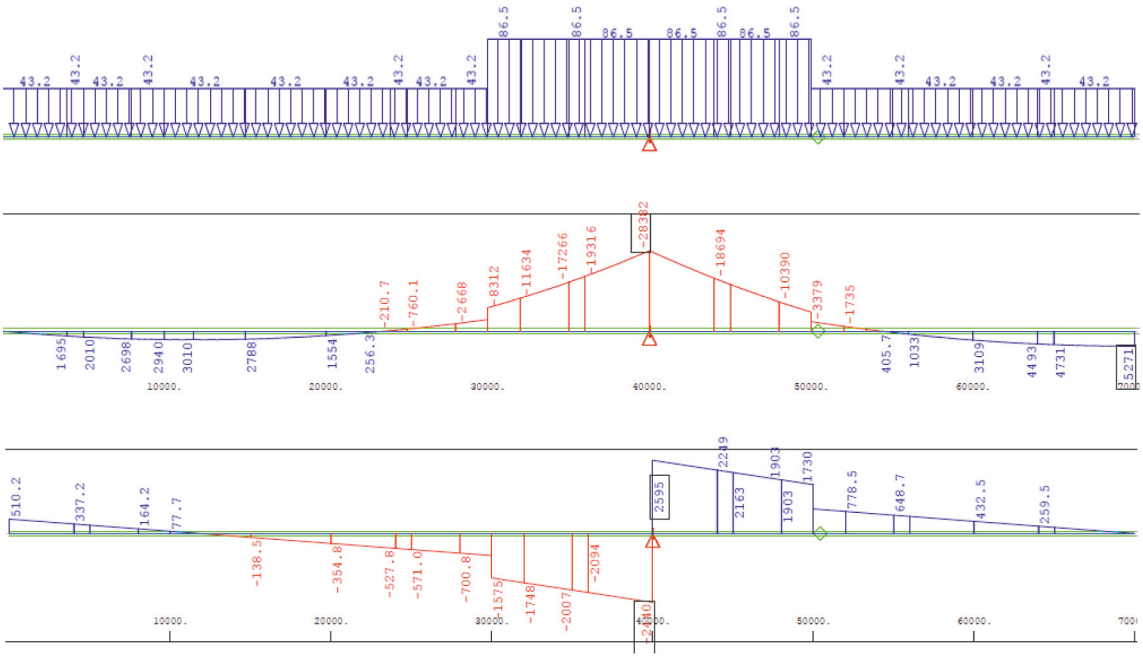


Figura 210 **Peso de losa más bordillos laterales: carga aplicada, flectores y cortantes**

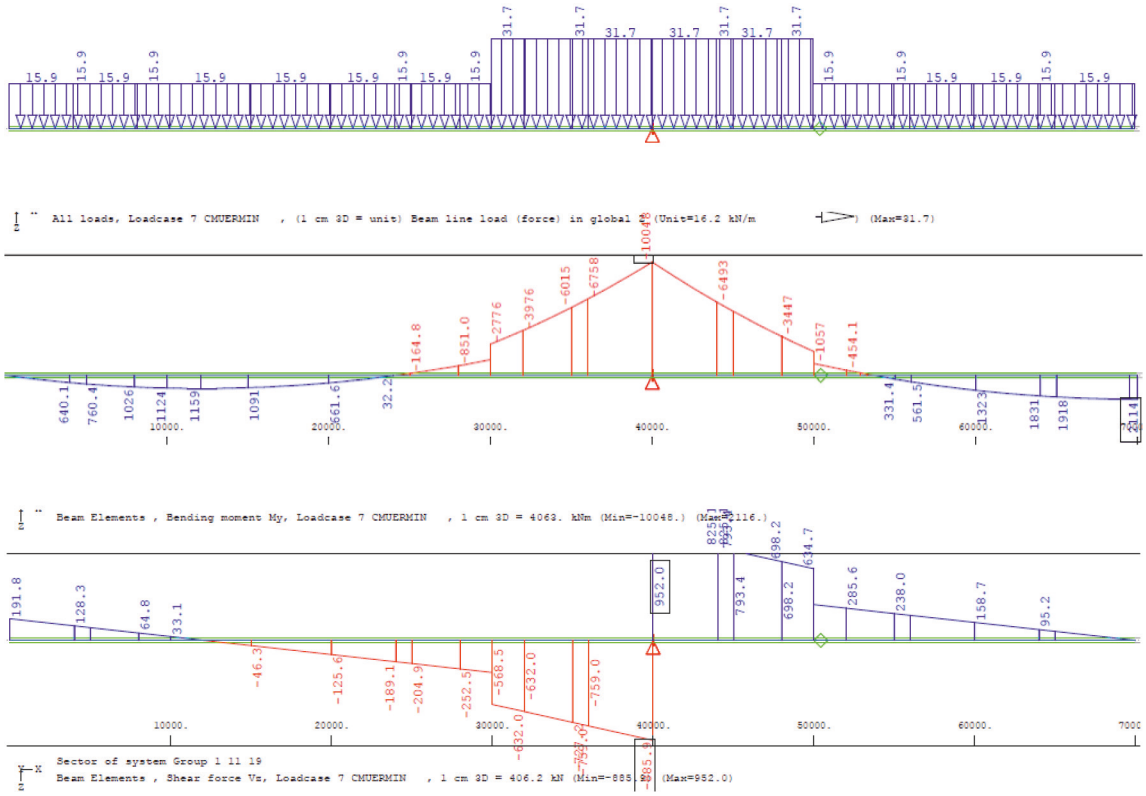


Figura 211 **Carga muerta nominal: carga aplicada, flectores y cortantes**

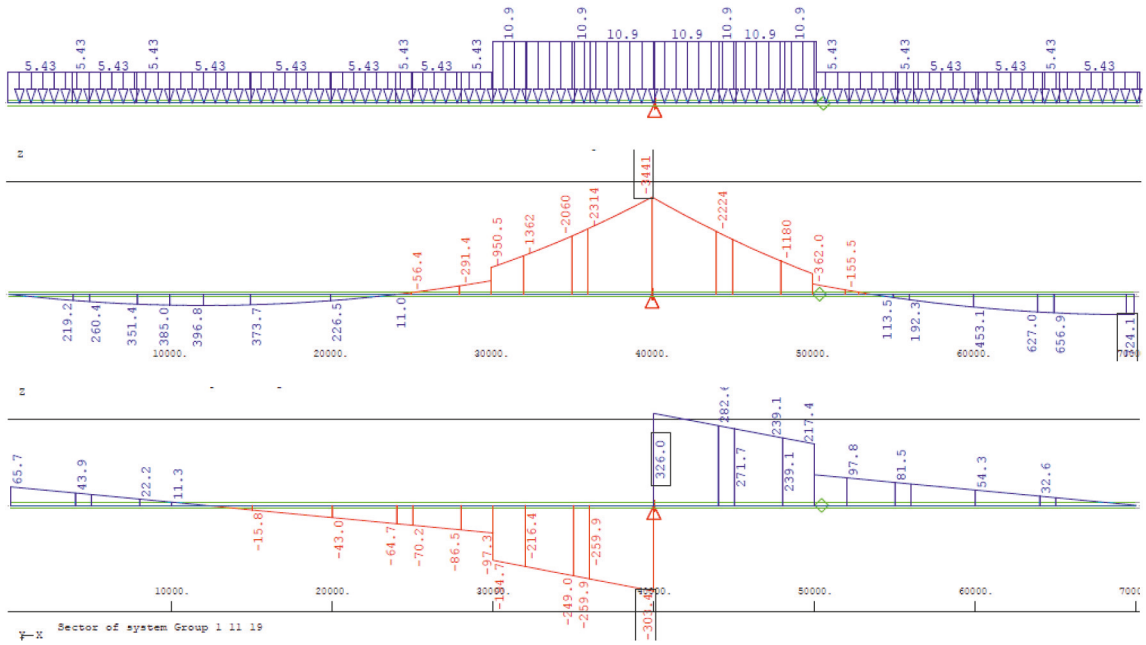


Figura 212 **Incremento de pavimento: carga aplicada, flectores y cortantes**

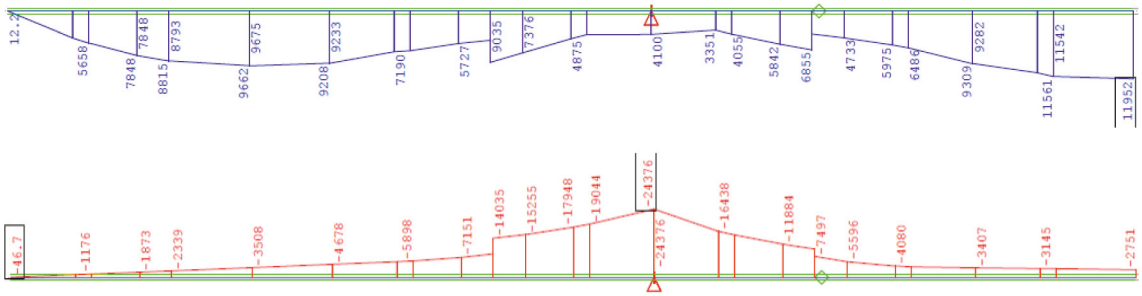


Figura 213 **Sobrecarga LM1: envolventes de flectores (máximos y mínimos)**

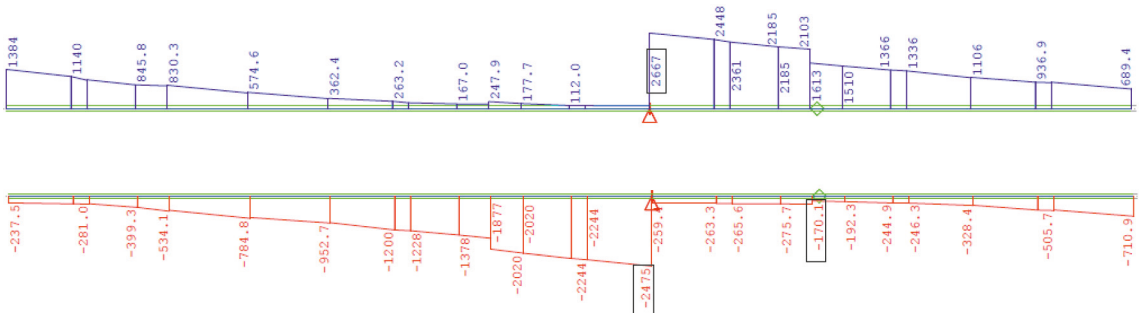


Figura 214 **Sobrecarga LM1: envolventes de cortantes (máximos y mínimos)**

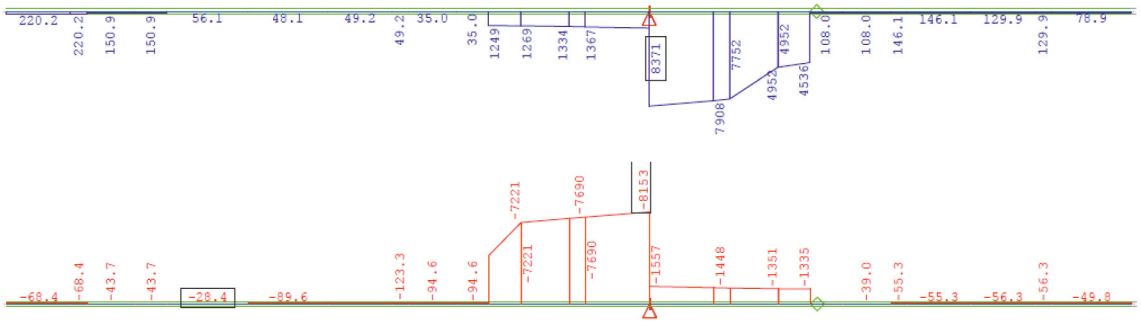


Figura 215 **Sobrecarga LM1: envolventes de torsores (máximos y mínimos)**

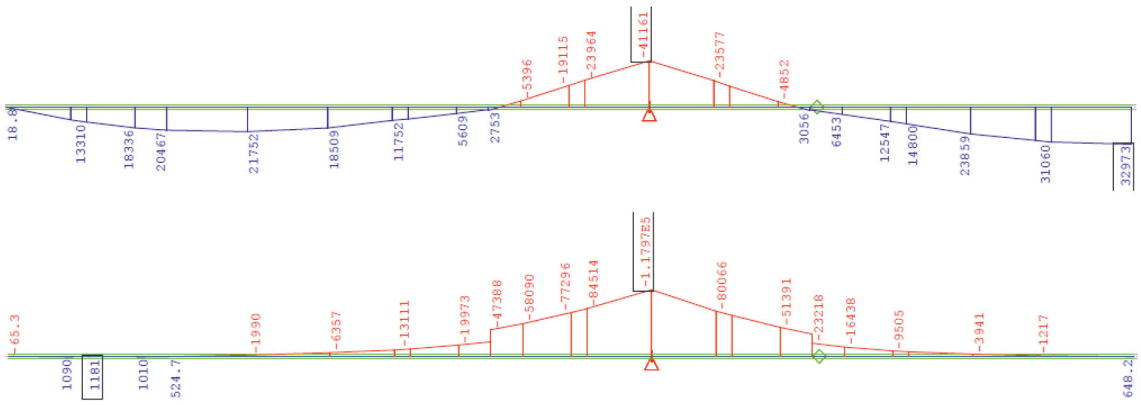


Figura 216 **ELU: envolventes de flectores (máximos y mínimos)**

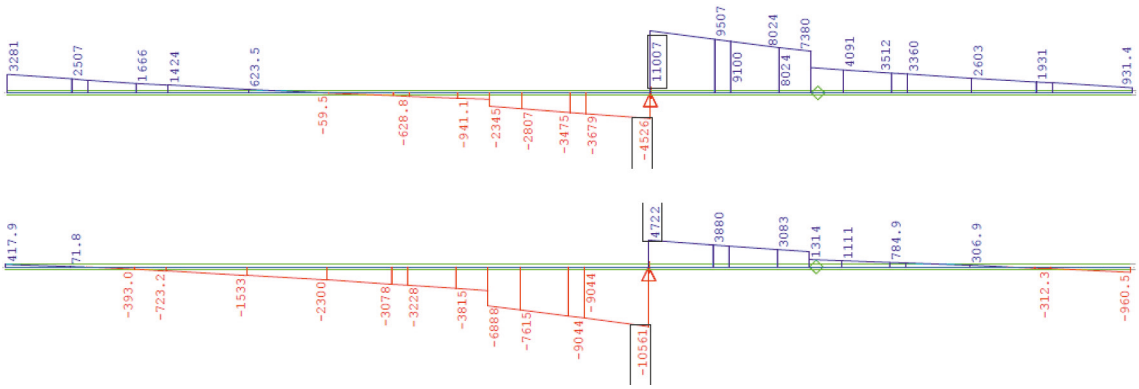


Figura 217 **ELU: envolventes de cortantes (máximos y mínimos)**

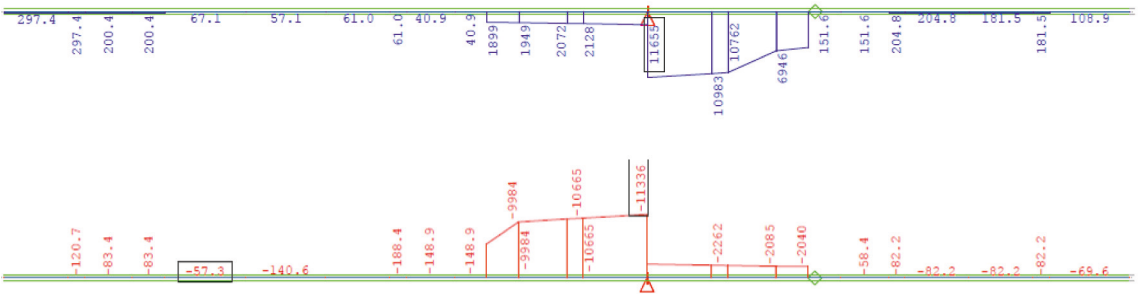


Figura 218 **ELU: envolventes de torsores (máximos y mínimos)**

6.2.4 Verificaciones seccionales básicas

A continuación se resumen las principales verificaciones a nivel resistente en ELU y de control tensional en ELS. Para el cálculo de tensiones normales se tendrán en cuenta tanto la secuencia constructiva como las redistribuciones de tensiones a nivel interno seccional por efectos reológicos.

6.2.4.1 Centro de vano principal

Verificación del Estado Límite Último:

- Esfuerzos solicitantes de cálculo en ELU, en una de las dos vigas mixtas:
  - Momento flector: $M_{y,Ed}$ = 32 973,0 kNm
  - Cortante: $V_{z,Ed}$ = 399,0 kN
  - Torsor: $M_{x,Ed}$ ~ 0 kNm
- Esfuerzos resistentes (por alma):
  - $M_{y,Rd}$ = 33 292,0 kNm
  - $V_{z,Rd}$ = 3 160,0 kN

Conclusión de las verificaciones del ELU de flexión y cortante en la sección de centro de vano principal: la sección cumple para los esfuerzos de cálculo considerados aisladamente $M_{y,Ed}$ y $V_{z,Ed}$, y además no hay que estudiar la interacción flector-cortante, al ser $V_{z,Ed} < 0{,}5\ V_{z,Rd}$, luego se verifica el ELU.

Verificación del Estado Límite de Servicio:

- Tensión normal en la platabanda inferior en la combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = 301,4 MPa < $f_y / \gamma_{M,ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2

- Tensión normal en platabandas superiores en combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = –278,2 MPa: $|\ \sigma_{Ed,ser}\ | < f_y / \gamma_{M,ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2 (Este valor se ha obtenido suponiendo que todo el peso de la losa del tablero recae sobre el metal en vez de aplicarse en dos fases, por lo que el resultado es conservador).

- Además se cumple también con 7.3(2) de UNE-EN 1993-2, en la que se establece que la variación de tensiones producida por la combinación frecuente de acciones:

  $\Delta\sigma_{frec} < 1{,}5\ f_y / \gamma_{M,ser}$

6.2.4.2 Centro de vano lateral

Verificación del Estado Límite Último:

- Esfuerzos solicitantes de cálculo en ELU, en una de las dos vigas mixtas:
  - Momento flector: $M_{y,Ed}$ = 21 752,0 kNm
  - Cortante: $V_{z,Ed}$ = –827,7 kN
  - Torsor: $M_{x,Ed}$ ~ 0 m kN
- Esfuerzos resistentes (por alma):
  - $M_{y,Rd}$ = 24 622,0 m kN
  - $V_{z,Rd}$ = 3 160,0 kN

Conclusión de las verificaciones del ELU de flexión y cortante en la sección de centro de vano lateral: la sección cumple para los esfuerzos de cálculo considerados aisladamente $M_{y,Ed}$ y $V_{z,Ed}$, y además no hay que estudiar la interacción flector-cortante, luego se verifica el ELU.

Verificación del Estado Límite de Servicio:

- Tensión normal en la platabanda inferior en la combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = 267,3 MPa < $f_y / \gamma_{M,ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2

- Tensión normal en platabandas superiores en combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = –162,8 MPa: $|\sigma_{Ed,ser}| < f_y / \gamma_{M,ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE EN 1993-2 (Este valor se ha obtenido suponiendo que todo el peso de la losa del tablero recae sobre el metal en vez de aplicarse en dos fases, por lo que el resultado es conservador).

- Además se cumple también con 7.3(2) de UNE-EN 1993-2, en la que se establece que la variación de tensiones producida por la combinación frecuente de acciones:

  $$\Delta\sigma_{frec} < 1{,}5\, f_y / \gamma_{M,ser}$$

6.2.4.3 Apoyo extremo

Verificación del Estado Límite Último:

- Esfuerzos solicitantes de cálculo en ELU, en una de las dos vigas mixtas:
  - Momento flector: $M_{y,Ed}$ = 0 kNm
  - Cortante: $V_{z,Ed}$ = 3 281 kN
  - Torsor: $M_{x,Ed}$ ~ 0 kNm
- Esfuerzos resistentes (por alma):
  - $V_{z,Rd}$ = 4 050,0 kN

Conclusión de las verificaciones del ELU de cortante en la sección de apoyo extremo: la sección cumple y se verifica el ELU.

Verificación del Estado Límite de Servicio:

- Tensión tangencial en el alma en la combinación de acciones característica:

  $\tau_{Ed,ser} = V_{z,Ed,ser} / A_w$ = 97,9 MPa < $f_y / (\sqrt{3}\, \gamma_{M,ser})$ = 206,7 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2

6.2.4.4 Apoyo intermedio

Verificación del Estado Límite Último:

- Esfuerzos solicitantes de cálculo en ELU:
  - Momento flector: $M_{y,Ed}$ = –117 970,0 kNm
  - Cortante: $V_{z,Ed}$ = 11 007,0 kN
  - Torsor: $M_{x,Ed}$ = 11 655,0 kNm

- Cortante de cálculo equivalente por alma:

$$V_{z,Ed} \text{ por alma} = \frac{11\,007,0}{2 \text{ almas}} + \frac{11\,655,0}{2 \cdot 6} = 6\,475 \text{ kN}$$

- Esfuerzos resistentes:
  - $M_{y,Rd}$ = –174 480,0 kNm (sección completa con dos almas)
  - $M_{y,f,Rd}$ = –138 522,0 kNm (sección completa sin tener en cuenta las almas a flexión)
  - $V_{z,Rd}$ = 8 569,0 kN (por alma)
- Conclusión ELU: el estudio de interacción flector–cortante permite afirmar que la sección cumple, puesto que el par ($M_{y,Ed}$, $V_{z,Ed}$) se halla en el dominio de seguridad del diagrama de interacción de la sección.

Verificación del Estado Límite de Servicio:

- Tensión normal en la platabanda inferior en la combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = –264,4 MPa: $|\sigma_{Ed,ser}| < f_y / \gamma_{M,ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE EN 1993-2

- Tensión normal en platabandas superiores en combinación de acciones característica:

  $\sigma_{Ed,ser}$ = 212,6 MPa < $f_y / \gamma_{M,ser}$ = 355 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2 (Este valor se ha obtenido suponiendo que todo el peso de la losa del tablero recae sobre el metal en vez de aplicarse en dos fases, por lo que el resultado es conservador).

- Además se cumple también con 7.3(2) de UNE-EN 1993-2, en la que se establece que la variación de tensiones producida por la combinación frecuente de acciones:

  $\Delta\sigma_{frec} < 1{,}5\, f_y / \gamma_{M,ser}$

- Tensión tangencial en el alma en la combinación de acciones característica:

  $\tau_{Ed,ser} = V_{z,Ed,ser} / A_w$ = 90,8 MPa < $f_y / (\sqrt{3}\, \gamma_{M,ser})$ = 206,7 MPa, acorde con 7.3(1) de UNE-EN 1993-2

6.2.4.5 Conexión

Por sencillez, se incluye en el ejemplo sólo el resumen de la conexión en la zona de apoyos intermedios. A la vista de la envolvente de flexión negativa en ELU, tanto el vano lateral como el central pueden estar sometidos prácticamente en toda su longitud a momentos negativos (Figura 216 inferior), por lo que las longitudes de distribución serán 40 y 30 m respectivamente. El segundo tramo resulta más desfavorable al tener menor longitud.

- Características de los pernos conectadores:
  - Acero S235J2 + C450
  - f_y > 350 MPa y f_u > 450 MPa
  - ϕ = 22 mm
  - h = 180 mm
  - Hormigón de la losa: f_{ck} = 30 MPa
- Resistencia de un perno:

  P_{Rd} = 109,47 kN acorde con la expresión (6.18) de UNE-EN 1994-2

  con γ_v = 1,25 acorde con Anejo Nacional de 6.6.3.1(1) de UNE-EN 1994-2
- Axil parcial que es necesario conectar en la zona de negativos junto al apoyo intermedio: 27 616,0 kN, correspondiente a la capacidad de tracción última de la totalidad de la armadura pasiva de la losa: 25 a 0,15 en la cara superior de la losa y Ø20 a 0,15 en la inferior
- Número total de pernos a disponer por alma:

$$\frac{27\,616{,}0\ \text{kN}}{109{,}47\,\text{kN}/\text{perno}\cdot 2\ \text{almas}} = 126{,}13 \approx 127\ \text{pernos}$$

  La longitud en la que se deberían repartir esos pernos no es 30 m en total, sino del orden de los 10 m a cada lado de la pila, coincidente con la zona de flexión negativa de la envolvente de momentos máximos (imagen superior de la Figura 216). Por tanto, se adoptará en esos 10 m un valor medio de 14 pernos por metro y alma. Su disposición deberá ser de forma afín a la envolvente de cortantes, sumando el efecto adicional de la torsión y coordinando su implantación con las prelosas. Para no alargar el estudio, no se desarrollarán estos aspectos en este ejemplo, comprobándose que la disposición óptima es de 20 pernos por metro y alma en la zona de la sección de pila

6.2.5 Análisis longitudinal a fatiga por el Método Simplificado

A continuación se recogen las envolventes de esfuerzos correspondientes al paseo del vehículo de fatiga FLM3 (4.6.4 de UNE-EN 1991-2 y apartado 3.2.3 de esta guía) por el carril virtual 1 (Figura 219, Figura 220 y Figura 221). Posteriormente se analizan en detalle las secciones fundamentales a fatiga por el MS,

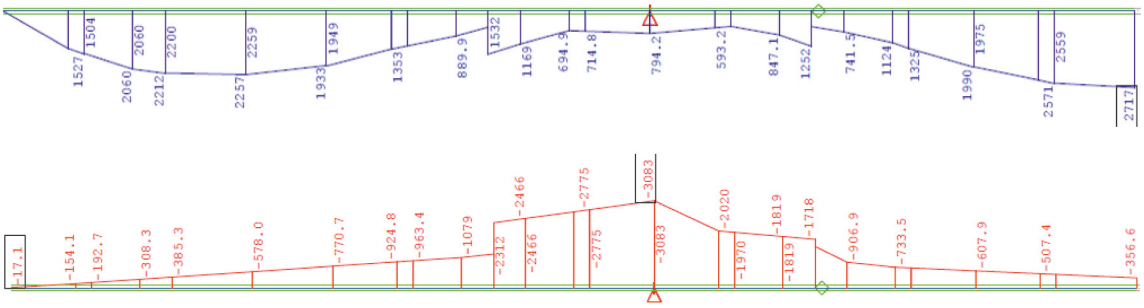


Figura 219 **Sobrecarga FLM3: envolventes de flectores (máximos y mínimos)**

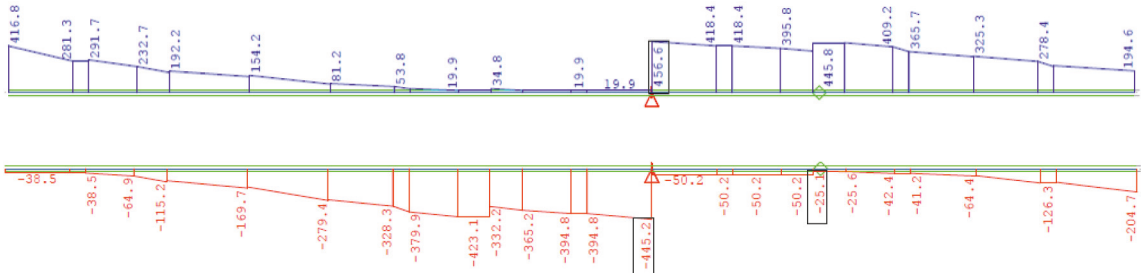


Figura 220 **Sobrecarga FLM3: envolventes de cortantes (máximos y mínimos)**

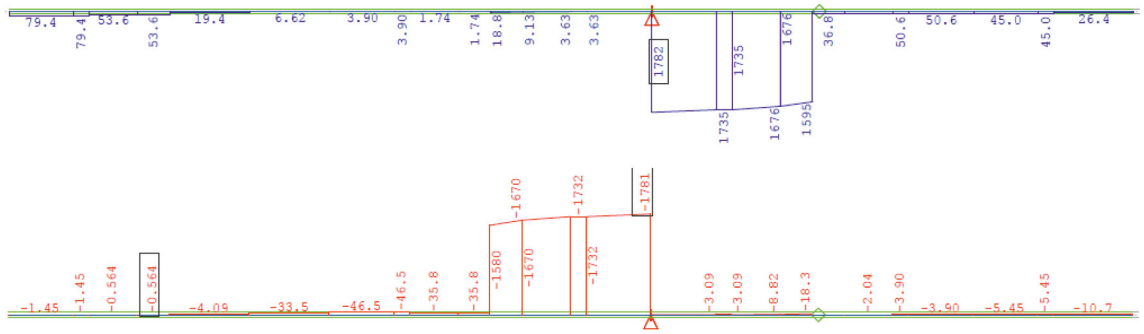


Figura 221 **Sobrecarga FLM3: envolventes de torsores (máximos y mínimos)**

6.2.5.1 Sección de centro de vano principal

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal en la platabanda inferior en centro de vano central, situada a 194,5 cm de la cara superior de la losa. Sólo se examinarán las tensiones normales porque las tensiones tangenciales son despreciables.

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

$$I_{y,G} = 13\,832\,214{,}0 \text{ cm}^4 \text{ (referido a } E_s = 2{,}1{\cdot}10^5 \text{ MPa)}$$

- Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

  $z_{G,sup}$ = 42,05 cm (desde la cara superior de la losa)

– Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3 (concomitantes), en una viga mixta (medio tablero):

- Momento flector: $\Delta M_{y,FLM3}$ = 2 717,0 – (–356,6) = 3 073,6 kNm
- Cortante: $\Delta V_{z,FLM3}$ ~ 0 kN
- Torsor: $\Delta M_{x,FLM3}$ ~ 0 kNm

– Oscilación tensional normal en la fibra de control, debido al FLM3:

$$\Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right) = \frac{3\,073{,}6\left(1{,}945-0{,}4205\right)}{13\,832\,214\cdot10^{-8}}\,10^{-3} = 33{,}7\ \text{MPa}$$, con γ_{Ff} = 1,0

Coeficiente de daño equivalente:

– Coeficiente λ_1: conforme a la figura 9.5 de UNE-EN 1993-2 para secciones de vano (Figura 25).

$$\lambda_1 = 2{,}55 - 0{,}70\,\frac{L-10}{70} = 2{,}55 - 0{,}70\,\frac{60-10}{70} = 2{,}05$$

– Coeficiente λ_2: depende del escenario de tráfico, de acuerdo con la expresión (35) (expresión (9.10) de UNE-EN 1993-2).

En la Tabla 113 del ejemplo anterior se reflejan todos los valores posibles suponiendo, por un lado, circulación exclusiva del vehículo FLM3 (Q_{m1} = 480 kN) y, por otro, la calibración del FLM3 con un tráfico equivalente del modelo FLM4 con sus 3 posibles repartos de composición de tráfico, larga distancia, media distancia y tráfico local, acorde con la Tabla 3 (tabla 4.7 de UNE-EN 1991-2), y cada caso con distintas intensidades de tráfico, acorde con la Tabla 4 (tabla 4.5 (n) de UNE-EN 1991-2).

– Coeficientes λ_3 y λ_4: se toman iguales a la unidad al proyectar para 100 años de vida útil (9.5.2(5) de UNE-EN 1993-2) y suponer circulación exclusiva de vehículos pesados por el carril virtual 1 (9.5.2(6) de UNE-EN 1993-2). De todas formas, como ya se explicó en 3.4.1.7 y en la Tabla 14, suponer, como indica UNE-EN 1991-2, un 10% del tráfico pesado circulando por el carril virtual 2 (ver 3.2) implica que λ_4 = 1,02, admitiendo que el tráfico que adelanta es de igual peso que el más excéntrico

– Coeficiente λ_{max} = 2,00 conforme a la figura 9.6 de UNE-EN 1993-2 para secciones de vano (Figura 26).

El valor del coeficiente λ se obtiene acorde con la expresión (34), que vuelve a reproducirse más abajo. En la Tabla 129 se indican subrayados los casos en los que condiciona el valor del límite superior λ_{max}

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \qquad \lambda \leq \lambda_{max}$$

Tabla 129 **Coeficiente λ para los modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	1,2935	1,2002	1,0967	0,8539
	0,125	1,5536	1,4416	1,3173	1,0250
	0,50	2,0000	1,9022	1,7381	1,3525
	2,00	2,0000	2,0000	2,0000	1,7847

Categoría mínima resultante para cada escenario:

Aplicando el Método Simplificado del daño equivalente descrito en 3.4.1, se deduce la expresión (69), de las ecuaciones (28) y (30), el valor de la categoría del detalle mínima $\Delta\sigma_C$ a exigir al elemento de estudio.

$$\Delta\sigma_C \geq \left(\gamma_{Mf}\ \gamma_{Ff}\ \Delta\sigma_{E,2} = \gamma_{Mf}\ \lambda\ \Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)\right) \tag{69}$$

con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35, correspondiente al criterio de evaluación a fatiga con integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9 (Tabla 5).

En la Tabla 130 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima $\Delta\sigma_C$ para las distintas composiciones de tráfico analizadas. Se subrayan los casos en lo que la categoría de fatiga es superior a 71 MPa.

Tabla 130 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	59,32	55,05	50,30	39,14
	0,125	71,25	66,12	60,41	47,01
	0,50	91,73	87,24	79,72	62,03
	2,00	91,73	91,73	91,73	81,85

Conforme a estos resultados, la fatiga puede llegar a ser condicionante frente al dimensionamiento estricto, cumpliendo el resto de Estados Límite Último y de Servicio, en alguna de las composiciones e intensidades de tráfico estudiadas, admitiendo la categoría de fatiga 71 como la mínima aceptable, condicionada por la posible presencia de un ojal en el extremo del alma en su unión con la platabanda (detalle 9 de tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.7 y Tabla 35), o bien por el eventual empalme de platabandas empleando chapa de respaldo

(detalle 14 de tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.5.2 y Tabla 30), detalles ambos que se deberían evitar siempre que fuera posible.

En la medida de lo posible se debería ir siempre a detalles en la platabanda con categoría mínima 80, sin ojales en el alma, condicionada a la soldadura de los rigidizadores transversales a la platabanda inferior (detalle 7 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.6.4 y Tabla 34), siempre que el espesor sea menor de 50 mm, o bien por el detalle de empalme de platabandas a tope ejecutados por los dos lados y sobreespesor de menos del 20% del ancho de la soldadura, también con categoría 80 (detalle 11 de Tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.5 y Tabla 28).

Para lograr que, en todos los casos de tráfico analizados en la Tabla 130, se pudiera cumplir con la categoría 71, sería necesario aumentar el módulo resistente de la sección mixta ($W_{y,inf} = I_{y,G} / z_{G,inf}$) en la relación 91,73 / 71 = 1,29, o sea, incrementar del orden de un 30% el módulo resistente. La forma más sencilla de lograrlo sería aumentar el área de acero de la platabanda inferior, que debería pasar de 750x55 a 1000x55.

En el caso de que se pudieran garantizar en la sección del centro del vano central (y zonas cercanas) detalles con categoría de fatiga mínima de 80, sería necesario aumentar la platabanda inferior de 750x55 a 875x55, mientras que si se pudieran llegar a garantizar detalles con categoría mínima 90 equivalente al detalle 5 de la Tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 con el empalme de la chapa de fondo soldada por ambos lados y sobreespesor de menos del 10% del ancho de la soldadura, la platabanda inferior apenas tendría que subir hasta 800x55 para cumplir con cualquier posibilidad de composición e intensidad de tráfico analizadas.

6.2.5.2 Sección de centro de vano lateral

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal en la platabanda inferior en centro de vano lateral, situada a 196,5 cm de la cara superior de la losa. Sólo se examinarán las tensiones normales porque las tensiones tangenciales son despreciables.

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

    $I_{y,G}$ = 10 117 775,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 38,0 cm (desde la cara superior de la losa)
- Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3 (concomitantes), en una viga mixta (medio tablero):
  - Momento flector: $\Delta M_{y,\mathrm{FLM3}}$ = 2 259,0 – (–578,0) = 2 837,0 kNm
  - Cortante: $\Delta V_{z,\mathrm{FLM3}}$ ~ 0 kN

- Torsor: $\Delta M_{x,FLM3} \sim 0$ kNm

– Oscilación tensional normal en la fibra de control, debido al FLM3:

$$\Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right) = \frac{2\,837{,}0\left(1{,}965-0{,}38\right)}{10\,117\,775\cdot10^{-8}}10^{-3} = 44{,}43\ \text{MPa}$$, con $\gamma_{Ff} = 1{,}0$

Coeficiente de daño equivalente:

– Coeficiente λ_1: conforme a la figura 9.5 de UNE-EN 1993-2 para secciones de vano (Figura 25)

$$\lambda_1 = 2{,}55-0{,}70\,\frac{L-10}{70} = 2{,}55-0{,}70\,\frac{40-10}{70} = 2{,}25$$

– Coeficientes λ_2, λ_3 y λ_4: igual que en apartado 6.2.5.1

– Coeficiente λ_{max} = 2,00 conforme a la figura 9.6 de UNE-EN 1993-2 para secciones de vano (Figura 26).

El valor del coeficiente λ se obtiene acorde con la expresión (34) como se ha descrito en 3.4.1.3. En la Tabla 131 se indican subrayados los casos en los que condiciona el valor del límite superior λ_{max}

Tabla 131 **Coeficiente λ para modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	1,4197	1,3173	1,2037	0,9366
	0,125	1,7052	1,5823	1,4458	1,1250
	0,50	2,0000	2,0000	1,9077	1,4847
	2,00	2,0000	2,0000	2,0000	1,9588

Categoría mínima resultante para cada escenario:

En la Tabla 132 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima $\Delta\sigma_C$ para las distintas composiciones de tráfico analizadas. Se subrayan los casos en lo que la categoría de fatiga es superior a 71 MPa.

Tabla 132 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	85,15	79,01	72,20	56,18
	0,125	102,28	94,91	86,72	67,48
	0,50	119,96	119,96	114,42	89,05
	2,00	119,96	119,96	119,96	117,49

Como sucedía en el centro del vano central, en el centro del vano lateral la fatiga es incluso más condicionante frente al dimensionamiento estricto de la platabanda inferior en tracción, cumpliendo con el resto de Estados Límite Últimos y de Servicio, en casi todas las composiciones e intensidades de tráfico estudiadas, admitiendo como categoría de fatiga mínima aceptable la 71, condicionada por la posible presencia de un ojal en el extremo del alma en su unión con la platabanda (detalle 9 de tabla 8.2 de UNE EN 1993-1-9, ver 4.7 y Tabla 35), o bien por el eventual empalme de platabandas empleando chapa de respaldo (detalle 14 de tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.5.2 y Tabla 30), detalles ambos que se deberían evitar siempre que fuera posible.

En la medida de lo posible se debería ir siempre a detalles en la platabanda con categoría mínima 80, sin ojales en el alma, condicionada la soldadura de los rigidizadores transversales a la platabanda inferior (detalle 7 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.6.4 y Tabla 34), siempre que el espesor sea menor de 50 mm, o bien por el detalle de empalme de platabandas a tope ejecutados por los dos lados y sobreespesor de menos del 20% del ancho de la soldadura, también con categoría 80 (detalle 11 de Tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.5 y Tabla 28).

Para lograr que, en todos los casos de tráfico analizados en la Tabla 132, se pudiera cumplir con la categoría 71, sería necesario aumentar el módulo resistente de la sección mixta ($W_{y,inf} = I_{y,G} / z_{G,inf}$) en la relación 119,96 /71 = 1,689, o sea, incrementar del orden de un 69% el módulo resistente. La forma más sencilla de lograrlo sería aumentar el área de acero de la platabanda inferior, que debería pasar de 750x35 a 900x55.

En el caso de que se pudieran garantizar en la sección del centro del vano central (y zonas cercanas) detalles con categoría de fatiga mínima de 80, sería necesario aumentar la platabanda de 750x35 a 800x55, mientras que si se pudieran llegar a garantizar detalles con categoría mínima 90 equivalente al detalle 5 de la Tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9 con el empalme de la chapa de fondo soldada por ambos lados y sobreespesor de menos del 10% del ancho de la soldadura, la platabanda inferior apenas tendría que subir hasta 750x50 para cumplir con cualquier posibilidad de composición e intensidad de tráfico analizada.

Tal y como se expuso en el capítulo 5 de esta guía, es bastante habitual en puentes continuos con sección bijácena que las dimensiones de la platabanda inferior en las zonas de positivos del vano lateral condicionen por fatiga incluso más que las zonas de positivos del vano tipo, que en ocasiones también suele requerir el aumento de dimensión frente a un dimensionamiento estricto cumpliendo el resto de Estados Límite.

6.2.5.3 Sección de apoyo intermedio: tensiones normales

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal de la platabanda superior en la sección de pila, situada a 30 cm de la cara superior de la losa.

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada, con la losa superior considerada como completamente fisurada (del lado de la seguridad):

    $I_{y,G}$ = 48 375 524,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 185,47 cm (desde la cara superior de la losa)
- Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3, en la sección cajón mixta completa compuesta por las dos vigas conectadas a la losa superior armada (fisurada) y al hormigón de fondo:
  - Momento flector: $\Delta M_{y,\mathrm{FLM3}}$ = 794,2 – (–3 083,0) = 3 877,2 kNm
- Oscilación tensional normal en la fibra de control, debido al FLM3:

$$\Delta\sigma(\gamma_{Ff}\ Q_k) = \frac{3\,877{,}2\,(1{,}8547-0{,}30)}{48\,385\,524\cdot 10^{-8}}\,10^{-3} = 12{,}46\ \mathrm{MPa}\ ,\ \text{con}\ \gamma_{Ff} = 1{,}0$$

Coeficiente de daño equivalente:

- Coeficiente λ_1: conforme a la figura 9.5 de UNE-EN 1993-2 para secciones de apoyo (Figura 25).

$$\lambda_1 = 1{,}70 + 0{,}50\,\frac{L-30}{50} = 1{,}70 + 0{,}50\,\frac{\left(\frac{60+40}{2}\right)-30}{50} = 1{,}90$$

- Coeficientes λ_2, λ_3 y λ_4: igual que en apartado 6.2.5.1
- Coeficiente $\lambda_{\max}$: conforme a la figura 9.6 de UNE-EN 1993-2 para secciones de apoyo (Figura 26).

$$\lambda_{\max} = 1{,}80 + 0{,}90\,\frac{L-30}{50} = 1{,}80 + 0{,}90\,\frac{\left(\frac{60+40}{2}\right)-30}{50} = 2{,}16$$

El valor del coeficiente λ se obtiene acorde con la expresión (34) como se ha descrito en 3.4.3.1. En la Tabla 133 se indican subrayados los casos en los que condiciona el valor del límite superior $\lambda_{\max}$

Tabla 133 **Coeficiente λ para modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	1,199	1,112	1,017	0,791
	0,125	1,440	1,336	1,221	0,950
	0,50	1,900	1,763	1,611	1,254
	2,00	2,160	2,160	2,126	1,654

Categoría mínima resultante para cada escenario:

En la Tabla 134 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima $\Delta\sigma_C$ para las distintas composiciones de tráfico analizadas.

Tabla 134 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	20,17	18,71	17,10	13,31
	0,125	24,22	22,47	20,54	15,98
	0,50	31,96	29,66	27,10	21,09
	2,00	36,33	36,33	35,76	27,82

Conforme a estos resultados (Tabla 134), la fatiga nunca será condicionante, con además bastante margen frente al proyecto cumpliendo el resto de estados límite (ELU y ELS), ya que, en el peor de los casos de tráfico analizados se requiere una categoría de fatiga de apenas algo más de 36 MPa.

Como se ha descrito en el capítulo 4, si se respetan las recomendaciones de buena práctica enfocadas a la correcta concepción, ejecución y control de los detalles, lo habitual será que no se tengan detalles con categoría inferior a 80, como sería el detalle de la soldadura de los rigidizadores transversales a la platabanda superior, siempre que su ancho no supere los 50 mm (detalle 7 de tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.6.4 y Tabla 34). La posible presencia de un ojal en el extremo del alma en su unión con la platabanda (detalle 9 de tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.7 y Tabla 35) condicionaría la categoría del detalle con un valor de 71.

Los detalles de empalme de platabandas a tope deberán concebirse para que, en general, siempre tengan una categoría mínima de 80, acorde al detalle 11 de la Tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9.

6.2.5.4 Sección de apoyo intermedio: tensiones tangenciales

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:

$$\text{Alma de canto} = 270 - 4 - 3{,}5 = 262{,}5 \ cm\text{, con espesor de 20 mm}$$

- Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3 (concomitantes), en la sección del apoyo del lado del vano central, que es la que condiciona:
  - Cortante: $\Delta V_{z,\mathrm{FLM3}}$ = 456,6 – (–50,2) = 506,8 kN
  - Torsor: $\Delta M_{x,\mathrm{FLM3}}$ = 1 782 kNm

  Los valores son concomitantes y corresponden a la sección de ancho completo.

- Cortante solicitante equivalente por alma:

$$\Delta V_{z,FLM3} \text{ por alma} = \frac{506{,}8}{2 \text{ almas}} + \frac{1\,782{,}0}{2 \cdot 6{,}0} = 401{,}9 \text{ kN}$$

- Oscilación tensional tangencial en la fibra de control, debido al FML3:

$$\Delta\tau(\gamma_{Ff}\ Q_k) = \frac{401{,}9}{262{,}5 \cdot 2{,}0} = 0{,}765 \text{ kN/cm}^2 = 7{,}65 \text{ MPa}$$, con γ_{Ff} = 1,0

admitiendo una distribución rectangular donde sólo el alma resiste tensiones tangenciales.

Coeficiente de daño equivalente:

- Coeficiente λ_1: conforme a la figura 9.5 de UNE-EN 1993-2 para secciones de apoyo (Figura 25).

$$\lambda_1 = 1{,}70 + 0{,}50\,\frac{L-30}{50} = 1{,}70 + 0{,}50\,\frac{\frac{60+40}{2} - 30}{50} = 1{,}90$$

- Coeficientes λ_2, λ_3 y λ_4: igual que en apartado 6.2.5.1
- Coeficiente $\lambda_{\max}$: conforme a la figura 9.6 de UNE-EN 1993-2 para secciones de apoyo (Figura 26).

$$\lambda_{\max} = 1{,}80 + 0{,}90\,\frac{L-30}{50} = 1{,}80 + 0{,}90\,\frac{\frac{60+40}{2} - 30}{50} = 2{,}16$$

El valor del coeficiente λ se obtiene acorde con la expresión (34) como se ha descrito en 3.4.1.3. En Tabla 135 se indican subrayados los casos en los que condiciona el valor del límite superior $\lambda_{\max}$

Tabla 135 **Coeficiente λ para modelos de carga FLM3 y FLM4**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	1,199	1,112	1,017	0,791
	0,125	1,440	1,336	1,221	0,950
	0,50	1,900	1,763	1,611	1,254
	2,00	2,160	2,160	2,126	1,654

Categoría mínima resultante para cada escenario:

Aplicando el Método Simplificado del daño equivalente descrito en 3.4.1, se deduce la expresión (66), que reproducimos más abajo, con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35 (integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9).

$$\Delta\tau_C \geq \left(\gamma_{Mf}\ \gamma_{Ff}\ \Delta\tau_{E,2} = \gamma_{Mf}\ \lambda\ \Delta\tau\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)\right)$$

En la Tabla 136 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima $\Delta\tau_C$ para las distintas composiciones de tráfico analizadas.

Tabla 136 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	12,38	11,48	10,50	8,17
	0,125	14,87	13,80	12,61	9,81
	0,50	19,62	18,21	16,64	12,95
	2,00	22,31	22,31	21,96	17,08

Como sucedía en la sección de apoyos frente a tensiones normales, acorde con estos resultados (Tabla 136), la fatiga nunca será condicionante tampoco frente a tensiones tangenciales, con bastante margen frente al proyecto cumpliendo el resto de Estados Límite (ELU y ELS), ya que, en el peor de los casos de tráfico analizados, se requiere una categoría de fatiga de apenas algo más de 22 MPa. Como se ha descrito en el capítulo 4, si se respetan las recomendaciones de buena práctica enfocadas a la correcta concepción, ejecución y control de los detalles, lo habitual será que no se tengan detalles con categoría inferior a 80 trabajando a rasante, como sería el detalle de la soldadura del alma con la platabanda (detalle 8 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.7 y Tabla 36).

6.2.5.5 Sección de apoyo intermedio: interacción σ-τ

Cuando se pueda dar interacción de tensiones normales y tangenciales, se debe verificar la expresión (29) descrita en el 3.4.1.1 y reproducida a continuación.

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

En este apartado se va a realizar la verificación de la seguridad frente a fatiga de la interacción partiendo de una categoría de fatiga 80 en ambos detalles (tensiones normales y tangenciales), tal y como se ha descrito en los dos puntos previos, suponiendo detalles sin ojales en el alma y empalmes a tope entre platabandas y almas, acorde con el detalle 11 de la Tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9.

La expresión anterior se desarrolla incluyendo en los numeradores de las dos fracciones las categorías mínimas obtenidas en los cálculos realizados en los dos puntos previos.

$$\left(\frac{\gamma_{Mf}\ \lambda\ \Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)}{\Delta\sigma_C}\right)^3+\left(\frac{\gamma_{Mf}\ \lambda\ \Delta\tau\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right)}{\Delta\tau_C}\right)^5\leq 1$$

La Tabla 137 incluye el resultado del primer miembro de la expresión anterior, verificándose en todos los casos, con la categoría de fatiga 80 tanto para $\Delta\sigma_C$ como para $\Delta\tau_C$, que hay mucho margen de seguridad.

Tabla 137 **Resultado de la verificación de la interacción σ–τ**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	0,016	0,013	0,010	0,005
	0,125	0,028	0,022	0,017	0,008
	0,50	0,065	0,052	0,039	0,018
	2,00	0,095	0,095	0,091	0,042

Conforme a estos resultados, la comprobación de fatiga con interacción entre tensiones normales y tangenciales queda muy holgada empleando detalles habituales.

6.2.5.6 Sección de apoyo intermedio: conexión

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada, con la losa superior considerada como completamente fisurada (del lado de la seguridad):

    $I_{y,G}$ = 48 375 524,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 185,47 cm (desde la cara superior de la losa).
  - Momento estático de la losa, S_{losa} , respecto al centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada. Dado que la losa se encuentra fisurada en la sección de negativos, el momento estático será el de las armaduras de la losa, Ø25 a 0,15 en la cara superior y Ø20 a 0,15 en la inferior, con su cdg aproximadamente a 0,15 m de la cara superior de la losa

$$S_{losa} = A_{acero\ pasivo}\left(z_{G,\mathrm{sup}} - z_{G,acero\ pasivo}\right) =$$

$$11{,}8\,\mathrm{m}\,\frac{8{,}05\cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2}{0{,}15\,\mathrm{m}}\left(1{,}875-0{,}15\right) = 0{,}109243\,\mathrm{m}^3$$

- Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3 en la sección del apoyo del lado del vano central, que es la que condiciona:
  - Cortante: $\Delta V_{z,\mathrm{FLM3}}$ = 456,6 – (–50,2) = 506,8 kN
  - Torsor: $\Delta M_{x,\mathrm{FLM3}}$ = 1 782 kNm

  Los valores son concomitantes y se refieren a la sección de ancho completo
- Cortante solicitante equivalente por alma:

$$\Delta V_{z,FLM3}\ \text{por alma} = \frac{506{,}8}{2\ \text{almas}} + \frac{1\,782{,}0}{2\cdot 6{,}0} = 401{,}9\ \ \mathrm{kN}$$

- Oscilación de esfuerzo rasante en la interfaz losa–platabanda superior:

$$\Delta r = \frac{\Delta V\ S_{losa}}{I_{y,G}} = \frac{401{,}9\cdot 0{,}109243}{0{,}48375524} = 90{,}75\,\mathrm{kN/m}\ \text{ en cada alma}$$

- Oscilación de tensión tangencial en el vástago de los pernos: admitiendo la distribución plástica de 20 pernos Ø22 por metro y alma, la sección resistente es de:

$$20\pi\frac{22^2}{4} = 7\,602{,}65\ \mathrm{mm^2/m}$$

  con lo cual la tensión tangencial es de:

$$\Delta\tau\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right) = \frac{90{,}75}{7\,602{,}65} = 0{,}0119377\,\mathrm{kN/mm^2} = 11{,}938\,\mathrm{MPa}$$

Coeficiente de daño equivalente:

De acuerdo con 3.4.2.3 e igual que en el apartado 6.1.5.4.

Categoría mínima resultante para cada escenario:

Se calcula de la misma forma que en el apartado 6.1.5.4. En la Tabla 138 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima $\Delta\tau_C$ para las distintas composiciones de tráfico analizadas.

Tabla 138 **Categoría mínima del detalle $\Delta\tau_C$ [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	13,88	13,22	12,43	10,41
	0,125	15,56	14,83	13,94	11,68
	0,50	18,50	17,63	16,58	13,88
	2,00	22,00	20,97	19,72	16,51

Conforme a estos resultados, la fatiga nunca es condicionante, con bastante margen frente al proyecto de la conexión con un dimensionamiento estricto de ELU y ELS, puesto que la categoría de fatiga de los pernos conectadores es 90 (detalle 10 de tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9, ver 4.9).

6.2.5.7 Sección de apoyo intermedio: interacción entre platabanda y pernos

Como se detalló en 3.4.2.1, cuando la chapa de acero a la que se halla soldado el conectador está sometida a tracción (bajo la combinación de acciones acorde con 6.8.3 de UNE-EN 1992-1-1), es preciso evaluar, la interacción entre la carrera de tensión normal en la chapa (verificada en 6.2.5.3) y la de tensión tangencial en el perno (verificada en 6.2.5.6), conforme a la expresión (40) (expresión (6.56) de UNE-EN 1994-2), que volvemos a reproducir más abajo.

$$\frac{\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}}+\frac{\gamma_{Ff}\,\Delta\tau_{E,2}}{\eta_E\,\frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf,s}}}\leq 1{,}3$$

Esta expresión se desarrolla incluyendo en los numeradores de las dos fracciones las categorías mínimas obtenidas en los cálculos realizados en los dos puntos previos, según la expresión (70).

$$\frac{\gamma_{Mf}\,\lambda\,\Delta\sigma(\gamma_{Ff}\,Q_k)}{\Delta\sigma_C}+\frac{\gamma_{Mf,s}\,\lambda_v\,\Delta\tau(\gamma_{Ff}\,Q_k)}{\frac{\eta_E}{\Delta\tau_C}}\leq 1{,}3 \qquad (70)$$

La expresión anterior se ha desarrollado para que los numeradores sean las categorías óptimas para tensión normal y tangencial obtenidas en puntos previos (Tabla 134 y Tabla 138 respectivamente).

La Tabla 139 incluye el resultado del primer miembro de la expresión (70), verificándose en todos los casos, con las categorías de fatiga $\Delta\sigma_C$ = 80 MPa y $\Delta\tau_C$ = 90 MPa, que hay mucho margen de seguridad frente al valor límite de 1,3.

Tabla 139 **Resultado de la verificación de la interacción $\Delta\sigma$ en platabanda y $\Delta\tau$ en los pernos**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	0,406	0,381	0,352	0,282
	0,125	0,476	0,446	0,412	0,329
	0,50	0,605	0,567	0,523	0,418
	2,00	0,699	0,687	0,666	0,531

Conforme a estos resultados, la comprobación de fatiga con interacción entre tensiones normales en la platabanda superior traccionada y las tensiones tangenciales en los pernos, lleva a resultados del lado de la seguridad cumpliendo con mucha holgura en todos los escenarios de tráfico posibles analizados.

6.2.5.8 Sección de apoyo intermedio: armaduras pasivas de losa superior

Fibra de control frente a fatiga:

Armadura en la cara superior de la losa, situada a 5 cm de la superficie.

Curva de resistencia a fatiga de las armaduras pasivas:

Se supondrá que en esta sección no hay dispositivos de empalme y que las barras son rectas, por lo que, de acuerdo con la Tabla 6.3N de UNE-EN 1992-2 (ver Tabla 6):

N^* = 106 ciclos

k_1 = 5

k_2 = 9

$\Delta\sigma_{Rsk}$ = 162,5 MPa

Obtención de la carrera tensional:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada, con la losa superior considerada como completamente fisurada (del lado de la seguridad):

    $I_{y,G}$ = 48 375 524,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 185,47 cm (desde la cara superior de la losa)
- Variación de esfuerzos solicitantes producidos por el FLM3, en la sección cajón mixta completa, compuesta por las dos vigas conectadas a la losa superior armada (fisurada) y al hormigón de fondo:
  - Momento flector: $\Delta M_{y,FLM3}$ = 794,2 – (–3 083,0) = 3 877,2 kNm
- Oscilación tensional normal en la fibra de control, debido al FLM3:

$$\Delta\sigma_{s,Ec}\left(\gamma_{F,fat}\,Q_k\right)=\frac{3\,877,2\left(1,8547-0,05\right)}{48\,385\,524\cdot 10^{-8}}\,10^{-3}=14,46\ \text{MPa}$$, con $\gamma_{F,fat}$ = 1,0

Coeficiente de daño equivalente para armaduras pasivas λ_s:

Se calcula según la expresión (50), reproducida a continuación.

$$\lambda_s = \varphi_{Fat}\cdot\lambda_{s,1}\cdot\lambda_{s,2}\cdot\lambda_{s,3}\cdot\lambda_{s,4}$$

donde:

φ_{fat} coeficiente de impacto de daño equivalente, función de la rugosidad superficial, que, en este caso se tomará igual a 1,0

$\lambda_{s,1}$ = 1,08 conforme a la figura NN.1 de UNE-EN 1992-2 para secciones de pila (ver Figura 27)

$\lambda_{s,2}$ depende del escenario de tráfico, de acuerdo con la expresión (51), que se reproduce a continuación

$$\lambda_{S2}=\overline{Q}\sqrt[k_2]{\frac{N_{obs}}{2,0}}$$

con $\overline{Q}$ obtenido de la Tabla 17 (tabla NN.1 de UNE-EN 1992-2)

En la Tabla 140 se reflejan todos los valores posibles de $\lambda_{s,2}$ suponiendo los tres posibles repartos de composición de tráfico, larga distancia, media distancia y tráfico local, acorde con la Tabla 17 (tabla NN.1 de UNE-EN 1992-2).

Tabla 140 **Coeficiente $\lambda_{s,2}$ para diferentes escenarios de tráfico**

Escenario		Larga distancia	Media distancia	Tráfico local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	0,6637	0,6239	0,5443
	0,125	0,7349	0,6908	0,6026
	0,50	0,8572	0,8058	0,7029
	2,00	1,0000	0,9400	0,8200

$\lambda_{s,3}$ se toma igual a la unidad al proyectar para 100 años de vida útil, según la expresión (52)

$\lambda_{s,4}$ se toma igual a la unidad al no considerar la simultaneidad de vehículos pesados en otros carriles virtuales, según la expresión (53)

El resultado del coeficiente λ_s se detalla en la Tabla 141.

Tabla 141 **Coeficiente λ_s para armadura pasiva recta**

Escenario		Larga distancia	Media distancia	Tráfico local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	0,7168	0,6738	0,5878
	0,125	0,7937	0,7461	0,6508
	0,50	0,9258	0,8703	0,7591
	2,00	1,0800	1,0152	0,8856

Categoría mínima resultante para cada escenario:

Aplicando el Método Simplificado del daño equivalente descrito en 3.4.3.3, se deduce la expresión (71), de las ecuaciones (47) y (49), el valor de la categoría del detalle mínima $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ a exigir al elemento de estudio.

$$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*) \geq \left(\gamma_{S,fat}\ \gamma_{F,fat}\ \Delta\sigma_{S,equ}(N^*) = \gamma_{S,fat}\ \lambda_s\ \Delta\sigma_{s,Ec}\left(\gamma_{F,fat}\ Q_k\right)\right) \quad (71)$$

con un coeficiente parcial para las cargas de fatiga $\gamma_{s,fat}$ = 1,15 (según la tabla 2.1N de UNE-EN 1992-1-1).

El valor de $\Delta\sigma_{s,Ec}$ obtenido de la oscilación de tensión normal en las armaduras causada por el paso del vehículo FLM3 se debe multiplicar por 1,75 (apoyo intermedio de puente continuo), acorde NN.2.1(101) de UNE-EN 1992-2.

En la Tabla 142 se resumen los resultados de la categoría del detalle mínima para la armadura pasiva en las distintas composiciones de tráfico analizadas.

Tabla 142 **Categoría mínima del detalle para la armadura pasiva (MPa)**

Escenario		Larga distancia	Media distancia	Tráfico local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	20,86	19,61	17,11
	0,125	23,10	21,71	18,94
	0,50	26,94	25,33	22,09
	2,00	31,43	29,54	25,77

Conforme a estos resultados, la fatiga en la armadura pasiva nunca es condicionante, además con mucho margen frente al proyecto estricto cumpliendo el resto de Estados Límite, ya que para barras rectas sin dispositivos de empalme $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ = 162,5 MPa.

Sin embargo, si se rehicieran los cálculos suponiendo la existencia de un empalme justo en la sección de pila, se llegaría a categorías mínimas similares, pero habría que compararlas con una categoría normativa $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ = 35 MPa, con lo que la verificación resultaría claramente más estricta.

De cualquier manera, siempre es recomendable no disponer solapes en las secciones de máxima tracción, como es la analizada.

6.2.6 Análisis longitudinal a fatiga por el Método del Daño Acumulado

En la Tabla 143 se resumen los esfuerzos críticos en las secciones de centro de vano y del apoyo intermedio para el paseo de los 5 vehículos integrantes del FLM4 (ver 3.2.4 y Tabla 3) por el carril virtual 1. Posteriormente se analizan en detalle dichas secciones a fatiga por el MDA.

Tabla 143 **Resumen de esfuerzos pésimos para el FLM3 y FLM4**

Vehículo		FLM3	FLM4a	FLM4b	FLM4c	FLM4d	FLM4e
Carga [kN]		480	200	310	490	390	450
Vano principal	ΔM_y [kNm]	3082,6	1664,6	2324,2	3126,8	2468,7	2764,8
Vano lateral	ΔM_y [kNm]	2835,0	1314,4	2073,8	2894,6	2262,2	2495,2
Apoyo intermedio	ΔM_y [kNm]	3877,0	1645,0	2551,0	3939,0	3125,0	3564,0
	ΔV_z [kN]	506,8	212,1	330,7	505,9	400,4	446,9
	ΔM_x [kNm]	1782	743,1	1153	1809	1437	1633

6.2.6.1 Sección de centro de vano principal

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal en la platabanda inferior en centro de vano central, situada a 194,5 cm de la cara superior de la losa. Sólo se examinarán las tensiones normales porque las tensiones tangenciales son despreciables.

Características de la sección:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

    $I_{y,G}$ = 13 832 214,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 42,05 cm (desde la cara superior de la losa).

Ciclo de cargas tipo:

Por tratarse de un tablero hiperestático, es necesario realizar un conteo de carreras de momentos. Sin embargo, el recuento en este caso es muy sencillo al haber 3 vanos: el paso de cualquier vehículo a lo largo del tablero produce un momento flector de valor cero en el centro del vano central al inicio con la entrada del vehículo en el tablero (punto A), pasando al valor del momento mínimo (máximo negativo) cuando el vehículo pasa por la zona central del vano lateral (punto B), y desde ese valor del momento mínimo se pasa al valor del momento máximo cuando el vehículo se sitúa en el centro del vano central (punto D), volviendo al valor de momento mínimo al cargar el vano lateral (punto F), y a cero a la salida (punto G) (Figura 222).

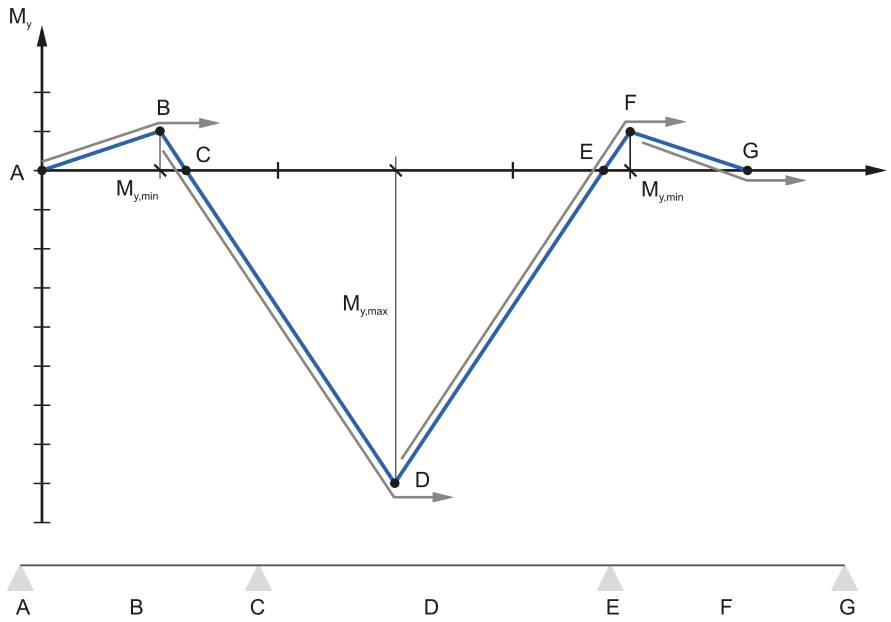


Figura 222 **Esquema de momentos en centro del vano central y conteo de semiciclos por el método de la gota de agua**

Por lo tanto, las carreras que se producen (en variación de momento flector) son las siguientes:

$\Delta M_{y,1} = 0 - M_{y,\min}$ una semicarrera de A a B

$\Delta M_{y,2} = M_{y,\max} - M_{y,\min}$ dos semicarreras B a D y D a F, o lo que es lo mismo, una carrera completa de B a F

$\Delta M_{y,3} = 0 - M_{y,\min}$ una semicarrera de F a G

Se producen 2 semicarreras de valor igual al momento mínimo en la sección ($\Delta M_{y,1}$ y $\Delta M_{y,3}$) y una igual al salto entre el momento mínimo y el momento máximo ($\Delta M_{y,2}$). Dado que las 2 semicarreras ($\Delta M_{y,1}$ y $\Delta M_{y,3}$) tienen un valor del orden de la octava o novena parte que la carrera principal máxima ($\Delta M_{y,1}$), no producen daño, al estar el valor de $\Delta\sigma$ (producido por $\Delta M_{y,1}$ o $\Delta M_{y,3}$) por debajo de $\Delta\sigma_L$, por lo que se descartan. A efectos prácticos, sólo se trabajará con la máxima oscilación de momentos flectores $\Delta_{My} = M_{y,max} - M_{y,min}$ que es la que producirá la oscilación $\Delta\sigma$.

Curva de fatiga:

Para la evaluación del daño acumulado se parte de un detalle con una categoría de fatiga 71, condicionada por la posible presencia de un ojal en el extremo del alma en el cruce con una soldadura a tope de la platabanda inferior, aunque lo habitual sería intentar evitar este detalle y concebir la estructura para que como mínimo se tuvieran detalles con categoría 80, como ya se expuso en las verificaciones por el MS.

Se adopta un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35, supuesta integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9.

En este caso, con una categoría de fatiga teórica de 71, los puntos singulares de la curva S–N de fatiga (Figura 17), afectados ya por el coeficiente parcial γ_{Mf} = 1,35 serán los siguientes, calculados acorde con 3.3.2.1:

- para 2 millones de ciclos, categoría del detalle (minorada por γ_{Mf}):

$$\Delta\sigma_C = \frac{71}{1{,}35} = 52{,}59 \text{ MPa}$$

- para 5 millones de ciclos, límite de fatiga bajo amplitud constante (minorado por γ_{Mf}). Punto de cambio de pendiente de la curva S–N de m = 3 a m = 5:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_c = 0{,}7368\ \Delta\sigma_c = 38{,}75 \text{ MPa}$$

- para 100 millones de ciclos, umbral de daño (minorado por γ_{Mf}). Punto de cambio de pendiente de la curva S–N de m = 5 a $m \to \infty$:

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0{,}5493\ \Delta\sigma_D = 0{,}4047\ \Delta\sigma_C = 21{,}28 \text{ MPa}$$

A partir de estos puntos, y aplicando la expresión (21), es posible determinar el número de ciclos resistentes N_R para cada una de las carreras de tensión:

- Si $\Delta\sigma \geq \Delta\sigma_D$, tramo con m = 3, y:

$$N_R = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma} \right)^{1/3} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma} \right)^{1/3}$$

- Si $\Delta\sigma_D \geq \Delta\sigma \geq \Delta\sigma_L$, tramo con m = 5, y:

$$N_R = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma} \right)^{1/5} = 100 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma} \right)^{1/5}$$

- Si $\Delta\sigma < \Delta\sigma_L, N_R \rightarrow \infty$ y por tanto esa carrera de tensión ($\Delta\sigma$) no produce daño alguno

Carrera tensional normal $\Delta\sigma$ en la fibra de control y número de ciclos de rotura:

La carrera de tensión $\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff}\, Q_k)$ que producirá cada vehículo de fatiga tipo definido en la Tabla 143 se obtiene según la expresión (72) y su resultado se incluye en la Tabla 144.

$$\Delta\sigma\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right) = \frac{\Delta M_y}{I_{yG}}\, z_{G,\text{inf}} \tag{72}$$

donde:

ΔM_y variación de momento flector producido en el centro del vano por el vehículo analizado, de valor $\Delta M_y = M_{y,\max} - M_{y,\min}$

I_{yG} momento de inercia de la sección mixta del centro de vano homogeneizada

$z_{G,inf}$ distancia de la fibra inferior de la sección bijácena al centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada

En la Tabla 145 se resume, para cada vehículo tipo analizado, el cálculo de su carrera de tensión $\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff}\, Q_k)$, el número de ciclos que produciría en cada caso la rotura por fatiga (N_R), y el valor del daño que produciría una carrera de cada vehículo ($D = 1/N_R$)[5]

5 Como se indicó ya en el ejemplo anterior, hay que remarcar que el análisis del MDA se está haciendo presuponiendo un tráfico tipo en composición e intensidad, ante la ausencia de datos reales de tráfico. En todos los casos, con los vehículos tipo analizados, las carreras de tensión individuales (Tabla 144) quedan por debajo del CAFL ($\Delta\sigma_D$). En el caso de que el tráfico real quedase perfectamente representado por el tráfico tipo analizado, y se pudiera asegurar que nunca a lo largo de la vida útil se llegara a producir una carrera de tensión por encima de $\Delta\sigma_D$, acorde con 1.3.3.3 de UNE-EN 1993-1-9, en estos casos no habría daño y la vida del detalle sería ilimitada. Por tanto, si se tiene la plena y absoluta certeza de que todas las carreras son inferiores a $\Delta\sigma_D$, la curva de fatiga se simplifica pasando a un tramo horizontal a partir de este punto (línea discontinua en la Figura 17). A la inversa, si al menos una carrera supera este límite, la curva de fatiga es la de tres ramas para tener en cuenta, como ya se explicó en 2.3, el daño adicional causado por las carreras de orden inferior, inicialmente inocuas, a medida que la fatiga progresa.
En general, la situación de que a lo largo de la vida útil se produzca al menos una posibilidad de superar el límite de $\Delta\sigma_D$ es más que razonable, por ejemplo con el paso esporádico de algún vehículo especial con cargas importantes, por lo tanto el ejemplo se desarrollará calculando los daños producidos por las carreras incluidas en la Tabla 144, aunque todas ellas queden por debajo del valor $\Delta\sigma_D$

Tabla 144 **Cálculo del daño unitario generado por cada vehículo analizado**

Vehículo	$\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff}\ Q_k)$ [MPa]	Control	m	N_R [10^6]	$D = 1 / N_R$
FLM3	33,973	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (21,28/33,973)^5 = 9,6536	1,036·10^{-7}
FLM4a	18,346	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\longrightarrow \infty$	$\longrightarrow \infty$	0
FLM4b	25,615	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (21,28/25,615)^5 = 39,6176	2,524·10^{-8}
FLM4c	34,461	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (21,28/34,461)^5 = 8,9891	1,112·10^{-7}
FLM4d	27,208	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (21,28/27,208)^5 = 29,3006	3,413·10^{-8}
FLM4e	30,471	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (21,28/30,471)^5 = 16,6313	6,013·10^{-8}

Cálculo del daño acumulado:

A partir de los daños producidos por cada carrera, es posible determinar el daño acumulado para cada escenario de tráfico del FLM3 y FLM4 en sus tres composiciones de tráfico (Tabla 3), con distintas intensidades de tráfico anual (Tabla 4) y una vida útil de 100 años, simplemente aplicando la expresión (54).

En la Tabla 145 se subrayan los casos en los que el daño resultaría superior a la unidad, incumpliendo a fatiga con la categoría del detalle teórico 71 del que se partió para desarrollar el ejemplo. El resto de casos, en los que el daño es menor de la unidad, cumplirían con holgura a fatiga con ese detalle tipo.

Tabla 145 **Daño acumulado para todos los escenarios de tráfico con $\Delta\sigma_C$ = 71**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	0,518	0,340	0,220	0,058
	0,125	1,295	0,850	0,550	0,144
	0,50	5,180	3,401	2,201	0,577
	2,00	20,719	13,603	8,804	2,307

Obtención de la categoría de fatiga óptima:

Sería posible tantear diferentes valores de categoría para que, en cada escenario de tráfico, se lograra un daño igual a la unidad. También es posible deducirla analíticamente sabiendo que, en este caso, ninguna oscilación tensional entra en el dominio de m = 3. El factor de corrección de la categoría inicialmente supuesta es, aproximadamente, la raíz quinta del daño.

Así, la Tabla 146 muestra las categorías de fatiga óptimas en cada caso, o sea, las que llevan a que el daño acumulado sea igual a uno.

Tabla 146 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	63	55	50	39
	0,125	75	69	63	49
	0,50	99	91	84	64
	2,00	114	115	104	84

Como ya se describió en 6.2.5.1 al aplicar el MS, aunque lo habitual podría ser tener detalles con categoría mínima 80 (en lugar de 71, como se tanteó en el ejemplo), será necesario redimensionar la platabanda inferior para conseguir que, en todos los escenarios de tráfico, se cumpla con una categoría 80.

Comparando estos valores (Tabla 146) con los resultantes del Método Simplificado (Tabla 130), se aprecia que, no sólo en aquellos casos en los que gobierna el límite de λ_{max}, sino también en otros (en los que λ_1 tiene influencia), las categorías predichas por el MS son ligeramente inferiores a las obtenidas mediante el MDA.

A la vista de estos resultados, parecería necesario corregir la calibración del MS. Una posible solución a esta divergencia sería fijar el valor de λ_1 en 2,20 para todos los casos y redefinir λ_{max} como (73):

$$\lambda_{\max} = 2{,}20 \left(\frac{N_{obs}}{500\,000} \right)^{\frac{1}{5}} \tag{73}$$

Conforme a esta aproximación, las categorías mínimas resultantes según el MS (corregido) serían ligeramente conservadoras respecto al MDA, como se demuestra a continuación:

Tabla 147 **Categoría mínima del detalle obtenida mediante el MS corregido con la expresión (73) [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	63,66	59,08	53,98	42,00
	0,125	76,47	70,96	64,84	50,45
	0,50	100,90	93,63	85,55	66,57
	2,00	133,14	123,54	112,88	87,84

6.2.6.2 Sección de centro de vano lateral

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal en la platabanda inferior en centro de vano lateral, situada a 196,5 cm de la cara superior de la losa. Sólo se examinarán las tensiones normales porque las tensiones tangenciales son despreciables.

Características de la sección:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada:

    $I_{y,G}$ = 10 117 775,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada:

    $z_{G,sup}$ = 38,0 cm (desde la cara superior de la losa)

Ciclo de cargas tipo:

En el caso de esta sección, el paso de cualquier vehículo a lo largo del tablero produce un momento flector de valor cero en el centro del vano lateral al inicio con la entrada del vehículo en el tablero (punto A), pasando al valor del momento máximo, que denominaremos $M_{y,\max 1}$, cuando el vehículo pasa por la zona central del vano lateral (punto B), y desde ese valor del momento máximo se pasa al valor del momento mínimo, máximo de valor negativo, $M_{y,\min}$, cuando el vehículo se sitúa en el centro del vano central (punto D), pasando a otro valor positivo al cargar la zona central del tercer vano, que denominaremos $M_{y,\max 2}$, (punto F), y a cero a la salida (punto G) (Figura 223).

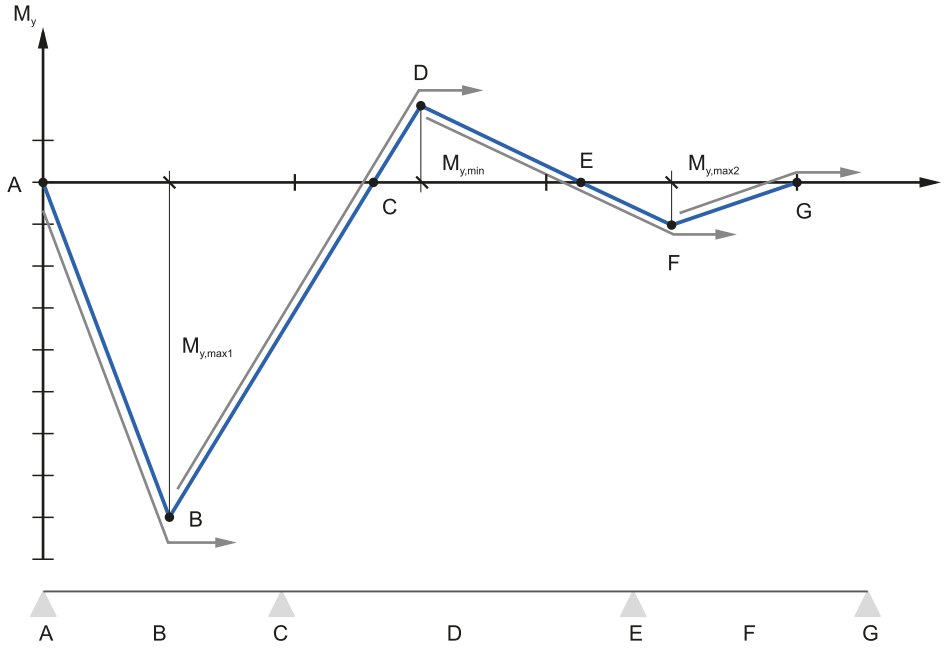


Figura 223 **Esquema de momentos en centro del vano lateral y conteo de semiciclos por el método de la gota de agua**

Por lo tanto, se producen las carreras siguientes (en variación de momento flector):

$$\Delta M_{y,1} = M_{y,\max 1} - 0 \text{ una semicarrera de A a B}$$

$$\Delta M_{y,2} = M_{y,\max 1} - M_{y,\min} \text{ una semicarrera de B a D}$$

$$\Delta M_{y,3} = M_{y,\max 2} - M_{y,\min} \text{ una semicarrera de D a F}$$

$$\Delta M_{y,4} = M_{y,\max 2} - 0 \text{ una semicarrera de F a G}$$

El valor de $\left| M_{y,\min} \right|$ es del orden de la quinta parte de $M_{y,\max 1}$, y el valor de $M_{y,\max 2}$ es del orden de entre la sexta y la octava parte de $M_{y,\max 1}$, por lo que a efectos prácticos las semicarreras $\Delta M_{y,3}$ y $\Delta M_{y,4}$ producirán variaciones de tensiones muy bajas que no producirán daño (con $\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$, por debajo del umbral de daño).

Las dos semicarreras $\Delta M_{y,1}$ y $\Delta M_{y,2}$ tienen orden de magnitud parecidas (al ser $M_{y,\max 1} >> M_{y,\min}$, del orden de 5 veces mayor). Para no complicar los cálculos, y evitar tener que considerar dos semicarreras de valor muy parecido, adoptaremos como valor de la carrera (suma de dos semicarreras) el máximo valor de los dos (en este caso $\Delta M_{y,2}$ que será del orden de un 20% mayor que $\Delta M_{y,1}$)

Por tanto, el cálculo del MDA en este caso se realizará considerando para cada vehículo una carrera con variación de momento flector igual a:

$$\Delta M_{y,2} = M_{y,\max 1} - M_{y,\min}$$

Curva de fatiga:

Para la evaluación del daño acumulado se parte, como en el caso del centro del vano principal, de una categoría de fatiga 71, condicionada por la posible presencia de un ojal en el extremo del alma en el cruce con una soldadura a tope de la platabanda inferior, aunque lo habitual sería intentar evitar este detalle y concebir la estructura para que como mínimo se tuvieran detalles con categoría 80, como ya se expuso en las verificaciones por Método Simplificado del daño equivalente.

Se adopta un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35, supuesta integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9.

Con estos datos, los resultados de los puntos singulares de la curva de fatiga (Figura 17) son los mismos que los obtenidos en el punto anterior:

$$\Delta\sigma_C = \frac{71}{1{,}35} = 52{,}59 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_c = 0{,}7368\, \Delta\sigma_c = 38{,}75 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0{,}5493\,\Delta\sigma_D = 0{,}4047\,\Delta\sigma_C = 21{,}28\ \text{MPa}$$

Carrera tensional normal $\Delta\sigma$ en la fibra de control y número de ciclos de rotura:

Siguiendo la misma metodología que en el punto anterior, en la Tabla 148 se resume, para cada vehículo tipo analizado, el cálculo de su carrera de tensión $\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff}\, Q_k)$, el número de ciclos que produciría en cada caso la rotura por fatiga N_R, y el valor del daño que produciría una carrera de cada vehículo $(D = 1/N_R)$.

Tabla 148 **Cálculo del daño unitario generado por cada vehículo analizado**

Vehículo	$\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff}\, Q_k)$ [MPa]	Control	m	N_R [10^6]	$D = 1 / N_R$
FLM3	44,412	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_D$	3	5 (38,75/44,412)^3 = 3,32111	3,01103·10^{-7}
FLM4a	20,591	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\longrightarrow \infty$	$\longrightarrow \infty$	0
FLM4b	32,487	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (21,28/32,487)^5 = 12,0589	8,29258·10^{-8}
FLM4c	45,345	$\Delta\sigma > \Delta\sigma_D$	3	5 (38,75/45,345)^3 = 3,120303	3,20481·10^{-7}
FLM4d	35,438	$\Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L$	5	100 (21,28/35,438)^5 = 7,8075	1,28081·10^{-7}
FLM4e	39,089	$\Delta\sigma > \Delta\sigma_D$	3	5 (38,75/39,089)^3 = 4,87103	2,05295·10^{-7}

Cálculo del daño acumulado:

A partir de los daños producidos por cada carrera, es posible determinar el daño acumulado para cada escenario de tráfico del FLM3 y FLM4 en sus tres composiciones de tráfico (Tabla 3), con distintas intensidades de tráfico anual (Tabla 4) y una vida útil de 100 años, simplemente aplicando la expresión (54).

En la Tabla 149 se subrayan los casos en los que el daño resultaría superior a la unidad, incumpliendo a fatiga con la categoría del detalle teórico 71 del que se partió para realizar el ejemplo. El resto de casos, en los que el daño es menor de la unidad, cumplirían con holgura a fatiga con ese detalle tipo.

Tabla 149 **Daño acumulado para todos los escenarios de tráfico con $\Delta\sigma_C$ = 71**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	1,506	1,021	0,670	0,184
	0,125	3,764	2,552	1,674	0,460
	0,50	15,055	10,206	6,696	1,842
	2,00	60,221	40,826	26,783	7,368

Obtención de la categoría de fatiga óptima:

Sería posible tantear diferentes valores de categoría para que, en cada escenario de tráfico, se lograra un daño igual a la unidad. También sería posible deducirla analíticamente sabiendo que, tal y como se describió en 3.6.2, en el caso de que hubiera carreras de tensión en las dos ramas (m = 3 y m = 5), como es el caso, sería siempre conservador tomar para el factor corrector de la categoría del detalle de partida la raíz cúbica del daño cuando éste es superior a la unidad, y la raíz quinta cuando el daño es inferior a la unidad.

Aplicando este criterio, se llega a los resultados de la Tabla 150 con las categorías de fatiga óptimas en cada caso, o sea, las que llevan a que el daño acumulado sea igual a uno.

Tabla 150 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	77	71	62	40
	0,125	93	86	79	55
	0,50	122	113	104	80
	2,00	161	149	137	106

Como ya se describió en 6.2.5.2 al aplicar el MS, aunque lo habitual podría ser tener detalles con categoría mínima 80 (en lugar de 71, como se tanteó en el ejemplo), será necesario redimensionar la platabanda inferior para conseguir que, en todos los casos de tráfico, se cumpla con una categoría 80.

Comparando estos valores (Tabla 150) con los resultantes del Método Simplificado (Tabla 132), se aprecia que en general las categorías predichas por el MS son inferiores a las obtenidas mediante el MDA, como ya se expuso al analizar la sección de centro de vano principal.

6.2.6.3 Sección de apoyo intermedio: tensiones normales

Fibra de control frente a fatiga:

Unión transversal de la platabanda superior en la sección de pila, situada a 30 cm de la cara superior de la losa.

Características de la sección:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada, con la losa superior considerada como completamente fisurada (del lado de la seguridad):

    $I_{y,G}$ = 48 375 524,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)
  - Posición del centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada

    $z_{G,sup}$ = 185,47 cm (desde la cara superior de la losa)
- Oscilación tensional normal en la fibra de control, producida por la oscilación de momentos flectores:

Ciclo de cargas tipo:

En el caso de esta sección, el paso de cualquier vehículo a lo largo del tablero produce un momento flector de valor cero en el apoyo al inicio con la entrada del vehículo en el tablero (punto A), pasando al valor del momento mínimo ($M_{y,\min 1}$) cuando el vehículo pasa por la zona central del vano lateral (punto B), y desde ese valor a un valor nulo (casi nulo) cuando el vehículo pesado se sitúa sobre el apoyo intermedio (punto C), volviendo a pasar a otro valor del momento mínimo ($M_{y,\min 2}$) cuando el vehículo se sitúa en la zona central del vano central (punto D), pasando a un valor positivo al cargar la zona central del tercer vano (que denominaremos $M_{y,\max}$) (punto F), y a cero a la salida (punto G) (Figura 224).

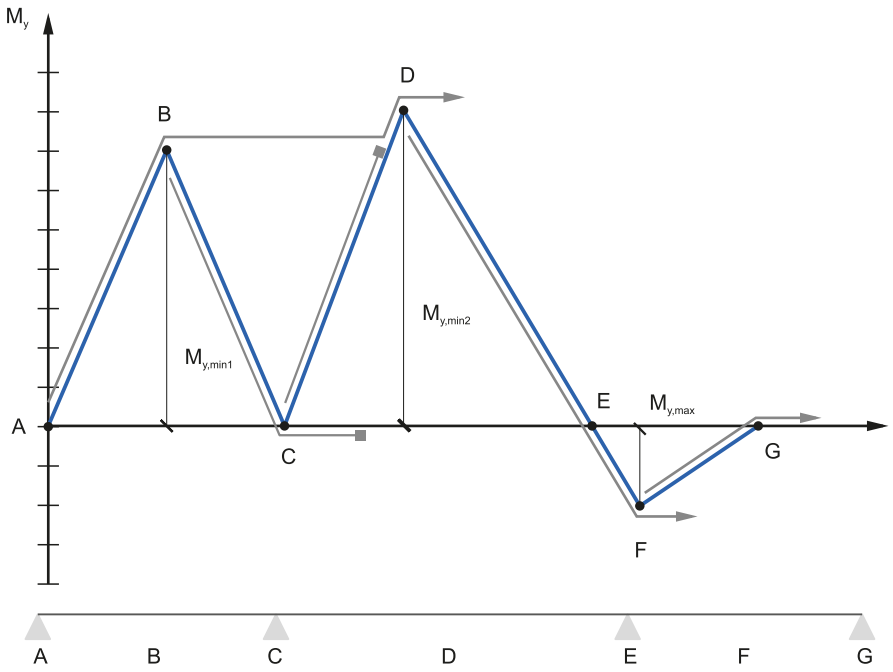


Figura 224 **Esquema de momentos en el apoyo intermedio y conteo de semiciclos por el método de la gota de agua**

Por lo tanto, se producen las carreras siguientes:

con $|M_{y,\min 1}| < |M_{y,\min 2}|$ se producen las semicarreras y carreras siguientes:

$\Delta M_{y,1} = 0 - M_{y,\min 1}$ una carrera (al interrumpirse la corriente de la gota) de B a C

$\Delta M_{y,2} = 0 - M_{y,\min 2}$ una carrera (dos semicarreras de A a D y de C a D)

$\Delta M_{y,3} = M_{y,\max} - M_{y,\min 2}$ una semicarrera de D a F

$\Delta M_{y,4} = M_{y,\max} - 0$ una semicarrera de F a G

En cualquiera de las dos opciones $\Delta M_{y,4}$ es de un orden de magnitud muy inferior al resto de carreras (o semicarreras), y producirán variaciones de tensiones muy bajas que no producirán daño (con $\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$, por debajo del umbral de daño), por lo que no se tendrá en cuenta y, del mismo modo, las variaciones de momentos flectores $\Delta M_{y,1}$ y $\Delta M_{y,2}$, que son de un orden de magnitud similares, también serán entre un 20% y un 25% inferiores en valor absoluto al valor de $\Delta M_{y,3}$, y por lo tanto también producirán variaciones de tensiones por debajo del umbral de daño.

Por tanto, el cálculo del MDA en este caso se realizará considerando para cada vehículo una semicarrera (media carrera por cada paso) con variación de momento flector igual a:

$$\Delta M_{y,3} = M_{y,\max} - M_{y,\min 2}$$

Curva de fatiga:

Para la evaluación del daño acumulado se parte, al igual que en el estudio de las secciones anteriores, de una categoría de fatiga 71, condicionada por la posible presencia de un ojal en el extremo del alma en el cruce con una soldadura a tope de la platabanda inferior, aunque lo habitual sería intentar evitar este detalle y concebir la estructura para que como mínimo se tuvieran detalles con categoría 80, como ya se expuso en las verificaciones por el Método Simplificado del daño equivalente.

Se adopta un coeficiente parcial de resistencia a fatiga γ_{Mf} = 1,35, supuesta integridad asegurada y consecuencias de fallo graves, según la Tabla 3.1 de UNE-EN 1993-1-9.

Con estos datos, los resultados de los puntos singulares de la curva de fatiga (Figura 17) son los mismos que los obtenidos en los dos puntos anteriores:

$$\Delta\sigma_C = \frac{71}{1{,}35} = 52{,}59 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_c = 0{,}7368\, \Delta\sigma_c = 38{,}75 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0{,}5493\, \Delta\sigma_D = 0{,}4047\, \Delta\sigma_C = 21{,}28 \text{ MPa}$$

Carrera tensional normal $\Delta\sigma$ en la fibra de control y número de ciclos de rotura:

Con estos valores, y para una categoría 71, en todos los posibles escenarios de tráfico la carrera de tensiones está muy por debajo del CAFL ($\Delta\sigma << \Delta\sigma_L$), y por lo tanto no se produce daño alguno. Esto queda reflejado en la Tabla 151.

Tabla 151 **Cálculo del daño unitario generado por cada vehículo analizado**

Vehículo	$\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff} Q_k)$ [MPa]	Control	m	N_R [10^6]	$D = 1 / N_R$
FLM3	12,460	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4a	5,287	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4b	8,199	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4c	12,660	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4d	10,043	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0
FLM4e	11,454	$\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	0

Como sucedió al verificar la fatiga con el MS, en la sección de negativos la fatiga no condiciona con los detalles habituales, con mucha holgura.

6.2.6.4 Sección de apoyo intermedio: conexión

Se analizará la conexión en la zona de apoyos intermedios, sometida a los cortantes equivalentes por alma indicados en la Tabla 152.

Tabla 152 **Resumen de cortantes equivalentes por alma en la sección de apoyo intermedio para FLM3 y los distintos vehículos del FLM4**

Vehículo		FLM3	FLM4a	FLM4b	FLM4c	FLM4d	FLM4e
Carga [kN]		480	200	310	490	390	450
Apoyo intermedio	$V_{Z,equiv}$ [kN]	401,9	168,0	261,4	403,7	320,0	359,5

Características de la sección:

- Sección resistente:
  - Inercia de la sección mixta homogeneizada, con la losa superior considerada como completamente fisurada (del lado de la seguridad):

    $I_{y,G}$ = 48 375 524,0 cm^4 (referido a E_s = 2,1·10^5 MPa)

  - Momento estático de la losa (S_{losa}) respecto al centro de gravedad de la sección mixta homogeneizada. Dado que la losa se encuentra fisurada en la sección de negativos, el momento estático será el de las armaduras de la losa, Ø25 a 0,15 en la cara superior de la losa y Ø20 a 0,15 en la inferior, con su cdg aproximadamente a 0,15 m de la cara superior de la losa

$$S_{losa} = A_{acero\ pasivo}\left(z_{G,\mathrm{sup}} - z_{G,acero\ pasivo}\right) =$$

$$11{,}8\,\mathrm{m}\,\frac{8{,}05\cdot10^{-4}\,\mathrm{m}^2}{0{,}15\,\mathrm{m}}\left(1{,}875-0{,}15\right) = 0{,}109243\,\mathrm{m}^3$$

Carrera tensional tangencial $\Delta\tau$:

- Oscilación de esfuerzo rasante en la interfaz losa-platabanda superior:

$$\Delta r = \frac{\Delta V_{z,equiv}\ S_{losa}}{I_{y,G}}\ \ \mathrm{kN/m\ \ en\ cada\ alma}$$

- Oscilación de tensión tangencial en el vástago de los pernos (Tabla 153): admitiendo la distribución plástica de 20 pernos Ø22 por metro y alma, la sección resistente es de:

$$20\,\pi\,\frac{22^2}{4} = 7\,602{,}65\ \text{mm}^2/\text{m}$$

con lo cual la tensión tangencial será de:

$$\Delta\tau\left(\gamma_{Ff}\ Q_k\right) = \frac{\Delta r \quad \text{kN/m}}{7\,602{,}65\ \text{mm}^2/\text{m}}\,10^3\ \text{MPa}$$

En la Tabla 153 se resume, para cada vehículo tipo analizado, la variación del rasante para la sección de apoyo y la carrera de tensiones tangenciales en los pernos conectadores.

Tabla 153 **Rasantes y tensiones tangenciales en pernos conectadores en sección de apoyo intermedio para los vehículos analizados**

Vehículo		FLM3	FLM4a	FLM4b	FLM4c	FLM4d	FLM4e
Carga [kN]		480	200	310	490	390	450
Apoyo intermedio	$V_{Z,equiv}$ [kN]	401,9	168	261,4	403,7	320	359,5
	Δr [kN/m]	90,76	37,94	59,03	91,17	72,26	81,18
	$\Delta\tau$ [MPa]	11,94	4,99	7,76	11,99	9,51	10,68

Número de ciclos de rotura:

En la Tabla 154 se resume, para cada vehículo tipo analizado, a partir de la tensión tangencial en la conexión, el daño que provocaría una carrera de cada vehículo. Recordar, nuevamente, que la curva de fatiga de los pernos (Figura 20) tiene pendiente m = 8 y la categoría del detalle $\Delta\tau_c$ = 90 MPa está referida a 2 millones de ciclos, con un coeficiente parcial de resistencia a fatiga $\gamma_{Mf,s}$ = 1,00.

Tabla 154 **Cálculo del daño unitario generado por cada vehículo analizado en los pernos conectadores**

Vehículo	$\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff}\ Q_k)$ [MPa]	N_R [10^6]	$D = 1/N_R$
FLM3	11,94	$2\,(90/11{,}94)^8 = 2{,}0873\cdot10^7$	$4{,}7909\cdot10^{-14}$
FLM4a	4,99	$2\,(90/4{,}99)^8 = 2{,}239\cdot10^{10}$	$4{,}4663\cdot10^{-17}$
FLM4b	7,76	$2\,(90/7{,}76)^8 = 6{,}5175\cdot10^8$	$1{,}5343\cdot10^{-15}$
FLM4c	11,99	$2\,(90/11{,}99)^8 = 2{,}014\cdot10^7$	$4{,}9653\cdot10^{-14}$
FLM4d	9,51	$2\,(90/9{,}51)^8 = 1{,}2922\cdot10^8$	$7{,}7388\cdot10^{-15}$

Tabla 154 continúa >

Vehículo	$\Delta\sigma\ (\gamma_{Ff} Q_k)$ [MPa]	N_R [10^6]	$D = 1 / N_R$
FLM4e	10,68	$2\ (90/10{,}68)^8 = 5{,}0925 \cdot 10^7$	$1{,}9637 \cdot 10^{-14}$

Cálculo del daño acumulado:

A partir de los daños producidos por cada carrera, es posible determinar el daño acumulado para cada escenario de tráfico del FLM3 y FLM4 en sus tres composiciones de tráfico (Tabla 3), con distintas intensidades de tráfico anual (Tabla 4) y una vida útil de 100 años, aplicando la expresión (54).

En la Tabla 155 se resume el resultado del daño acumulado, verificándose que se cumple con mucha holgura con la categoría del detalle 90, como también sucedió en la verificación por el MS.

Tabla 155 **Daño acumulado para todos los escenarios de tráfico (pernos en apoyos intermedios)**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	$2{,}40 \cdot 10^{-7}$	$1{,}41 \cdot 10^{-7}$	$8{,}69 \cdot 10^{-8}$	$2{,}14 \cdot 10^{-8}$
	0,125	$5{,}99 \cdot 10^{-7}$	$3{,}51 \cdot 10^{-7}$	$2{,}17 \cdot 10^{-7}$	$5{,}36 \cdot 10^{-8}$
	0,50	$2{,}40 \cdot 10^{-6}$	$1{,}41 \cdot 10^{-6}$	$8{,}69 \cdot 10^{-7}$	$2{,}14 \cdot 10^{-7}$
	2,00	$9{,}58 \cdot 10^{-6}$	$5{,}62 \cdot 10^{-6}$	$3{,}47 \cdot 10^{-6}$	$8{,}57 \cdot 10^{-7}$

Distribución óptima de pernos según fatiga por MDA:

El factor de corrección de la categoría inicialmente considerada (90) es, matemáticamente, la raíz octava del daño. Así, se llega a las siguientes categorías estrictas (Tabla 156).

Tabla 156 **Categoría mínima del detalle [MPa]**

Escenario		FLM3	FLM4 + Larga Distancia	FLM4 + Media Distancia	FLM4 + Tráfico Local
N_{obs} (10^6 veh/año)	0,05	13,39	12,52	11,78	9,80
	0,125	15,01	14,04	13,21	10,99
	0,50	17,85	16,69	15,71	13,07
	2,00	21,23	19,85	18,68	15,55

Comparando estos resultados (Tabla 156) con los obtenidos por el Método Simplificado (Tabla 138), se aprecia que los resultados se ajustan bastante bien.

Anejo A
CATEGORÍA DE DETALLES DE FATIGA SEGÚN UNE-EN 1993-1-9

En este anexo se incluyen las tablas 8.1 a 8.10 de UNE-EN 1993-1-9 con la definición de las categorías de detalle de fatiga.

Tabla 8.1 de UNE-EN 1993-1-9. Detalles sin uniones o con uniones mecánicas

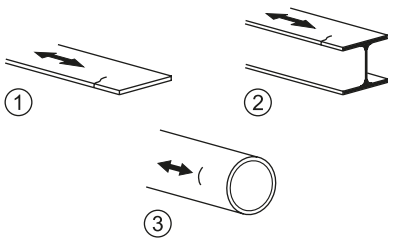
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
160	NOTA: La resistencia a fatiga asociada a la categoría 160 es la más alta. Ningún detalle puede tener mayor resistencia a fatiga para ningún número de ciclos 	Productos laminados o extruidos 1) Chapas y productos planos brutos de laminación. 2) Perfiles laminados brutos de laminación. 3) Perfiles huecos sin soldadura, circulares o rectangulares.	Detalles 1) a 3): Las aristas vivas, los defectos superficiales y los defectos de laminación deberán desbastarse hasta su eliminación, dejando transiciones suaves.

Tabla 8.1 continúa >

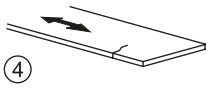
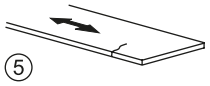
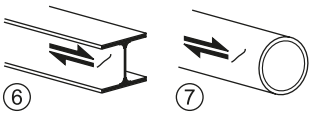
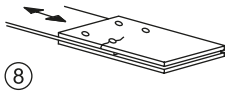
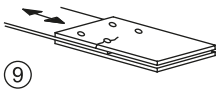
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos	
140	 ④	Chapas oxicortadas o cizalladas 4) Material oxicortado o cizallado con posterior saneamiento de bordes. 5) Material oxicortado a máquina con estrías de corte regulares y poco profundas, o a mano con posterior saneamiento de bordes para eliminación de aristas. Máquinas de oxicorte que cumplan las especificaciones de calidad de la Norma Europea EN 1090.	4) Deberá eliminarse toda traza visible de aristas. Las superficies de corte deberán ser mecanizadas o desbastadas y toda rebaba eliminada. Cualquier marca dejada por la maquinaria empleada, por ejemplo en el desbastado, deberá ser paralela a la dirección de las tensiones. Detalles 4) y 5) - Las esquinas entrantes deberán ser mejoradas mediante desbaste (pendiente $\leq 1/4$) o tenerse en cuenta en los cálculos mediante el factor de concentración de tensiones correspondiente. - No se admiten reparaciones por relleno con soldadura.	
125	 ⑤			
100 $m = 5$	 ⑥ ⑦	6) y 7) Productos fabricados por laminación o extrusión, como los de los detalles 1), 2), 3).	Detalles 6) y 7): $\Delta\tau$ calculado como: $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$	
Si los detalles 1-5 se ejecutan en acero con resistencia mejorada a la corrosión debe adoptarse la categoría de detalles inmediatamente inferior				
112	 ⑧	8) Unión simétrica con cubrejuntas doble y tornillos pretensados de alta resistencia.	8) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	En general, para uniones atornilladas (detalles 8 a 13): Distancia a los extremos $e_1 \geq 1{,}5\ d$ Distancia a los bordes $e_2 \leq 1{,}5\ d$ Espaciamiento $p_1 \geq 2{,}5\ d$ Espaciamiento $p_2 \leq 2{,}5\ d$ Para los detalles véase la Norma Europea EN 1993-1-8, figura 3.1
		8) Unión simétrica con cubrejuntas doble, tornillos pretensados y taladros inyectados.	8) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	
90	 ⑨	9) Unión con cubrejuntas doble y tornillos calibrados.	9) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	
		9) Unión con cubrejuntas doble, tornillos sin pretensar y taladros inyectados.	9) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.	

Tabla 8.1 continúa >

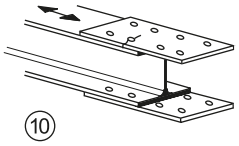
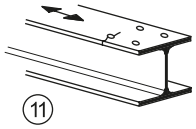
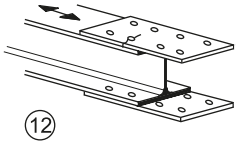
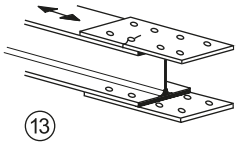
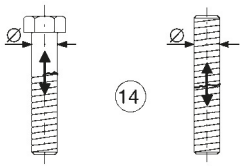
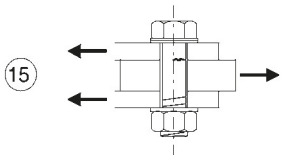
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
90	 10	10) Unión con cubrejuntas simple y tornillos pretensados de alta resistencia.	10) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.
		10) Unión con cubrejuntas simple, tornillos pretensados y taladros inyectados.	10) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección bruta.
	 11	11) Elemento estructural con taladros sometido a esfuerzo normal y momento flector.	11) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta..
80	 12	12) Unión con cubrejuntas simple y tornillos calibrados.	12) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta.
		12) Unión con cubrejuntas simple, tornillos sin pretensar y taladros inyectados.	12) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta.
50	 13	13) Unión simétrica con cubrejuntas simple o doble, tornillos sin pretensar y taladros de holgura ordinaria. Sin inversión de carga.	13) Para el cálculo de $\Delta\sigma$ se utilizará la sección neta.
50	 14	14) Tornillos y espárragos traccionados con rosca laminada o mecanizada. Para diámetros grandes (tornillos de anclaje) se tendrá en cuenta el efecto del tamaño mediante k_s	14) El valor de $\Delta\sigma$ debe calcularse en las secciones traccionadas del tornillo, teniendo en cuenta los esfuerzos de flexión y tracción debidos a la unión, así como las tensiones de flexión debidas a otras causas. En tornillos pretensados, puede tenerse en cuenta la reducción de la carrera de tensiones.
	Efecto del tamaño para ϕ > 30 mm: $k_s = (30/\phi)^{0.25}$		
100 $m = 5$	 15	15) Tornillos sometidos a cortadura simple o doble sin rosca en las secciones bajo esfuerzo cortante – Tornillos calibrados. – Tornillos ordinarios sin inversión de carga (tornillos de los tipos 5.6, 8.8 o 10.9).	15) Para el cálculo de $\Delta\tau$ se utilizará la sección de la espiga.

Tabla 8.2 de UNE-EN 1993-1-9. Piezas armadas soldadas

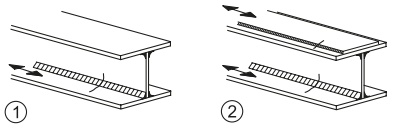
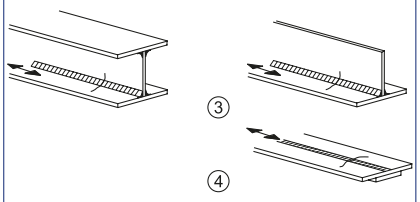
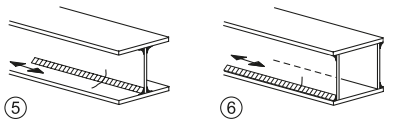
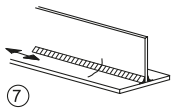
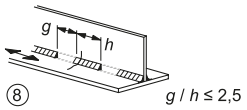
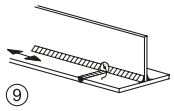
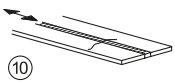
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
125		Cordones longitudinales continuos 1) Soldaduras a tope con ejecución automática o completamente mecanizada efectuada desde ambos lados. 2) Soldaduras en ángulo de ejecución automática o completamente mecanizada. Los extremos de las platabandas se comprobarán como detalles 6) o 7) de la tabla 8.5.	Detalles 1) y 2): La soldadura deberá ejecutarse ininterrumpidamente, a menos que se trate de una reparación realizada por especialistas y verificada mediante inspección.
112		3) Soldaduras a tope o en ángulo con ejecución automática o completamente mecanizada intermitente efectuada desde ambos lados. 4) Soldaduras a tope con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida efectuada con chapa dorsal continua desde un solo lado.	4)La categoría de este detalle es 100 N/mm² cuando se ejecuta intermitentemente.
100		5) Soldaduras a tope o en ángulo ejecutadas manualmente. 6) Soldaduras a tope, de ejecución automática o completamente mecanizada o manual desde un solo lado, en particular las de vigas cajón.	5) y 6) Es fundamental conseguir un buen ajuste entre las chapas de alma y de ala. Los bordes de alma deben acondicionarse para que la penetración de la soldadura en la raíz de la unión sea regular y continua.
100		7) Reparaciones automáticas o completamente mecanizadas o manuales de soldaduras a tope o en ángulo de detalles 1) a 6).	7) Es posible recuperar la categoría del detalle original mejorando la reparación mediante desbaste realizado por especialistas para eliminar los signos visibles de la reparación y la posterior verificación del detalle reparado.
80		8) Soldaduras longitudinales discontinuas en ángulo.	8) Los valores de $\Delta\sigma$ basados en las tensiones normales del ala.
71		9) Soldaduras longitudinales, a tope o en ángulo, o soldaduras interrumpidas por groeras de altura no superior a 60 mm. Para groeras de altura superior a 60 mm, véase el detalle 1) de la tabla 8.4.	9) Los valores de $\Delta\sigma$ basados en las tensiones normales del ala.
125		10) Soldaduras longitudinales a tope, enrase de ambas caras con muela en la dirección de carga, 100% END.	
112		10) Ejecución ininterrumpida; sin desbaste.	
90		10) Ejecución con interrupciones	

Tabla 8.2 continúa >

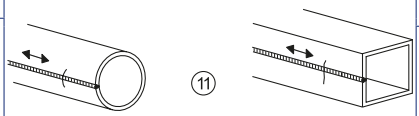
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
140		11) Soldaduras longitudinales de cierre de perfiles huecos con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida.	Espesor de pared $t \leq 12{,}5$ mm
125		11) Soldaduras longitudinales de cierre de perfiles huecos con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida.	Espesor de pared $t \leq 12{,}5$ mm
90		11) Ejecución con interrupciones.	
Los detalles 1 a 11 ejecutados con soldadura automática y con soldadura mecanizada tienen igual categoría de detalle.			

Tabla 8.3 de UNE-EN 1993-1-9. Empalmes soldados

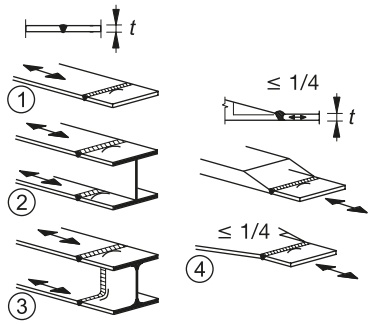
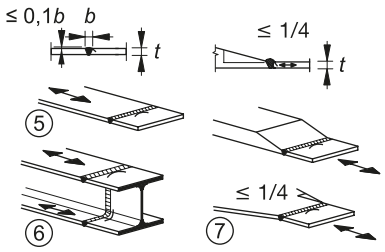
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
112		Sin chapa de respaldo: 1) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos. 2) Empalmes en prolongación de alas y almas antes del armado de la viga. 3) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas sin groeras. 4) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$	- 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). Detalle 3): Sólo para uniones de perfiles laminados, cortadas y soldadas.
	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0,2}$		
90		5) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos. 6) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas sin groeras. 7) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$. Eliminación de entallas en soldaduras por mecanizado.	- 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). Detalles 5 y 7): Soldaduras ejecutadas en posición horizontal.
	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0,2}$		

Tabla 8.3 continúa >

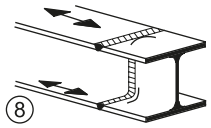
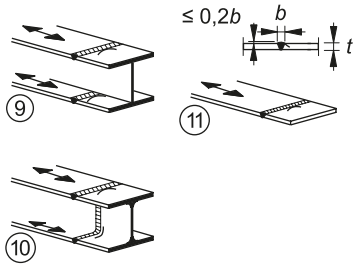
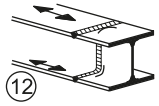
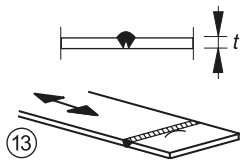
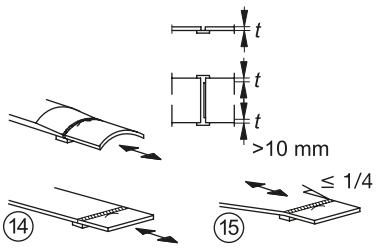
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
90		8) Como el detalle 3) pero con groeras.	- Todas las soldaduras enrasadas mediante muela con la superficie de las chapas paralela a la dirección de la flecha. - Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, bordes de chapa enrasados 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.
	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		
80		9) Empalmes en prolongación de vigas armadas sin groeras. 10) Empalmes en prolongación de perfiles laminados mediante soldadura a tope de secciones completas con groeras. 11) Empalmes en prolongación de chapas, productos planos, perfiles laminados y chapas de vigas armadas.	- 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). Detalle 10: Sobreespesor de cordones inferiores al 10 % de la anchura con transición gradual al plano de las superficies empalmadas.
	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		
63		12) Empalmes en prolongación de perfiles laminados con soldadura a tope de secciones completas sin groeras.	- Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, bordes de chapa enrasados con muela según dirección de la tensión. - Soldaduras en ambas caras.
36		13) Soldaduras a tope ejecutadas desde un solo lado..	13) Sin chapa dorsal.
71	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$	13) Soldaduras a tope ejecutadas desde un solo lado con penetración total y verificación mediante técnicas END apropiadas.	
71		<u>Con chapa dorsal:</u> 14) Empalmes en prolongación. 15) Empalmes en prolongación de chapas y productos planos o curvos de anchura o espesor rebajado con pendiente $\leq 1/4$.	<u>Detalles 14 y 15):</u> Soldaduras en ángulo de unión de la chapa dorsal con extremos distantes más de 10 mm de la chapa cargada. Puntos de soldadura aplicados en la zona a ocupar por las soldaduras a tope.
	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0.2}$		

Tabla 8.3 continúa >

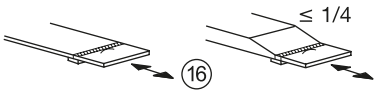
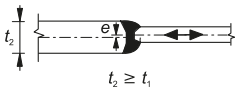
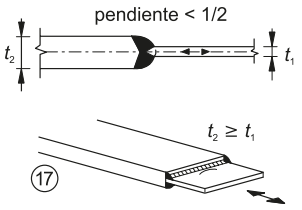
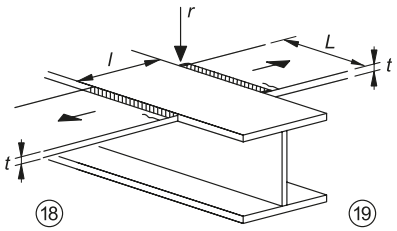
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
50	 Efecto del tamaño para $t > 25$ mm $k_s = (25/t)^{0,2}$	16) Empalmes en prolongación con chapa dorsal permanente y anchura o espesor rebajado con pendiente ≤ 1/4. También válido para chapas curvadas.	16) Si los extremos de las soldaduras 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.
71	Efecto del tamaño para $t > 25$ mm y/o excentricidad: $k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0,2} / \left(1 + \frac{6e}{t_1} \frac{t_1^{1,5}}{t_1^{1,5} + t_2^{1,5}}\right)$ 		17) Empalmes en prolongación con continuidad del plano medio y discontinuidad de espesor.	
40		18) Empalmes en prolongación a través de ala interpuesta.	Detalles 18) y 19): La comprobación a fatiga del elemento interpuesto debe efectuarse como detalle 4 o 5 de la tabla 8.4.
Como el detalle 4 de la tabla 8.4		19) Para transiciones con acuerdo conforme al detalle 4 de la tabla 8.4.	

Tabla 8.4 de UNE-EN 1993-1-9. Cartelas y rigidizadores soldados

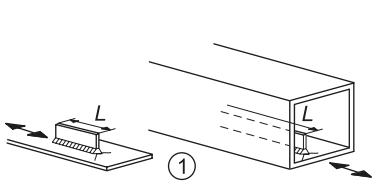
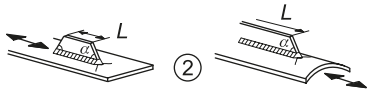
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$L \leq 50$ mm		Cartelas longitudinales: 1) La categoría del detalle es función de la longitud L de la cartela.	El espesor de la cartela debe ser inferior a su altura. En caso contrario, véase la tabla 8.5, detalles 5 o 6.
71	$50 < L \leq 80$ mm			
63	$80 < L \leq 100$ mm			
56	$L > 100$ mm			
71	$L > 100$ mm $\alpha < 45°$		2) Cartelas longitudinales soldadas a chapas o tubos.	

Tabla 8.4 continúa >

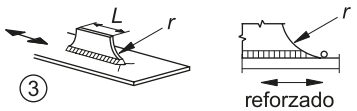
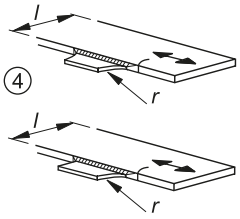
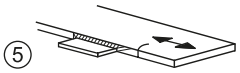
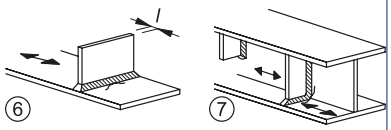
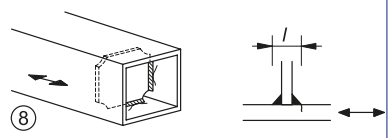
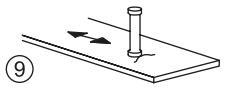
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$r > 150$ mm		3) Cartela con acuerdo de transición soldada en ángulo a una chapa o tubo; extremo del cordón de soldadura reforzado (penetración total); longitud del cordón reforzado > r.	<u>Detalles 3) y 4):</u> Acuerdo de transición 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.
90	$\frac{r}{l} \geq \frac{1}{3}$ o $r > 150$ mm		4) Cartela soldada al borde de una chapa o al del ala de una viga.	
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.	
80	$l \leq 50$ mm		<u>Cartelas o rigidizadores transversales:</u> 6) Cartelas soldadas a chapa. 7) Rigidizadores verticales de vigas unidos por soldadura. 8) Diafragmas de vigas cajón soldados a las alas o a las almas. Para secciones huecas pequeñas pueden no ser viables.Las categorías de detalle son también válidas para rigidizadores anulares.	<u>Detalles 6) y 7):</u> Los extremos de los cordones deben ser cuidadosamente desbastados para eliminar mordeduras. 7) Si el rigidizador termina en el alma (parte izquierda de la figura), $\Delta\sigma$ debe calcularse empleando las tensiones principales.
71	$50 < l \leq 80$ mm			
80			9) Efecto debido a los conectadores de transmisión de cortante soldados sobre material base.	

Tabla 8.5 de UNE-EN 1993-1-9. Uniones soldadas transmisoras de esfuerzos

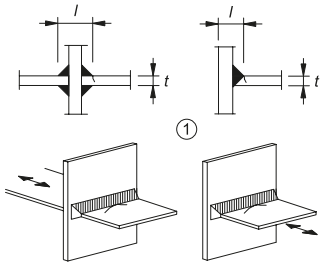
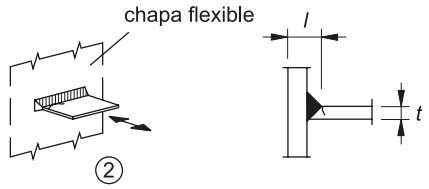
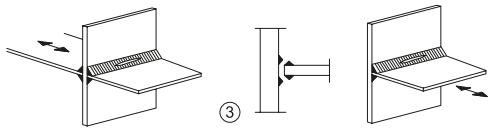
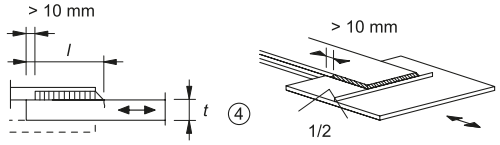
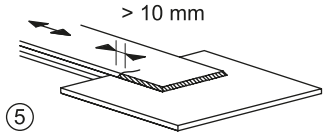
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$l \leq 50$ mm todo t		Uniones en cruz y en T: 1) Fisuración del pie del cordón en soldaduras a tope con penetración total y en todas las soldaduras con penetración parcial.	1) Comprobada mediante inspección la ausencia de discontinuidades y desalineaciones fuera de las tolerancias especificadas por la Norma Europea EN 1090. 2) Para calcular $\Delta\sigma$ se emplean las tensiones nominales modificadas. 3) En uniones con penetración parcial son necesarias dos comprobaciones a fatiga. Una para fisuración de la raíz de la unión con las tensiones definidas en el capítulo 5 y con las categoría de detalle 36* para $\Delta\sigma_{\omega}$ y 80 para $\Delta\tau_{\omega}$ Otra para fisuración del pie del cordón con el valor de $\Delta\sigma$ correspondiente a la chapa que transmite la carga. Detalles 1) a 3): La desalineación de las chapas cargadas no debería superar el 15% del espesor de la chapa interpuesta.
71	$50 < l \leq 80$ mm todo t			
63	$80 < l \leq 100$ mm todo t			
56	$100 < l \leq 120$ mm todo t			
56	$l > 120$ mm $t \leq 20$ mm			
50	$120 < l \leq 200$ mm $t > 20$ mm $l > 200$ mm $20 < t \leq 30$ mm			
45	$200 < l \leq 300$ mm $t > 30$ mm $l > 300$ mm $30 < t \leq 50$ mm			
40	$l > 300$ mm $t > 50$ mm			
Como el detalle 1 de la tabla 8.5			2) Fisuración del pie de cordón desde los extremos de la soldadura, con concentración de tensiones debida a la flexibilidad de la chapa.	
36*			3) Fisuración de la raíz de la unión en uniones en ángulo y en uniones a tope en T con penetración parcial, de acuerdo con la figura 4.6 de la Norma EN 1993-1-8:2005.	
Como el detalle 1 de la tabla 8.5	 Área de la chapa principal sometida a tensiones: pendiente = 1/2		Uniones por solape soldadas: 4) Uniones por solape con soldaduras en ángulo.	4) En la chapa principal, $\Delta\sigma$ debe calcularse empleando el área indicada en la figura. 5) $\Delta\sigma$ también debe calcularse, en las chapas exteriores. Detalles 4) y 5): - Extremos de la soldadura a más de 10 mm del borde de la chapa principal. - La fisuración por cortante de los cordones debería comprobarse como el detalle 8.
45*			Uniones por solape soldadas: 5) Uniones por solape con soldaduras en ángulo.	

Tabla 8.5 continúa >

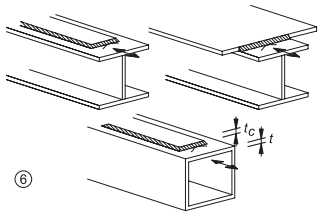
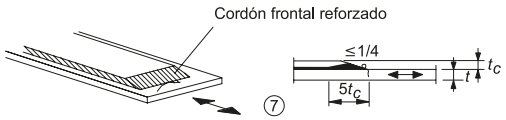
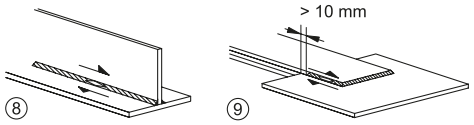
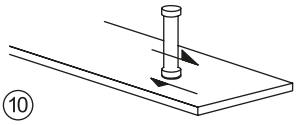
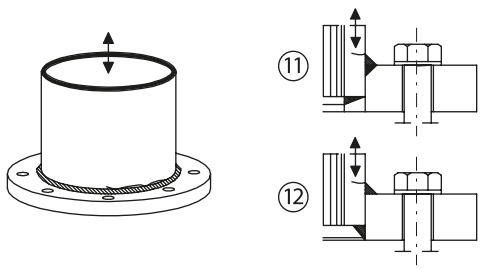
Categoría de detalle	Detalle constructivo			Descripción	Requisitos
	$t_c < t$ [mm]	$t_c \geq t$ [mm]			
56*	$t \leq 20$	-		<u>Platabandas en vigas y vigas armadas:</u> 6) Extremos de platabandas simples o múltiples, soldadas con o sin cordón en el borde frontal.	6) Si la platabanda es más ancha que el ala, es necesario un cordón de soldadura en el borde frontal cuidadosamente desbastado para eliminar mordeduras. La longitud mínima de platabanda es de 300 mm. Para longitudes menores, el efecto del tamaño es el del detalle 1.
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$			
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$			
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$			
36	-	$t > 50$			
56				7) Platabandas en vigas y vigas armadas. La longitud del refuerzo ha de ser superior a 5 t_c	7) El cordón del borde frontal enrasado con muela, así como el extremo de la platabanda, con una pendiente < 1/4, si t_c > 20 mm.
80 m = 5				8) Soldadura continua en ángulo con transmisión de esfuerzos rasantes, como en el caso de las uniones ala-alma en vigas armadas. 9) Uniones por solape con soldaduras en ángulo.	8) $\Delta\tau$ debe calcularse para la sección de garganta del cordón. 9) $\Delta\tau$ debe calcularse para la sección de garganta considerando toda la longitud del cordón, cuyo extremo debe distar más de 10 mm del borde de la chapa. Véanse también los detalles 4) y 5).
90 m = 8 Ver EN 1994-2				<u>Conectadores soldados para transmisión de cortante:</u> 10) Para estructuras mixtas.	10) $\Delta\tau$ se calcula para la sección nominal del perno del conectador.
71				11) Unión tubo-brida con el 80% de soldaduras a tope y penetración total.	11) El pie de soldadura ha de desbastarse y $\Delta\sigma$ se calcula para el tubo.
40				12) Unión tubo-brida con soldaduras en ángulo.	12) $\Delta\sigma$ calculada para el tubo.

Tabla 8.6 de UNE-EN 1993-1-9. Perfiles huecos

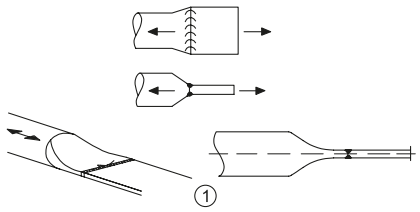
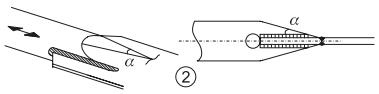
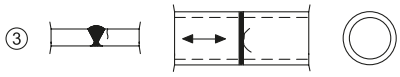
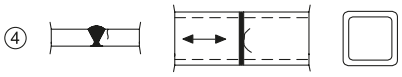
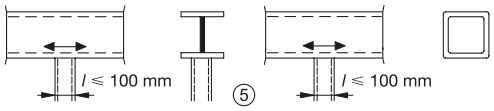
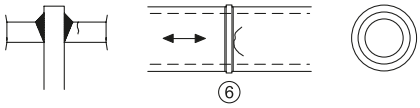
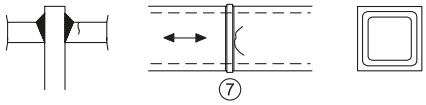
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
71		1) Uniones tubo-chapa con aplastamiento del extremo del tubo, biselado de bordes en X y soldadura a tope.	1) $\Delta\sigma$ se calcula para el tubo. Sólo para un diámetro del tubo inferior a 200 mm.
71 63	$\alpha \leq 45$ $\alpha > 45°$ 	2) Uniones tubo-chapa con soldadura a lo largo de ranuras de inserción de la chapa en el tubo rematadas con taladros.	2) $\Delta\sigma$ se calcula para el tubo. La fisuración por cortante de la soldadura debería comprobarse usando el detalle 8, de la tabla 8.5.
71		Soldaduras a tope con cordones frontales: 3) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles circulares huecos mediante soldaduras a tope.	Detalles 3) y 4): - Cordones con sobreespesor inferior al 10% de la anchura y transición gradual. - Ejecución de la soldadura en posición horizontal, comprobación mediante inspección, y ausencia de defectos fuera de las tolerancias especificadas por la Norma Europea EN 1090. - Para $t > 8$ mm, la categoría de detalle aumenta en dos escalones.
56		4) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles rectangulares huecos mediante soldaduras a tope.	
71		Acoplamientos mediante soldadura: 5) Perfiles huecos circulares o rectangulares unidos a otros perfiles mediante soldaduras en ángulo.	Detalle 5): - Soldaduras que no transmitan carga. - Dimensión paralela a la dirección de las tensiones $l \leq 100$ mm. - Para otros casos, véase la tabla 8.4.
50		Empalmes en prolongación mediante soldadura: 6) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles circulares huecos mediante soldaduras a tope con chapa interpuesta.	Detalles 6) y 7): - Soldaduras que transmitan carga. - Comprobación de soldaduras mediante inspección, y ausencia de defectos fuera de las tolerancias especificadas por la Norma Europea EN 1090. - Para $t > 8$ mm, la categoría de detalle aumenta en un escalón.
45		7) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles rectangulares huecos mediante soldaduras a tope con chapa interpuesta.	

Tabla 8.6 continúa >

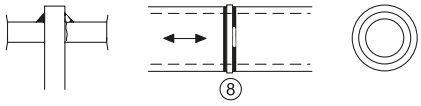
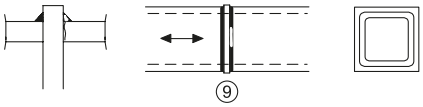
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
40		8) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles circulares huecos mediante soldaduras en ángulo con chapa interpuesta.	Detalles 8) y 9): - Soldaduras que transmitan carga. - Espesores de pared $t > 8$ mm.
36		9) Empalmes en prolongación extremo-extremo entre perfiles rectangulares huecos mediante soldaduras en ángulo con chapa interpuesta.	

Tabla 8.7 de UNE-EN 1993-1-9. Uniones en nudos de vigas en celosía

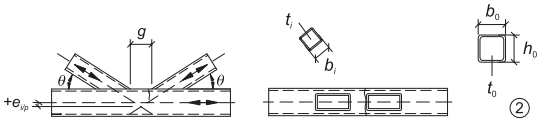
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Requisitos
90 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2{,}0$	Uniones con separación: Detalle 1): Nudos en K y en N, perfiles circulares huecos 	Detalles 1) y 2): - Comprobaciones por separado de cordones y riostras. - Para valores del cociente t_0/t_i comprendidos entre 1 y 2, la categoría de detalle puede obtenerse por interpolación lineal. - Se admite soldadura en ángulo para riostras con espesor de pared $t \leq 8$ mm. t_0 , $t_i \leq 8$ mm $35° \leq \theta \leq 50°$ $(b_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$ $(d_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$ $0{,}4 \leq b_i/b_0 \leq 1{,}0$ $0{,}25 \leq d_i/d_0 \leq 1{,}0$ $b_0 \leq 200$ mm $d_0 \leq 300$ mm $-0{,}5\,h_0 \leq e_{i/p} \leq 0{,}25\,h_0$ $-0{,}5\,d_0 \leq e_{i/p} \leq 0{,}25\,d_0$ $e_{0/p} \leq 0{,}02\,b_0$ o $e_{0/p} \leq 0{,}02\,d_0$ [$e_{0/p}$ es la excentricidad de alabeo] Detalle 2): $0{,}5\,(b_0 - b_i) \leq g \leq 1{,}1\,(b_0 - b_i)$ y $g \geq 2\,t_0$
45 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} = 1{,}0$		
71 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1{,}4$	Uniones con separación: Detalle 2): Nudos en K y en N, perfiles rectangulares huecos 	
36 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} = 1{,}0$		

Tabla 8.7 continúa >

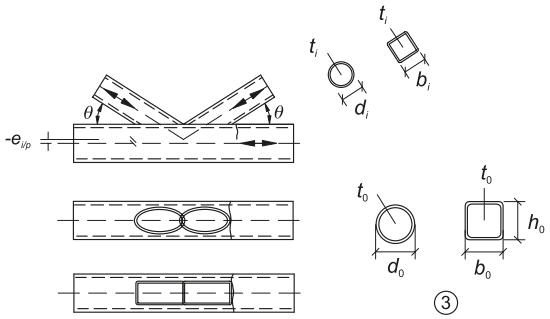
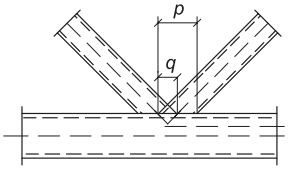
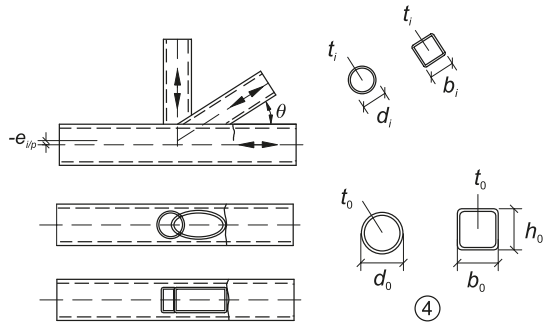
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Requisitos
71 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$	Uniones con solape: Detalle 3): Nudos en K y en N, perfiles circulares huecos  	Detalles 3) y 4): 30% ≤ solape ≤ 100% solape = (q/p) 100 [%] - Comprobaciones por separado de cordones y riostras. - Para valores del cociente t_0/t_i comprendidos entre 1 y 2, la categoría de detalle puede obtenerse por interpolación lineal. - Se admite la soldadura en ángulo para riostras con espesor de pared $t \leq 8$ mm. $t_0, t_i \leq 8$ mm $35° \leq \theta \leq 50°$ $(b_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$ $(d_0/t_0)\,(t_0/t_i) \leq 25$ $0,4 \leq b_i/b_0 \leq 1,0$ $0,25 \leq d_i/d_0 \leq 1,0$ $b_0 \leq 200$ mm $d_0 \leq 300$ mm $0,5\,h_0 \leq e_i/p \leq 0,25\,h_0$ $0,5\,d_0 \leq e_i/p \leq 0,25\,d_0$ $e_{0/p} \leq 0,02\,b_0$ o $\leq 0,02\,d_0$ [$e_{0/p}$ es la excentricidad de alabeo] Definiciones de p y q: 
56 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		
71 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$	Uniones con solape: Detalle 4): Nudos en K y en N, perfiles rectangulares huecos  	
50 $m = 5$	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		

Tabla 8.8 de UNE-EN 1993-1-9. Tableros ortótropos con largueros cerrados

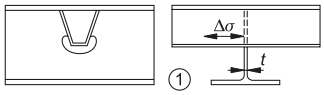
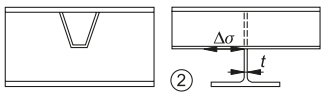
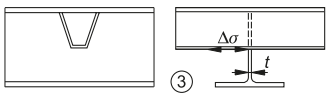
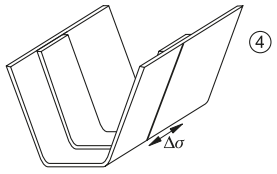
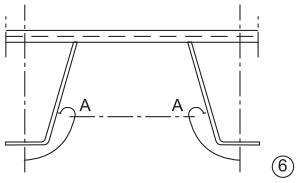
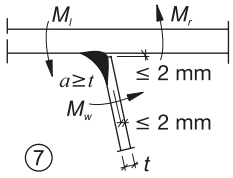
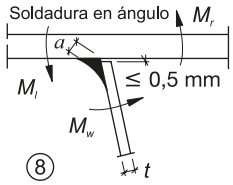
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$t \leq 12$ mm	 	1) Larguero continuo longitudinal con groeras en las viguetas.	1) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensión directa del larguero longitudinal.
71	$t > 12$ mm			
80	$t \leq 12$ mm	 	2) Larguero continuo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

Tabla 8.8 continúa >

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
71		4) Empalme de largueros mediante soldadura a tope con penetración total y chapa dorsal.	4) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensiones normales del larguero.
112 90 80	Como los detalles 1, 2 y 4 de la tabla 8.3 Como los detalles 5 y 7 de la tabla 8.3 Como los detalles 9 y 11 de la tabla 8.3	5) Empalme de largueros mediante soldadura a tope sin chapa dorsal con soldeo por ambos lados y penetración total.	5) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensión directa del larguero. Puntos de soldadura en la zona a ocupar por la soldadura a tope.
71		6) Sección crítica del alma de las viguetas debido a las groeras.	6) Comprobación basada en la carrera de tensiones de la sección crítica teniendo en cuenta el efecto Vierendeel. NOTA: Se puede utilizar la categoría de detalle 112 si la carrera de tensiones se calcula conforme a la Norma Europea EN 1993-2, apartado 9.4.2.2(3).
71		Unión soldada entre chapas de tablero y largueros de sección trapezoidal o en V: 7) Soldaduras con penetración parcial con $a \geq t$.	7) Comprobación basada en la carrera de tensiones normales debidas a la flexión de la chapa.
50		8) Soldaduras en ángulo o soldaduras con penetración parcial fuera de los límites del detalle 7).	8) Comprobación basada en la carrera de tensiones normales debidas a la flexión de la chapa.

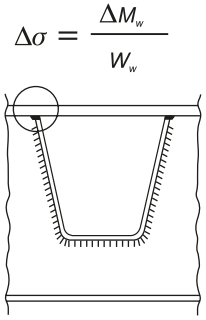


Tabla 8.9 de UNE-EN 1993-1-9. Tableros ortótropos con largueros abiertos

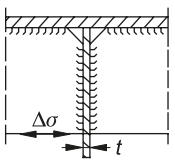
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80 71	$t \leq 12$ mm $t > 12$ mm		1) Uniones de largueros longitudinales a viguetas.	1) Comprobación basada en la carrera $\Delta\sigma$ de tensiones normales del larguero.

Tabla 8.9 continúa >

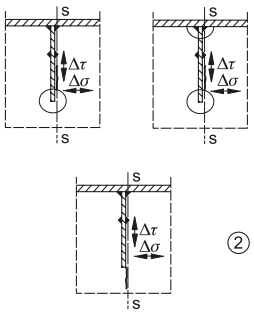
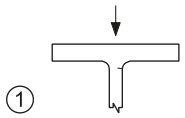
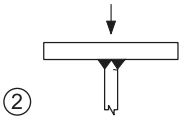
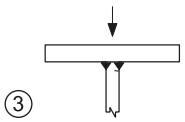
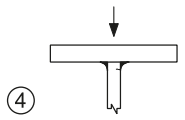
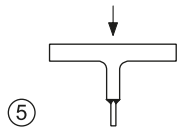
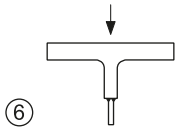
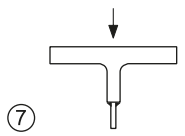
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
56	 ②	2) Uniones de largueros longitudinales continuos a viguetas. $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_s}{W_{net,s}}$ $\Delta\tau = \frac{\Delta V_s}{A_{w,net,s}}$ Comprobar también la carrera de tensiones entre largueros según la definición de la Norma Europea EN 1993-2.	2) Comprobación basada en la carrera equivalente de tensiones: $\Delta\sigma_{eq} = \frac{1}{2}\left(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^4}\right)$ resultante de combinar las carreras $\Delta\sigma$ de tensión normal y $\Delta\tau$ de tensión cortante del alma de la vigueta.

Tabla 8.10 de UNE-EN 1993-1-9. Uniones ala superior-alma de vigas carril

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
160	 ①	1) Perfiles laminados con secciones en I o H.	1) Carrera $\Delta\sigma_{vert}$ de tensiones verticales de compresión en el ala por carga de ruedas.
71	 ②	2) Unión con soldaduras a tope en T y penetración total.	2) Carrera $\Delta\sigma_{vert}$ de tensiones verticales de compresión en el ala por carga de ruedas.
36*	 ③	3) Unión con soldaduras a tope en T y penetración parcial o penetración total efectiva según la Norma Europea EN 1993-1-8.	3) Carrera $\Delta\sigma_{ver}$ de tensiones en la garganta de los cordones por compresión vertical debida a carga de ruedas.
36*	 ④	4) Soldaduras en ángulo.	4) Carrera $\Delta\sigma_{ver}$ de tensiones en la garganta de los cordones por compresión vertical debida a carga de ruedas.
71	 ⑤	5) Unión a ala de sección en T mediante soldaduras a tope en T y penetración total.	5) Carrera $\Delta\sigma_{ver}$ de tensiones verticales de compresión en el ala por carga de ruedas.
36*	 ⑥	6) Unión a ala de sección en T mediante soldaduras a tope en T y penetración parcial o penetración total efectiva según la Norma Europea EN 1993-1-8.	6) Carrera $\Delta\sigma_{ver}$ de tensiones en la garganta de los cordones por compresión vertical debida a carga de ruedas.
36*	 ⑦	7) Unión a ala de sección en T mediante soldaduras en ángulo.	7) Carrera $\Delta\sigma_{ver}$ de tensiones en la garganta de los cordones por compresión vertical debida a carga de ruedas.

Asimismo, la tabla B.1 del Anexo B de UNE-EN 1993-1-9 recoge las categorías de detalles particulares para la evaluación por el método de la tensión geométrica o del punto caliente.

Las categorías reflejadas son para fisuras iniciadas en talones de soldaduras a tope, talones de soldaduras en ángulo para unión de apéndices y talones de soldaduras en ángulo en uniones cruciformes.

Se hace la advertencia, en las notas al pie, que la tabla B.1 no cubre los efectos de desalineaciones, que tendrán que tenerse en cuenta explícitamente en la evaluación de las tensiones. Tampoco cubre la iniciación de la fatiga en la raíz de las soldaduras seguida de la propagación por la garganta de la soldadura.

Como puede apreciarse en todos los diagramas, el punto de iniciación de la fisura se halla en el espesor de la chapa. Dado que no aparecen factores de concentración de tensiones, se entiende que la única forma de evaluar las tensiones en estos detalles es mediante modelos locales de elementos finitos.

Tabla B.1 de UNE-EN 1993-1-9. Categorías de detalle para tensiones geométricas (punto caliente)

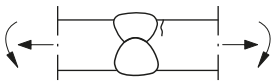
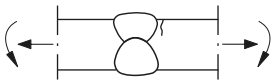
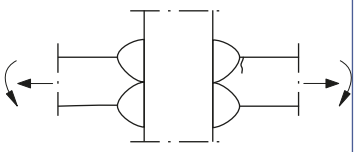
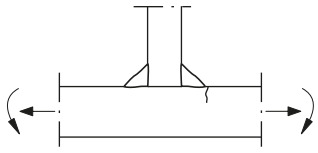
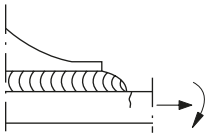
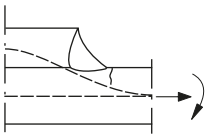
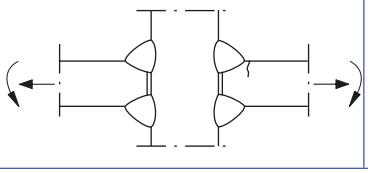
Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
112	① 	1) Soldaduras a tope con penetración total.	1) - Todas las soldaduras enrasadas con las superficies unidas por amolado paralelo a la dirección de la flecha. - Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, y enrase de bordes de chapa con muela en la dirección de la tensión. - Soldeo por ambos lados y verificación mediante END. - Para desalineaciones véase la NOTA 1.
100	② 	2) Soldaduras a tope con penetración total.	2) - Soldaduras sin amolado de enrase. - Utilización y posterior retirada de chapas de derrame, y enrase de bordes de chapa con muela en la dirección de la tensión. - Soldeo por ambos lados y verificación mediante END. - Para desalineaciones véase la NOTA 1.
100	③ 	3) Unión en cruz con soldaduras a tope en K y penetración total.	3) - Ángulo de pie de cordón ≤ 60°. - Para desalineaciones véase la NOTA 1.
100	④ 	4) Soldaduras en ángulo no transmisoras de carga.	4) - Ángulo de pie de cordón ≤ 60°. - Véase NOTA 2.

Tabla B.1 continúa >

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
100	⑤ 	5) Extremos con escuadra y extremos de rigidizadores lon-gitudinales.	5) - Ángulo de pie de cordón $\leq 60°$. - Véase NOTA 2.
100	⑥ 	6) Extremos de platabandas y uniones afines.	6) - Ángulo de pie de cordón $\leq 60°$. - Véase NOTA 2.
90	⑦ 	7) Unión en cruz con soldaduras en ángulo transmisoras de carga.	7) - Ángulo de pie de cordón $\leq 60°$. - Para desalineaciones véase la NOTA 1 - Véase también la NOTA 2.

NOTA 1	Los efectos de las faltas de alineación no se tienen en cuenta en la tabla B.1. Deben considerarse explícitamente en la determinación de las tensiones.
NOTA 2	La tabla B.1 no es aplicable a fisuras con iniciación de la fatiga en la raíz de la unión y propagación a través de la garganta.
NOTA 3	Para la definición del ángulo de pie de cordón véase la Norma EN 1090.

Página generada
intencionalmente
en blanco



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE FOMENTO
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
CENTRO DE PUBLICACIONES