Anejo 29

Proyecto de estructuras de acero.

Puentes de acero

Contenido

1 GENERALIDADES 1563

1.1 ALCANCE 1563
1.1.1 Objeto del Anejo 29 1563
1.1.2 Alcance del Anejo 29 1563
1.2 NORMATIVA DE REFERENCIA 1563
1.3 HIPÓTESIS 1563
1.5 TÉRMINOS Y DEFINICIONES 1563
1.5.1 Puentes 1563
1.5.2 Estribo 1564
1.5.3 Estribo integral 1564
1.5.4 Pila 1564
1.5.5 Apoyo 1564
1.5.6 Tirante 1564
1.5.7 Pretensado 1564
1.5.8 Gálibo 1564
1.5.9 Respiración (de chapas) 1564
1.5.10 Elementos estructurales secundarios 1564
1.6 NOTACIÓN 1564
1.7 CONVENIOS PARA LOS EJES 1565

2 BASES DE CÁLCULO 1565

2.1 REQUISITOS 1565
2.1.1 Requisitos básicos 1565
2.1.2 Gestión de la fiabilidad 1565
2.1.3 Vida útil de proyecto, durabilidad y resistencia 1565
2.1.3.1 Generalidades 1565
2.1.3.2 Vida útil de proyecto 1565
2.1.3.3 Durabilidad 1566
2.1.3.4 Robustez e integridad estructural 1566
2.2 PRINCIPIOS DE CÁLCULO EN ESTADO LÍMITE 1566
2.3 VARIABLES BÁSICAS 1567
2.3.1 Acciones y condiciones ambientales 1567
2.3.2 Propiedades de los materiales y de los productos 1567
2.4 COMPROBACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS COEFICIENTES PARCIALES 1567
2.5 CÁLCULO ASISTIDO POR ENSAYOS 1567

3 MATERIALES 1567

3.1 GENERALIDADES 1567
3.2 ACERO ESTRUCTURAL 1567
3.2.1 Propiedades del material 1567
3.2.2 Requisitos de ductilidad 1567
3.2.3 Tenacidad de fractura 1567
3.2.4 Resistencia mejorada a la deformación en la dirección perpendicular a la superficie del producto 1568
3.2.5 Tolerancias 1568
3.2.6 Valores de cálculo de los coeficientes de los materiales 1569
3.3 DISPOSITIVOS DE UNIÓN 1569

3.3.1 Fijaciones ... *1569*
3.3.1.1 Tornillos, tuercas y arandelas ... 1569
3.3.1.2 Tornillos pretensados ... 1569
3.3.1.3 Roblones y remaches ... 1569
3.3.1.4 Pernos de anclaje ... 1569
3.3.2 Material de aporte en soldaduras ... *1569*
3.4 CABLES Y OTROS ELEMENTOS TRACCIONADOS ... 1570
3.5 APOYOS ... 1570
3.6 OTROS ELEMENTOS DEL PUENTE ... 1570

4 DURABILIDAD ... 1570

5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL ... 1571

5.1 MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA EL ANÁLISIS ... 1571
5.1.1 Modelización estructural e hipótesis básicas ... *1571*
5.1.2 Modelización de uniones ... *1571*
5.1.3 Interacción suelo-estructura ... *1572*
5.2 ANÁLISIS GLOBAL ... 1572
5.2.1 Efectos de la geometría deformada de la estructura ... *1572*
5.2.2 Estabilidad estructural de los pórticos ... *1572*
5.3 IMPERFECCIONES ... 1572
5.3.1 Bases ... *1572*
5.3.2 Imperfecciones para el análisis global de pórticos ... *1572*
5.3.3 Imperfecciones para el análisis de los sistemas de arriostramiento ... *1572*
5.3.4 Imperfecciones de los elementos ... *1573*
5.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS CONSIDERANDO LA NO LINEALIDAD DE LOS MATERIALES ... 1573
5.4.1 Generalidades ... *1573*
5.4.2 Análisis global elástico ... *1573*
5.5 CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES ... 1573
5.5.1 Bases ... *1573*
5.5.2 Clasificación ... *1573*

6 ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS ... 1573

6.1 GENERALIDADES ... 1573
6.2 RESISTENCIA DE LAS SECCIONES ... 1575
6.2.1 Generalidades ... *1575*
6.2.2 Propiedades de la sección ... *1575*
6.2.2.1 Sección bruta ... 1575
6.2.2.2 Sección neta ... 1575
6.2.2.3 Efectos de arrastre por cortante ... 1575
6.2.2.4 Propiedades eficaces de secciones con almas Clase 3 y alas Clase 1 o 2 ... 1575
6.2.2.5 Efectos de la abolladura en secciones de Clase 4 ... 1575
6.2.2.6 Propiedades eficaces de secciones de Clase 4 ... 1575
6.2.3 Tracción ... *1575*
6.2.4 Compresión ... *1575*
6.2.5 Flexión ... *1576*
6.2.6 Cortante ... *1576*
6.2.7 Torsión ... *1577*
6.2.7.1 Generalidades ... 1577

6.2.7.2 Torsión en la que se pueden despreciar los efectos de distorsión 1577
6.2.8 Flexión, axil, cortante y cargas transversales 1577
6.2.9 Flexión y cortante 1577
6.2.10 Flexión y axil 1577
6.2.10.1 Secciones Clase 1 y 2 1577
6.2.10.2 Secciones Clase 3 1577
6.2.10.3 Secciones Clase 4 1577
6.2.11 Flexión, cortante y axil 1578
6.3 RESISTENCIA A PANDEO DE LOS ELEMENTOS 1578
6.3.1 Elementos de sección constante a compresión 1578
6.3.1.1 Resistencia a pandeo 1578
6.3.1.2 Curvas de pandeo 1578
6.3.1.3 Esbeltez para el pandeo por flexión 1578
6.3.1.4 Esbeltez para el pandeo por torsión y el pandeo por torsión y flexión 1578
6.3.1.5 Utilización de propiedades de sección de Clase 3 con límites de tensión 1578
6.3.2 Elementos de sección constante a flexión 1578
6.3.2.1 Resistencia a pandeo 1578
6.3.2.2 Curvas de pandeo lateral por torsión. Caso general 1578
6.3.2.3 Curvas de pandeo lateral para secciones laminadas o secciones soldadas equivalentes 1578
6.3.3 Elementos de sección constante sometidos a flexión y compresión 1578
6.3.4 Método general para el pandeo lateral y flexión de elementos estructurales 1579
6.3.4.1 Método general 1579
6.3.4.2 Método simplificado 1579
6.4 ELEMENTOS COMPUESTOS COMPRIMIDOS 1581
6.5 ABOLLADURA DE CHAPAS 1581

7 ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO 1582

7.1 GENERALIDADES 1582
7.2 MODELOS DE CÁLCULO 1583
7.3 LIMITACIONES DE TENSIONES 1583
7.4 LIMITACIÓN DE LA RESPIRACIÓN DE LAS ALMAS 1584
7.5 LÍMITES RELATIVOS A LOS GÁLIBOS DE CIRCULACIÓN 1584
7.6 LÍMITES RELATIVOS AL ASPECTO VISUAL 1584
7.7 CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO PARA PUENTES DE FERROCARRIL 1585
7.8 CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO PARA PUENTES DE CARRETERA 1585
7.8.1 Generalidades 1585
7.8.2 Límite de flechas para evitar un excesivo impacto del tráfico 1585
7.8.3 Efectos de resonancia 1585
7.9 CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO PARA PASARELAS PEATONALES 1586
7.10 CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO PARA LOS EFECTOS DEL VIENTO 1586
7.11 ACCESIBILIDAD DE LOS DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LAS UNIONES Y LAS SUPERFICIES 1586
7.12 DRENAJE 1586

8 ELEMENTOS DE SUJECIÓN, SOLDADURAS, CONEXIONES Y UNIONES 1587

8.1 UNIONES MEDIANTE TORNILLOSY BULONES 1587
8.1.1 Categorías de uniones con tornillos 1587
8.1.1.1 Uniones a cortante 1587
8.1.1.2 Uniones en tracción 1587
8.1.2 Disposición de los taladros para los tornillos 1587

8.1.3 Resistencia de cálculo de los elementos individuales de unión 1587
8.1.3.1 Tornillos 1587
8.1.3.2 Pernos por inyección 1587
8.1.3.2.1 Generalidades 1587
8.1.3.2.2 Resistencia de cálculo 1587
8.1.4 Grupos de elementos de unión 1587
8.1.5 Uniones largas 1587
8.1.6 Uniones resistentes al deslizamiento con las uniones 8.8 y 10.9 1587
8.1.6.1 Resistencia de cálculo al deslizamiento 1587
8.1.6.2 Tracción y cortante combinados 1587
8.1.6.3 Uniones híbridas 1587
8.1.7 Deducciones por los taladros de los elementos de unión 1588
8.1.7.1 Generalidades 1588
8.1.7.2 Cálculo de la resistencia al desgarro 1588
8.1.7.3 Angulares conectados por un ala y otros elementos en tracción unidos de forma asimétrica 1588
8.1.7.4 Angulares de soporte 1588
8.1.8 Fuerzas de palanca 1588
8.1.9 Distribución de esfuerzos entre elementos de unión en estado límite último 1588
8.1.10 Uniones con bulones 1588
8.1.10.1 Generalidades 1588
8.1.10.2 Cálculo de los bulones 1588
8.2 UNIONES SOLDADAS 1588
8.2.1 Geometría y dimensiones 1588
8.2.1.1 Tipo de soldadura 1588
8.2.1.2 Soldaduras en ángulo 1588
8.2.1.2.1 Generalidades 1588
8.2.1.2.2 Soldaduras en ángulo discontinuas 1588
8.2.1.3 Soldaduras de ojal (o en ranura) 1589
8.2.1.4 Soldaduras a tope 1589
8.2.1.5 Soldaduras de tapón (o botón) 1589
8.2.1.6 Soldaduras en chaflán 1589
8.2.2 Soldaduras con rellenos 1589
8.2.3 Resistencia de cálculo de una soldadura en ángulo 1589
8.2.4 Resistencia de cálculo de soldaduras en ojal (o en ranura) 1589
8.2.5 Resistencia de cálculo de las soldaduras a tope 1589
8.2.5.1 Soldaduras a tope con penetración completa 1589
8.2.5.2 Soldaduras a tope con penetración parcial 1589
8.2.5.3 Soldaduras a tope en T 1589
8.2.6 Resistencia de cálculo de las soldaduras de tapón (o botón) 1589
8.2.7 Distribución de esfuerzos 1589
8.2.8 Uniones con alas no rigidizadas 1590
8.2.9 Uniones largas 1590
8.2.10 Soldaduras a tope con penetración parcial a un único lado cargadas excéntricamente 1590
8.2.11 Angulares conectados por un lado 1590
8.2.12 Soldadura en zonas conformadas en frío 1590
8.2.13 Análisis de uniones estructurales formadas por secciones en doble T 1590
8.2.14 Uniones de perfiles tubulares 1590
9 COMPROBACIÓN A FATIGA 1591

9.1 GENERALIDADES 1591
9.1.1 Requisitos para la comprobación a fatiga 1591
9.1.2 Cálculo en fatiga de puentes de carretera 1591
9.1.3 Cálculo en fatiga de puentes de ferrocarril 1592
9.2 CARGA DE FATIGA 1593
9.2.1 Generalidades 1593
9.2.2 Modelo simplificado de carga de fatiga para puentes de carretera 1593
9.2.3 Modelo simplificado de carga de fatiga para puentes de ferrocarril 1593
9.3 COEFICIENTES PARCIALES PARA COMPROBACIONES A FATIGA 1593
9.4 RANGO DE TENSIONES DE FATIGA 1593
9.4.1 Generalidades 1593
9.4.2 Análisis en fatiga 1594
9.4.2.1 Rigidizadores longitudinales 1594
9.4.2.2 Vigas transversales 1594
9.5 PROCEDIMIENTOS DE COMPROBACIÓN A FATIGA 1596
9.5.1 Comprobación a fatiga 1596
9.5.2 Coeficientes de daño equivalente λ para puentes de carretera 1596
9.5.3 Coeficientes de daño equivalente λ para puentes de ferrocarril 1599
9.5.4 Combinación del daño debido a rangos de tensiones locales y globales 1603
9.6 RESISTENCIA A FATIGA 1603
9.7 TRATAMIENTO POSTERIOR A LA SOLDADURA 1604

10 CÁLCULO ASISTIDO POR ENSAYOS 1604

10.1 GENERALIDADES 1604
10.2 TIPOS DE ENSAYOS 1604
10.3 COMPROBACIÓN DE LOS EFECTOS AERODINÁMICOS EN PUENTES MEDIANTE ENSAYOS 1605

APÉNDICE A RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LOS APOYOS 1606

APÉNDICE B RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LAS JUNTAS DE DILATACIÓN EN PUENTES DE CARRETERA 1607

APÉNDICE C RECOMENDACIONES PARA LOS DETALLES CONSTRUCTIVOS DE TABLEROS DE PUENTES DE ACERO 1608

C.1 PUENTES DE AUTOPISTA 1608
C.1.1 Generalidades 1608
C.1.2 Chapa de tablero 1609
C.1.3 Rigidizadores 1613
C.1.4 Vigas transversales 1617
C.2 PUENTES DE FERROCARRIL 1618
C.2.1 Generalidades 1618
C.2.2 Espesor y dimensiones de la chapa 1619
C.2.3 Unión del rigidizador a la viga transversal 1620
C.2.4 Inspección y tolerancias en la preparación de la soldadura 1621
C.3 TOLERANCIAS PARA LOS PRODUCTOS SEMI-ACABADOS Y LA FABRICACIÓN 1622
C.3.1 Tolerancias para los productos semi-acabados 1622
C.3.2 Tolerancias para la fabricación 1622
C.3.3 Requisitos particulares para las uniones soldadas 1622

APÉNDICE D LONGITUDES DE PANDEO RECOMENDADAS DE ELEMENTOS EN PUENTES Y CONSIDERACIONES SOBRE LAS IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS 1630

D.1 GENERALIDADES 1630
D.2 CELOSÍAS 1630
D.2.1 Elementos verticales y diagonales con extremos fijos 1630
D.2.2 Elementos verticales que forman parte de un pórtico 1630
D.2.3 Pandeo de las diagonales fuera de su plano 1632
D.2.4 Cordones comprimidos de puentes con sección abierta 1633
D.3 PUENTES ARCO 1635
D.3.1 Generalidades 1635
D.3.2 Coeficientes de pandeo de arcos en su plano 1635
D.3.3 Coeficientes de pandeo de arcos autoportantes fuera de su plano 1637
D.3.4 Pandeo fuera de su plano de arcos con contravientos y pórticos extremos 1638
D.3.5 Imperfecciones 1639

APÉNDICE E RECOMENDACIONES PARA LA COMBINACIÓN DE LOS EFECTOS LOCALES DE CARGAS DE RUEDAS Y PRESIÓN DE NEUMÁTICOS Y DE LOS EFECTOS GLOBALES DE TRÁFICO EN PUENTES DE CARRETERA 1641

E.1 REGLA DE COMBINACIÓN PARA LOS EFECTOS DE CARGA GLOBAL Y LOCAL 1641
E.2 COEFICIENTE DE COMBINACIÓN 1641

1 Generalidades

1.1 Alcance

1.1.1 Objeto del Anejo 29

(1) Véase el apartado 1.1.1 del Anejo 22 del Código Estructural.

NOTA: La numeración de los apartados de este Anejo en ocasiones no es consecutiva, a semejanza de la estructura de la correspondiente norma de Eurocódigo.

1.1.2 Alcance del Anejo 29

(1) Este anejo proporciona una base general para el proyecto estructural de puentes de acero y elementos de acero de puentes mixtos. Establece disposiciones que complementan, modifican o sustituyen las disposiciones equivalentes de los Anejos 22 a 29 del Código Estructural.

(2) Los criterios de proyecto para puentes mixtos se establecen en el Anejo 32 del Código Estructural.

(4) Este anejo trata únicamente la resistencia, el comportamiento en servicio y la durabilidad de las estructuras de los puentes. No se consideran otros aspectos del proyecto.

(5) Deben tenerse en cuenta los Capítulos 4 y 21 del Código Estructural para la ejecución de las estructuras de los puentes de acero.

NOTA: En el Apéndice C se recogen indicaciones adicionales.

(6) La ejecución solo se trata en la medida que es necesaria para definir la calidad de los materiales de construcción y los productos que se deben emplear, así como la calidad de ejecución requerida para cumplir con las hipótesis de cálculo.

(7) No se tratan las exigencias especiales del cálculo sísmico. Dichas exigencias se establecen en la Norma de Construcción Sismorresistente para puentes vigente.

1.2 Normativa de referencia

Las normas citadas en este anejo deben utilizarse en la versión indicada en el Anejo 1 del Código Estructural.

1.3 Hipótesis

(1) Véase el apartado 1.3(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

1.5 Términos y definiciones

(1) Son de aplicación los términos y definiciones que se indican en las normas en este Código Estructural, así como los que se establecen a continuación:

1.5.1 Puentes

Construcciones de ingeniería civil cuyo objetivo principal es soportar cargas de tráfico o peatonales, salvando un obstáculo natural o una vía de comunicación.

NOTA: Se contemplan también los puentes de ferrocarril, así como los puentes que soportan canales, tuberías de servicio u otros vehículos, tales como aeronaves.

1.5.2 Estribo

Soporte extremo de un puente.

NOTA: Se distingue entre estribos rígidos y estribos flexibles, cuando corresponda.

1.5.3 Estribo integral

Estribo que se une al tablero sin ninguna junta que permita el movimiento relativo.

1.5.4 Pila

Soporte intermedio de un puente, situado bajo el tablero.

1.5.5 Apoyo

Dispositivo estructural situado entre la superestructura y un estribo o pila del puente que transmite las cargas desde el tablero hacia el estribo o pila.

1.5.6 Tirante

Elemento traccionado que une el tablero de un puente al pilono o pilonos, por encima del tablero.

1.5.7 Pretensado

Efecto permanente debido a esfuerzos controlados y/o deformaciones impuestas controladas dentro de una estructura.

NOTA: Se distinguen varios tipos de pretensado, según el caso (tales como pretensado mediante armaduras activas o pretensado mediante deformaciones impuestas en los apoyos).

1.5.8 Gálibo

Altura libre disponible para el tráfico.

1.5.9 Respiración (de chapas)

Deformación de una chapa fuera de su plano producida por la repetida aplicación de cargas en el plano.

1.5.10 Elementos estructurales secundarios

Elementos estructurales que no forman parte de la estructura principal del puente.

NOTA: Los elementos estructurales secundarios, tales como pretiles, impostas, escaleras y trampillas de acceso, están presentes por otras razones funcionales.

1.6 Notación

(1) Será de aplicación la notación que se establece en este Código Estructural.

Se enumera a continuación la notación adicional:

$\sigma_{Ed,ser}$, $\tau_{Ed,ser}$	Tensiones nominales obtenidas a partir de la combinación característica de cargas
λ, λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, λ_{max}, λ_{loc}, λ_{glo}	Coeficientes de daño equivalente
ϕ_2, ϕ_{loc}, ϕ_{glo}	Coeficientes de impacto de daño equivalente
$\Delta\sigma_p$, $\Delta\sigma_{loc}$, $\Delta\sigma_{glo}$	Rangos de tensiones producidos por una carga p

μ_k	Valor característico del coeficiente de rozamiento
γ_μ	Coeficiente parcial para el rozamiento
α	Coeficiente que depende del tipo de apoyo y número de apoyos con esfuerzos favorables o desfavorables
T_{0max},T_{0min}, T_0	Temperaturas
ΔT_0, ΔT_K, ΔT_γ	Diferencias de temperatura
γ_T	Coeficiente parcial para la temperatura
K, $K_{cimentación}$, K_{pila}, K_{apoyo}	Rigidez elástica (rigidez del muelle)
S_d, S_T	Distancia de deslizamiento

(2) La notación adicional se define en el texto cuando aparezca por primera vez.

1.7 Convenios para los ejes

(1) Véase el apartado 1.7(1), (2), (3) y (4) del Anejo 22 del Código Estructural.

2 Bases de cálculo

2.1 Requisitos

2.1.1 Requisitos básicos

(1) Véase el apartado 2.1.1(1), (2) y (3) del Anejo 22 del Código Estructural.

2.1.2 Gestión de la fiabilidad

(1) Véase el apartado 2.1.2(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

2.1.3 Vida útil de proyecto, durabilidad y resistencia

2.1.3.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 2.1.3.1(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

(2) Debe justificarse la resistencia a fatiga de los puentes para su vida útil de proyecto.

2.1.3.2 Vida útil de proyecto

(1) Se debe tomar la vida útil de proyecto de 100 años como el periodo durante el cual el puente debe servir al uso al cual está destinado, requiriendo un mantenimiento normal, pero sin reparaciones importantes.

NOTA: Se puede establecer la vida útil de proyecto en las especificaciones del proyecto en el caso de puentes provisionales.

(2) Véase el apartado 2.1.3.3 para los elementos estructurales que no puedan proyectarse para la vida útil total del puente.

2.1.3.3 Durabilidad

(1) Para asegurar su durabilidad, los puentes y sus elementos deben proyectarse de forma que se minimicen los daños debidos a deformaciones excesivas, así como por deterioro, fatiga y acciones accidentales previsibles durante su vida útil de proyecto.

(2) Deben proyectarse las partes estructurales de un puente que se encuentren conectadas a las impostas o a los pretiles, de forma que se asegure que puedan desarrollarse las deformaciones plásticas de dichas barreras de seguridad o pretiles sin dañar la estructura.

(3) Cuando se incluyan en un puente elementos que van a necesitar ser sustituidos, véase el apartado 4(6), debe comprobarse, como situación transitoria de proyecto, que dicha sustitución se puede realizar con total seguridad.

(4) Se deben utilizar tornillos pretensados para realizar las uniones permanentes de las partes estructurales del puente, consiguiendo uniones de categoría B o C. Como alternativa, se pueden utilizar tornillos calibrados o soldadura, para evitar el deslizamiento.

(5) Se pueden utilizar uniones en las cuales la transmisión de esfuerzos se realice exclusivamente por contacto directo, cuando lo justifiquen los cálculos en fatiga. Cada proyecto podrá definir los detalles específicos orientados a mejorar la durabilidad de la estructura.

El apartado 87.4 del Código Estructural recoge criterios generales sobre detalles adecuados.

2.1.3.4 Robustez e integridad estructural

(1) El proyecto de un puente debe asegurar que, cuando se produzca el daño de un elemento debido a acciones accidentales, el resto de la estructura puede resistir en condiciones razonables, al menos, la combinación accidental de cargas.

En estructuras soportadas por cables (puentes, atirantados, puentes arco de tablero superior o puentes colgantes), se considerará la posible rotura de un tirante o péndola. La estructura deberá poder resistir la combinación de acciones accidental sin el elemento roto, teniendo en cuenta los efectos dinámicos generados por la rotura, Se comprobará particularmente la no ocurrencia de un fallo progresivo.

Igualmente, en estructuras construidas con un carro de avance se verificará que la estructura resiste la posible caída repentina de un carro, teniendo en cuenta los efectos dinámicos y considerando la combinación de cargas accidental compatible con el proceso constructivo.

(2) Será necesario considerar los efectos de la corrosión o de la fatiga de los elementos y del material mediante la definición adecuada de los detalles de proyecto, véanse también los Anejos 27 y 28 del Código Estructural.

NOTA: El apartado 3 del Anejo 27 proporciona métodos de cálculo que utilizan los principios de vida segura.

Para comprobar la seguridad frente a la fatiga, se emplearán los métodos de tolerancia al daño y de integridad asegurada, de acuerdo con el Anejo 27, aunque generalmente se empleará este último, no estableciéndose condiciones adicionales para seleccionar el método de prevención del fallo por fatiga.

NOTA: Véase el apartado 4 para indicaciones sobre acceso, mantenimiento e inspección. En caso general, se recomienda el método de integridad asegurada.

2.2 Principios de cálculo en estado límite

(1) Véase el apartado 2.2(1) y (2) del Anejo 22 del Código Estructural.

(3) Para limitar el daño en los estados límite últimos, se deben emplear modelos de análisis global elástico, para las situaciones de proyecto permanentes y transitorias, véase el apartado 5.4.

(4) Se debe comprobar que se alcanza la vida útil requerida sin daños por fatiga mediante cálculos justificativos o mediante la adopción de detalles de proyecto adecuados (véase el Apéndice C), así como a través de comprobaciones del estado límite de servicio.

2.3 Variables básicas

2.3.1 Acciones y condiciones ambientales

(1) Las acciones, combinación de acciones y coeficientes parciales para el proyecto de puentes deben tomarse de la reglamentación específica vigente.

NOTA: Para las acciones sobre los tableros de puentes de acero en puentes de carretera, véase el Apéndice E.

(2) Véase el apartado 2.3(2), (3) (4) y (5) del Anejo 22 del Código Estructural.

NOTA: Para las acciones sobre los apoyos, véase el Apéndice A.

2.3.2 Propiedades de los materiales y de los productos

(1) Véase el apartado 2.3.2(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

2.4 Comprobación por el método de los coeficientes parciales

(1) Véanse los apartados 2.4.1(1), 2.4.2(1) y (2), 2.4.3(1) y 2.4.4(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

2.5 Cálculo asistido por ensayos

(1) Véase el apartado 2.5(1), (2) y (3) del Anejo 22 del Código Estructural.

3 Materiales

Las propiedades de los materiales se recogen en el Capítulo 18 del Código Estructural.

3.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 3.1(1) (2) y (3) del Anejo 22 del Código Estructural.

3.2 Acero estructural

3.2.1 Propiedades del material

(1) Véase el apartado 3.2.1(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

3.2.2 Requisitos de ductilidad

(1) Véase el apartado 3.2.2(1) y (2) del Anejo 22 del Código Estructural.

3.2.3 Tenacidad de fractura

(1) El material debe poseer la tenacidad de fractura requerida para evitar una rotura frágil durante la vida útil de proyecto considerada para la estructura.

(2) Si se cumplen las condiciones que se establecen en el Anejo 28 del Código Estructural para la temperatura mínima de servicio, no son necesarias comprobaciones adicionales frente a la rotura frágil.

Se cumplirán los requisitos adicionales para la resiliencia del material base que se recogen en tabla A29.3.1:

Tabla A29.3.1 Requerimientos adicionales para la resiliencia del material base

Espesor nominal	Requerimientos adicionales
t ≤ 30 mm	$T_{27J} = -20°C$ de acuerdo con la norma UNE-EN 10025
30 < t ≤ 80 mm	Acero de grano fino de acuerdo con la norma UNE-EN 10025, por ejemplo S355N/M
t >80 mm	Acero de grano fino de acuerdo con la norma UNE-EN 10025, por ejemplo S355NL/ML

(3) Para elementos del puente comprimidos, se debe seleccionar un valor mínimo adecuado de tenacidad de fractura.

No se precisa comprobación de tenacidad de fractura en los elementos en que exista la certeza de que están sometidos únicamente a tensiones de compresión en todas sus direcciones (bien sea por compresión pura, compresión compuesta o ciclo de fatiga con tensiones únicamente de compresión).

En el resto de los casos, se utilizarán los valores de la tabla A28.2.1 del Anejo 28 del Código Estructural para $\sigma_{Ed} = 0{,}25 f_y(t)$.

3.2.4 Resistencia mejorada a la deformación en la dirección perpendicular a la superficie del producto

(1) Se debe utilizar, cuando sea necesario, un acero con propiedades mejoradas en la dirección perpendicular a la superficie, conformes con la norma UNE-EN 10164, véase el Anejo 28 del Código Estructural.

Se utilizarán los valores definidos en la tabla A29.3.2.

Tabla A29.3.2 Elección de la clase Z según la norma UNE-EN 10164

Valor requerido Z_{Ed} según el Anejo 28	Clase Z_{Rd}, de acuerdo a la norma UNE-EN 10164
$Z_{Ed} \leq 10$	-
$10 < Z_{Ed} \leq 20$	$Z15$
$20 < Z_{Ed} \leq 30$	$Z25$
$Z_{Ed} > 30$	$Z35$

3.2.5 Tolerancias

(1) Las tolerancias de dimensión y de masa de las secciones de acero laminado, perfiles tubulares y chapas deben ser conformes con este Código Estructural y con el Documento de Evaluación Europeo (DEE) correspondiente, a menos que se especifiquen tolerancias más estrictas.

(2) Para elementos soldados deben aplicarse las tolerancias indicadas en este Código.

(3) Véase el apartado 3.2.5(3) del Anejo 22 del Código Estructural.

3.2.6 Valores de cálculo de los coeficientes de los materiales

(1) Véase el apartado 3.2.6(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

3.3 Dispositivos de unión

3.3.1 Fijaciones

3.3.1.1 Tornillos, tuercas y arandelas

(1) Los tornillos, tuercas y arandelas deben ser conformes con lo indicado en el Anejo 26 del Código Estructural.

(2) Las reglas de este apartado son de aplicación a los tornillos de las clases descritos en el Artículo 85 del Código Estructural.

(3) Los valores nominales del límite elástico f_{yb} y de la resistencia última a tracción f_{ub} se establecen en la tabla 85.2.a del Código Estructural y se deben adoptar como valores característicos en los cálculos.

3.3.1.2 Tornillos pretensados

(1) Los tornillos estructurales de alta resistencia de las clases 8.8 y 10.9, conformes con el Anejo 26 del Código Estructural, se pueden emplear como tornillos pretensados cuando el apriete sea controlado y se lleve a cabo según ese mismo anejo.

3.3.1.3 Roblones y remaches

(1) El Código Estructural no contempla los roblones por desuso.

3.3.1.4 Pernos de anclaje

(1) Se pueden utilizar las siguientes clases de acero para los pernos de anclaje:

- clases de acero de acuerdo con el Capítulo 18 del Código Estructural;
- barras de armadura conformes con el Capítulo 8 del Código Estructural.

El límite elástico nominal para los pernos de anclaje no debe superar $640\ N/mm^2$.

3.3.2 Material de aporte en soldaduras

(1) Todos los materiales de aporte en soldaduras deben ser conformes con el Anejo 26, y deberán cumplir lo establecido en el apartado 85.5 del Código Estructural

(2) Las prestaciones del material de aporte no pueden ser inferiores a los valores específicos para el tipo de acero que se va a soldar. Esto debe tenerse en cuenta para:

- límite elástico especificado;
- resistencia última a tracción;
- deformación en rotura;
- valor de la energía mínima del ensayo Charpy del material de aporte.

3.4 Cables y otros elementos traccionados

(1) Los cables y otros elementos sometidos a tracción quedan fuera del ámbito del Código Estructural y será necesario referirse a reglamentación específica.

Cada proyecto, en función de sus características, podrá definir los requisitos adicionales a cumplir por los cables y tirantes, en su caso, que deberán cumplir además la reglamentación específica que les sea de aplicación.

3.5 Apoyos

(1) Los apoyos estructurales deben ser conformes con las normas UNE-EN 1337.

Cada proyecto, en función de sus características, definirá los apoyos a disponer en cada caso, que deberán cumplir además la reglamentación específica que les sea de aplicación.

3.6 Otros elementos del puente

(1) Cada proyecto, en función de sus características, definirá las juntas de calzada, las barreras de seguridad, las barandillas, los pretiles y otros elementos auxiliares a disponer en cada caso, que deberán cumplir además la reglamentación específica que les sea de aplicación.

(2) Cada proyecto, en función de sus características, definirá el sistema específico de tratamiento de la superficie del tablero a disponer en cada caso (el sistema de acabado, los productos utilizados y el método de aplicación), que deberán cumplir además la reglamentación específica que les sea de aplicación.

4 Durabilidad

(1) Véase el apartado 4(1), (2) y (3) del Anejo 22 del Código Estructural.

Cada proyecto definirá los detalles específicos orientados a facilitar las operaciones de inspección y mantenimiento, teniendo en cuenta lo establecido en el apartado 105.4 del Código Estructural.

En el caso de que el proyecto suponga que un elemento no es accesible para inspección, deberá asegurarse que tampoco sea posible la entrada de agua en su interior durante su vida de servicio.

(4) Es necesario realizar comprobaciones a fatiga en el caso de elementos que no se puedan inspeccionar (véase el Anejo 27 del Código Estructural); además se debe proporcionar un espesor adicional adecuado, debido a la posible pérdida por corrosión.

En ausencia de estudios más detallados, el sobreespesor (incremento del espesor nominal) tendrá el siguiente valor mínimo, expresado en mm por cara inaccesible y por cada 30 años de vida útil prevista de la estructura:

- Clases de exposición C4 (corrosividad alta), C5 (corrosividad muy alta): $1{,}5\ mm$.
- Clase de exposición C3 (corrosividad media): $1\ mm$.
- Clase de exposición C2 (corrosividad baja): $0{,}5\ mm$.
- No se precisa sobreespesor en el caso de la clase de exposición C1 (corrosividad muy baja).

El espesor resultante (espesor nominal más el sobreespesor) en los cajones inaccesibles de puentes no podrá ser inferior a $8\ mm$.

Los aceros con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica podrán utilizarse sin pintura de protección en las superficies exteriores, incrementando el espesor nominal, obtenido en el cálculo, en $1\ mm$ para la superficie expuesta al ambiente exterior. En la superficie interior de secciones cerradas e

inaccesibles con aceros de resistencia mejorada a la corrosión atmosférica, se aplicarán las disposiciones establecidas en los párrafos anteriores relativas al sobreespesor de acero y aplicando el sistema de protección adecuado a la vida útil prevista.

(5) Se debe dotar a la estructura y a sus componentes de una resistencia a fatiga adecuada mediante:

- el cálculo en fatiga de los detalles constructivos, de acuerdo con los puntos (1) y (4) de este apartado, con el Anejo 27 del Código Estructural y con las comprobaciones en servicio según el apartado 7;
- la definición de los detalles estructurales de proyecto adecuados para los tableros de acero de losa ortótropa;
- la elección del material, según el apartado 3;
- la fabricación conforme con el Capítulo 21 del Código Estructural.

(6) Los componentes que no puedan proyectarse con suficiente fiabilidad para alcanzar la vida útil total de proyecto del puente deben estar diseñados para permitir su sustitución. Se pueden incluir en este tipo de componentes:

- tirantes, cables, péndolas;
- apoyos;
- juntas de dilatación;
- dispositivos de drenaje;
- barreras de seguridad, pretiles;
- capa de asfalto y otras protecciones de la superficie;
- barreras de viento;
- pantallas anti-ruido.

5 Análisis estructural

5.1 Modelización de la estructura para el análisis

5.1.1 Modelización estructural e hipótesis básicas

(1) Véase el apartado 5.1.1(1), (2) y (3) del Anejo 22 del Código Estructural.

(4) Para la modelización estructural y las hipótesis básicas de los elementos de los puentes, véase el Anejo 22 del Código Estructural.

NOTA: Véase además el Anejo 25 del Código Estructural para el cálculo de elementos formados por chapas.

5.1.2 Modelización de uniones

(1) Véanse el apartado 5.1.2(1), (2) y (3) del Anejo 22 y 5.1.2(1), (2), (3) y (4) del Anejo 26.

(5) Se debe elegir el tipo de unión y su modelización en los puentes, de forma que se asegure que se puede alcanzar la resistencia a fatiga requerida durante la vida útil.

NOTA: Las uniones rígidas correspondientes a las categorías de fatiga que se establecen en el Anejo 27 son adecuadas para unir elementos de puentes, con la excepción de los apoyos, articulaciones o cables.

5.1.3 Interacción suelo-estructura

(1) Véase el apartado 5.1.3(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

NOTA 2: La rigidez de los apoyos se puede determinar a partir de las características de deformación de los apoyos, las pilas y las cimentaciones.

5.2 Análisis global

5.2.1 Efectos de la geometría deformada de la estructura

(1) Véase el apartado 5.2.1(1), (2) y (3) del Anejo 22 del Código Estructural.

(4) Los puentes se pueden calcular mediante un análisis de primer orden si se satisface el siguiente criterio:

$$\alpha_{cr} \geq 10 \qquad (5.1)$$

donde:

α_{cr} se define en el apartado 5.2.1(3) del Anejo 22 del Código Estructural.

(5) Véase el apartado 5.2.1(5) y (6) del Anejo 22 del Código Estructural.

5.2.2 Estabilidad estructural de los pórticos

(1) Véase el apartado 5.2.2(1), (2), (3) y (4) del Anejo 22 del Código Estructural.

(5) Cuando el comportamiento de un puente o sus componentes esté gobernado por el primer modo de pandeo (un único grado de libertad), los efectos de segundo orden M_{II} pueden calcularse aplicando el siguiente coeficiente a los momentos flectores M_I:

$$M_{II} = M_I \frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}} \qquad (5.2)$$

donde:

$\alpha_{cr} > 3.$

(6) Véase el apartado 5.2.2(7) y (8) del Anejo 22.

5.3 Imperfecciones

5.3.1 Bases

(1) Véase el apartado 5.3.1(1), (2) y (3) del Anejo 22.

5.3.2 Imperfecciones para el análisis global de pórticos

(1) Véase el apartado 5.3.2(1), (2) y (3) del Anejo 22.

NOTA 1: Si se acumulan los efectos por la contribución de varias pilas, se aplicará el parámetro α_m (por ejemplo para las pilas que formen un pórtico con la superestructura).

NOTA 2: Véase además el Apéndice D para la utilización de las imperfecciones de los elementos.

(4) Véase el apartado 5.3.2(6), (7), (8), (10) y (11) del Anejo 22.

5.3.3 Imperfecciones para el análisis de los sistemas de arriostramiento

(1) Véase el apartado 5.3.3(1), (2), (3), (4) y (5) del Anejo 22.

5.3.4 Imperfecciones de los elementos

(1) Véase el apartado 5.3.4(1), (2) y (3) del Anejo 22.

5.4 Métodos de análisis considerando la no linealidad de los materiales

5.4.1 Generalidades

(1) Para determinar los esfuerzos solicitantes se debe emplear un análisis elástico en todas las situaciones permanentes y transitorias de proyecto.

Para situaciones de proyecto accidentales podrá aplicarse el método general de análisis no lineal en teoría de segundo orden, que considera simultáneamente los efectos de la no linealidad del comportamiento de los materiales y del equilibrio de la estructura en su configuración geométrica deformada.

Este método general de análisis no lineal en teoría de segundo orden resulta siempre de aplicación a cualquier estructura, o elemento aislado de la misma, si se consideran de forma adecuada y conservadora las condiciones de rigidez de los apoyos de la misma, o de las vinculaciones en los extremos de los elementos, respectivamente. La interacción entre los efectos de la no linealidad geométrica y la del material se irá evaluando mediante un proceso iterativo, o paso a paso, bajo incrementos monótonos crecientes de la configuración de cargas para la que se esté controlando la estructura.

5.4.2 Análisis global elástico

(1) Véase el apartado 5.4.2(1), (2) y (3) del Anejo 22.

(4) Si todas las secciones son de Clase 1, se pueden despreciar en el estado límite último los efectos de las diferencias de temperatura, de la retracción y de los asientos del terreno.

5.5 Clasificación de las secciones

5.5.1 Bases

(1) Véase el apartado 5.5.1(1) del Anejo 22.

5.5.2 Clasificación

(1) Véase el apartado 5.5.2(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9) y (10) del Anejo 22.

6 Estados límite últimos

6.1 Generalidades

(1) Los coeficientes parciales γ_M, tal y como se definen en el apartado 2.4.3 del Anejo 22 se deberán aplicar a los diferentes valores característicos de resistencia de este apartado, véase la tabla A29.6.1:

Tabla A29.6.1 Coeficientes parciales

a) resistencia de elementos y de secciones	
- resistencia de secciones frente a una plastificación excesiva, incluyendo abolladura	γ_{M0}
- resistencia de elementos frente a la inestabilidad evaluada mediante comprobaciones de dichos elementos	γ_{M1}
- resistencia a la rotura de secciones sometidas a tracción	γ_{M2}
b) resistencia de uniones	
- resistencia de tornillos - resistencia de bulones - resistencia de soldaduras - resistencia de chapas en apoyos al aplastamiento	γ_{M2}
- resistencia al deslizamiento - en estado límite último (categoría C) - en estado límite de servicio	γ_{M3} $\gamma_{M3,serv}$
- capacidad resistente de un perno por inyección	γ_{M4}
- resistencia de los nudos de vigas en celosía con perfiles huecos	γ_{M5}
- resistencia de los bulones en estado límite de servicio	$\gamma_{M6,serv}$
- pretensado de los tornillos de alta resistencia	γ_{M7}

NOTA: Para el coeficiente parcial de la resistencia del hormigón γ_c véase el Anejo 21.

Se emplearán los siguientes valores numéricos de γ_{Mi}:

$\gamma_{M0} = 1{,}05$

$\gamma_{M1} = 1{,}10$

$\gamma_{M2} = 1{,}25$

$\gamma_{M3} = 1{,}25$

$\gamma_{M3,serv} = 1{,}10$

$\gamma_{M4} = 1{,}10$

$\gamma_{M5} = 1{,}10$

$\gamma_{M6,serv} = 1{,}00$

$\gamma_{M7} = 1{,}10$

Se podrá utilizar el coeficiente parcial $\gamma_{M0} = 1{,}0$, siempre y cuando se cumpla las siguientes condiciones:

- Tolerancias más “estrictas” según el Anejo 16 del Código Estructural.
- Garantías adicionales para el acero según el Artículo 18 del Código Estructural. Se deberá garantizar que el límite elástico del acero empleado en la obra presente una dispersión acorde con el coeficiente parcial reducido, según un análisis basado en la teoría de fiabilidad estructural.
- Control de ejecución intenso según el Capítulo 24 del Código Estructural.

6.2 Resistencia de las secciones

6.2.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 6.2.1(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9) y (10) del Anejo 22 del Código Estructural.

6.2.2 Propiedades de la sección

6.2.2.1 Sección bruta

(1) Véase el apartado 6.2.2.1(1) del Anejo 22.

6.2.2.2 Sección neta

(1) Véase el apartado 6.2.2.2(1), (2), (3), (4) y (5) del Anejo 22.

6.2.2.3 Efectos de arrastre por cortante

(1) Véanse los apartados 6.2.2.3(1) y (2) del Anejo 22 y 3.2 y 3.3 del Anejo 25.

Los efectos del arrastre por cortante en los cálculos en estado límite último (ELU) se determinarán considerando el efecto combinado del propio arrastre por cortante y el de la abolladura de las chapas comprimidas, conforme a lo expuesto en la NOTA 2 del apartado b) del apartado 3.3 del Anejo 25.

6.2.2.4 Propiedades eficaces de secciones con almas Clase 3 y alas Clase 1 o 2

(1) Véase el apartado 6.2.2.4(1) del Anejo 22 del Código Estructural.

6.2.2.5 Efectos de la abolladura en secciones de Clase 4

(1) Se deben considerar los efectos de la abolladura por tensiones normales mediante la aplicación del método de la sección reducida en las secciones clase 4, conforme a lo indicado en el Anejo 25.

6.2.2.6 Propiedades eficaces de secciones de Clase 4

(1) Véase el apartado 6.2.2.5(1), (2), (3), (4) y (5) del Anejo 22.

6.2.3 Tracción

(1) Véase el apartado 6.2.3(1), (2), (3), (4) y (5) del Anejo 22.

6.2.4 Compresión

(1) Véase el apartado 6.2.4(1) del Anejo 22.

(2) La resistencia de cálculo de las secciones sometidas a compresión simple $N_{c,Rd}$ debe determinarse como se indica a continuación:

a) Sin abolladura:

$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$ para secciones de Clases 1,2 y 3 (6.1)

b) Con abolladura:

$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}$ para secciones de Clase 4 o (6.2)

$N_{c,Rd} = \frac{A \sigma_{limit}}{\gamma_{M0}}$ para la limitación de tensiones (6.3)

donde:

$\sigma_{limit} = \rho_x f_y$ es la tensión límite de la zona más débil de la sección sometida a compresión (véase el apartado 10(5) del Anejo 25).

(3) Véase el apartado 6.2.4(3) y (4) del Anejo 22.

6.2.5 Flexión

(1) Véase el apartado 6.2.5(1) del Anejo 22.

(2) La resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal debe determinarse como se indica a continuación:

a) Sin abolladura:

$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$ para secciones de Clases 1 y 2 (6.4)

$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}}$ para secciones de Clase 3 (6.5)

b) Con abolladura:

$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}}$ para secciones de Clase 4 o (6.6)

$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} \sigma_{limit}}{\gamma_{M0}}$ para la limitación de tensiones (6.7)

donde:

$W_{el,min}$ y $W_{eff,min}$ son los módulos de elasticidad correspondientes a la fibra sometida a la máxima tensión elástica

σ_{limit} es la tensión límite de la zona más débil de la sección sometida a compresión (véase el apartado 2.4 del Anejo 25).

(3) Véase el apartado 6.2.5(3), (4), (5) y (6) del Anejo 22.

6.2.6 Cortante

(1) Véase el apartado 6.2.6 (1), (2). (3), (4), (5), (6), (7) y (8) del Anejo 22 y el apartado 5 del Anejo 25.

6.2.7 Torsión

6.2.7.1 Generalidades

(1) Se deben tener en cuenta los efectos de torsión y de distorsión en los elementos sometidos a torsión.

(2) Se pueden tener en cuenta los efectos de la rigidez transversal de la sección y/o de los diafragmas empleados para reducir las deformaciones debidas a la distorsión, considerando un modelo elástico adecuado, sometido al efecto combinado de flexión, torsión y distorsión.

(3) Se pueden despreciar los efectos de la distorsión cuando, bien la propia rigidez o bien las dimensiones de la sección transversal y/o la eventual disposición de diafragmas, limiten los efectos de la distorsión al 10% de los efectos de flexión.

(4) Los diafragmas se deben calcular teniendo en cuenta su función de distribución de cargas.

6.2.7.2 Torsión en la que se pueden despreciar los efectos de distorsión

(1) Véase el apartado 6.2.7(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8) y (9) del Anejo 22.

6.2.8 Flexión, axil, cortante y cargas transversales

(1) Se puede determinar la interacción entre la flexión, el axil, el cortante y las cargas transversales empleando uno de los dos siguientes métodos:

1. Métodos de interacción que se establecen en los apartados 6.2.8 a 6.2.10.

NOTA: Para los efectos de abolladura, véanse los apartados 4 a 7 del Anejo 25.

2. Interacción de tensiones utilizando el criterio de plastificación dado en el apartado 6.2.1.

NOTA: Para los efectos de abolladura, véase el apartado 10 del Anejo 25.

6.2.9 Flexión y cortante

(1) Véase el apartado 6.2.8(1), (2), (3), (4), (5) y (6) del Anejo 22.

6.2.10 Flexión y axil

6.2.10.1 Secciones Clase 1 y 2

(1) Véase el apartado 6.2.9.1(1), (2), (3), (4), (5) y (6) del Anejo 22.

6.2.10.2 Secciones Clase 3

(1) Véase el apartado 6.2.9.2(1) del Anejo 22.

(2) Cuando se utilice el método de la limitación de tensiones debe cumplirse la siguiente expresión para tener en cuenta la abolladura:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{\sigma_{limit}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.8)$$

donde:

σ_{limit} debe obtenerse según el apartado 10 del Anejo 25.

6.2.10.3 Secciones Clase 4

(1) Véase el apartado 6.2.9.3(1) y (2) del Anejo 22.

6.2.11 Flexión, cortante y axil

(1) Véase el apartado 6.2.10(1), (2) y (3) del Anejo 22.

6.3 Resistencia a pandeo de los elementos

6.3.1 Elementos de sección constante a compresión

6.3.1.1 Resistencia a pandeo

(1) Véase el apartado 6.3.1.1(1), (2), (3) y (4) del Anejo 22.

6.3.1.2 Curvas de pandeo

(1) Véase el apartado 6.3.1.2 1), (2), (3) y (4) del Anejo 22.

6.3.1.3 Esbeltez para el pandeo por flexión

(1) Véase el apartado 6.3.1.3(1) y (2) del Anejo 22.

6.3.1.4 Esbeltez para el pandeo por torsión y el pandeo por torsión y flexión

(1) Véase el apartado 6.3.1.4(1), (2) y (3) del Anejo 22.

6.3.1.5 Utilización de propiedades de sección de Clase 3 con límites de tensión

(1) Como alternativa al empleo de las propiedades de sección de Clase 4 que se establecen en las ecuaciones (6.48), (6.49), (6.51) y (6.53) del Anejo 22, se pueden utilizar las propiedades de sección de Clase 3 que se establecen en las ecuaciones (6.47), (6.49), (6.50) y (6.52) del Anejo 22, con limitación de tensiones, de acuerdo con el apartado 10 del Anejo 25, véase el apartado 6.2.2.5.

6.3.2 Elementos de sección constante a flexión

6.3.2.1 Resistencia a pandeo

(1) Véase el apartado 6.3.2.1(1), (2), (3) y (4) del Anejo 22.

6.3.2.2 Curvas de pandeo lateral por torsión. Caso general

(1) Véase el apartado 6.3.2.2(1), (2) y (3) del Anejo 22.

(4) Se pueden despreciar los efectos del pandeo lateral por torsión si la esbeltez adimensional satisface $\overline{\lambda}_{LT} \leq 0{,}2$, o si se cumple que $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0{,}04$.

6.3.2.3 Curvas de pandeo lateral para secciones laminadas o secciones soldadas equivalentes

(1) Véase el apartado 6.3.2.3(1) y (2) del Anejo 22.

6.3.3 Elementos de sección constante sometidos a flexión y compresión

(1) A menos que se realice un análisis de segundo orden, empleando las imperfecciones que se indican en el apartado 5.3.2, se debe comprobar la estabilidad en el plano de pandeo de los elementos de sección constante sometidos a flexión y compresión, de acuerdo con los apartados 6.3.3 o 6.3.4 del Anejo 22.

NOTA: Como simplificación a la ecuación (6.61) en el apartado 6.3.3 del Anejo 22, se puede emplear la siguiente condición:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{C_{mi,o}\left(M_{y,Ed}+\Delta M_{y,Ed}\right)}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 0{,}9 \qquad (6.9)$$

donde:

N_{Ed} es el valor de cálculo del axil de compresión

$M_{y,Ed}$ es el valor de cálculo del momento flector máximo según el eje $y-y$ del elemento, que se obtiene mediante un análisis de primer orden, sin considerar las imperfecciones

$\Delta M_{y,Ed}$ es el momento adicional debido al desplazamiento del eje del centro de gravedad, de acuerdo con el apartado 6.2.10.3

$C_{mi,o}$ es el coeficiente de momento equivalente, véase la tabla A22.A.2 del Anejo 22

χ_y es el coeficiente de reducción debido al pandeo por flexión, según el apartado 6.3.1.

6.3.4 Método general para el pandeo lateral y flexión de elementos estructurales

6.3.4.1 Método general

(1) Véase el apartado 6.3.4(1), (2), (3) y (4) del Anejo 22.

6.3.4.2 Método simplificado

(1) Véase el apartado 6.3.2.4(1) del Anejo 22.

Se utilizará el valor $\overline{\lambda}_{c,0} = 0{,}2$. Para la comprobación frente a pandeo lateral de elementos con arriostramiento lateral puntual del ala comprimida, se adopta un valor del coeficiente $k_{fl} = 1{,}0$ (véase el apartado 6.3.2.4(2) del Anejo 22).

(2) Se pueden comprobar los cordones de celosías y las alas comprimidas que se encuentran sometidas a pandeo lateral por medio de la modelización de los elementos como un soporte sometido a un esfuerzo de compresión N_{Ed} con apoyos elásticos continuos o discretos modelizados como muelles.

NOTA 1: En el Apéndice D.2.4 se proporcionan indicaciones para determinar la rigidez de la coacción en el caso de celosías en U.

NOTA 2: Cuando los cordones de celosías y/o las alas se encuentren coaccionados por pórticos en U, los elementos del pórtico en U estarán sometidos a esfuerzos producidos por la coacción y la interacción del pórtico en U con las alas y/o cordones.

(3) Se puede determinar el modo de pandeo y la carga elástica crítica de pandeo N_{cr} a partir de un análisis elástico de autovalores. Si se utilizan muelles continuos para representar las coacciones, que son básicamente discretas, la carga crítica de pandeo no se debe tomar mayor que la correspondiente al pandeo con nodos en los puntos en los que se localicen dichas coacciones.

(4) Puede realizarse la comprobación de seguridad según el apartado 6.3.2, utilizando:

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \qquad (6.10)$$

donde:

A_{eff} es el área eficaz del cordón

N_{cr} es la carga elástica crítica de pandeo, obtenida con A_{gross}.

(5) Se puede tener en cuenta el efecto de las imperfecciones iniciales y los efectos de segundo orden sobre un apoyo elástico, en los cordones comprimidos o las alas inferiores de vigas continuas entre apoyos rígidos, por medio de la aplicación adicional de un esfuerzo lateral F_{Ed} en la unión del cordón con el apoyo elástico, tal que:

$$F_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{100} \quad \text{si } l_k \leq 1{,}2l$$
$$F_{Ed} = \frac{l}{l_k}\frac{N_{Ed}}{80}\frac{1}{1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \quad \text{si } l_k > 1{,}2l \qquad (6.11)$$

donde:

$$l_k = \pi\sqrt{\frac{EI}{N_{cr}}}$$

l es la distancia entre los apoyos elásticos.

(6) Si el valor de cálculo del esfuerzo de compresión N_{Ed} es constante a lo largo de la longitud del cordón, el axil crítico N_{cr} se puede calcular como:

$$N_{cr} = mN_E \qquad (6.12)$$

donde:

$$N_E = \pi^2\frac{EI}{L^2}$$

$m = \frac{2}{\pi^2}\sqrt{\gamma}$ pero no menor que 1,0

$$\gamma = \frac{cL^4}{EI}$$

$$c = \frac{C_d}{l}$$

donde:

L es la longitud del vano entre los apoyos rígidos

l es la distancia entre los apoyos elásticos

C_d es la rigidez del apoyo elástico, véase el punto (2), NOTA 1.

Se puede suponer rígido el apoyo lateral de un ala comprimida si su rigidez C_d satisface la siguiente expresión:

$$C_d > \frac{4N_E}{L} \qquad (6.13)$$

donde:

N_E es la carga crítica elástica que se obtiene bajo la hipótesis de extremos articulados.

(7) El procedimiento dado en los puntos (2) a (6) también puede aplicarse a las alas comprimidas de las vigas cuando A_{eff} en (4) se sustituye por:

$$A_{eff} + \frac{A_{wc}}{3}$$

donde:

A_{wc} es el área de la zona comprimida del alma. En el caso de secciones de Clase 4 se deben tomar las áreas eficaces.

Cuando el esfuerzo axil no sea constante a lo largo de toda su longitud, se empleará el método que se describe a continuación para la comprobación del pandeo lateral del cordón comprimido.

Para el ala inferior de una viga continua con rigidizadores laterales dispuestos a una distancia L (ver figura A29.6.1), el valor de m de la ecuación 6.12 será el mínimo valor obtenido de los dos siguientes:

$$m = 1 + 0{,}44(1 + \mu)\Phi^{1,5} + (3 + 2\Phi)\,\gamma/(350 - 50\mu) \qquad (6.14)$$

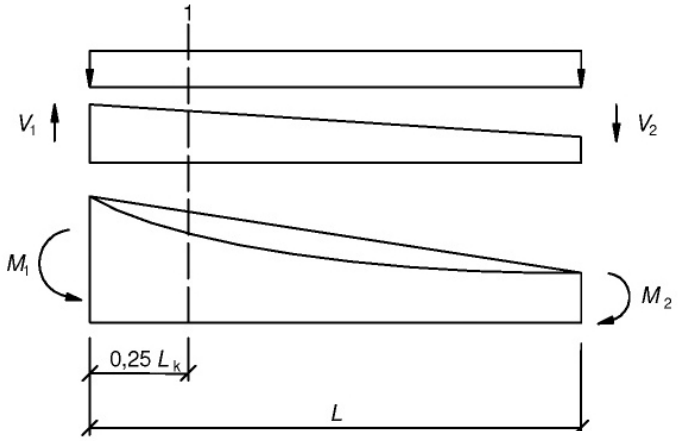
$$m = 1 + 0{,}44(1 + \mu)\Phi^{1,5} + (0{,}195 + (0{,}05 + \mu/100)\Phi)\gamma^{0,5}$$

donde:

$\mu = V_2/V_1$, véase la figura A29.6.1

$\Phi = 2(1 - M_2/M_1)(1 + \mu)$ para $M_2 > 0$

Cuando el momento flector cambie de signo, se puede utilizar la ecuación (6.14) como una estimación conservadora, introduciendo el valor $M_2 = 0$.



1) Sección de cálculo

Figura A29.6.1 Segmento de viga entre apoyos laterales rígidos con variación parabólica de los momentos flectores

La comprobación de la resistencia al pandeo lateral por torsión, según el apartado 6.3.2.2, se puede llevar a cabo tomando el esfuerzo correspondiente a la sección situada a una distancia $0{,}25L_k$ del apoyo con el mayor momento, como se muestra en la Figura A29.6.1, siempre que la resistencia de la sección se compruebe también en la sección con el mayor momento, donde $L_k = L/\sqrt{m}$.

6.4 Elementos compuestos comprimidos

(1) Véase el apartado 6.4 del Anejo 22.

6.5 Abolladura de chapas

(1) Para la abolladura de chapas en una viga armada se deben aplicar las reglas dadas en el Anejo 25.

(2) Se debe llevar a cabo la comprobación de la abolladura de chapas de los elementos en estado límite último utilizando uno de los dos procedimientos siguientes:

a) Comprobando las tensiones normales, tensiones tangenciales y esfuerzos transversales de acuerdo con los apartados 4, 5 o 6 del Anejo 25. Además, se deben cumplir los criterios de interacción del apartado 7 del Anejo 25.

b) Empleando el método de la tensión reducida, sobre la base de los límites de tensión gobernados por la abolladura, según el apartado 10 del Anejo 25.

NOTA: Véase además el apartado 6.2.2.5.

(3) Se puede comprobar la estabilidad de los rigidizadores de las almas o de las chapas de tablero rigidizadas, sometidas a compresión y flexión adicional producida por cargas perpendiculares al plano de la chapa rigidizada, según el apartado 6.3.2.3.

7 Estados límite de servicio

7.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 7.1(1), (2) y (3) del Anejo 22.

(4) Se deben cumplir los siguientes criterios relativos a los estados límite de servicio:

a) Garantizar un comportamiento elástico con el objeto de limitar:
   - una plastificación excesiva, véase el apartado 7.3(1);
   - desviaciones de la geometría prevista por flechas residuales, véase el apartado 7.3(1);
   - deformaciones excesivas, véase el apartado 7.3(4).

b) Limitar las flechas y las curvaturas con el fin de evitar:
   - impactos dinámicos no previstos debidos al tráfico (combinación de limitaciones de flechas y frecuencias naturales), véanse los apartados 7.7 y 7.8;
   - el incumplimiento de los gálibos requeridos, véase el apartado 7.5 o 7.6;
   - la fisuración de las capas de pavimento, véase el apartado 7.8;
   - daños de los dispositivos de drenaje, véase el apartado 7.12.

c) Limitar las frecuencias naturales, véanse los apartados 7.8 y 7.9, con el fin de:
   - evitar las vibraciones, debidas al tráfico o al viento, que sean inaceptables para los peatones o los pasajeros de vehículos que utilicen el puente;
   - limitar los daños de fatiga causados por la resonancia;
   - limitar la excesiva emisión de ruido.

d) Restringir la esbeltez de la chapa, véase el apartado 7.4, con el fin de limitar la:
   - ondulación excesiva de las chapas;
   - respiración de las chapas (deformaciones transversales);
   - reducción de la rigidez debida a la abolladura de las chapas, que se traduce en un incremento de la flecha, véase el Anejo 25.

e) Mejorar la durabilidad mediante la definición adecuada de los detalles de proyecto que reduzcan la corrosión y el desgaste excesivo, véase el apartado 7.11.

f) Facilitar el mantenimiento y la reparación, véase el apartado 7.11, para asegurar:
   - el acceso a las partes estructurales para el mantenimiento, inspección y renovación de la protección contra la corrosión y los pavimentos bituminosos;
   - la sustitución de apoyos, anclajes, cables y juntas de dilatación con la interrupción mínima en la utilización de la estructura.

(5) En la mayoría de situaciones los aspectos relativos a los estados límite de servicio se deben contemplar en el proyecto global del puente, o bien mediante la definición adecuada de los detalles de proyecto. Sin embargo, en los casos oportunos, se pueden comprobar los estados límite de servicio mediante evaluaciones numéricas, por ejemplo calculando las flechas o las frecuencias propias de la estructura.

Cada proyecto, en función de sus características, podrá definir requisitos adicionales a cumplir para los estados límite de servicio que, en cualquier caso deberán ser conformes con lo indicado en la reglamentación vigente que le sea aplicable.

7.2 Modelos de cálculo

(1) Las tensiones en los estados límite de servicio deben obtenerse por medio de un análisis elástico lineal, utilizando las propiedades adecuadas de la sección, véase el Anejo 25.

(2) En la modelización de la estructura, debe tenerse en cuenta la distribución no uniforme de cargas y rigideces, debidas a los cambios en el espesor de la chapa, en la rigidización, etc.

(3) Las flechas deben obtenerse mediante un análisis elástico lineal, utilizando las propiedades adecuadas de la sección, véase el Anejo 25.

NOTA: Se pueden utilizar modelos simplificados para el cálculo de las tensiones siempre que el efecto de las simplificaciones sea conservador.

7.3 Limitaciones de tensiones

(1) Se deben limitar las tensiones nominales $\sigma_{Ed,ser}$ y $\tau_{Ed,ser}$ que se obtienen a partir de las combinaciones características de cargas, cuyo cálculo debe considerar los efectos del arrastre por cortante en las alas anchas y los efectos hiperestáticos producidos por las flechas (por ejemplo los momentos hiperestáticos en celosías), como sigue:

$$\sigma_{Ed,ser} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}} \tag{7.1}$$

$$\tau_{Ed,ser} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}\cdot\gamma_{M,ser}} \tag{7.2}$$

$$\sqrt{\sigma_{Ed,ser}^2 + 3\tau_{Ed,ser}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}} \tag{7.3}$$

donde:

$\gamma_{M,ser} = 1{,}0$.

NOTA 1: Las comprobaciones anteriores deben incluir, cuando corresponda, las tensiones σ_z producidas por las cargas transversales, véase el Anejo 25.

NOTA 2: Se pueden despreciar los efectos de abolladura de chapas, según se especifica en el apartado 2.2 (5) del Anejo 25.

(2) Se debe limitar el rango de variación de la tensión nominal $\Delta\sigma_{fre}$, producido por la combinación frecuente de cargas, al valor $1{,}5\, f_y/\gamma_{M,ser}$, véase el Anejo 27.

(3) En el caso de uniones mediante tornillos no pretensados sometidos a cortante, se deben limitar los esfuerzos en el tornillo producidos por la combinación característica de cargas, según la expresión:

$$F_{b,Rd,ser} \leq 0{,}7F_{b,Rd} \tag{7.4}$$

donde:

$F_{b,Rd}$ es la capacidad resistente utilizada en las comprobaciones en estado límite último.

(4) En el caso de uniones mediante tornillos pretensados de categoría B resistentes al deslizamiento (resistencia al deslizamiento en el estado límite de servicio, véase el Anejo 26), la evaluación en servicio se debe realizar utilizando la combinación característica de cargas.

7.4 Limitación de la respiración de las almas

(1) Se limitará la esbeltez de las chapas de las almas para evitar una respiración excesiva que pueda producir fatiga en las zonas próximas a las uniones alma-ala.

Al objeto de evitar problemas de fatiga por respiración del alma, se estudiará dicho fenómeno en todos los paneles de almas de vigas de puentes que no verifiquen las condiciones definidas en el apartado 7.4(2).

(2) En el caso de paneles de alma sin rigidizadores longitudinales o subpaneles de almas rigidizadas, se puede despreciar la respiración de las almas, siempre que se cumplan los siguientes criterios:

$b/t \leq 30 + 4{,}0L \leq 300$ para puentes de carretera (7.5)

$b/t \leq 55 + 3{,}3L \leq 250$ para puentes de ferrocarril (7.6)

donde:

L es la longitud de vano en m, no siendo inferior a 20 m.

(3) Si no se cumple la disposición anterior (2), debe comprobarse la respiración de las almas como se indica a continuación:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed,ser}}{k_\sigma \cdot \sigma_E}\right)^2 + \left(\frac{1{,}1\tau_{x,Ed,ser}}{k_\tau \cdot \sigma_E}\right)^2} \leq 1{,}1 \qquad (7.7)$$

donde:

$\sigma_{x,Ed,ser}$, $\tau_{x,Ed,ser}$ son las tensiones obtenidas con la combinación frecuente de cargas. Si las tensiones no son uniformes a lo largo de la longitud del panel, véase apartado 4.6(3) del Anejo 25

k_σ, k_τ son los coeficientes de abolladura, bajo la hipótesis de bordes articulados del panel, véase el Anejo 25

$\sigma_E = 190000\left(\frac{t}{b_p}\right)^2$ $[N/mm^2]$

b_p es el menor valor entre a y b.

NOTA: Para tensiones que varíen a lo largo del panel, véase el apartado 4.6(3), del Anejo 25.

7.5 Límites relativos a los gálibos de circulación

(1) Se deben mantener los gálibos específicos de circulación sin que se produzca la invasión de alguna parte de la estructura bajo los efectos de la combinación característica de cargas.

7.6 Límites relativos al aspecto visual

(1) Se debe considerar el empleo de contraflechas de fabricación para alcanzar una apariencia satisfactoria del puente.

(2) En el cálculo de la contra flecha, se considerarán los efectos de la deformación por cortante y del desplazamiento de las uniones atornilladas o remachadas.

(3) Para uniones mediante remaches o tornillos de fijación, se puede suponer un deslizamiento del elemento de sujeción de $0{,}2\ mm$. No será necesario considerar el deslizamiento en el caso de tornillos pretensados.

7.7 Criterios de funcionamiento para puentes de ferrocarril

(1) Se pueden encontrar criterios específicos relacionados con las flechas y vibraciones en puentes de ferrocarril en la reglamentación específica vigente.

(2) Se puede indicar cualquier requisito para limitar la emisión de ruido dentro de las especificaciones del proyecto.

7.8 Criterios de funcionamiento para puentes de carretera

7.8.1 Generalidades

(1) Se deben evitar las deformaciones excesivas cuando puedan:

- poner en peligro el tráfico por una pendiente transversal excesiva cuando la superficie esté helada;
- afectar a las cargas dinámicas del puente por el impacto de las ruedas;
- afectar al comportamiento dinámico produciendo incomodidad a los usuarios;
- producir la fisuración de las superficies bituminosas;
- perjudicar al sistema de drenaje de agua del tablero del puente.

NOTA: Véase el Apéndice C para los requisitos de durabilidad.

(2) Las deformaciones se deben calcular con la combinación frecuente de cargas.

(3) Las flechas y la frecuencia natural de vibración del puente se deben limitar para evitar incomodidad a los usuarios.

7.8.2 Límite de flechas para evitar un excesivo impacto del tráfico

(1) La estructura del tablero se tiene que proyectar de forma que se asegure un perfil longitudinal regular en toda su longitud y que no existe un cambio brusco en la sección que pueda producir un fenómeno de impacto. Se deben evitar los cambios bruscos en la pendiente del tablero, así como los cambios de nivel en las juntas de dilatación. Las vigas transversales en los extremos del puente deben dimensionarse para asegurar que la flecha no supere:

- el límite establecido para el correcto funcionamiento de la junta de dilatación;
- $5\ mm$ bajo cargas frecuentes, a menos que se especifiquen otros límites según el tipo particular de junta de dilatación.

NOTA: En el Apéndice B se proporcionan indicaciones sobre el límite de flechas en las juntas de dilatación.

(2) Cuando la estructura del tablero se encuentre apoyada de forma irregular (por ejemplo mediante puntales adicionales en pilas intermedias del puente), la superficie del tablero adyacente a estos apoyos adicionales debe calcularse mediante los coeficientes de impacto modificados que se establecen según la reglamentación específica vigente para el área más próxima a las juntas de dilatación.

7.8.3 Efectos de resonancia

(1) Se debe tener en cuenta la resonancia mecánica cuando proceda. En el caso de elementos ligeros de arriostramiento, tirantes o elementos similares que tengan frecuencias naturales cercanas a la frecuencia de cualquier excitación mecánica producida por el paso regular de vehículos sobre las

uniones del tablero, se debe contemplar la posibilidad de incrementar su rigidez o la disposición de amortiguadores, por ejemplo amortiguadores oscilantes.

NOTA: El Apéndice B proporciona indicaciones sobre los elementos sobre los que se apoyan las juntas de dilatación.

7.9 Criterios de funcionamiento para pasarelas peatonales

(1) En el caso de pasarelas de tráfico peatonal y ciclista con vibraciones excesivas que puedan causar molestias a los usuarios, se deben adoptar medidas para minimizar dichas vibraciones mediante el proyecto del puente con la frecuencia natural adecuada o colocando dispositivos de amortiguamiento adecuados.

7.10 Criterios de funcionamiento para los efectos del viento

(1) Se tienen que minimizar las vibraciones de los elementos esbeltos originadas por el desprendimiento de vórtices, para evitar oscilaciones de tensión de amplitud suficiente para producir daños por fatiga.

NOTA: La reglamentación específica vigente proporciona indicaciones para obtener las cargas de fatiga producidas por el desprendimiento de vórtices.

7.11 Accesibilidad de los detalles constructivos de las uniones y las superficies

(1) Se deben proyectar y detallar todos los elementos de acero de forma que se minimice el riesgo de corrosión y se permita la inspección y el mantenimiento, véase la norma UNE-EN ISO 12944-3.

(2) Se tienen que proyectar todos los elementos de forma que sean accesibles para su inspección, limpieza y pintura. Cuando dicho acceso no sea posible, todos los elementos inaccesibles deben sellarse de forma eficaz frente a la corrosión (por ejemplo el interior de cajones y zonas huecas), o bien construirse en acero con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica. Si el ambiente o las dificultades de acceso son tales que pueda producirse corrosión a lo largo la vida útil del puente, deben adoptarse márgenes suficientes al dimensionar los elementos, véase el apartado 4(4).

7.12 Drenaje

(1) Todos los tableros tienen que ser impermeables y las superficies de calzada y pasarelas deben sellarse para evitar la infiltración del agua.

(2) La disposición del drenaje debe tener en cuenta la pendiente del tablero del puente, así como la localización, diámetro y pendiente de las tuberías.

(3) Los desagües deben conducir el agua hasta un punto por debajo de la estructura que impida que el agua entre dentro de la misma.

(4) Las tuberías de drenaje deben proyectarse de forma que puedan limpiarse fácilmente. En los planos se tiene que indicar la distancia entre los centros de las aperturas para permitir la limpieza.

(5) Cuando se utilicen tuberías de drenaje dentro de puentes con sección cajón, se deben adoptar disposiciones adecuadas para evitar la acumulación de agua en el caso de fugas o rotura de tuberías.

(6) En puentes de carretera, conviene disponer drenajes a la altura de la junta de dilatación, en ambos lados si fuese necesario.

(7) En puentes de ferrocarril con tramos de vía sobre balasto de más de $40\ m$, se puede suponer que el tablero drena hacia los sistemas de drenaje del estribo y no es necesario ningún dispositivo adicional de drenaje a lo largo de la longitud del tablero.

(8) Deben disponerse sistemas de drenaje para todas las secciones cerradas, a menos que estén completamente selladas mediante soldadura.

8 Elementos de sujeción, soldaduras, conexiones y uniones

8.1 Uniones mediante tornillos y bulones

8.1.1 Categorías de uniones con tornillos

8.1.1.1 Uniones a cortante

(1) Véase el apartado 3.4.1(1) del Anejo 26.

8.1.1.2 Uniones en tracción

(1) Véase el apartado 3.4.2(1) del Anejo 26.

8.1.2 Disposición de los taladros para los tornillos

(1) Véase el apartado 3.5(1) y (2) del Anejo 26.

8.1.3 Resistencia de cálculo de los elementos individuales de unión

8.1.3.1 Tornillos

(1) Véase el apartado 3.6.1(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), y (15) del Anejo 26.

8.1.3.2 Pernos por inyección

8.1.3.2.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 3.6.2.1(1) y (2) del Anejo 26.

8.1.3.2.2 Resistencia de cálculo

(1) Véase el apartado 3.6.2.2(1), (2), (3), (4), (5) y (6) del Anejo 26.

8.1.4 Grupos de elementos de unión

(1) Véase el apartado 3.7(1) del Anejo 26.

8.1.5 Uniones largas

(1) Véase el apartado 3.8(1) y (2) del Anejo 26.

8.1.6 Uniones resistentes al deslizamiento con las uniones 8.8 y 10.9

8.1.6.1 Resistencia de cálculo al deslizamiento

(1) Véase el apartado 3.9.1(1) y (2) del Anejo 26.

8.1.6.2 Tracción y cortante combinados

(1) Véase el apartado 3.9.2(1) y (2) del Anejo 26.

8.1.6.3 Uniones híbridas

(1) Véase el apartado 3.9.3(1) del Anejo 26.

8.1.7 Deducciones por los taladros de los elementos de unión

8.1.7.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 3.10.1(1) del Anejo 26.

8.1.7.2 Cálculo de la resistencia al desgarro

(1) Véase el apartado 3.10.2(1), (2) y (3) del Anejo 26.

8.1.7.3 Angulares conectados por un ala y otros elementos en tracción unidos de forma asimétrica

(1) Véase el apartado 3.10.3(1) y (2) del Anejo 26.

8.1.7.4 Angulares de soporte

(1) Véase el apartado 3.10.4(1), (2), (3), (4), (5) y (6) del Anejo 26.

8.1.8 Fuerzas de palanca

(1) Véase el apartado 3.11(1) del Anejo 26.

8.1.9 Distribución de esfuerzos entre elementos de unión en estado límite último

(1) Si se aplica un momento en una unión, la distribución de los esfuerzos será linealmente proporcional a la distancia desde el centro de giro.

(2) Véase el apartado 3.12(3) del Anejo 26.

8.1.10 Uniones con bulones

8.1.10.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 3.13.1(1), (2), (3) y (4) del Anejo 26.

8.1.10.2 Cálculo de los bulones

(1) Véase el apartado 3.13.2(1), (2) y (3) del Anejo 26.

8.2 Uniones soldadas

8.2.1 Geometría y dimensiones

8.2.1.1 Tipo de soldadura

(1) Véase el apartado 4.3.1(1) y (2) del Anejo 26.

8.2.1.2 Soldaduras en ángulo

8.2.1.2.1 Generalidades

(1) Véase el apartado 4.3.2.1(1), (2), (3), (4), (5) y (6) del Anejo 26.

8.2.1.2.2 Soldaduras en ángulo discontinuas

(1) No se deben utilizar soldaduras en ángulo discontinuas en las zonas en las que se puedan formar picaduras por corrosión.

NOTA: Se permite la utilización de soldaduras en ángulo discontinua cuando la unión esté protegida de la atmósfera, por ejemplo en el interior de secciones cajón.

8.2.1.3 Soldaduras de ojal (o en ranura)

(1) Véase el apartado 4.3.3(1), (2), (3) y (4) del Anejo 26.

8.2.1.4 Soldaduras a tope

(1) Véase el apartado 4.3.4(1), (2) y (3) del Anejo 26.

No se utilizarán cordones discontinuos a tope con penetración total o parcial.

8.2.1.5 Soldaduras de tapón (o botón)

(1) Véase el apartado 4.3.5(1) del Anejo 26.

(2) Véase el apartado 4.3.5(2), (3), (4) y (5) del Anejo 26.

8.2.1.6 Soldaduras en chaflán

(1) Véase el apartado 4.3.6(1) del Anejo 26.

8.2.2 Soldaduras con rellenos

(1) Véase 4.4(1), (2) y (3) del Anejo 26.

8.2.3 Resistencia de cálculo de una soldadura en ángulo

(1) Para obtener la resistencia de cálculo de una soldadura en ángulo, véase el apartado 4.5 del Anejo 26.

8.2.4 Resistencia de cálculo de soldaduras en ojal (o en ranura)

(1) Véase el apartado 4.6(1) del Anejo 26.

8.2.5 Resistencia de cálculo de las soldaduras a tope

8.2.5.1 Soldaduras a tope con penetración completa

(1) Véase el apartado 4.7.1(1) del Anejo 26.

8.2.5.2 Soldaduras a tope con penetración parcial

(1) Véase el apartado 4.7.2(1) y (2) del Anejo 26.

8.2.5.3 Soldaduras a tope en T

(1) Véase el apartado 4.7.3(1) del Anejo 26.

8.2.6 Resistencia de cálculo de las soldaduras de tapón (o botón)

(1) Véase el apartado 4.8 del Anejo 26.

8.2.7 Distribución de esfuerzos

(1) Véase el apartado 4.9(1), (2), (3), (4), (5) y (6) del Anejo 26.

8.2.8 Uniones con alas no rigidizadas

(1) Véase el apartado 4.10(1), (2), (3), (4) y (5) del Anejo 26.

8.2.9 Uniones largas

(1) Véase el apartado 4.11(1), (2), (3) y (4) del Anejo 26.

8.2.10 Soldaduras a tope con penetración parcial a un único lado cargadas excéntricamente

(1) Véase el apartado 4.12(1) y (2) del Anejo 26.

8.2.11 Angulares conectados por un lado

(1) Véase el apartado 4.13(1), (2) y (3) del Anejo 26.

8.2.12 Soldadura en zonas conformadas en frío

(1) Véase el apartado 4.14(1) del Anejo 26.

8.2.13 Análisis de uniones estructurales formadas por secciones en doble T

(1) Para el análisis en estado límite último de uniones estructurales formadas por secciones en doble T, véanse los apartados 5 y 6 del Anejo 26.

8.2.14 Uniones de perfiles tubulares

(1) Para el análisis en estado límite último de uniones estructurales formadas por perfiles huecos, véase el apartado 7 del Anejo 26.

En las uniones soldadas de secciones tubulares en puentes, solo se permitirán uniones a tope con penetración completa.

En caso excepcional de que se necesitara utilizar uniones soldadas en ángulo y se permita por la dirección facultativa, dichas uniones deberán tener un espesor eficaz de garganta igual a "t", siendo "t" el espesor del tubo. El espesor eficaz de garganta es el que queda después de restar la holgura existente (ver figura A29.8.1) que, en cualquier caso no podrá ser mayor de 3 mm.

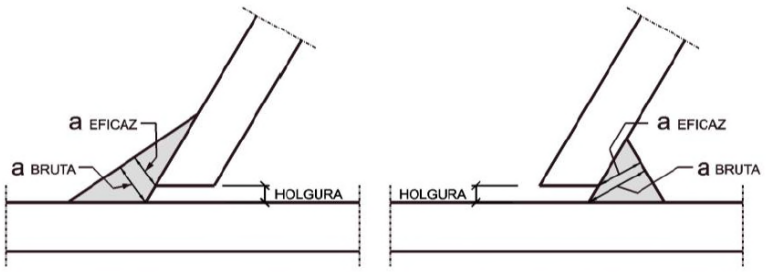


Figura A29.8.1 Espesor eficaz de garganta

La geometría y el proceso de ejecución debe ser tal que, a posteriori, se puedan hacer los ensayos que sea necesario para poder verificar el espesor de garganta eficaz real dispuesto en toda la longitud de la soldadura.

Además en lo relativo a las uniones que haya que reforzar por ser de resistencia insuficiente, para evitar el solape de las diagonales o montantes en una unión en K o N, las diagonales o montantes se podrán soldar a un rigidizador vertical, que supone una disposición constructiva tendente a evitar las dificultades que entraña la correcta ejecución de una unión soldada en silla (ver figura A29.8.2).

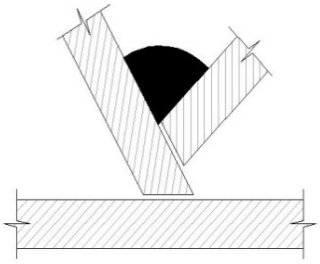


Figura A29.8.2 Unión soldada en silla

En este caso la geometría y disposición de dicha unión deberá ser la que se indica en la figura A29.8.3.

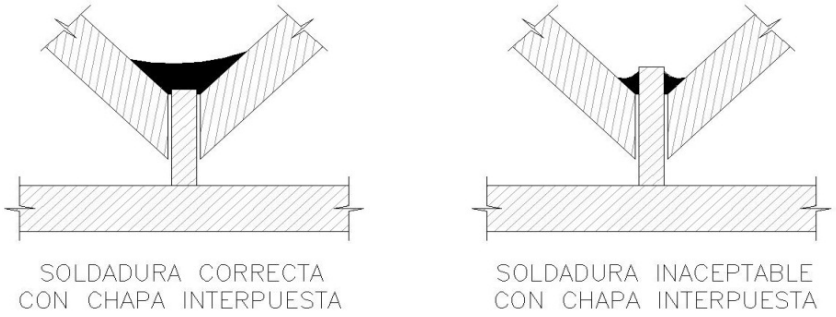


Figura A29.8.3 Ejemplos de soldadura aceptable e inaceptable en el caso de chapa interpuesta

9 Comprobación a fatiga

9.1 Generalidades

9.1.1 Requisitos para la comprobación a fatiga

(1) Las comprobaciones a fatiga deben realizarse en todas las zonas críticas, de acuerdo con el Anejo 27.

(2) No serán de aplicación las comprobaciones a fatiga en:

- pasarelas peatonales, puentes que soporten canales u otros puentes sometidos principalmente a carga estática, a no ser que dichos puentes o alguna de sus partes sean susceptibles de excitación por cargas de viento o peatonales;
- las partes de los puentes de ferrocarril o carretera que no sean solicitados por cargas de tráfico ni sean susceptibles de excitación por cargas de viento.

9.1.2 Cálculo en fatiga de puentes de carretera

(1) 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.

(2) La comprobación a fatiga se debe llevar a cabo utilizando el procedimiento que se establece en este apartado y en el Anejo 27.

9.1.3 Cálculo en fatiga de puentes de ferrocarril

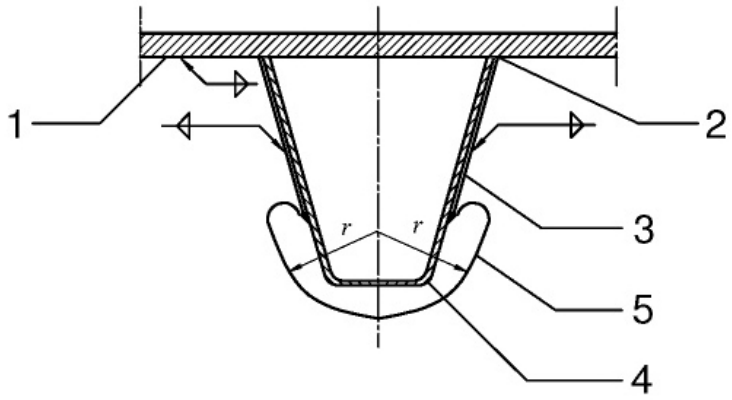
(1) Las comprobaciones a fatiga se deben realizar en todos los elementos estructurales, incluyendo los elementos que se enumeran en (2).

Todos los elementos estructurales de puentes de ferrocarril sometidos a cargas repetidas deberán ser comprobados frente al estado límite de fatiga, siempre que se identifiquen como críticos en este aspecto.

(2) Se deben comprobar los siguientes elementos del tablero del puente:

1. En tableros de puentes con rigidizadores longitudinales y vigas transversales:
   - chapa de tablero,
   - rigidizadores,
   - vigas transversales,
   - uniones entre los rigidizadores y las vigas transversales.
2. En tableros de puentes con rigidizadores transversales únicamente:
   - chapa de tablero,
   - rigidizadores.

(3) Para la comprobación a fatiga de las zonas críticas, véase las figuras A29.9.1 y A29.9.2 así como la tabla A29.9.8.



1 Zona 1
2 Zona 2
3 Zona 3
4 Zona 4 (empalme)
5 Zona 5

Figura A29.9.1 Zonas críticas en fatiga, véase además la tabla A29.9.8



1 Soldadura a tope
2 Soldadura por puntos continua a lo largo de toda la longitud de la banda dorsal

Figura A29.9.2 Rigidizadores con chapas de unión y placas de respaldo metálicas

9.2 Carga de fatiga

9.2.1 Generalidades

(1) La carga de fatiga debida al tráfico se debe obtener a partir de la reglamentación específica vigente.

(2) Las cargas de fatiga en elementos esbeltos debidas a excitaciones de viento se deben obtener a partir de la reglamentación específica vigente.

9.2.2 Modelo simplificado de carga de fatiga para puentes de carretera

(1) Debe utilizarse el modelo 3 de carga de fatiga (modelo para vehículo único) para la comprobación a fatiga de puentes de carretera, de forma conjunta con los datos de tráfico específicos para la localización del puente, de acuerdo con la reglamentación específica vigente.

NOTA: Véase además el apartado 9.4.1(6).

9.2.3 Modelo simplificado de carga de fatiga para puentes de ferrocarril

(1) Deben utilizarse los valores característicos del modelo 71 de carga para la comprobación a fatiga de puentes de ferrocarril, incluyendo el coeficiente dinámico Φ_2 que se indica la reglamentación específica vigente.

9.3 Coeficientes parciales para comprobaciones a fatiga

(1) Se debe tomar $\gamma_{Ff} = 1{,}0$ como coeficiente parcial para las cargas de fatiga.

(2) Se debe tomar γ_{Mf} como coeficiente parcial para la resistencia a fatiga. El valor de γ_{Mf} a utilizar deberá extraerse de la tabla A27.3.1 del Anejo 27.

9.4 Rango de tensiones de fatiga

9.4.1 Generalidades

(1) Se puede utilizar el siguiente procedimiento para determinar el rango de tensiones de fatiga para la carga simplificada de fatiga que se especifica en los apartados 9.2.2 o 9.2.3.

(2) La tensión máxima $\sigma_{P,max}$ y la tensión mínima $\sigma_{P,min}$ se deben determinar considerando las áreas de influencia.

(3) El rango de tensiones de referencia $\Delta\sigma_p$ para determinar el daño producido por el espectro del rango de tensiones debe obtenerse según:

$$\Delta\sigma_p = \left|\sigma_{p,max} - \sigma_{p,min}\right| \quad (9.1)$$

(4) El daño producido por el espectro del rango de tensiones se puede representar por medio del rango de tensiones de daño equivalente correspondiente a $2x10^6$ ciclos:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda\Phi_2\Delta\sigma_p \quad (9.2)$$

donde:

λ es el coeficiente de daño equivalente definido en 9.5

Φ_2 es el coeficiente de impacto de daño equivalente.

(5) En puentes de ferrocarril se debe obtener el valor de Φ_2 a partir de la reglamentación específica vigente. En puentes de carretera, Φ_2 puede tomarse igual a 1,0, tal y como se indica en el modelo de carga de fatiga.

(6) Como alternativa al procedimiento anterior, el espectro de tensiones de fatiga se puede obtener mediante la evaluación del historial de tensiones producida por los vehículos de carga de fatiga que se especifican en la reglamentación específica vigente de acciones, véase Anejo 27.

9.4.2 Análisis en fatiga

9.4.2.1 Rigidizadores longitudinales

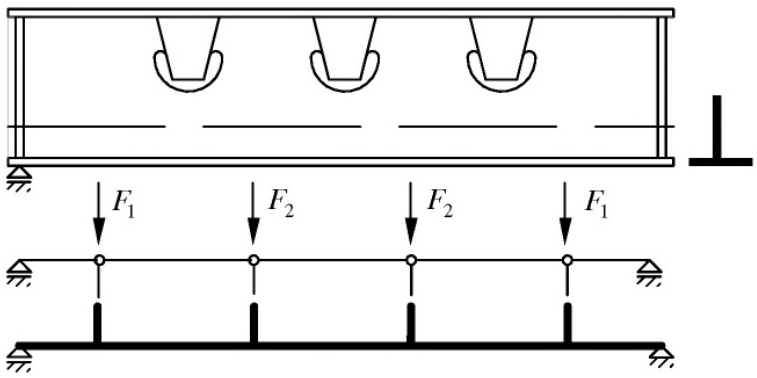
(1) Los rigidizadores longitudinales deben analizarse empleando un modelo de la estructura completa o, de forma simplificada, utilizando un modelo de viga continua sobre apoyos elásticos.

NOTA: Los rigidizadores longitudinales de los puentes de ferrocarril se pueden analizar como vigas continuas sobre apoyos elásticos.

9.4.2.2 Vigas transversales

(1) En el análisis de las vigas transversales, se debe tener en cuenta la influencia de los cortes en la chapa.

NOTA: Cuando se realicen cortes en la chapa de las vigas transversales, como se muestra en la figura A29.9.3, los efectos de las acciones se pueden determinar a través de la aplicación de un modelo de viga Vierendeel (en el que la chapa de tablero y la parte de la viga transversal bajo los cortes en la chapa son las alas y las zonas entredichos cortes son los montantes).



F_i Acción sobre el alma entre los cortes en la chapa

Figura A29.9.3 Modelo de viga Vierendeel para una viga transversal

(2) En el análisis del modelo para la viga transversal, se debe tener en cuenta:

1. Las uniones de la viga transversal con los rigidizadores transversales de las almas de las vigas principales deben formar un pórtico transversal continuo;
2. La contribución a la deformación global de las deformaciones de los elementos de las vigas Vierendeel debidas a momentos flectores, axiles y cortantes;
3. Los efectos del cortante entre la chapa de tablero y el alma de la viga transversal sobre las tensiones normales y tensiones tangenciales en la sección crítica de la figura A29.9.4;
4. Los efectos de la introducción local de cargas de los rigidizadores al alma;
5. Las tensiones tangenciales producidas por el cortante horizontal y vertical en la sección crítica de la figura A29.9.4.

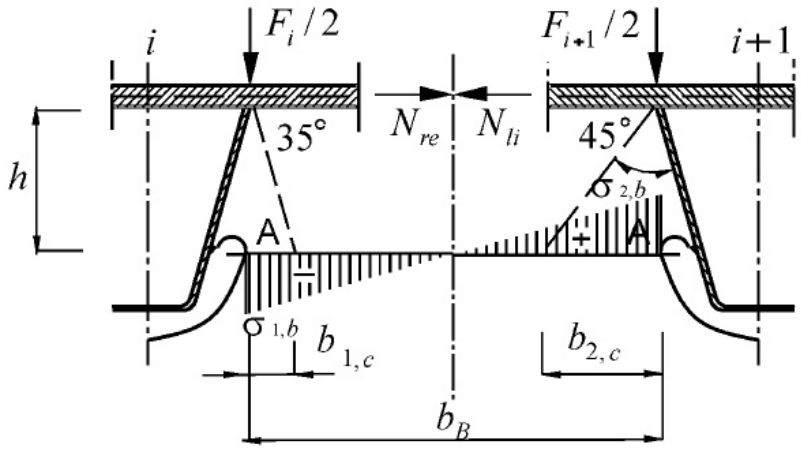


Figura A29.9.4 Distribución de tensiones en una groera

(3) Las tensiones normales en la sección crítica (figura A29.9.4) se pueden determinar como se indica a continuación:

$$\sigma_1 = \sigma_{1b} + \sigma_{1c} \quad (9.3)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{2b} + \sigma_{2c} \quad (9.4)$$

donde:

$-\sigma_{1b} = +\sigma_{2b} = \frac{M_{Ed}}{W}$ son las tensiones debidas a la flexión (9.5)

$\sigma_{1c} = -\frac{F_i}{2 \cdot A_{1c}}$ y $\sigma_{2c} = -\frac{F_{i+1}}{2 \cdot A_{2c}}$ son las tensiones de compresión debidas a las cargas locales de los rigidizadores (9.6)

$W = \frac{1}{6} t b_B^2$

$A_{1c} = b_{1c} t$

$A_{2c} = b_{2c} t$

V_{Ed} es el esfuerzo cortante horizontal

$M_{Ed} = V_{Ed} h$ es el momento flector en la sección crítica

F_i, F_{i+1} son las cargas introducidas por los rigidizadores

t es el espesor de la chapa del alma.

(4) En ausencia de groeras, las tensiones en la sección crítica se pueden obtener considerando que las alas están formadas por las almas de los rigidizadores con un ancho eficaz $b_{eff} = 5t_{w,st}$, donde $t_{w,st}$ es el espesor de chapa de los rigidizadores.

9.5 Procedimientos de comprobación a fatiga

9.5.1 Comprobación a fatiga

(1) La comprobación a fatiga se debe realizar como se indica a continuación:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \qquad (9.7)$$

y

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E2} \leq \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}} \qquad (9.8)$$

9.5.2 Coeficientes de daño equivalente λ para puentes de carretera

(1) El coeficiente de daño equivalente λ para puentes de carretera con un vano de hasta $80\ m$ de luz se debe obtener a partir de:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \qquad \text{con } \lambda \leq \lambda_{max} \qquad (9.9)$$

donde:

λ_1 es el coeficiente que tiene en cuenta el efecto de daño del tráfico y depende de la longitud de la línea o área crítica de influencia

λ_2 es el coeficiente que tiene en cuenta la intensidad de tráfico

λ_3 es el coeficiente que tiene en cuenta la vida útil de proyecto del puente

λ_4 es el coeficiente que tiene en cuenta el tráfico en otros carriles

λ_{max} es el valor máximo de λ teniendo en cuenta el límite de fatiga, véase (7).

(2) Al determinar λ_1, cuyos valores se obtendrán de la figura A29.9.5, la longitud de la línea o área crítica de influencia puede obtenerse como se indica a continuación:

a) para los momentos flectores:
   - para un vano simplemente apoyado, la longitud del vano L_i;
   - en las secciones de centro de vano de vanos continuos, la longitud del vano considerado L_i, véase la figura A29.9.7;
   - en las secciones de apoyo de vanos continuos, la media de las dos luces L_i y L_j adyacentes a dicho apoyo, véase la figura A29.9.7;
   - para vigas apoyadas sobre vigas transversales, la suma de las dos luces adyacentes de las vigas apoyadas sobre la viga transversal.

b) para el esfuerzo cortante en un vano simplemente apoyado y en vanos continuos:
   - para las secciones de apoyo, la luz del vano considerado $\mathrm{L_i}$, véase la figura A29.9.7;
   - para las secciones de centro de vano, $0{,}4$ veces la longitud del vano considerado $\mathrm{L_i}$, véase la figura A29.9.7.

c) para las reacciones:
   - para los apoyos extremos, la luz del vano considerado $\mathrm{L_i}$;

- para los apoyos intermedios, la suma de las luces de los dos vanos adyacentes $L_i + L_j$.

d) para los puentes arco:

- para las péndolas, el doble de la distancia entre las péndolas;
- para el arco, la mitad de la luz del arco.

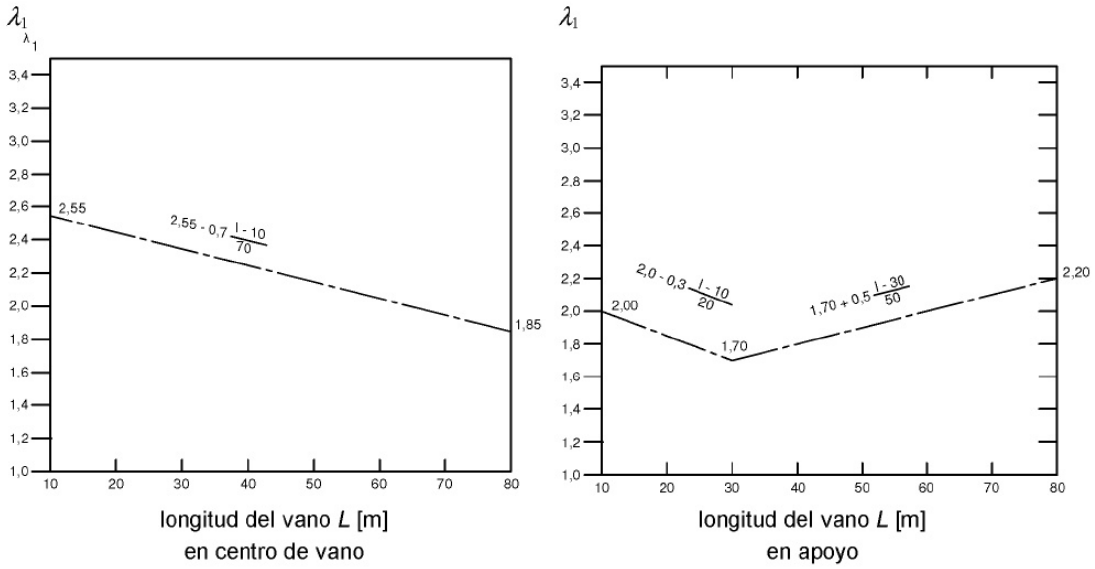


Figura A29.9.5 λ_1 para los momentos flectores en puentes de carretera

(3) El coeficiente λ_2 se debe calcular como sigue:

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0}\left(\frac{N_{Obs}}{N_0}\right)^{1/5} \qquad (9.10)$$

donde:

Q_{m1} es el peso medio (kN) de los vehículos pesados circulando por el carril para vehículos lentos, que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_{m1} = \left(\frac{\sum n_i Q_i^5}{\sum n_i}\right)^{1/5}$$

$Q_0 = 480$ kN

$N_0 = 0{,}5 \cdot 10^6$

N_{Obs} es el número total de vehículos pesados por año circulando en el carril para vehículos lentos, véase el apartado 9.2.2 (2)

Q_i es el peso en kN del del vehículo pesado i circulando por el carril para vehículos pesados

n_i es el número de vehículos pesados de peso Q_i circulando por el carril para vehículos pesados.

(4) Para valores dados de Q_{m1} y N_{Obs}, el coeficiente λ_2 se puede obtener a partir de la tabla A29.9.1.

Tabla A29.9.1 λ_2

Q_{m1}	N_{Obs}							
	$0{,}25 \cdot 10^6$	$0{,}50 \cdot 10^6$	$0{,}75 \cdot 10^6$	$1{,}00 \cdot 10^6$	$1{,}25 \cdot 10^6$	$1{,}50 \cdot 10^6$	$1{,}75 \cdot 10^6$	$2{,}00 \cdot 10^6$
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

(5) El coeficiente λ_3 se debe calcular como sigue:

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100}\right)^{1/5} \qquad (9.11)$$

donde:

t_{Ld} es la vida útil de proyecto del puente en años. El valor a utilizar será 100 años.

Tabla A29.9.2 λ_3

Vida útil de proyecto en años	50	60	70	80	90	100	120
Coeficiente λ_3	0,871	0,903	0,931	0,956	0,979	1,000	1,037

(6) El coeficiente λ_4 se debe calcular como sigue:

$$\lambda_4 = \left[1 + \frac{N_2}{N_1}\left(\frac{\eta_2 \cdot Q_{m2}}{\eta_1 \cdot Q_{m1}}\right)^5 + \frac{N_3}{N_1}\left(\frac{\eta_3 \cdot Q_{m3}}{\eta_1 \cdot Q_{m1}}\right)^5 + \cdots + \frac{N_k}{N_1}\left(\frac{\eta_k \cdot Q_{mk}}{\eta_1 \cdot Q_{m1}}\right)^5\right]^{1/5} \qquad (9.12)$$

donde:

k es el número de carriles con tráfico pesado

N_j es el número de vehículos pesados por año en el carril j

Q_{mj} es el peso medio de los vehículos pesados en el carril j

η_j es el valor de la línea de influencia del esfuerzo que produce el rango de tensiones en el centro del carril j, a introducir en la ecuación (9.12), con signo positivo.

(7) El coeficiente λ_{max} se debe obtener a partir de los espectros de los rangos de tensiones correspondientes. Para su utilización directa, se obtendrá de la figura A29.9.6.

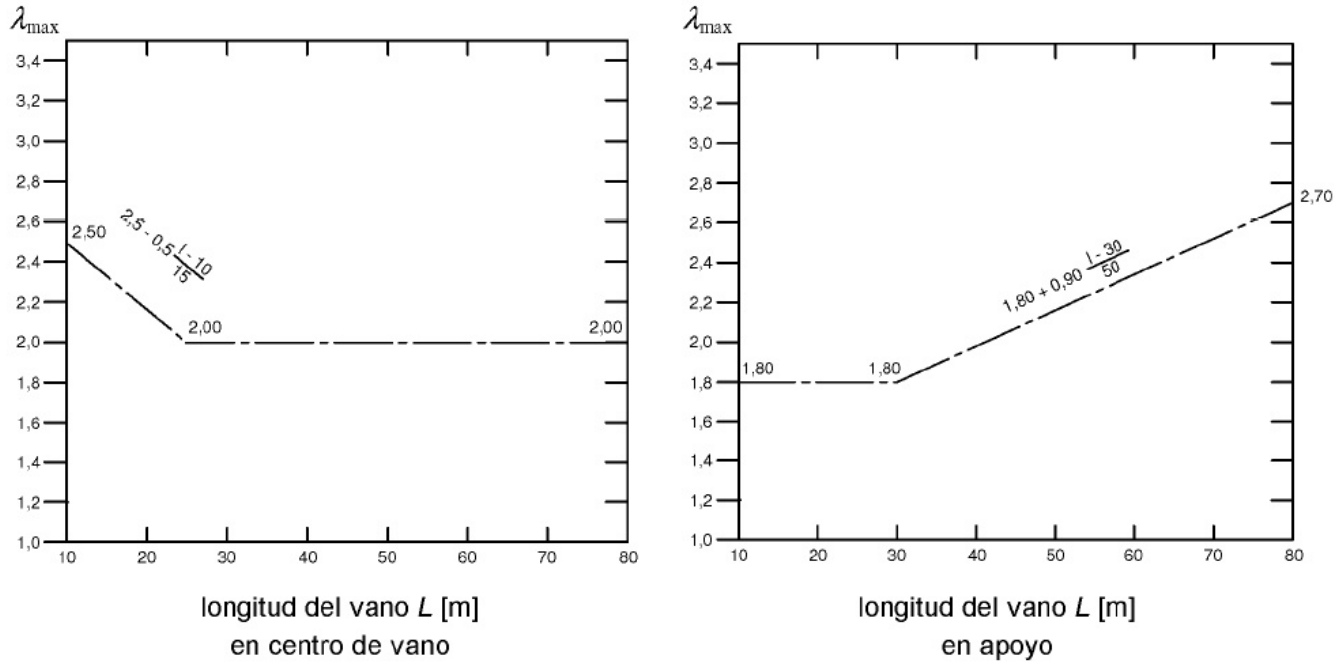


Figura A29.9.6 λ_{max} para los momentos flectores en puentes de carretera

9.5.3 Coeficientes de daño equivalente λ para puentes de ferrocarril

(1) El coeficiente de daño equivalente λ para puentes de ferrocarril con vanos de hasta $100\ m$ de luz se debe obtener a partir de:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \qquad \text{con } \lambda \leq \lambda_{max} \qquad (9.13)$$

donde:

λ_1 es el coeficiente que tiene en cuenta el efecto de daño del tráfico y depende de la longitud de la línea de influencia

λ_2 es el coeficiente que tiene en cuenta la intensidad de tráfico

λ_3 es el coeficiente que tiene en cuenta la vida útil de proyecto del puente

λ_4 es el coeficiente que tiene en cuenta que el elemento estructural puede estar cargado por más de una vía

λ_{max} es el valor máximo de λ teniendo en cuenta el límite de fatiga, véase (9).

(2) El valor del parámetro λ_1 se puede obtener a partir de la tabla A29.9.3 para tráfico convencional de ferrocarril y en la tabla A29.9.4 para trenes expresos con unidades múltiples y líneas de metro, así como para tráfico ferroviario con ejes de 25 t.

Para líneas de alta velocidad la Propiedad definirá, en su caso a través de la reglamentación vigente, los valores de λ_1 que sean de aplicación.

Tabla A29.9.3 Valores de λ_1 para tráfico ferroviario convencional

L	λ_1
0,5	1,60
1,0	1,60
1,5	1,60
2,0	1,46
2,5	1,38
3,0	1,35
3,5	1,17
4,0	1,07
4,5	1,02
5,0	1,03
6,0	1,03
7,0	0,97
8,0	0,92
9,0	0,88
10,0	0,85
12,5	0,82
15,0	0,76
17,5	0,70
20,0	0,67
25,0	0,66
30,0	0,65
35,0	0,64
40,0	0,64
45,0	0,64
50,0	0,63
60,0	0,63
70,0	0,62
80,0	0,61
90,0	0,61
100,0	0,60

Tabla A29.9.4 Valores λ_1 para para trenes expresos con unidades múltiples y líneas de metro, así como para tráfico ferroviario con ejes de 25 t

L	λ_1 para para trenes expresos con unidades múltiples y líneas de metro		λ_1 para tráfico ferroviario con ejes de 25t
	Tipo 9	Tipo 10	
0,5	0,97	1,00	1,65
1,0	0,97	1,00	1,65
1,5	0,97	1,00	1,65
2,0	0,97	0,99	1,64
2,5	0,95	0,97	1,55
3,0	0,85	0,94	1,51
3,5	0,76	0,85	1,31
4,0	0,65	0,71	1,16
4,5	0,59	0,65	1,08
5,0	0,55	0,62	1,07
6,0	0,58	0,63	1,04
7,0	0,58	0,60	1,02
8,0	0,56	0,60	0,99
9,0	0,56	0,55	0,96
10,0	0,56	0,51	0,93
12,5	0,55	0,47	0,90
15,0	0,50	0,44	0,92
17,5	0,46	0,44	0,73
20,0	0,44	0,43	0,68
25,0	0,40	0,41	0,65
30,0	0,37	0,42	0,64
35,0	0,36	0,44	0,65
40,0	0,35	0,46	0,65
45,0	0,35	0,47	0,65
50,0	0,36	0,48	0,66
60,0	0,39	0,48	0,66
70,0	0,40	0,49	0,66
80,0	0,39	0,49	0,66
90,0	0,39	0,48	0,66
100,0	0,40	0,48	0,66

(4) Al determinar λ_1, la longitud crítica de la línea de influencia deberá obtenerse como se indica a continuación:

a) para los momentos flectores:

- para un vano simplemente apoyado, la longitud del vano L_i;

- en las secciones de centro de vano de vanos continuos, la longitud del vano considerado L_i, véase la figura A29.9.7;
- en las secciones de apoyo de vanos continuos, la media de las dos luces L_i y L_j adyacentes al apoyo, véase la figura A29.9.7;
- para vigas transversales sujetando los elementos de fijación de los carriles (o traviesas), la suma de las dos luces de las traviesas (o vigas) inmediatamente adyacentes a la viga transversal;
- para una chapa de tablero apoyada únicamente en vigas transversales o costillas transversales (sin elementos longitudinales) y para aquellos elementos transversales de apoyo, la longitud de la línea de influencia de la deformada (despreciando cualquier parte que indique una deformada hacia arriba), teniendo en cuenta debidamente la rigidez de los carriles en la distribución de la carga. Para elementos transversales con un espaciamiento inferior a 750 mm, esto se puede tomar como 2 veces el espaciamiento de los elementos transversales + 3 m.

b) para el esfuerzo cortante en un vano simplemente apoyado y un vano continuo:

- para las secciones de apoyo, la luz del vano considerado L_i, véase la figura A29.9.7;
- para las secciones de centro de vano, $0{,}4$ veces la longitud del vano considerado L_i, véase la figura A29.9.7.

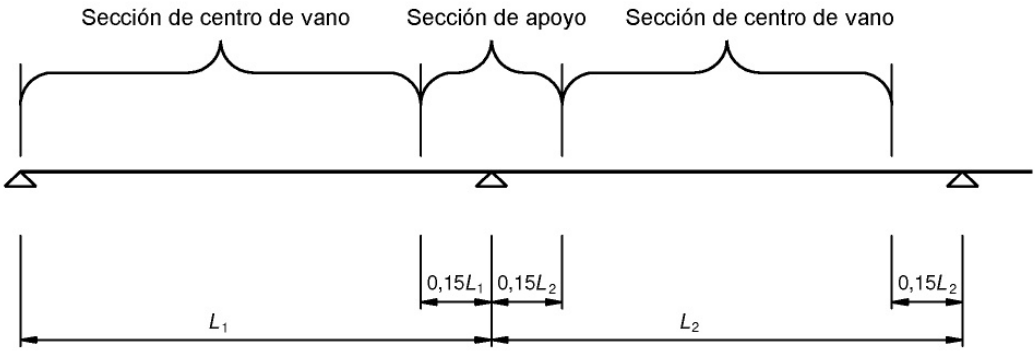


Figura A29.9.7 Localización de las secciones de centro de vano y apoyo

(5) El coeficiente λ_2 se debe obtener a partir de la tabla A29.9.5.

Tabla A29.9.5 λ_2

Tráfico por año [10^6t/vía]	5	10	15	20	25	30	35	40	50
λ_2	0,72	0,83	0,90	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,15

(6) El coeficiente λ_3 se debe obtener a partir de la tabla A29.9.6.

Tabla A29.9.6 λ_3

Vida útil de proyecto [años]	50	60	70	80	90	100	120
λ_3	0,87	0,90	0,93	0,96	0,98	1,00	1,04

(7) El coeficiente λ_4 se debe obtener a partir de la tabla A29.9.7.

Tabla A29.9.7 λ_4

$\Delta\sigma_1 / \Delta\sigma_{1+2}$	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
λ_4	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71

$\Delta\sigma_1$ es el rango de tensiones en la sección a comprobar debido al tren de cargas UIC71, definido en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril (IAPF) vigente, actuando en una vía

$\Delta\sigma_{1+2}$ es la carrera de tensiones en la sección a controlar, debida al tren de cargas UIC71 definido en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril (IAPF) vigente, actuando en dos vías cualesquiera

NOTA: La tabla A29.9.7 es válida únicamente si $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_{1+2}$ tienen el mismo signo.

(8) Los valores del parámetro λ_4 en la tabla A29.9.7 suponen que el 12% del tráfico total cruza el puente mientras hay tráfico en la otra vía. Si el porcentaje de tráfico que cruza el puente es diferente, λ_4 se debe tomar como sigue:

$$\lambda_4 = \sqrt[5]{n + [1-n][a^5 + (1-a)^5]} \qquad (9.14)$$

donde:

$a = \Delta\sigma_1 / \Delta\sigma_{1+2}$

n es el porcentaje de tráfico que cruza el puente.

(9) El valor de λ no debe superar el valor de λ_{max} dado por:

$$\lambda_{max} = 1{,}4 \qquad (9.15)$$

9.5.4 Combinación del daño debido a rangos de tensiones locales y globales

(1) Cuando se combinen los efectos de la flexión del puente (efectos globales) y los efectos de la flexión de sus elementos (efectos locales) en la comprobación de tensiones en un componente, los efectos combinados $\Delta\sigma_{E2}$ se calcularán como sigue:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda_{loc} \cdot \Phi_{loc} \cdot \Delta\sigma_{loc} + \lambda_{glo} \cdot \Phi_{glo} \cdot \Delta\sigma_{glo} \qquad (9.16)$$

donde el sufijo "loc" se refiere a los efectos locales y "glo" a los efectos globales.

9.6 Resistencia a fatiga

(1) Se debe emplear el Anejo 27 para la evaluación de la resistencia a fatiga de los puentes.

(2) Pueden emplearse las categorías de fatiga que se establecen en la tabla A29.9.8 para las zonas críticas de los tableros de acero.

Tabla A29.9.8 Categorías de detalles constructivos para las evaluaciones de fatiga

Zona crítica	Detalle	Detalle según Anejo 27	Categoría de detalle
1	Chapa de tablero con tensiones longitudinales en las soldaduras en ángulo transversales, véase la figura A29.9.1	tabla A27.8.4 detalle 8	71
2	Chapa de tablero con tensiones longitudinales en la unión soldada viga-chapa de tablero, véase la figura A29.9.1	tabla A27.8.2 detalle 6	100
		tabla A27.8.4 detalle 9	80
3	Rigidizador de sección hueca en la unión rigidizador-viga transversal, véase la figura A29.9.1	tabla A27.8.8 detalle 1	80
4	Empalme de rigidizadores con chapas de unión y placas de respaldo metálicas, véase la figura A29.9.2	tabla A27.8.8 detalle 4	71
5	Bordes libres de los agujeros de rebaje en las almas de las vigas transversales, véase la figura A29.9.4	tabla A27.8.8 detalle 6	112

9.7 Tratamiento posterior a la soldadura

(1) Cuando sea adecuado, se pueden utilizar técnicas para mejorar la soldadura, tales como el endurecimiento superficial por granallado o martillo de bola, el pulido del pie de soldadura o la refundición del pie de soldadura con soldadura TIG (electrodo permanente de tungsteno), con el objetivo de mejorar la vida en fatiga de las uniones.

10 Cálculo asistido por ensayos

10.1 Generalidades

(1) El cálculo asistido por ensayos debe ser conforme con el Anejo 18 del Código Estructural, complementando a las disposiciones adicionales que se establecen en los apartados 10.2 y 10.3.

10.2 Tipos de ensayos

(1) Los ensayos se pueden llevar a cabo para los siguientes fines:

a) determinar la resistencia última o las propiedades en servicio de las partes de la estructura, por ejemplo ensayos para desarrollar sistemas normalizados de puentes provisionales;

b) obtener propiedades específicas del material, por ejemplo ensayos geotécnicos in situ o en laboratorio, ensayo de nuevos materiales para recubrimiento;

c) reducir incertidumbres en los parámetros de los modelos de carga o de resistencia, por ejemplo ensayos en túnel de viento, ensayos de prototipos a escala real, ensayos de modelos a escala reducida;

d) comprobar la calidad de los productos suministrados o la consistencia de las características de producción, por ejemplo ensayos de cables o conectores;

e) tener en cuenta las condiciones reales experimentadas, como por ejemplo mediciones de frecuencias o amortiguamiento;

f) comprobar el comportamiento de la estructura real o elementos estructurales tras su finalización, por ejemplo el ensayo de prueba de carga en estado límite último o estado límite de servicio.

(2) Para los ensayos de tipo a), b) y c), los valores de cálculo se deben obtener a partir de los resultados del ensayo, si están disponibles cuando se realice el cálculo.

(3) Para los ensayos de tipo d), e) y f), o para situaciones en las cuales no se dispone de los resultados de los ensayos cuando se realiza el dimensionamiento, los valores de cálculo se deben tomar como aquellos para los cuales se supone que se va a cumplir el criterio de aceptación en una fase posterior.

10.3 Comprobación de los efectos aerodinámicos en puentes mediante ensayos

(1) Los ensayos deben emplearse para comprobar el proyecto de un puente bajo los efectos del viento cuando el cálculo o la utilización de resultados establecidos no proporcionen una garantía suficiente de seguridad estructural durante la fase de ejecución o la vida en servicio.

(2) Los ensayos deben utilizarse para determinar:

a) la acción global del viento en la localización del puente y en la estación local de registro de vientos;

b) los esfuerzos cuasi-estáticos de arrastre y elevación y los momentos torsores provocados sobre el puente o sus componentes como consecuencia del flujo de viento que los atraviesa;

c) la amplitud de oscilación del puente o de sus componentes debida al desprendimiento de vórtices desde ambos lados del puente o de sus componentes en el flujo de viento (respuesta de amplitud limitada);

d) la velocidad del viento que puede producir respuestas de amplitud divergente en el puente o sus componentes, debidas a fenómenos de galope, flameo torsional, flameo clásico, vibración inducida por lluvia y viento, divergencia no oscilatoria, etc.;

e) la respuesta del puente o sus elementos originada por la turbulencia del viento;

f) el amortiguamiento intrínseco de la estructura.

(3) Los apartados anteriores 10.3(2) a) hasta e) deben realizarse en un túnel de viento. Cuando un puente se somete a ensayos de túnel de viento, los modelos deben simular de forma precisa los detalles constructivos externos de la sección, incluyendo elementos no estructurales, tales como los pretiles. Además, se tiene que simular un intervalo representativo de frecuencias naturales y amortiguamiento, adecuado con los modos previstos de vibración del puente. También debe considerarse la influencia de la turbulencia y del efecto del viento inclinado respecto de la horizontal.

(4) Debe tenerse en cuenta cualquier cambio potencial en la sección (incluyendo formaciones de hielo o flujos de agua en un cable) durante los ensayos.

NOTA: El amortiguamiento estructural se puede determinar mediante excitación mecánica del puente (empleando maquinaria con movimiento alternativo, maquinaria rotativa desequilibrada, balancines o dispositivos similares). El valor del amortiguamiento requerido se puede determinar a partir de la energía necesaria para generar una amplitud de oscilación particular o de la caída de la oscilación cuando cesa la excitación.

Apéndice A Recomendaciones técnicas para los apoyos

Los apoyos quedan fuera del ámbito del Código Estructural, debiendo cumplir la reglamentación específica vigente. En el caso de que no exista esta reglamentación, deberá realizarse un estudio particular para su uso.

Apéndice B Recomendaciones técnicas para las juntas de dilatación en puentes de carretera

Las juntas de dilatación quedan fuera del ámbito del Código Estructural, debiendo cumplir la reglamentación específica vigente. En el caso de que no exista esta reglamentación, deberá realizarse un estudio particular para su uso.

Apéndice C Recomendaciones para los detalles constructivos de tableros de puentes de acero

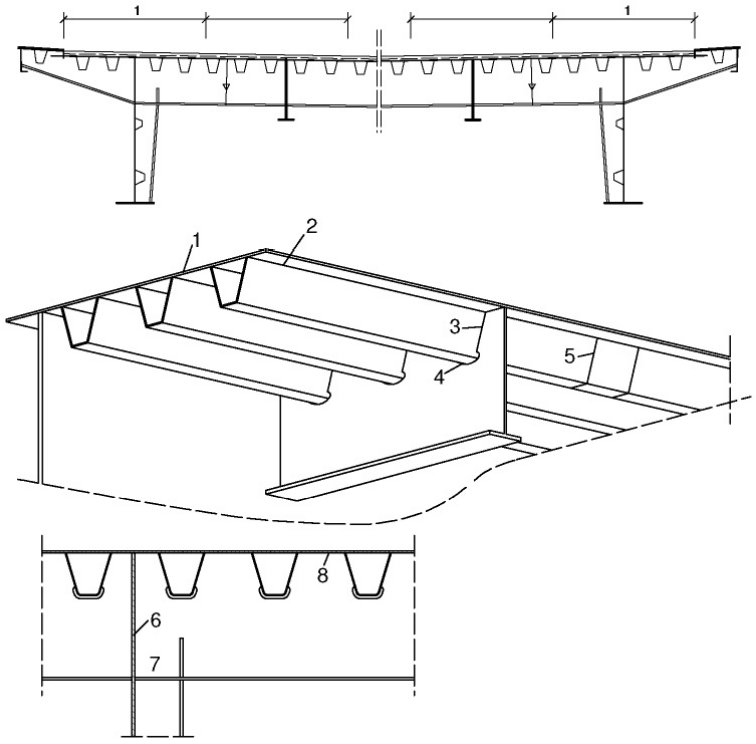
C.1 Puentes de autopista

C.1.1 Generalidades

(1) Este apéndice proporciona recomendaciones sobre los detalles estructurales y de ejecución de puentes de carretera para alcanzar un estándar de calidad mínimo, según las hipótesis del Anejo 27 del Código Estructural.

NOTA 2: Este apéndice solo se es de aplicación a los tipos de detalles constructivos descritos en las figuras siguientes.

(2) Las recomendaciones se basan en un proyecto normal, como muestra la figura A29.C.1 y tienen como objetivo tanto la durabilidad de la estructura de acero como la del acabado superficial. Se supone que la superficie de acabado cumple con los requisitos de adherencia, tratamiento superficial, preparación de las chapas e impermeabilización.



1 Carril para tráfico pesado

1 Chapa de tablero

2 Soldadura de unión del rigidizador a la chapa de tablero

3 Soldadura de unión del rigidizador al alma de la viga transversal

4 Corte en la chapa en el alma de la viga transversal

5 Empalme del rigidizador

6 Empalme de la viga transversal

7 Soldadura de unión de la viga transversal a la viga principal o al pórtico transversal

8 Soldadura de unión del alma de la viga transversal a la chapa de tablero

Figura A29.C.1 Ejemplos de detalles estructurales de tableros de acero de puentes de autopista

NOTA: El Apéndice C no es de aplicación a los tableros provistos de rigidizadores transversales.

(3) Las recomendaciones se basan en los carriles de la calzada por los que circula tráfico pesado y abarcan:

1. la chapa de tablero,
2. las uniones soldadas de los rigidizadores a la chapa de tablero,
3. las uniones soldadas de los rigidizadores al alma de la viga transversal,
4. el detalle del corte en la chapa en el alma de la viga transversal,

5. la continuidad de los rigidizadores,
6. la continuidad de las vigas transversales,
7. la unión entre las vigas transversales y las vigas principales.

(4) Las tablas C.3, C.4 y C.5 detallan los aspectos relativos a las tolerancias, métodos del ensayo de inspección y requisitos mínimos de los mismos (incluyendo sus valores de referencia).

C.1.2 Chapa de tablero

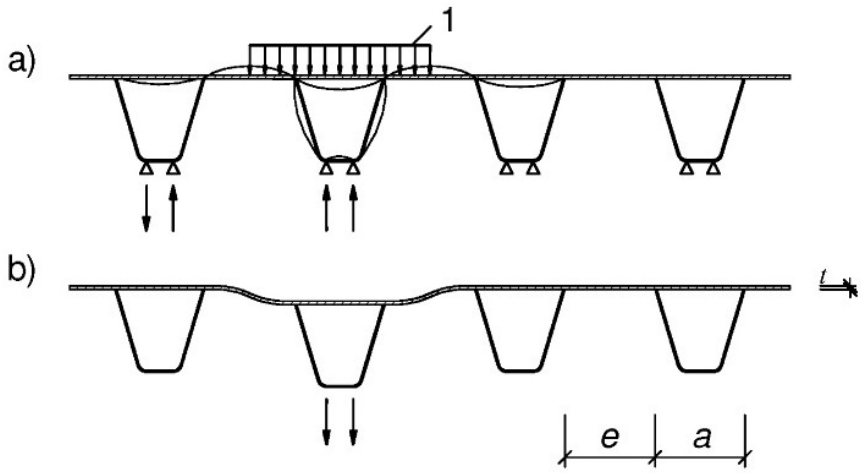
C.1.2.1 Generalidades

(1) Las acciones de fatiga se originan por la flexión de la chapa de tablero debida a las cargas de las ruedas y a la presión de los neumáticos, véase la figura A29.C.2.

(2) La figura A29.C.2 a) representa el perfil de flexión, suponiendo que los rigidizadores no descienden verticalmente. La figura A29.C.2 b) muestra el caso de descensos diferenciales de los rigidizadores.

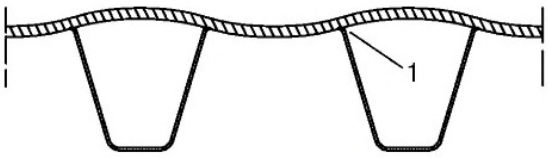
(3) La combinación de la chapa de tablero con el acabado superficial conduce a un incremento de la rigidez de la chapa debido a un cierto comportamiento mixto.

(4) Las fisuras de fatiga pueden aparecer en las soldaduras entre los rigidizadores y la chapa, véase la figura A29.C.3, así como en el acabado superficial.

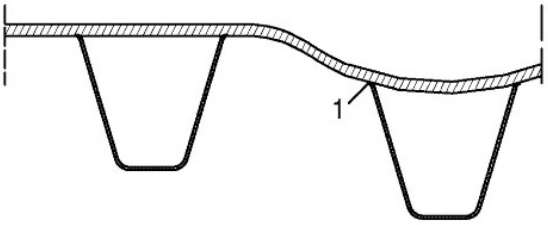


1 *carga de la rueda*

Figura A29.C.2 Efecto de a) cargas locales de las ruedas y b) flechas diferenciales de los rigidizadores



a) Inicio de la fisura comenzando en la raíz de la soldadura en el interior de los rigidizadores zadores



b) Inicio de la fisura comenzando en el pie de la soldadura en el exterior de los rigidizadores :adores

1 Inicio de la fisura *de la fisura*

Figura A29.C.3 Fisuras de fatiga en la chapa de tablero

(5) Las recomendaciones se refieren a lo siguiente:

1. el espesor mínimo de la chapa de tablero y la rigidez mínima de los rigidizadores,
2. los empalmes de la chapa de tablero,
3. las uniones entre la chapa de tablero y las almas de las vigas principales, almas de los rigidizadores de sección abierta y almas de las vigas transversales.

(6) Las disposiciones relativas a la unión entre la chapa de tablero y las almas de los rigidizadores se establecen en el apartado C.1.3.

(7) Se deben cumplir las tolerancias que se establecen en la tabla A29.C.3(1) con el fin de alcanzar las tolerancias de montaje de la chapa de tablero, como se especifica en la tabla A29.C.4.

C.1.2.2 Espesor de las chapas de tablero y rigidez mínima de los rigidizadores

(1) Se debe seleccionar el espesor de la chapa de tablero de acuerdo con la categoría de tráfico, los efectos del comportamiento mixto de la chapa de tablero con el acabado superficial y la separación de los apoyos de la chapa de tablero.

Se utilizarán las siguientes dimensiones:

1) Espesor de la losa ortótropa del tablero en el carril de vehículos pesados de la calzada:

$t \geq 14\ mm$ para una capa de asfalto $\geq 70\ mm$,

$t \geq 16\ mm$ para una capa de asfalto $\geq 40\ mm$.

2) Separación de las almas de los rigidizadores de la losa ortótropa del tablero, en la zona con sobrecargas de tráfico:

$e/t \leq 25$ donde $e \leq 300\ mm$.

3) Espesor de la losa ortótropa del tablero para pasarelas (con cargas para vehículos de mantenimiento):

$t \geq 10\ mm$ y $e/t \leq 40$,

$e \leq 600\ mm$.

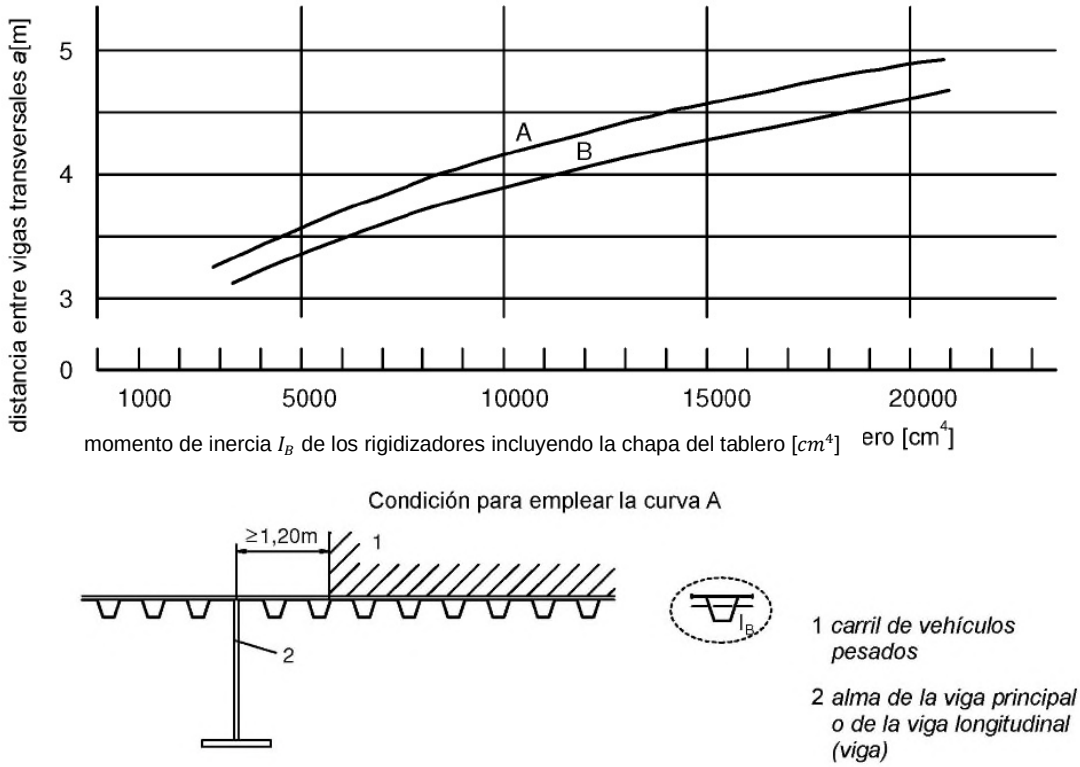
4) Espesor del rigidizador:

$t_{stiff} \geq 6\ mm.$

Si se cumplen estos valores, no será necesario comprobar los momentos flectores en la chapa de tablero.

(2) La rigidez mínima de los rigidizadores debe seleccionarse de acuerdo con la categoría de tráfico, así como en función de la posición del apoyo rígido proporcionado por las almas de las vigas principales o longitudinales, en relación con el carril que soporta el tráfico pesado. De esta forma, se evita la fisuración del acabado superficial por flechas diferenciales.

Los valores de rigidez mínima a utilizar se pueden obtener de la figura A29.C.4.



NOTA a) La curva A es de aplicación a todos los rigidizadores que no se recogen en b)

b) La curva B es de aplicación a los rigidizadores situados bajo el carril más cargado, dentro de una distancia de 1,20 m desde el alma de la viga principal

c) La figura es de aplicación a todo tipo de rigidizadores

C.1.2.3 Soldaduras de la chapa de tablero

(1) Las soldaduras transversales (es decir, las soldaduras que cruzan los carriles de circulación) deben ser soldaduras dobles en V o soldaduras simples en V con pasada de raíz o pasada exterior, o bien soldaduras sencillas en V con placas de respaldo cerámicas. Las soldaduras con placas de respaldo metálicas, véase la figura A29.C.6, no se recomiendan, por la discontinuidad en el cruce con los rigidizadores.

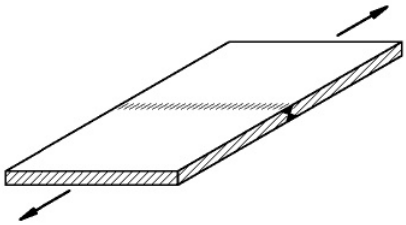


Figura A29.C.5 Soldaduras de la chapa de tablero transversales al carril de circulación sin placa de respaldo metálica

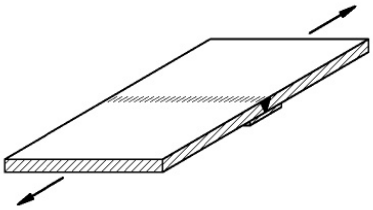
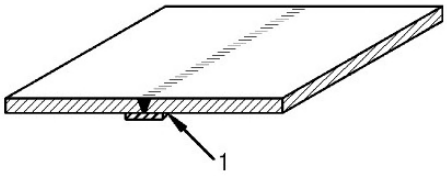


Figura A29.C.6 Soldaduras de la chapa de tablero transversales al carril de circulación con placa de respaldo cerámica

(2) Para tolerancias e inspecciones de soldaduras de la chapa de tablero sin placas de respaldo, véase la tabla A29.C.4 (1).

(3) Las soldaduras longitudinales (soldaduras a lo largo del carril de circulación) se deben dimensionar como soldaduras transversales.



1 Sin soldadura de sellado

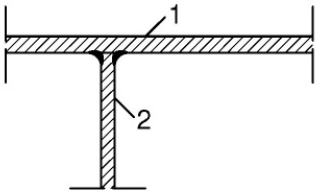
Figura A29.C.7 Soldaduras de la chapa de tablero en la dirección del carril de circulación con placa de respaldo metálica

(4) Las soldaduras en V con placas de respaldo metálicas se pueden utilizar en soldaduras longitudinales con los siguientes requisitos:

1. ejecución de acuerdo con la figura A29.C.7
2. tolerancias e inspecciones establecidas en la tabla A29.C.4 (2).

C.1.2.4 Unión entre la chapa de tablero y las almas de las vigas principales, almas de los rigidizadores de sección abierta y almas de las vigas transversales

(1) Las soldaduras que unen la chapa de tablero con las almas se deben dimensionar como soldaduras en ángulo, de acuerdo con la figura A29.C.8.



1 chapa del tablero
2 alma de la viga principal

Figura A29.C.8 Unión entre la chapa de tablero y el alma de la viga principal

(2) Para la unión de rigidizadores de sección hueca con la chapa de tablero, véase el apartado C.1.3.

C.1.3 Rigidizadores

C.1.3.1 Acciones de fatiga

(1) Las acciones de fatiga se producen por:

1. flexión en las almas por efecto de las deformaciones de la chapa de tablero, debido a uniones soldadas rígidas entre el rigidizador y la chapa de tablero;
2. tensiones tangenciales en las soldaduras entre los rigidizadores y la chapa de tablero, producido por esfuerzos cortantes en los rigidizadores;
3. tensiones normales longitudinales en los rigidizadores, debidas a momentos flectores y esfuerzos axiles en los rigidizadores;
4. flexión local en la unión entre rigidizadores y vigas transversales, en el alma de los rigidizadores y en las almas de las vigas transversales.

C.1.3.2 Tipo de rigidizadores

(1) Los rigidizadores pueden ser de sección cerrada, tales como trapezoidales, en forma de V, redondeados, o de sección abierta.

(2) Para rigidizadores de sección cerrada, véase la tabla A29.C.3(2).

(3) Para rigidizadores de sección abierta bajo carriles de circulación de tráfico, véase la tabla A29.C.3(3).

(4) En el caso de un cambio en el espesor de la chapa de los rigidizadores, la falta de alineación entre las superficies de las chapas no debe superar el valor de $2\ mm$.

C.1.3.3 Unión del rigidizador a la chapa de tablero

(1) Para los rigidizadores de sección cerrada bajo la calzada, la soldadura entre el rigidizador y la chapa de tablero debe ser una soldadura a tope.

(2) El espesor de garganta de la soldadura "a" no debe ser inferior al espesor del rigidizador "t", véase la tabla A29.C.4(3) y (4).

(3) Para uniones del rigidizador a la chapa de tablero fuera de la calzada, véase la tabla A29.C.4(5).

(4) Para las tolerancias y los controles, véase la tabla A29.C.4(3), (4) y (5).

C.1.3.4 Unión de un rigidizador a otro rigidizador

(1) En la unión de un rigidizador con otro rigidizador, se deben disponer chapas de empalme, de acuerdo con la tabla A29.C.4(6).

(2) El empalme debe localizarse cercano al punto de inflexión del rigidizador (a una distancia de $0{,}2l$ de la viga transversal, siendo l la luz del rigidizador).

(3) La secuencia de soldadura debe ser tal que las tensiones residuales sean pequeñas y que el ala inferior del rigidizador reciba compresiones residuales. La secuencia de soldadura que se especifica en la tabla A29.C.4(6) es la siguiente:

1. Primera soldadura entre el rigidizador y la chapa de empalme.
2. Segunda soldadura entre el rigidizador y la chapa de empalme; según [1] y [2] dados en la tabla A29.C.4(6), se deberá soldar primero el ala inferior y después el alma.
3. Por último la soldadura de la chapa de tablero.

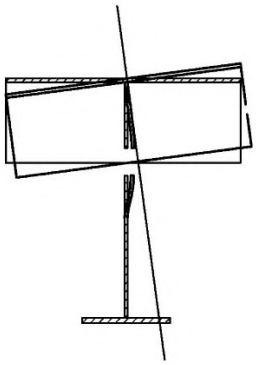
(4) Para las soldaduras a tope entre el rigidizador y la chapa de empalme, son de aplicación las tolerancias e inspecciones que se establecen en la tabla A29.C.4(7).

C.1.3.5 Unión de los rigidizadores al alma de la viga transversal

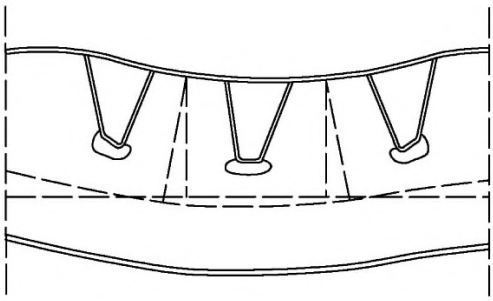
C.1.3.5.1 Generalidades

(1) Las acciones de fatiga en la unión de los rigidizadores al alma de la viga transversal proceden de las siguientes causas, véase la figura A29.C.9:

1. Los esfuerzos cortantes, momentos torsores y tensiones debidas a las deformaciones de distorsión de los rigidizadores, producen tensiones en las soldaduras en ángulo entre los rigidizadores y el alma de la viga transversal.
2. Los giros de los rigidizadores debidos a su flexión producen tensiones de flexión en el alma. El efecto Poisson provoca deformaciones transversales de los rigidizadores, restringidas por el alma de la viga transversal.
3. Las tensiones y deformaciones en el plano del alma de la viga transversal pueden producir concentración de tensiones en los bordes de las groeras y deformaciones en los rigidizadores.



giro del rigidizador en su conexión al alma de la viga transversal, véase el caso 2 del punto (1) del apartado C.1.3.5.1



deformaciones impuestas al rigidizador por la distribución de deformación en el alma de la viga transversal, véase el caso 3 del punto (1) del apartado C.1.3.5.1

Figura A29.C.9 Unión de los rigidizadores al alma de la viga transversal

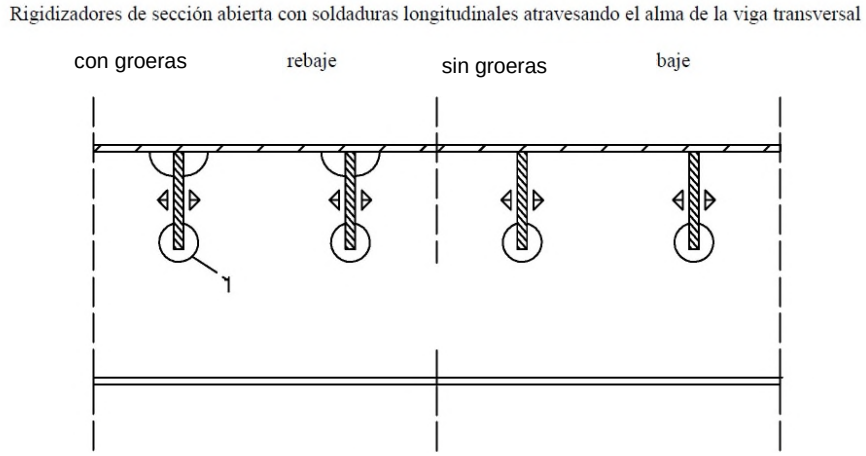
(2) La magnitud de estos efectos dependen de si:

- los rigidizadores pasan a través del alma y las formas del corte en la chapa y de la groera;
- los rigidizadores no pasan a través de las almas de las vigas transversales, de la forma de los rigidizadores y su ajuste.

(3) Los rigidizadores se deben disponer preferiblemente pasantes a través de las almas de la viga transversal.

(4) Cuando no sea posible pasar los rigidizadores a través de las almas, por ejemplo en el caso de puentes con cantos de las vigas transversales extremadamente pequeños o pequeñas distancias entre las vigas transversales, los rigidizadores deben ajustarse entre las almas, de acuerdo con el apartado C.1.3.5.3.

(5) Para rigidizadores planos, véase la figura A29.C.10, las acciones de fatiga (véase el apartado C.1.3.5.1(1)) son similares a las de los rigidizadores de sección cerrada; sin embargo, los efectos del apartado C.1.3.5.1(1) 3 son de menor importancia.



1 Groera en la parte inferior del rigidizador plano para evitar la fusión de las aristas vivas

Figura A29.C.10 Uniones de los rigidizadores planos con las almas de vigas transversales

C.1.3.5.2 Cortes en la chapa en las almas de las vigas transversales

(1) Para rigidizadores de sección cerrada, los cortes en la chapa deben realizarse con o sin groeras, como se indica a continuación, véase la figura A29.C.11:

1 con groeras alrededor de la parte inferior del rigidizador con soldadura parcial del rigidizador con el alma, véase la igura A29.C.11 a);

2 sin groeras con soldadura alrededor de todo el perímetro de soldadura, véase la figura A29.C.11 b).

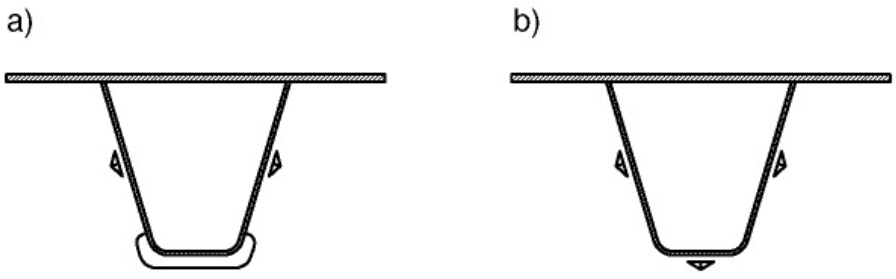
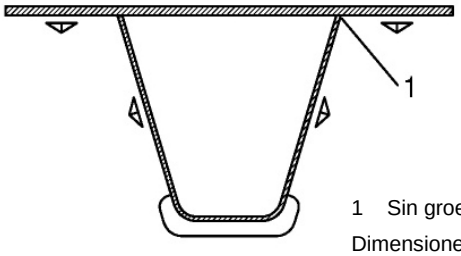


Figura A29.C.11 Cortes en la chapa en las almas de vigas transversales con o sin groeras

(2) Se deben evitar las groeras en el alma de la viga transversal en las uniones entre el rigidizador y la chapa de tablero, véase la figura A29.C.12.



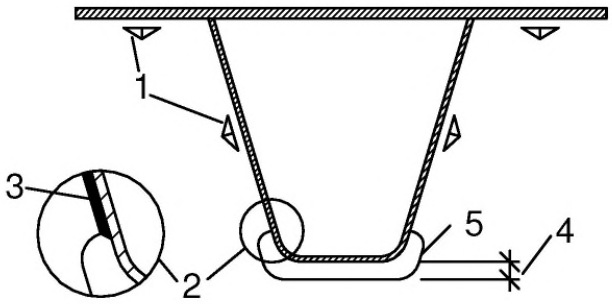
1 Sin groera

Dimensiones de acuerdo con la Tabla C.4 (3), (4) y (5)

Figura A29.C.12 Uniones soldadas de los rigidizadores de sección cerrada con el alma de la viga transversal con groeras

(3) La forma de los cortes en la chapa en el alma de la viga transversal, véase la figura A29.C.13, debe ser tal que:

1. Las soldaduras entre los rigidizadores y el alma tengan una resistencia adecuada y los retornos no presenten muescas ni poros, véase la figura A29.C.13 a).
2. Las dimensiones del corte en la chapa permitan:
   - adaptarse a las tolerancias del perfil del rigidizador y
   - la preparación de la superficie, la aplicación y la inspección de la protección contra la corrosión, véase la figura A29.C.13 b).
3. El rango de tensiones $\Delta\sigma$ en el borde de los cortes en la chapa debido a la flexión del alma en su plano y fuera del plano se encuentra dentro de unos límites admisibles, véase la figura A29.C.13 c).



1 Soldaduras en ángulo

2 Detalle a)

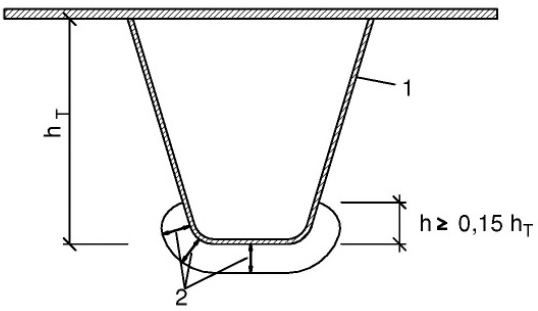
3 Soldadura alrededor del borde sin muescas ni poros, con amolado cuando sea necesario

4 Detalle b)

5 Detalle c)

Figura A29.C.13 Detalles críticos para la forma de las groeras

(4) El tamaño mínimo del corte en la chapa deberá ser conforme con la norma UNE-EN ISO 12944-3 y con la figura A29.C.14.



1 *espesor de la chapa del alma de la viga transversal* $t_{w,crossb}$

2 *valor constante de la holgura* $b \geq 2t_{w,crossb} \geq 25\ mm$

Figura A29.C.14 Dimensiones mínimas de las groeras

(5) Los requisitos para las tolerancias y la inspección se indican en la tabla A29.C.4(9).

(6) Para la unión de los rigidizadores a la viga transversal final, véase el apartado C.1.3.5.3.

(7) Los requisitos para las uniones de los rigidizadores sin groeras se establecen en la tabla A29.C.4(8).

C.1.3.5.3 Rigidizadores ajustados entre vigas transversales

(1) Los rigidizadores únicamente se pueden ajustar entre las vigas transversales cuando se cumplan las siguientes condiciones:

1. el puente se proyecte únicamente para tráfico ligero, o los rigidizadores no se localicen directamente bajo el tráfico;
2. la separación entre las vigas transversales sea $\leq 2{,}75\ m$;
3. el tipo de acero de las almas de la viga transversal es conforme con los requisitos de calidad Z que se establece en el Anejo 28 del Código Estructural;
4. las secuencias de montaje y soldadura son tales que se puedan despreciar los efectos de la retracción.

(2) La unión de los bordes de los rigidizadores al alma debe realizarse con soldaduras a tope, con una preparación de las soldaduras conformes con los requisitos que se establecen en la tabla A29.C.4(10).

C.1.3.5.4 Rigidizadores compuestos por chapas planas

(1) Las chapas planas que atraviesan las almas de las vigas transversales deberán tener soldaduras en ángulo continuas en la chapa de tablero y deberán soldarse al alma de las vigas transversales a ambos lados, véase la figura A29.C.10.

(2) Se deberá dejar un hueco de un ancho máximo de $1\ mm$ para reducir la retracción.

(3) Los requisitos sobre los detalles constructivos y la inspección deben tomarse de la tabla A29.C.4(11).

C.1.4 Vigas transversales

C.1.4.1 Generalidades

(1) En las vigas transversales se debe contemplar lo siguiente:

1. unión del alma a los rigidizadores;
2. unión del alma a la chapa de tablero;
3. unión del alma de la viga transversal al alma de la viga principal;
4. unión del alma al ala inferior de la viga transversal;
5. unión del ala inferior de la viga transversal al alma de la viga principal, o al ala inferior, cuando ambas alas están al mismo nivel;
6. unión de las vigas transversales a los rigidizadores transversales, pórticos o diafragmas situados en el mismo plano que las vigas transversales.

(2) Se debe acotar el radio de cualquier esquina de los bordes libres de los cortes en la chapa o de las groeras.

(3) Se tienen que cumplir los requisitos de detalle que se establecen en los apartados C.1.4.2, C.1.4.3 y C.1.4.4.

C.1.4.2 Uniones del alma de la viga transversal

(1) Los detalles constructivos y la inspección de las uniones soldadas de las almas de las vigas transversales a la chapa de tablero o al alma de la viga principal deben realizarse de acuerdo con la tabla A29.C.4(12) y la tabla A29.C.4(13), respectivamente.

(2) Los empalmes de las almas en las vigas transversales deben soldarse, de acuerdo con la tabla A29.C.4(14).

C.1.4.3 Uniones del ala de las vigas transversales

(1) La unión del ala inferior de la viga transversal al alma de la viga principal se debe realizar mediante soldadura a tope, de acuerdo con la tabla A29.C.4(15).

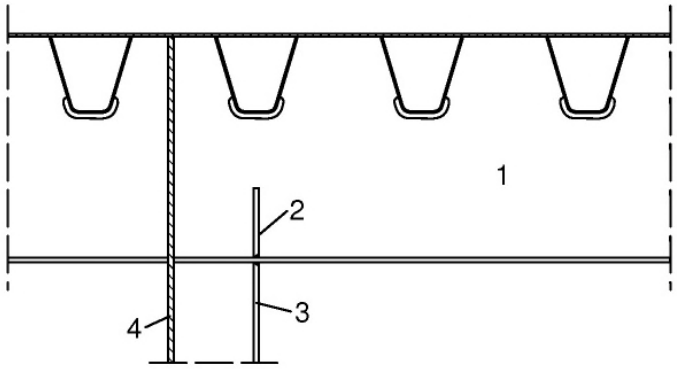
(2) Cuando las alas inferiores de las vigas transversales y de las vigas principales se encuentren en el mismo plano, las uniones serán conformes con la tabla A29.C.4(16).

(3) Las uniones soldadas entre alas de vigas transversales deben ser conformes con la tabla A29.C.4(14).

C.1.4.4 Rigidizadores transversales, pórticos o diafragmas

(1) Con el fin de reducir la concentración de tensiones en las uniones entre vigas transversales, rigidizadores transversales y diafragmas, debe disponerse una rigidización local en todas las uniones y juntas.

(2) Se deben detallar las uniones de los elementos de los pórticos y las vigas transversales, de acuerdo con la figura A29.C.15. Los detalles se deben comprobar a fatiga.



1 *viga transversal*
2 *rigidizador*
3 *rigidizador transversal del alma de la viga principal*
4 *alma de la viga principal*

Figura A29.C.15 Unión tipo de vigas transversales a rigidizadores transversales del alma de las vigas principales

C.2 Puentes de ferrocarril

C.2.1 Generalidades

(1) El Apartado C.2 proporciona recomendaciones para el proyecto y los detalles estructurales de tableros ortótropos de puentes de ferrocarril. Contempla las disposiciones de ejecución en conformidad con las normas de calidad expuestas en el Anejo 27 del Código Estructural.

(2) Los tableros de puentes de ferrocarril pueden estar compuestos por:

1. rigidizadores longitudinales y vigas transversales;
2. rigidizadores transversales únicamente.

(3) Para tableros con rigidizadores longitudinales, deben emplearse rigidizadores planos de sección abierta o rigidizadores trapezoidales de sección cerrada.

(4) En los tableros de puente con rigidizadores longitudinales de sección cerrada las vigas transversales deben proyectarse con alas inferiores. En los tableros con rigidizadores longitudinales planos, las vigas transversales se pueden proyectar sin alas inferiores. Para tableros con rigidizadores transversales únicamente, se pueden emplear los rigidizadores planos sin alas inferiores.

C.2.2 Espesor y dimensiones de la chapa

(1) En tableros con rigidizadores longitudinales y vigas transversales, son de aplicación las dimensiones de la tabla A29.C.1, véase la figura A29.C.16.

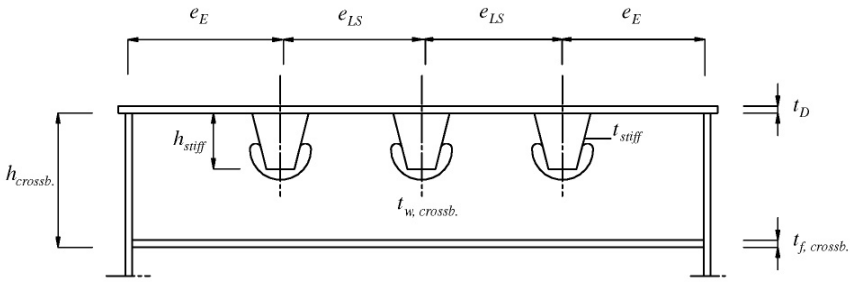


Figura A29.C.16 Detalles tipo de una viga transversal

Tabla A29.C.1 Dimensiones de un tablero con rigidizadores longitudinales

Dimensiones	Rigidizadores de sección abierta	Rigidizadores de sección hueca
espesor de la chapa de tablero t_D	$t_D \geq 14\ mm$	$t_D \geq 14\ mm$
separación entre rigidizadores e_{LS}	$e_{LS} \sim 400\ mm$	$600\ mm \leq e_{LS} \leq 900\ mm$
distancia al borde del primer rigidizador e_E	$e_E \geq e_{LS}$	$e_E \geq e_{LS}$
separación de las vigas transversales e_{crossb}	$e_{crossb} \leq 2700\ mm$	$2500\ mm \leq e_{crossb} \leq 3500\ mm$
relación entre el canto del rigidizador y el canto de la viga transversal h_{stiff}/h_{crossb}	$h_{stiff}/h_{crossb} \leq 0{,}5$	$h_{stiff}/h_{crossb} \leq 0{,}4$
espesor de la chapa del rigidizador t_{stiff}	$t_{stiff} \geq 10\ mm$	$6mm \leq t_{stiff} \leq 10\ mm$
espesor de la chapa del alma de la viga transversal $t_{w,crossb}$	$t_{w,crossb} \geq 10\ mm$	$10mm \leq t_{w,crossb} \leq 20\ mm$
Espesor de la chapa del ala de la viga transversal $t_{f,crossb}$	$t_{f,crossb} \geq 10\ mm$	$t_{f,crossb} \geq 10\ mm$

(2) En tableros de puentes con rigidizadores transversales únicamente, son de aplicación las dimensiones de la tabla A29.C.2.

Tabla A29.C.2 Dimensiones de un tablero con rigidizadores transversales únicamente

espesor de la chapa de tablero t_D	$t_D \geq 14\ mm$
espaciamiento de las vigas transversales e_{crossb}	$e_{crossb} \sim 700\ mm$
distancia al borde de las vigas transversales e_E	$e_E \geq 400\ mm$
espesor de la chapa del alma de la viga transversal $t_{w,crossb}$	$t_{w,crossb} \geq 10\ mm$
espesor de la chapa del ala de la viga transversal $t_{f,crossb}$	(donde se dispongan alas) $t_{f,crossb} \geq 10\ mm$

C.2.3 Unión del rigidizador a la viga transversal

(1) Los rigidizadores longitudinales normalmente deben ser pasantes a través de las almas de las vigas transversales.

(2) Las uniones de los rigidizadores de sección abierta a las almas de las vigas transversales deben detallarse como se muestra en la figura A29.C.17.

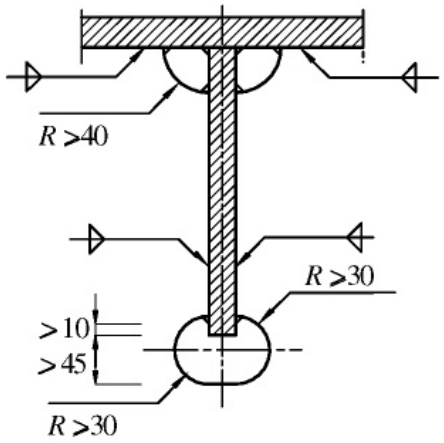
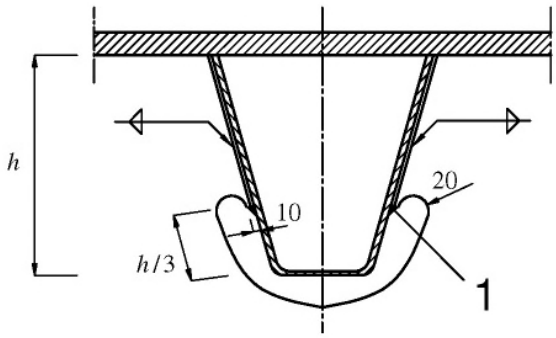


Figura A29.C.17 Unión entre el rigidizador plano y el alma de la viga transversal

(3) La unión de los rigidizadores de sección hueca a las almas de las vigas transversales debe detallarse como se muestra en la figura A29.C.18.



1 Soldadura alrededor del borde sin muescas ni poros, con amolado cuando sea necesario

Figura A29.C.18 Unión entre el rigidizador de perfil cerrado y el alma de la viga transversal

C.2.4 Inspección y tolerancias en la preparación de la soldadura

C.2.4.1 Generalidades

(1) A menos que se especifique otra cosa, deben emplearse las tablas C.3 y C.4 para los detalles estructurales, la preparación de la soldadura, las tolerancias y las inspecciones del puente.

C.2.4.2 Uniones del rigidizador a la chapa de tablero

C.2.4.2.1 Preparación de la soldadura de los rigidizadores

(1) En las uniones del rigidizador a la chapa de tablero, los bordes de las chapas conformadas (véase la tabla A29.C.4(3) y (4)) serán achaflanados, véase la figura A29.C.19.

(2) Para una chapa con un espesor $t < 8\,mm$, se puede prescindir del chaflán si se puede comprobar (por medio de ensayos de la soldadura) que se cumplen los requisitos para las soldaduras a tope que se establecen en el apartado C.2.4.2.2.

C.2.4.2.2 Requisitos para soldaduras a tope

(1) Los requisitos para las soldaduras a tope son los que se indican a continuación:

- espesor de garganta $a \geq 0{,}9t_{stiff}$, véase la tabla A29.C.4(7);
- espacio no soldado en la raíz $\leq 0{,}25t$ o $\leq 2\,mm$, el que sea menor;

donde:

a es el tamaño de la soldadura

t es el espesor de la chapa

t_{stiff} es el espesor del rigidizador.

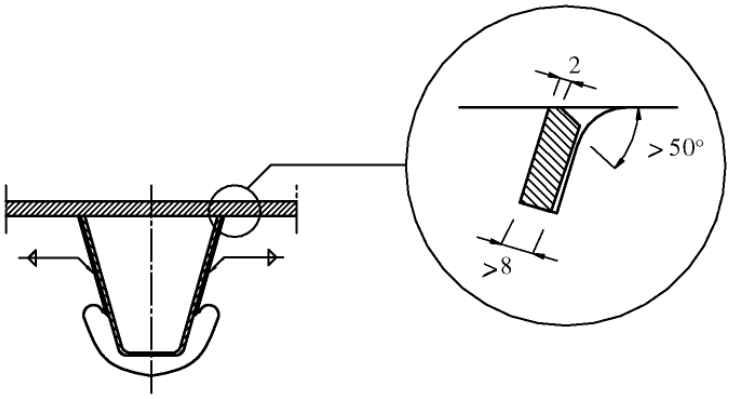


Figura A29.C.19 Preparación de la soldadura de la unión rigidizador-chapa de tablero

C.3 Tolerancias para los productos semi-acabados y la fabricación

C.3.1 Tolerancias para los productos semi-acabados

(1) Independientemente de los métodos de fabricación empleados en la chapa de tablero o en el conformado de los rigidizadores, deben cumplirse las tolerancias de fabricación que se especifican en la tabla A29.C.4.

(2) La tabla A29.C.3 proporciona indicaciones sobre la recepción. No son, sin embargo, imprescindibles si puede justificarse el cumplimiento de los requisitos de la tabla A29.C.4 por otros medios.

C.3.2 Tolerancias para la fabricación

(1) Las tolerancias de la tabla A29.C.4 son de aplicación para el proyecto, fabricación y ejecución de los tableros de puentes.

(2) En la tabla A29.C.4, se utilizan las siguientes abreviaturas:

- Requisito 1: Resultados de ensayos externos de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 5817;
- Requisito 2: Resultados de ensayos internos de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 5817;
- Requisito 3: Véase el apartado C.3.3;
- Requisito 4: Aceros conformes con la norma UNE-EN 10164, como se especifica en el Anejo 28 del Código Estructural.

C.3.3 Requisitos particulares para las uniones soldadas

(1) Cuando se requiera en la tabla A29.C.4, se deben aplicar las condiciones especificadas en la tabla A29.C.5, además de las de la norma UNE-EN ISO 5817.

Tabla A29.C.3 Tolerancias para los productos semi-acabados

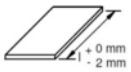
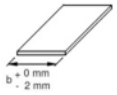
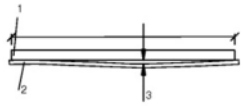
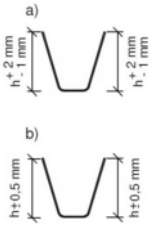
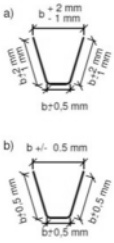
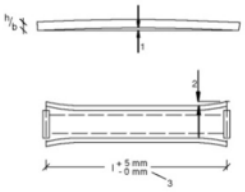
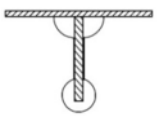
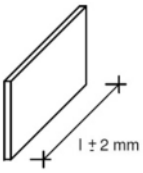
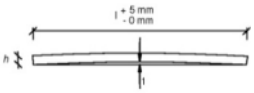
Producto	Espesor	Longitud/ canto	Ancho	Rectitud	Observaciones
1) Chapa de tablero después de ser cortada y rectificada por laminación	UNE-EN 10029, Clase C			 1. longitud medida $2000\ mm$ 2. chapa 3. hueco máximo de ajuste$2{,}0\ mm$	Longitudes y anchos incluyendo medidas previstas para la retracción y después de la realización de la preparación para la soldadura final.
2) Perfil conformado a) pasante a través de las vigas transversales con groeras  b) pasante a través de las vigas transversales sin groeras 	UNE-EN 10029, Clase C			a) y b)  1. holgura máxima $L/1000$ 2. sobreancho máx. $+1\ mm$ 3. unión de rigidizadores con chapas de empalme radio $r = r \pm 2\ mm$ giro 1° sobre una longitud de $4\ m$ paralelismo $2\ mm$	Espesor de la chapa $t \geq 6\ mm$ Para el conformado en frío, emplear únicamente materiales adecuados para esta técnica. $R/t \geq 4$ para asegurar la calidad de las soldaduras en la zona conformada en frío. Inspeccionar visualmente los extremos de los perfiles para buscar fisuras y mediante líquidos penetrantes en caso de duda. ad b) Si se superan las tolerancias, adaptar los cortes en la chapa de las vigas transversales para cumplir con el ancho máximo de hueco.
3) Perfil plano soldado por ambos lados 	UNE-EN 10029, Clase C			 1. holgura máxima $L/1000$	Espesor de la chapa $t \geq 10\ mm$ Elegir la calidad Z conforme con la norma UNE-EN 10164 según el Anejo 28.

Tabla A29.C.4 Fabricación

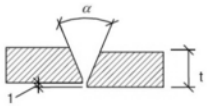
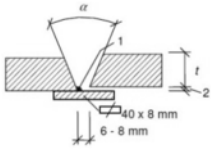
Detalle estructural	Nivel de tensión σ_{Ed}	Método de ensayo y cantidad de ensayos	Resultados de ensayos requeridos	Observaciones
1) Empalmes de la chapa de tablero sin placa de respaldo  1 Falta de alineación $\leq 2\ mm$	tensiones de tracción $\sigma_{Ed} \leq 0{,}90 f_{yk}$ y $\sigma_{Ed} > 0{,}75 f_{yk}$	1a. Inspección de la preparación de bordes de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual en el 100% después de la soldadura 2. Ensayos en el 100% por ultrasonidos o radiografía	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, falta de alineación máxima $\leq 2\ mm$ ad 1b. Requisitos 1 y 3 ad 2. Requisitos 2 y 3	Requisitos de los ensayos, véase C.3.3
	tensiones de tracción $\sigma_{Ed} \leq 0{,}75 f_{yk}$ y $\sigma_{Ed} > 0{,}60 f_{yk}$	1a. Inspección de la preparación de bordes de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual en el 100% después de la soldadura 2. Ensayos en el 100% por ultrasonidos o radiografía	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, falta de alineación máxima $\leq 2\ mm$ ad 1b. Requisitos 1 y 3 ad 2. Requisitos 2 y 3	Requisitos de los ensayos, véase C.3.3
	tensiones de tracción $\sigma_{Ed} \leq 0{,}60 f_{yk}$ o tensiones de compresión	1a. Inspección de la preparación de bordes de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual en el 100% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, falta de alineación máxima $\leq 2\ mm$ ad 1b. Requisitos 1 y 3	Requisitos de los ensayos, véase C.3.3
2) Empalmes de la chapa de tablero con placa de respaldo  1 Soldadura por puntos 2 Falta de alineación $\leq 2\ mm$ Preparación de la soldadura y ángulo de preparación de la soldadura α dependiente del procedimiento de soldadura. Empalme de placas de respaldo metálicas realizadas por soldaduras a tope con chaflán y pasada de raíz. Finalización de todos los trabajos de empalmes antes de la soldadura por puntos de la chapa de tablero. Sin soldaduras de sellado.	tensiones de tracción $\sigma_{Ed} \leq 0{,}90 f_{yk}$ y $\sigma_{Ed} > 0{,}75 f_{yk}$	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura; la fusión de soldaduras por puntos por medio de los posteriores cordones de soldadura se debe comprobar mediante ensayos 1b. Inspección visual en el 100% después de la soldadura 2. Ensayos en el 100% por radiografía	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, soldaduras por puntos de placas de respaldo: Requisito 1: falta de alineación ≤2mm ad 1b. Requisito 1: Huecos de ajuste entre la chapa y la placa de respaldo ≤1mm ad 2. Requisitos 2 y 3	ad 1a. Soldadura por puntos en la soldadura a tope final, las soldaduras por puntos que presenten fisuras deben eliminarse
	tensiones de tracción $\sigma_{Ed} \leq 0{,}75 f_{yk}$ y $\sigma_{Ed} > 0{,}60 f_{yk}$	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual ≥ 50% después de la soldadura 2. Ensayos en el 10% por radiografía	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, soldaduras por puntos de placas de respaldo: Requisito 1; falta de alineación $\leq 2\ mm$ ad 1b. Requisitos 1 y 3 ad 2 Requisitos 2 y 3	ad 1a. Soldadura por puntos en la soldadura a tope final, las soldaduras por puntos que presenten fisuras deben eliminarse
	tensiones de tracción $\sigma_{Ed} \leq 0{,}60 f_{yk}$ o tensiones de compresión	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual en el 100% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, falta de alineación máxima $\leq 2\ mm$ ad 1b. Requisitos 1 y 3	

Tabla A29.C.4 (Cont.) Fabricación

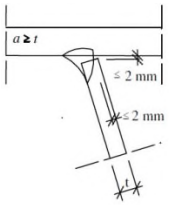
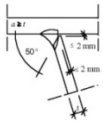
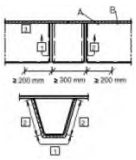
Detalle estructural	Nivel de tensión σ_{Ed}	Método de ensayo y cantidad de ensayos	Resultados de ensayos requeridos	Observaciones
3) Unión rigidizador-chapa de tablero (proceso de soldadura totalmente mecanizado)  	Independiente del nivel de tensiones en la chapa de tablero	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura 2. Antes de la fabricación: Ensayos previos según la norma UNE-EN ISO 15614-1 para cuantificación del procedimiento de soldadura, o cuando esté disponible, conformes con la norma UNE-EN ISO 15613, por cada cabezal de soldadura. 3. Durante la fabricación 1 ensayo de producción por cada 120 m de puente, con un mínimo de 1 ensayo de producción, por cabeza de soldadura y con ensayos a escala macroscópica	ad 1.Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura ad 1b Requisito 1 ad 2.Cumplir con el ratio de fusión Requisito 2 mediante la preparación de ensayos a escala macroscópica (1 vez al arranque o parada y otra en la mitad de la soldadura) ad 3. Véase ad 2: Pero con los ensayos a escala macros-cópica únicamente a partir de la mitad de la soldadura del ensayo de soldadura	Deben eliminarse los comienzos y las paradas ad 2 Procedimientos de ensayos de soldadura bajo la supervisión por un organismo reconocido, comprobando los parámetros de soldadura durante la fabricación ad 3. Ejecución, evaluación y documentación por el control de producción del fabricante, supervisión por el control de producción del fabricante.
4) Unión rigidizador-chapa de tablero (procedimiento de soldadura manual y parcialmente mecanizado), ángulo de la preparación de la soldadura $\boldsymbol{\alpha}$ dependiente del proceso de soldadura y la accesibilidad  	Independiente del nivel de tensiones en la chapa de tablero	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura ad 1b. Requisito 1	Deben eliminarse los arranques y las paradas Este requisito también es de aplicación a soldaduras locales, por ejemplo en uniones rigidizador-rigidizador con chapas de empalme, véase 16).
5) Unión rigidizador-chapa de tablero fuera de la calzada (bordillos)  Espesor de garganta de las soldaduras en ángulo requerido por el cálculo	Carga peatonal sin carga de vehículos, con la excepción de vehículos ocasionales	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual en ≥ 25% después de la soldadura 2. Medida del espesor de garganta	ad 1a.Cumplir la tolerancia de la holgura para la soldadura ad 1b. Requisito 1 ad 2.Cumplir con el requisito para el espesor de garganta y requisito 1	Deben eliminarse los arranques y las paradas
6) Unión rigidizador-rigidizador con chapas de empalme  A Soldadura en obra B Soldadura en taller	Independiente del nivel de tensiones	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1.Cumplir con la tolerancia de la holgura para la soldadura, falta de alineación entre el rigidizador y la chapa de unión $\leq 2\ mm$ ad 1b. Requisitos 1 y 3	La longitud no soldada en obra de la junta entre los rigidizadores y la chapa de tablero puede realizarse en un lado de la chapa únicamente. ad 1a Para las holguras de la raíz véase el detalle 7), para las soldaduras en obra véanse los detalles 3), 4) y 5)

Tabla A29.C.4 (Cont.) Fabricación

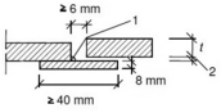
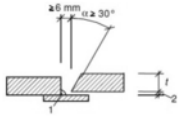
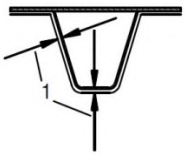
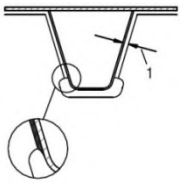
Detalle estructural	Nivel de tensión σ_{Ed}	Método de ensayo y cantidad de ensayos	Resultados de ensayo requeridos	Observaciones
7) Unión rigidizador-rigidizador con chapas de empalme a) para espesores de chapa $\boldsymbol{t = 6 - 8\ mm}$  1 soldadura por puntos continua 2 falta de alineación $\leq \boldsymbol{2\ mm}$ b) para espesores de chapa $\boldsymbol{t \geq 8\ mm}$  1 soldadura por puntos continua 2 falta de alineación $\leq \boldsymbol{2\ mm}$ El ángulo de preparación de la soldadura $\boldsymbol{\alpha}$ depende del procedimiento de soldadura y el ancho de la holgura depende del espesor de la chapa	Independiente del nivel de tensiones	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura 2. Ensayo de soldadura mediante 1 ensayo de producción	ad 1. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, falta de alineación $\leq 2\ mm$ ad 1b. Requisito 1 ad 2. Requisitos 1 y 2	
8) Unión rigidizador-viga transversal con rigidizadores que atraviesan la viga transversal sin groeras  1 holgura$\leq \boldsymbol{3\ mm}$	Espesor de garganta $a = a_{nom}$ de acuerdo con el cálculo para una holgura de $s \leq 2\ mm$, para holgura entre bordes s mayor: $a = a_{nom} + (s - 2)$ Espesor mínimo de garganta $a = 4\ mm$	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, cumplir con el espesor de garganta requerido a ad 1b. Requisitos 1 y 3	1. Se supone que en primer lugar se sueldan los rigidizadores a la chapa de tablero (con holguras), para luego montar y soldar las vigas transversales. 2. Las tolerancias para los cortes en la chapa de las vigas transversales siguen a las de los perfiles conformados para los rigidizado-res, véase tabla A29.C.3, detalle 2) b). 3. Los bordes cortados de las almas de las vigas transversales no tendrán muescas, en caso de tener habrá que amolarlas. Si se usa oxicorte se aplicará la norma UNE-EN ISO 9013 – Calidad 1.
9) Unión rigidizador-viga transversal con rigidizadores que atraviesan la viga transversal con groeras  1 holgura$\leq \boldsymbol{3\ mm}$ soldaduras alrededor de los bordes de las groeras sin muescas ni poros	Espesor de garganta $a = a_{nom}$ de acuerdo con el cálculo para una holgura de $s \leq 2\ mm$, para holgura entre bordes $s$mayor: $a = a_{nom} + (s - 2)$ Espesor mínimo de garganta $a = 4\ mm$	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, cumplir con el espesor de garganta requerido a ad 1b. Requisitos 1 y 3	1. Se supone que en primer lugar se sueldan los rigidizadores a la chapa de tablero (con holguras), para luego montar y soldar las vigas transversales. 2. Las tolerancias para los cortes en la chapa de las vigas transversales siguen a las de los perfiles conformados para los rigidizadores, véase la tabla A29.C.3, detalle 2) a). 3. Los bordes cortados de las almas de las vigas transversales, incluyendo las groeras, no tendrán muescas, en caso de tener habrá que amolarlas. Si se usa oxicorte se aplicará la norma UNE-EN ISO 9013 – Calidad 1.

Tabla A29.C.4 (Cont.) Fabricación

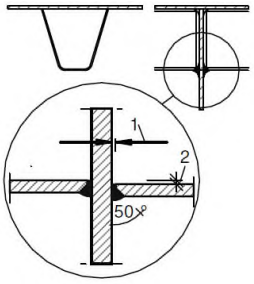
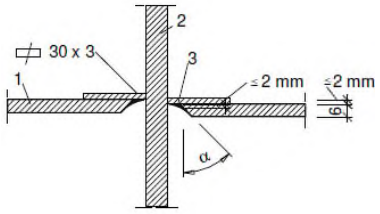
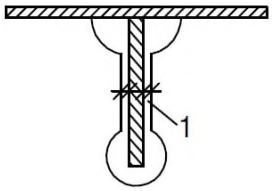
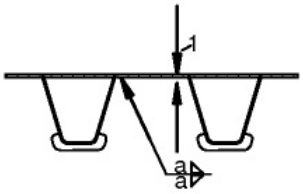
Detalle estructural	Nivel de tensión σ_{Ed}, τ_{Ed}	Método de ensayo y cantidad de ensayos	Resultados de ensayo requeridos	Observaciones
10) Unión rigidizador-viga transversal con rigidizadores ajustados entre las vigas transversales (no pasantes)  1 holgura≤ $\mathbf{2}\ \boldsymbol{mm}$ 2 falta de alineación ≤ $\mathbf{2}\ \boldsymbol{mm}$ soldadura de penetración completa por una única cara (soldadura simple en V) sin placa de respaldo  1 rigidizador 2 alma de la viga transversal 3 soldadura por puntos soldadura de penetración completa en una única cara con placa de respaldo	Espesor de garganta $a > t_{stiffener}$	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual en ≥ 50% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, falta de alineación ≤ $2\ mm$ ad 1b. Requisitos 1 y 3	1. Esta solución únicamente se permite para puentes con tráfico ligero y para vigas transversales con una separación $\leq 2{,}75\ m.$ 2. Para las almas de las vigas transversales, véase el requisito 4. 3. La secuencia de montaje y soldadura de los rigidizadores y las vigas transversales deberá plantearse para evitar los efectos perjudiciales de la retracción. 4. Placa de respaldo de una sola pieza, véase 7) 5. Soldaduras por puntos únicamente en el interior de soldaduras finales
11) Unión rigidizador-viga transversal con chapas planas pasantes  1 holgura≤ $\mathbf{1}\ \boldsymbol{mm}$	Espesor de garganta de las soldaduras en ángulo según el cálculo	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura. ad 1b. Requisitos 1 y 2	Se prepararán los bordes de los cortes de la viga transversal sin muescas ni endurecimiento, en caso de que tuviesen habrá que amolarlos. Si se usa oxicorte se aplicará la norma UNE-EN ISO 9013 – Calidad 1.
12) Unión del alma de la viga transversal a la chapa de tablero (con o sin groeras)  1 holgura≤ $\mathbf{1}\ \boldsymbol{mm}$	Espesor de garganta de las soldaduras en ángulo según el cálculo	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura. ad 1b. Requisito 1	Los bordes de los cortes con oxicorte se deberán preparar de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 9013 – Calidad 1.

Tabla A29.C.4 (Cont.) Fabricación

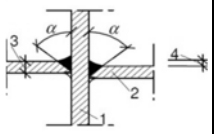
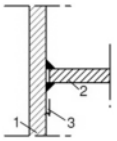
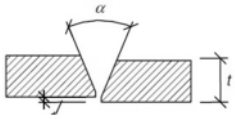
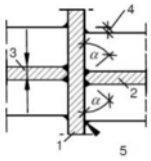
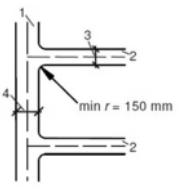
Detalle estructural	Nivel de tensión σ_{Ed}	Método de ensayo y cantidad de ensayos	Resultados de ensayo requeridos	Observaciones
13) Unión de las almas de las vigas transversales al alma de la viga principal a) para vigas transversales continuas 1 alma de la viga principal 2 alma de la viga transversal 3 $\boldsymbol{t_{w,crossb}}$ 4 falta de alineación $\leq \boldsymbol{0,5 t_{w,crossb}}$  	Independiente del nivel de tensiones	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1a. Satisfacer las tolerancias para la preparación de la soldadura, requisito 1 para a), falta de alineación *≤0,5 $t_{w,crossb}$* ad 1b. Requisito 1	Ejecución con soldaduras de penetración completa, ángulo de preparación de soldadura α y preparación de la soldadura de acuerdo con el procedimiento de soldadura y el espesor de la chapa.
b) para vigas transversales no continuas 1. alma de la viga principal 2. alma de la viga transversal 3. holgura$\leq \boldsymbol{2\ mm}$  	Espesor de garganta de las soldaduras en ángulo según el cálculo	véase comentarios encima	ad 1a. Véase comentarios encima. ad 1b. Véase comentarios encima	Ejecución con soldaduras en ángulo, véase el detalle 12).
14) Empalme del ala inferior o del alma de la viga transversal  1. falta de alineación $\boldsymbol{0 - 2\ mm}$	Independiente del nivel de tensiones	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura 2. Ensayos en ≥10% por ultrasonidos o radiografía	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, requisito 1, falta de alineación *≤ 2 mm* ad 1b. Requisitos 1 y 3 2. Requisito 2	
15) Unión de las alas de la viga transversal al alma de la viga principal  1. alma de la viga principal 2. alma de la viga transversal 3. $\boldsymbol{t_{w,crossb}}$ 4. falta de alineación $\leq \boldsymbol{0,5\ t_{w,crossb}}$ 5. $\boldsymbol{r \geq \frac{t_{w,viga\ principal}}{2} \geq 8}$	Independiente del nivel de tensiones	1a. Inspección de la preparación de la soldadura previa a la soldadura 1b. Inspección visual del 100% después de la soldadura	ad 1a. Cumplir con las tolerancias para la preparación de la soldadura, falta de alineación *≤ 0,5$t_{w,crossb}$* ad 1b. Requisitos 1 y 3	1. Para las almas de las vigas principales, requisito 4. 2. Para espesores de chapa inferiores además se pueden utilizar soldaduras en semi V con pasada de raíz, véase 13). 3. Únicamente se utilizarán soldaduras a tope con penetración completa con pasada de raíz.
16) Unión de alas de vigas transversales y vigas principales en su plano  1. viga principal 2. viga transversal 3. $\boldsymbol{b_{crossb}}$ 4. $\boldsymbol{b_{main\ girder}}$	Radio mínimo en la unión *min r=150 mm* Todos los espesores de chapa son iguales en otro caso es necesaria una evaluación de la fatiga			Se deben amolar los acuerdos.

Tabla A29.C.5 Condiciones complementarias a la normaUNE-EN ISO 5817

Al nº	Discontinuidad	Requisito complementario
3	Porosidad y sopladuras	únicamente se aceptan pequeños poros aislados
4	Sopladuras agrupadas	suma máxima de poros: 2 %
5	Sopladuras alargadas y vermiculares	ausencia de poros alargados
10	Mal ajuste, soldaduras en ángulo	ensayo de todas las soldaduras transversales, se admiten pequeñas interrupciones de raíz solo localmente $b \leq 0{,}3 + 0{,}10a$ y siempre $b \leq 1\ mm$ $b =$ holgura de la raíz o interrupción de la raíz, respectivamente
11	Mordeduras	a) soldaduras a tope únicamente son aceptables localmente $h \leq 0{,}5\ mm$ b) soldaduras en ángulo no son aceptables cuando sean perpendiculares a la dirección de las tensiones, se deberán eliminar mediante amolado
18	Falta de alineación lineal de bordes	máximo $2\ mm$ se deberán eliminar las aristas vivas
24	Proyección de chispas o golpe de arco	no son aceptables fuera de la zona de fusión
26	Discontinuidades múltiples en una sección transversal	no se permiten
6	Inclusiones sólidas	no se permiten
25	Proyecciones de soldadura	Se deben eliminar las proyecciones y sus zonas térmicas afectadas

Apéndice D Longitudes de pandeo recomendadas de elementos en puentes y consideraciones sobre las imperfecciones geométricas

D.1 Generalidades

(1) Este apéndice proporciona los coeficientes de longitud de pandeo β que pueden emplearse para el cálculo de elementos en compresión en puentes, utilizando la siguiente expresión:

$$l_K = \beta \cdot L \qquad \text{(D.1)}$$

(2) Este apéndice también proporciona indicaciones para la aplicación de las imperfecciones en el análisis de segundo orden, véase apartado 5.3.2 del Anejo 22 del Código Estructural.

(3) Las imperfecciones se pueden determinar utilizando el modo de pandeo correspondiente, véase el apartado 5.3.2(11) del Anejo 22, o con hipótesis simplificadas sobre las imperfecciones de los elementos, véase el apartado 5.3.2(3) del Anejo 22.

D.2 Celosías

D.2.1 Elementos verticales y diagonales con extremos fijos

(1) A menos que se realice una comprobación más precisa, teniendo en cuenta las rigideces correspondientes y la naturaleza de las uniones, pueden utilizarse estos valores:

- para el pandeo en su plano: $\beta = 0{,}9$
- para el pandeo fuera de su plano: $\beta = 1{,}0$

D.2.2 Elementos verticales que forman parte de un pórtico

(Véase la figura A29.D.1 a) o la figura A29.D.1 b))

(1) El coeficiente de longitud de pandeo β se puede obtener de la tabla A29.D.1.

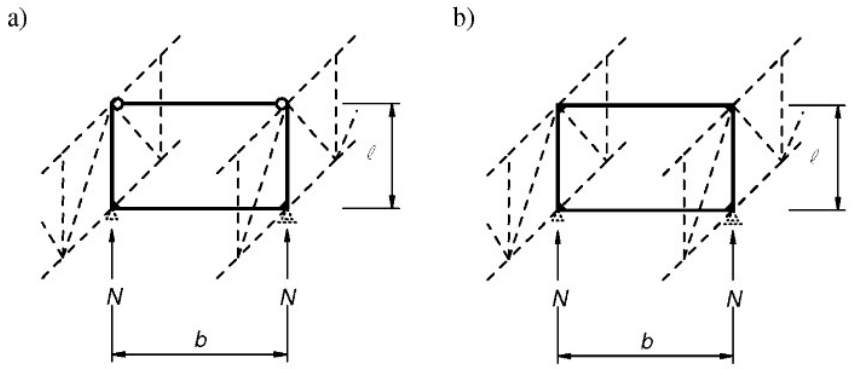
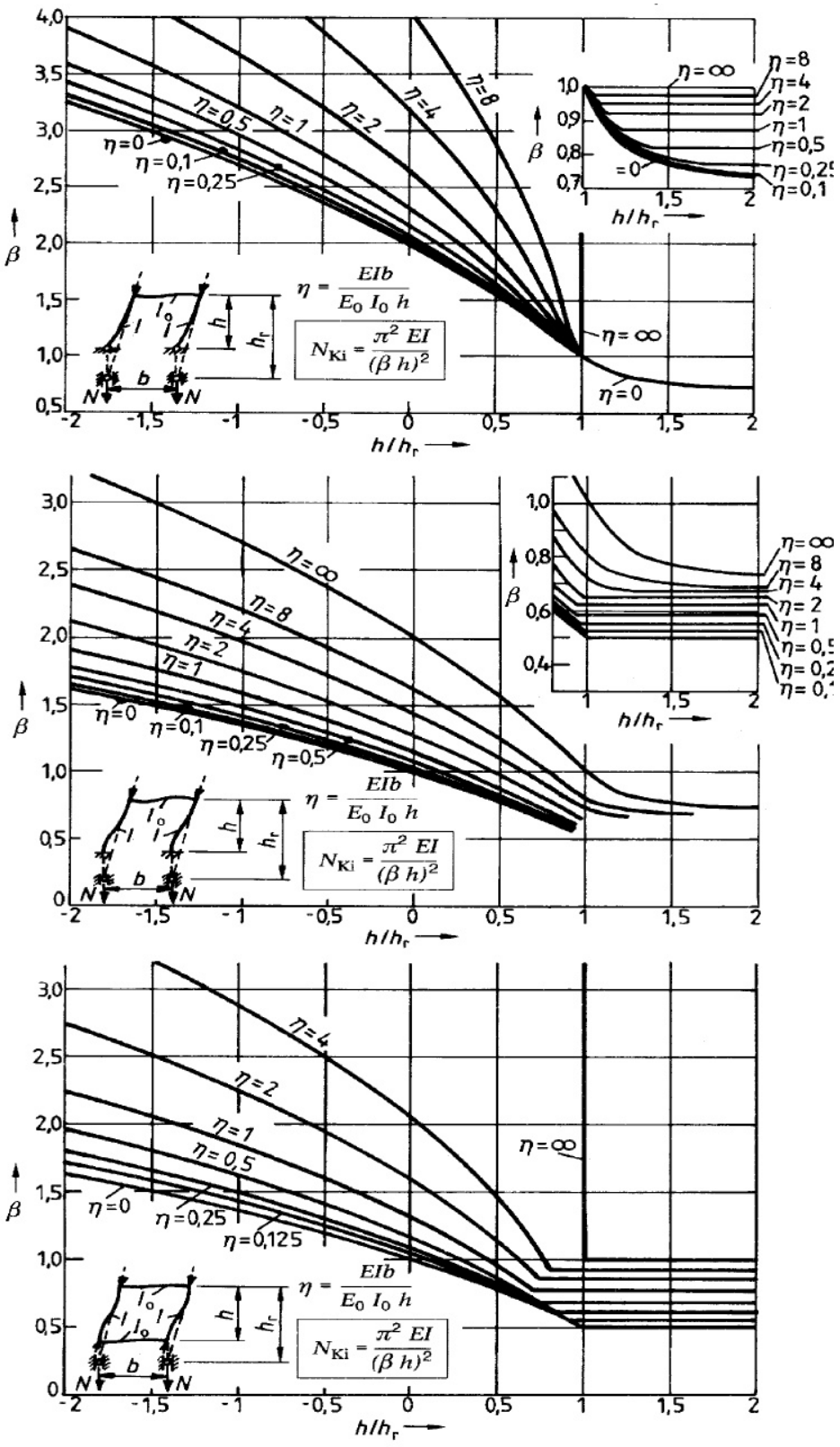


Figura A29.D.1 Elementos verticales que forman parte de un pórtico

Tabla A29.D.1 Coeficientes de longitud de pandeo β

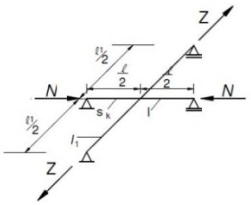
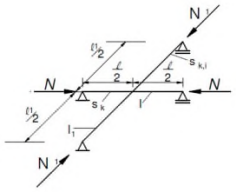
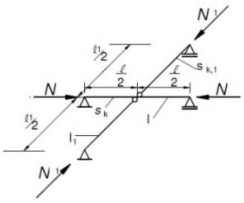
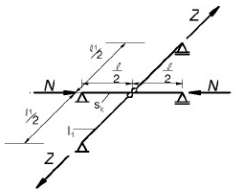
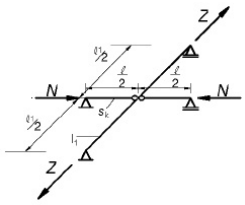
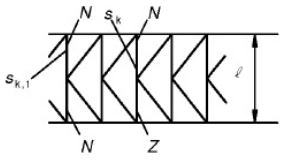


D.2.3 Pandeo de las diagonales fuera de su plano

(1) Las longitudes de pandeo de las diagonales de las celosías se pueden obtener de la tabla A29.D.2.

(2) Las uniones deberán alcanzar una rigidez y una resistencia a flexión suficientes para asegurar la continuidad de las diagonales, como se indica en la tabla A29.D.2.

Tabla A29.D.2 Longitudes de pandeo

	1	2	3
1		$\beta = \sqrt{\dfrac{1-\frac{3}{4}\frac{Zl}{Nl_1}}{1+\frac{I_1 l^3}{I l_1^3}}}$ con $\beta \geq 0{,}5$	
2		$\beta = \sqrt{\dfrac{1+\frac{N_1 l}{N l_1}}{1+\frac{I_1 l^3}{I l_1^3}}}$ con $\beta \geq 0{,}5$	$\beta_1 = \sqrt{\dfrac{1+\frac{N l_1}{N_1 l}}{1+\frac{I l_1^3}{I_1 l^3}}}$ con $\beta_1 \geq 0{,}5$
3		elementos continuos en compresión $\beta = \sqrt{1+\dfrac{\pi^2}{12}\dfrac{N_1 l}{N l_1}}$	elementos articulados en compresión $\beta_1 = 0{,}5$ cuando $EI \geq \dfrac{N_1 l^3}{\pi^2 l_1}\left(\dfrac{\pi^2}{12}+\dfrac{N l_1}{N_1 l}\right)$
4		$\beta = \sqrt{1-0{,}75\dfrac{Zl}{Nl_1}}$ con $\beta \geq 0{,}5$	
5		$\beta = 0{,}5$ Cuando $\dfrac{Nl_1}{Zl} \leq 1$ o cuando $EI_1 \geq \frac{3Zl_1^2}{4\pi^2}\left(\frac{Nl_1}{Zl}-1\right)$	
6		$\beta = \left(0{,}75-0{,}25\left\lvert\dfrac{Z}{N}\right\rvert\right)$ Con $\beta \geq 0{,}5$	$\beta_1 = \left(0{,}75-0{,}25\dfrac{N_1}{N}\right)$ $N_1 < N$

(3) Para diagonales que se encuentren elásticamente apoyadas en centro de vano, véanse la figura A29.D.2 y la ecuación (D.2):

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{3}{16}\frac{CL}{N}} \qquad \text{(D.2)}$$

donde:

L es la longitud del sistema

N es el valor máximo entre N_1 y N_2

C es la rigidez del apoyo lateral con $C \leq \frac{4N}{l}$.

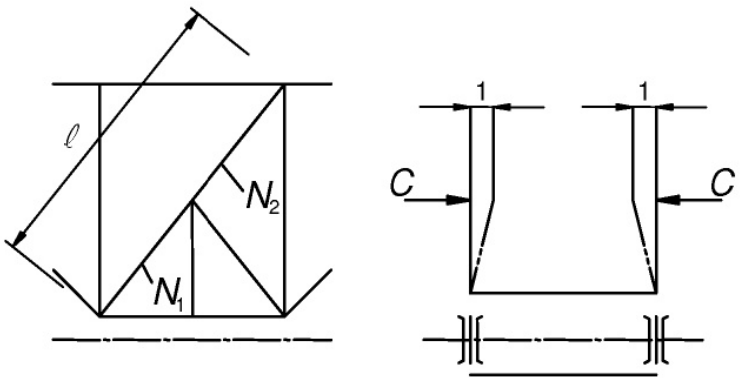


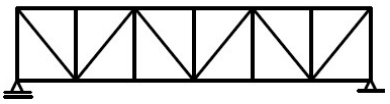
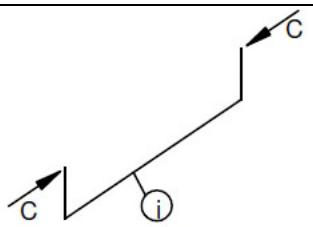
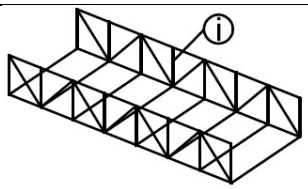
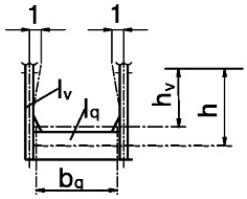
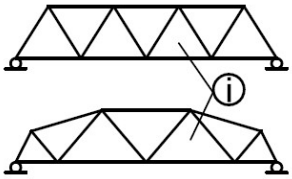
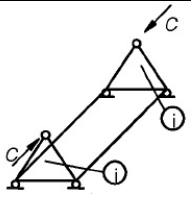
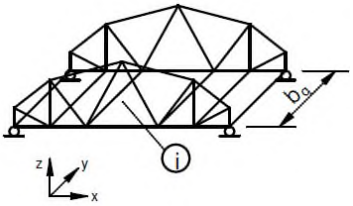
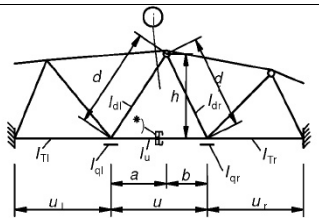
Figura A29.D.2 Diagonal con apoyo elástico en centro de vano

D.2.4 Cordones comprimidos de puentes con sección abierta

(1) Los cordones comprimidos se pueden modelar como montantes con apoyos laterales.

(2) Se puede determinar la rigidez de los apoyos laterales empleando la tabla A29.D.3.

Tabla A29.D.3 Rigideces laterales C_d para celosías

	1	2
1	 Ejemplo de puente en celosía con montantes	
1a	 Modelado	 $C = \frac{EI_v}{\frac{h_v^3}{3}+\frac{h^2 b_q I_v}{2I_q}}$
2	 Ejemplo de puente en celosía sin montantes	 Pórtico en U en puente en celosía sin montantes
2a	 Modelado	 *) Articulación en torsión Modelado: Cordón inferior del pórtico en U con rigidez a flexión EI_l únicamente, cordones inferiores adyacentes con rigidez a torsión GI_T
2b	Rigidez elástica $C = \frac{A+B-2D}{AB-D^2} EI_u$	
2c	$A = \frac{h^2 I_u}{n_l} + \frac{d_l^3 I_u}{3I_{dl}} + \frac{a^2 u}{3}$ $n_l = \frac{2}{b_q} I_{ql} + \frac{GI_{Tl}}{Eu_l}$ $B = \frac{h^2 I_u}{n_r} + \frac{d_r^3 I_u}{3I_{dr}} + \frac{b^2 u}{3}$ $n_r = \frac{2}{b_q} I_{qr} + \frac{GI_{Tr}}{Eu_r}$ $D = \frac{1}{6} abu$ Las longitudes d_l, d_r, a, b, u y b_q se pueden reducir en el caso de extremos rígidos. u_l y u_r se pueden reducir en el caso de que los extremos estén empotrados a torsión. EI_{dl}, EI_{dr}, EI_u = rigidez a flexión de diagonales y cordones inferiores en la flexión fuera de plano EI_{ql}, EI_{qr} = rigidez a flexión de la viga transversal GI_{Tl}, GI_{Tr} = rigidez a torsión de St. Venant de los cordones adyacentes	

D.3 Puentes arco

D.3.1 Generalidades

(1) En el apartado D.3.1 se proporcionan los coeficientes de longitud de pandeo β para el pandeo de puentes arco en su plano y fuera de su plano.

(2) El axil crítico de pandeo N_{cr} en el arco para el pandeo en su plano se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{\beta s}\right)^2 EI_y \qquad \text{(D.3)}$$

donde:

N_{cr} se refiere al esfuerzo en los apoyos

s es la mitad de la longitud del arco

EI_y es la rigidez a flexióndel arco en su plano

β es el coeficiente de longitud de pandeo.

(3) El axil crítico de pandeo en arcos autoportantes para el pandeo fuera de su plano se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{\beta l}\right)^2 EI_z \qquad \text{(D.4)}$$

donde:

N_{cr} se refiere al esfuerzo en los apoyos

l es la longitud proyectada del arco

EI_z es la rigidez a flexión del arco fuera de su plano

β es el coeficiente de longitud de pandeo.

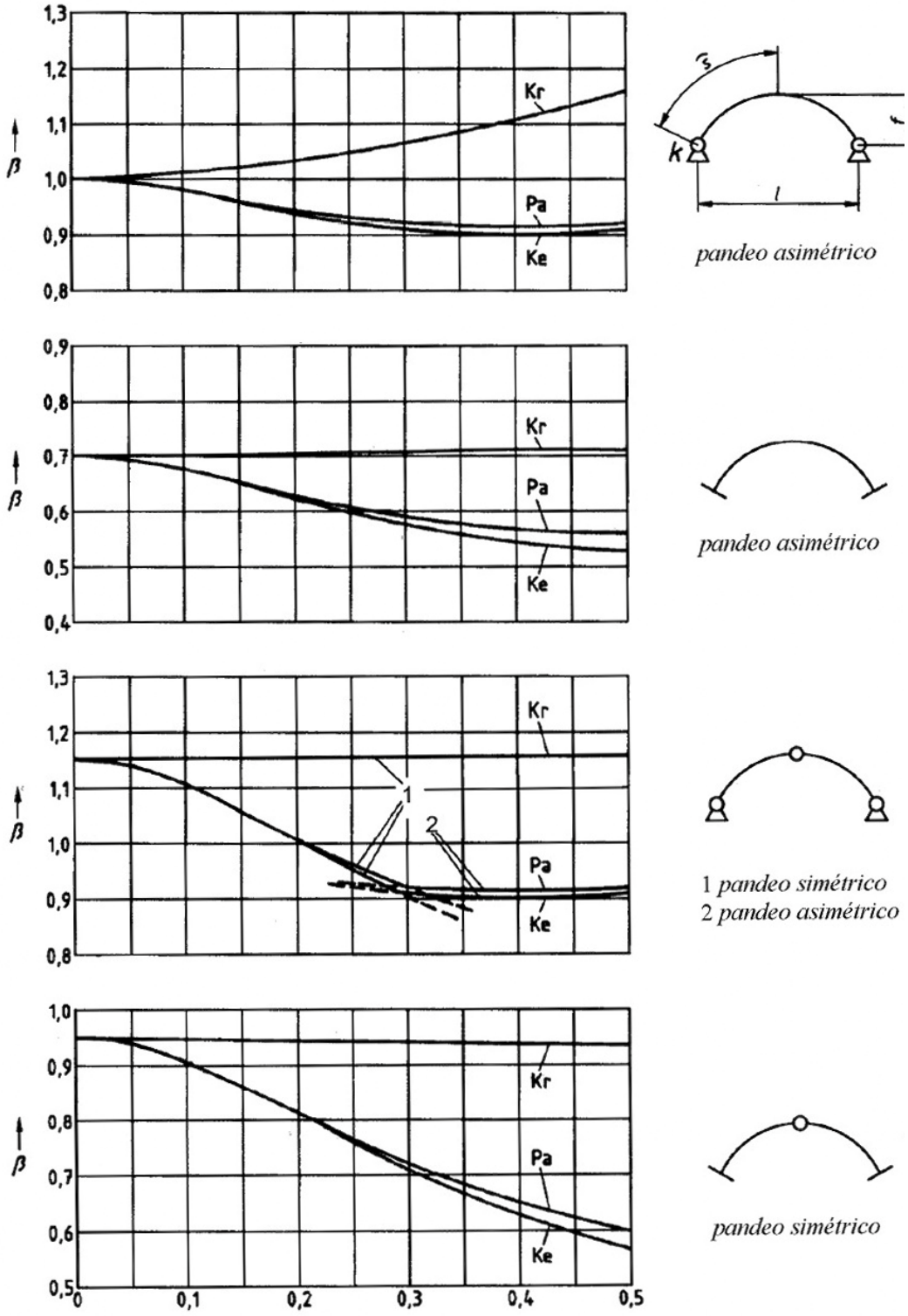
(4) El pandeo fuera de su plano de los arcos con contravientos y pórticos se puede comprobar mediante una comprobación de la estabilidad de los pórticos extremos.

D.3.2 Coeficientes de pandeo de arcos en su plano

(1) Para arcos con apoyos rígidos o articulados, los coeficientes de pandeo β se establecen en la tabla A29.D.4.

(2) Para arcos compuestos por un tirante de tracción y péndolas, los coeficientes de pandeo β se establecen en la figura A29.D.4.

Tabla A29.D.4 Coeficiente de longitud de pandeo β para arcos con $f/l > 0{,}1$



Pa: Forma parabólica Ke: Forma de catenaria Kr: Forma circular

para Pa y Ke la carga es vertical; para Kr se estima la carga radial (por ejemplo la presión hidrostática)

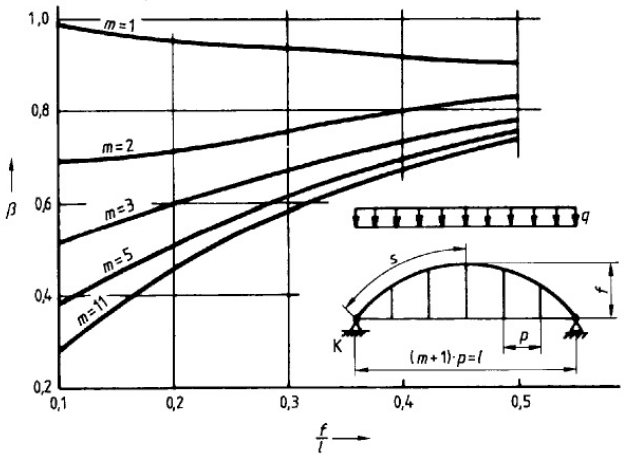


Figura A29.D.4 Coeficiente de pandeo β

(3) Se puede suponer que el fenómeno de inestabilidad en arcos se puede evitar si se cumple el siguiente criterio:

$$l\sqrt{\frac{EA}{12EI_y}} > K \qquad \text{(D.5)}$$

donde:

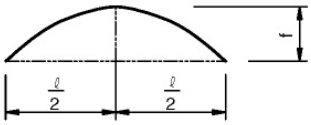
A es el área de la sección

I_y es el momento de inercia

K es un coeficiente.

(4) El valor del coeficiente K se puede tomar de la tabla A29.D.5.

Tabla A29.D.5 Coeficiente K

	f/l	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20
	K	35	23	17	10	8
		319	97	42	13	6
						

D.3.3 Coeficientes de pandeo de arcos autoportantes fuera de su plano

(1) En el caso de pandeo de arcos autoportantes fuera de su plano los coeficientes de pandeo se pueden obtener como:

$$\beta = \beta_1\beta_2 \qquad \text{(D.6)}$$

donde:

β_1 se establece en la tabla A29.D.6 y β_2 se indica en la tabla A29.D.7.

Tabla A29.D.6 Valores de β_1

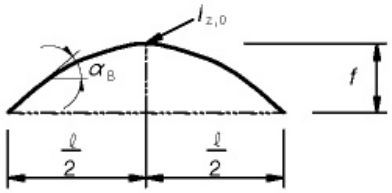
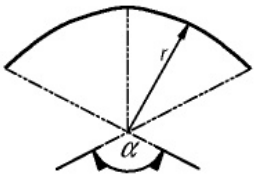
f/l	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	
I_z constante	0,50	0,54	0,65	0,82	1,07	
I_z variable $I_z(\alpha_B) = \frac{I_{z,0}}{\cos \alpha_B}$	0,50	0,52	0,59	0,71	0,86	

Tabla A29.D.7 Valores deβ_2

Modo de carga	β_2	Comentarios
conservadora (el tablero se fija a la clave del arco)	1	
mediante péndolas	$1 - 0{,}35\frac{q_H}{q}$	
mediante montantes	$1 + 0{,}45\frac{q_{St}}{q}$	q carga total q_H carga transmitida por las péndolas q_{St} carga transmitida por los montantes

(2) En el caso de pandeo fuera de su plano de los arcos circulares autoportantes con carga radial, el coeficiente de pandeo β se puede obtener mediante:

$$\beta = \pi r \alpha \frac{\sqrt{\pi^2 + \alpha^2 K}}{l(\pi^2 - \alpha^2)} \qquad \text{(D.7)}$$

donde:

r es el radio del círculo

α es la sección angular del arco,$0 < \alpha < \pi$

$K = \frac{EI_z}{GI_T}$.

D.3.4 Pandeo fuera de su plano de arcos con contravientos y pórticos extremos

(1) El pandeo fuera de su plano se puede comprobar verificando la estabilidad de los pórticos extremos, de acuerdo con el apartado D.2.2.

(2) El coeficiente de longitud de pandeo β se puede obtener de la tabla A29.D.1, empleando la geometría que se muestra en la figura A29.D.5.

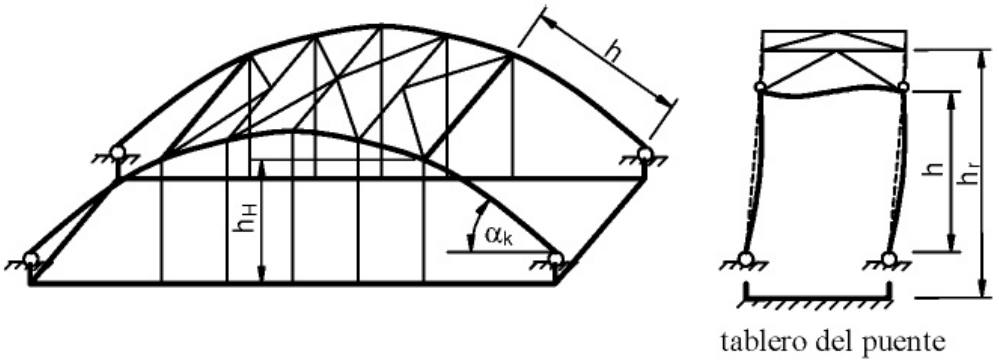


Figura A29.D.5 Pandeo de pórticos en los arcos

(3) El valor del parámetro h_r de la tabla A29.D.1 se puede obtener como la media de todas las longitudes de las péndolas h_H multiplicadas por $\frac{1}{sen\alpha_k}$, donde α_k (constante) se obtiene de la figura A29.D.5.

D.3.5 Imperfecciones

(1) A menos que se empleen los modos de pandeo correspondientes para las imperfecciones, véase el apartado 5.3.2 (11) del Anejo 22 del Código Estructural, se pueden utilizar las imperfecciones del arco que se indican en la tabla A29.D.8 para el pandeo de los arcos en su plano y en la tabla A29.D.9 para el pandeo de los arcos fuera de su plano.

Tabla A29.D.8 Forma y amplitud de las imperfecciones para el pandeo de arcos en su plano

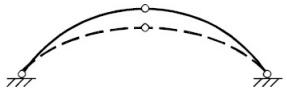
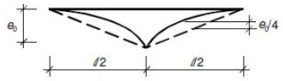
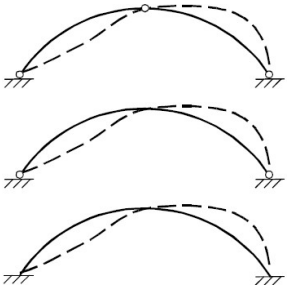
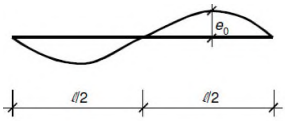
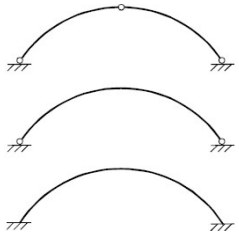
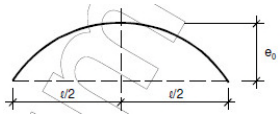
	1	2	3			
		forma de la imperfección (seno o parábola)	e_0 según la curva de pandeo relativa a la clasificación de la sección			
			a	b	c	d
1			$\frac{s}{300}$	$\frac{s}{250}$	$\frac{s}{200}$	$\frac{s}{150}$
2			$\frac{l}{600}$	$\frac{l}{500}$	$\frac{l}{400}$	$\frac{l}{300}$

Tabla A29.D.9 Forma y amplitud de las imperfecciones para el pandeo de arcos fuera de su plano

	forma de la imperfección (seno o parábola)	e_0 según la curva de pandeo relativa a la clasificación de la sección				
			a	b	c	d
		$l \leq 20\ m$	$\frac{l}{300}$	$\frac{l}{250}$	$\frac{l}{200}$	$\frac{l}{150}$
		$l > 20\ m$ $l_1 = \sqrt{20l[m]}$	$\frac{l_1}{300}$	$\frac{l_1}{250}$	$\frac{l_1}{200}$	$\frac{l_1}{150}$

Apéndice E Recomendaciones para la combinación de los efectos locales de cargas de ruedas y presión de neumáticos y de los efectos globales de tráfico en puentes de carretera

E.1 Regla de combinación para los efectos de carga global y local

(1) Cuando se considere la resistencia local de los rigidizadores en tableros ortótropos, se deben tener en cuenta los efectos derivados de las cargas locales de ruedas y neumáticos, actuando sobre el rigidizador, así como los efectos derivados de las cargas globales de tráfico, actuando sobre el puente (véase la figura A29.E.1).

(2) Para tener en cuenta los diferentes orígenes de estas cargas, se debe aplicarla siguiente regla de combinación para determinar los valores de cálculo:

$$\sigma_{Ed} = \sigma_{loc,\mathrm{Ed}} + \psi \cdot \sigma_{glob,\mathrm{Ed}} \quad \text{(E.1)}$$

$$\sigma_{Ed} = \psi \cdot \sigma_{loc,\mathrm{Ed}} + \sigma_{glob,\mathrm{Ed}} \quad \text{(E.2)}$$

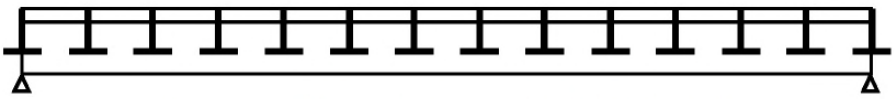
donde:

σ_{Ed} es el valor de cálculo de la tensión en la viga debida a los efectos combinados de la carga local $\sigma_{loc,Ed}$ y de la carga global $\sigma_{glob,Ed}$

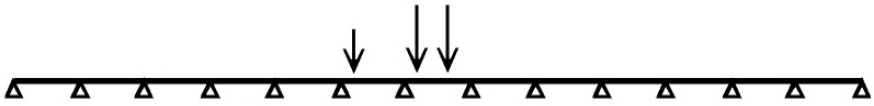
$\sigma_{loc,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión en la viga debida a la carga local de ruedas o neumáticos producida por un único vehículo pesado

$\sigma_{glob,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión en la viga debida a cargas en el puente producidas por uno o más vehículos pesados

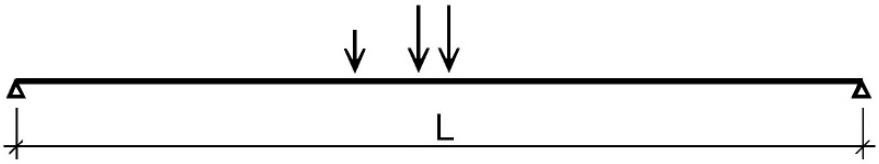
ψ es el coeficiente de combinación.



a) Puente con tablero ortótropo con rigidizadores longitudinales



b) Modelo de análisis para determinar los efectos locales $\sigma_{\mathrm{loc,Ed}}$



c) Modelo de análisis para determinar los efectos globales $\sigma_{\mathrm{glob,Ed}}$

Figura A29.E.1 Modelización de la estructura con efectos locales y globales

E.2 Coeficiente de combinación

(1) El coeficiente de combinación ψ se puede determinaren base a las distribuciones de pesos de diferentes camiones actuando sobre una línea de influencia para los efectos de la combinación de acciones. Se empleará el valor de ψ obtenido a partir de la figura A29.E.2.

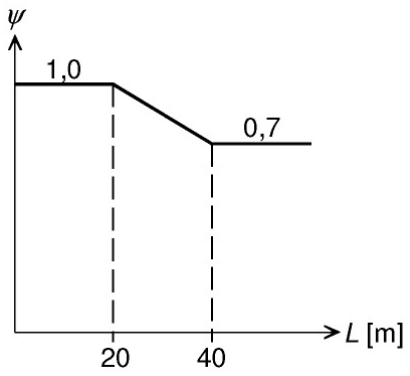


Figura A29.E.2 Coeficiente de combinación dependiente de la longitud de vano L