Anejo 22

Proyecto de estructuras de acero. Reglas generales y reglas para edificación

Contenido

1. GENERALIDADES 1126

1.1 ALCANCE 1126
1.1.1 Alcance de los Anejos 22 a 29 1126
1.1.2 Alcance del Anejo 22 1126
1.2 NORMATIVA DE REFERENCIA 1127
1.3 HIPÓTESIS 1127
1.5 TÉRMINOS Y DEFINICIONES 1127
1.5.1 Pórtico 1127
1.5.2 Subestructura 1127
1.5.3 Tipos de pórticos 1127
1.5.4 Análisis global 1127
1.5.5 Longitud del sistema 1127
1.5.6 Longitud de pandeo 1127
1.5.7 Arrastre por cortante 1128
1.5.8 Cálculo de la capacidad 1128
1.5.9 Perfiles de canto constante 1128
1.6 NOTACIÓN 1128
1.7 CONVENIO PARA LOS EJES 1137

2. BASES DE CÁLCULO 1139

2.1 REQUISITOS 1139
2.1.1 Requisitos básicos 1139
2.1.2 Gestión de la fiabilidad 1139
2.1.3 Vida útil, durabilidad y resistencia 1139
2.1.3.1 Generalidades 1139
2.1.3.2 Vida útil en edificación 1139
2.1.3.3 Durabilidad de los edificios 1140
2.2 PRINCIPIOS DE CÁLCULO EN ESTADO LÍMITE 1140
2.3 VARIABLES BÁSICAS 1140
2.3.1 Acciones y condiciones ambientales 1140
2.3.2 Propiedades de los materiales y de los productos 1140
2.4 COMPROBACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS COEFICIENTES PARCIALES 1141
2.4.1 Valores de cálculo de las propiedades de los materiales 1141
2.4.2 Valores de cálculo de los parámetros geométricos 1141
2.4.3 Resistencias de cálculo 1141
2.4.4 Comprobación del equilibrio estático 1141
2.5 CÁLCULO ASISTIDO POR ENSAYOS 1141

3. MATERIALES 1142

3.1 GENERALIDADES 1142
3.2 ACERO ESTRUCTURAL 1142
3.2.1 Propiedades del material 1142
3.2.2 Requisitos de ductilidad 1142
3.2.3 Tenacidad de fractura 1142

3.2.4 Propiedades en el sentido del espesor ... 1145
3.2.5 Tolerancias ... 1145
3.2.6 Valores de cálculo de los coeficientes de los materiales ... 1145
3.3 DISPOSITIVOS DE UNIÓN ... 1145
3.3.1 Fijaciones ... 1145
3.3.2 Material de aporte en soldaduras ... 1146
3.4 OTROS PRODUCTOS PREFABRICADOS PARA EDIFICACIÓN ... 1146

4. DURABILIDAD ... 1146

5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL ... 1146

5.1 MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA EL ANÁLISIS ... 1146
5.1.1 Modelización estructural e hipótesis básicas ... 1146
5.1.2 Modelización de uniones ... 1147
5.1.3 Interacción suelo-estructura ... 1147
5.2 ANÁLISIS GLOBAL ... 1147
5.2.1 Efectos de la geometría deformada de la estructura ... 1147
5.2.2 Estabilidad estructural de los pórticos ... 1149
5.3 IMPERFECCIONES ... 1150
5.3.1 Bases ... 1150
5.3.2 Imperfecciones para el análisis global de pórticos ... 1151
5.3.3 Imperfecciones para el análisis de los sistemas de arriostramiento ... 1155
5.3.4 Imperfecciones de los elementos ... 1156
5.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS CONSIDERANDO LA NO LINEALIDAD DE LOS MATERIALES ... 1157
5.4.1 Generalidades ... 1157
5.4.2 Análisis global elástico ... 1157
5.4.3 Análisis global plástico ... 1158
5.5 CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES ... 1158
5.5.1 Bases ... 1158
5.5.2 Clasificación ... 1159
5.6 REQUISITOS RELATIVOS A SECCIONES PARA EL ANÁLISIS GLOBAL PLÁSTICO ... 1160

6. ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS ... 1163

6.1 GENERALIDADES ... 1163
6.2 RESISTENCIA DE LAS SECCIONES ... 1164
6.2.1 Generalidades ... 1164
6.2.2 Propiedades de la sección ... 1165
6.2.2.1 Sección bruta ... 1165
6.2.2.2 Sección neta ... 1165
6.2.2.3 Efectos de arrastre por cortante ... 1166
6.2.2.4 Propiedades eficaces de secciones con almas Clase 3 y alas Clases 1 o 2 ... 1166
6.2.2.5 Propiedades eficaces de la sección de Clase 4 ... 1167
6.2.3 Tracción ... 1167
6.2.4 Compresión ... 1168
6.2.5 Momento flector ... 1168
6.2.6 Cortante ... 1169
6.2.7 Torsión ... 1171
6.2.8 Flexión y cortante ... 1172

6.2.9 Flexión y axil ... 1173
6.2.9.1 Secciones Clases 1 y 2 ... 1173
6.2.9.2 Secciones Clase 3 ... 1174
6.2.9.3 Secciones Clase 4 ... 1174
6.2.10 Flexión, cortante y axil ... 1175
6.3 RESISTENCIA A PANDEO DE LOS ELEMENTOS ... 1175
6.3.1 Elementos de sección constante a compresión ... 1175
6.3.1.1 Resistencia a pandeo ... 1175
6.3.1.2 Curvas de pandeo ... 1176
6.3.1.3 Esbeltez para el pandeo por flexión ... 1178
6.3.1.4 Esbeltez para el pandeo por torsión y el pandeo por torsión y flexión ... 1179
6.3.2 Elementos de canto constante a flexión ... 1179
6.3.2.1 Resistencia a pandeo ... 1179
6.3.2.2 Curvas de pandeo lateral por torsión. Caso general ... 1180
6.3.2.3 Curvas de pandeo lateral para secciones laminadas o secciones soldadas equivalentes ... 1181
6.3.2.4 Métodos simplificadosde comprobación de vigas con arriostramientos laterales en edificios ... 1182
6.3.3 Elementos de sección constante sometidos a flexión y compresión ... 1183
6.3.4 Método general para el pandeo lateral y flexión de elementos estructurales ... 1185
6.3.5 Pandeo lateral de los elementos con rótulas plásticas en edificación ... 1186
6.3.5.1 Generalidades ... 1186
6.3.5.2 Arriostramiento en rótulas plásticas rotadas ... 1186
6.3.5.3 Verificación de la longitud estable del segmento ... 1187
6.4 ELEMENTOS COMPUESTOS COMPRIMIDOS ... 1188
6.4.1 Generalidades ... 1188
6.4.2 Elementos triangulados comprimidos ... 1190
6.4.2.1 Resistencia de los componentes de los perfiles triangulados comprimidos ... 1190
6.4.2.2 Detalles constructivos ... 1191
6.4.3 Elementos empresillados comprimidos ... 1192
6.4.3.1 Resistencia de los elementos empresillados comprimidos ... 1192
6.4.3.2 Detalles constructivos ... 1193
6.4.4 Elementos compuestos próximos ... 1194

7. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO ... 1195

7.1 GENERALIDADES ... 1195
7.2 ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO EN EDIFICACIÓN ... 1195
7.2.1 Flechas verticales ... 1195
7.2.2 Flechas horizontales ... 1196
7.2.3 Efectos dinámicos ... 1197

APÉNDICE A MÉTODO 1: COEFICIENTES RECOMENDADOS DE INTERACCIÓN KIJ PARA LA FÓRMULA DE INTERACCIÓN EN 6.3.3(4) ... 1198

APÉNDICE B MÉTODO 2: COEFICIENTES RECOMENDADOS DE INTERACCIÓN kij PARA LA FÓRMULA DE INTERACCIÓN 6.3.3(4) ... 1201

APÉNDICE AB DISPOSICIONES ADICIONALES DE CÁLCULO RECOMENDADAS EN EDIFICACIÓN ... 1204

APÉNDICE BB RECOMENDACIONES SOBRE PANDEO EN ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN ... 1205

APÉNDICE C SELECCIÓN DE LA CLASE DE EJECUCIÓN ... 1217

1. Generalidades

1.1 Alcance

1.1.1 Alcance de los Anejos 22 a 29

(1) Los Anejos 22 a 29 son de aplicación en los proyectos de edificación y de obra civil en acero. Cumple con los principios y requisitos de seguridad estructural y aptitud al servicio de las estructuras, con las bases de cálculo y las comprobaciones establecidas en el Anejo 18 Bases de cálculo de estructuras.

(2) Los Anejos 22 a 29 se ocupan únicamente de los requisitos de resistencia, aptitud al servicio, durabilidad y resistencia al fuego de estructuras de acero. No se consideran otros requisitos, como aislamiento térmico o acústico.

(3) Los Anejos 22 a 29 están planteados para su utilización con el resto de este 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 22

(1) Este Anejo proporciona unas reglas básicas para aceros estructurales con un espesor mayor o igual a 3 mm ($t \geq 3\,mm$). También proporciona disposiciones suplementarias para cálculos de estructuras metálicas en edificación, que se indican con la letra “B” después del número de párrafo.

NOTA: Los perfiles y chapas finas conformados en frío no están considerados.

(2) En este Anejo se tratan las siguientes materias:

Apartado 1: Generalidades.

Apartado 2: Bases del diseño.

Apartado 3: Materiales.

Apartado 4: Durabilidad.

Apartado 5: Análisis estructural.

Apartado 6: Estados Límite Últimos.

Apartado 7: Estados Límite de Servicio.

(3) Los apartados 1 y 2 incluyen requisitos adicionales a los establecidos en el Anejo 18 de este Código Estrucutral.

(4) El apartado 3 incluye las propiedades de los materiales de los productos hechos con aceros estructurales de aleaciones bajas.

(5) El apartado 4 establece requisitos generales de durabilidad.

(6) El apartado 5 se refiere al análisis estructural de estructuras que para su análisis global se pueden modelizar sus elementos con suficiente precisión, como elementos lineales.

(7) El apartado 6 establece requisitos detallados para el cálculo de secciones y elementos.

(8) El apartado 7 establece requisitos para la aptitud al servicio.

1.2 Normativa de referencia

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

1.3 Hipótesis

Además de las hipótesis generales del Anejo 18, así como las recogidas en la reglamentación específica vigente, también serán de aplicación los criterios sobre fabricación y ejecución establecidos en el Capítulo 21 de este Código Estructural.

1.5 Términos y definiciones

(1) Son de aplicación los criterios del apartado 1.4 del Anejo 18.

(2) En este anejo se utilizan los siguientes términos y definiciones, cuyos significados se indican a continuación:

1.5.1 Pórtico

Estructura completa o parte de ella, formada por un conjunto de elementos estructurales conectados directamente entre sí, calculados para resistir de forma solidaria las cargas; este término se refiere a celosías reticuladas y articuladas, ya sean planas o tridimensionales.

1.5.2 Subestructura

Pórtico que forma parte de uno mayor, pero es tratado de forma aislada en su análisis estructural.

1.5.3 Tipos de pórticos

Los términos utilizados para distinguir entre los distintos tipos de pórticos son:

- Semirrígido: En la que las propiedades estructurales de los elementos y uniones necesitan una consideración explícita en el análisis global.
- Rígido: En la que solo las propiedades estructurales de los elementos necesitan ser considerados en el análisis global.
- Articulado: En la que no se le pide a las uniones resistir momentos.

1.5.4 Análisis global

La determinación de un conjunto consistente de esfuerzos internos de la estructura, en equilibrio con un conjunto particular de acciones aplicadas sobre ella.

1.5.5 Longitud del sistema

Distancia en un plano dado entre dos puntos adyacentes en el que un elemento tiene coaccionado el movimiento en el plano, o entre un punto y el final del elemento.

1.5.6 Longitud de pandeo

Longitud del sistema de un elemento equivalente biarticulado, con la misma resistencia al momento flector que un segmento o elemento dado.

1.5.7 Arrastre por cortante

Distribución no uniforme del esfuerzo cortante en las alas anchas debido a la deformación por cortante, se tendrá en cuenta en los cálculos usando un ancho eficaz reducido de las alas para las comprobaciones de seguridad.

1.5.8 Cálculo de la capacidad

Método de cálculo que permite alcanzar la capacidad plástica de una sección de un elemento dándole mayor resistencia a sus uniones y elementos conectados al mismo, para que estas no sean puntos débiles que limiten la capacidad del elemento.

1.5.9 Perfiles de canto constante

Perfiles con una sección transversal constante en toda su longitud.

1.6 Notación

(1) Los siguientes símbolos son de aplicación.

(2) Los símbolos que aparecen en el articulado y no están incluidos en esta lista se encuentran definidos en su primera aparición.

NOTA: Los símbolos están ordenados por orden de aparición en el texto.

Apartado 1

$x - x$	eje longitudinal del elemento
$y - y$	eje de una sección
$z - z$	eje de una sección
$u - u$	eje principal mayor (cuando no coincide con el eje $y - y$)
$v - v$	eje principal menor (cuando no coincide con el eje $z - z$)
b	ancho de la sección
h	canto de la sección
d	canto de la parte recta del alma
t_w	espesor del alma
t_f	espesor del ala
r	radio
r_1	radio
r_2	radio
t	espesor

Apartado 2

P_k	valor nominal del pretensado impuesto durante el montaje
G_k	valor nominal del efecto de las secciones permanentes
X_k	valores característicos de la propiedad X del material
X_n	valores nominales de la propiedade X del material

R_d	valor de cálculo de la resistencia
R_k	valor característico de la resistencia
γ_M	coeficiente parcial de seguridad (general)
γ_{Mi}	coeficiente parcial de seguridad (particular)
γ_{Mf}	coeficiente de seguridad a fatiga
η	factor de conversión
a_d	valor de cálculo para datos geométricos

Apartado 3

f_y	límite elástico
f_u	tensión última
R_{eH}	límite elástico obtenido de la norma del producto
R_m	tensión última obtenida de la norma del producto
A_0	área de la sección inicial
ε_y	deformación correspondiente al límite elástico
ε_u	deformación correspondiente a la tensión última
Z_{Ed}	valor cálculo de la resistencia del material a desgarro laminar especificado en función de las deformaciones debidas a la restricción de la retracción térmica del material bajo los cordones de soldadura
Z_{Rd}	valor de cálculo de la resistencia del material a desgarro laminar
E	módulo de elasticidad longitudinal
G	módulo de elasticidad transversal
ν	coeficiente de Poisson en régimen elástico
α	coeficiente de dilatación térmica lineal

Apartado 5

α_{cr}	factor por el que la carga de cálculo tendría que ser aumentada para provocar una inestabilidad elástica en el modo global (pandeo global)
F_{Ed}	carga de cálculo sobre la estructura
F_{cr}	carga crítica de inestabilidad global por pandeo elástico de la estructura calculada con las rigideces elásticas iniciales
H_{Ed}	valor de cálculo de la resultante horizontal, incluyendo las fuerzas equivalentes transferidas por la planta (cortante)
V_{Ed}	valor de cálculo de la carga vertical total en la estructura, ejercida sobre el entramado transferida por la planta (reacción de la planta)
$\delta_{H,Ed}$	desplazamiento horizontal relativo entre una planta y la inmediatamente inferior
h	altura de la planta
$\bar{\lambda}$	esbeltez relativa adimensional

N_{Ed}	valor de cálculo del esfuerzo axil
Φ	imperfección inicial de verticalidad
Φ_0	coeficiente valor básico de imperfección inicial de verticalidad
α_h	coeficiente de reducción para la altura h aplicable a columnas
h	altura de la estructura
α_m	coeficiente de reducción por el número de pilares en una fila
m	número de pilares por fila
e_0	máxima imperfección de un elemento
L	longitud del elemento
η_{init}	amplitud del modo elástico crítico de pandeo
η_{cr}	forma de la deformada del modo elástico crítico de pandeo
$e_{0,d}$	valor de cálculo de la amplitud máxima de una imperfección
M_{Rk}	resistencia característica a flexión de la sección crítica
N_{Rk}	resistencia característica a axil de la sección crítica
α	factor de imperfección
$EI\eta''_{cr}$	momento flector producido por la deformada η_{cr} en la sección
χ	factor de reducción para la curva de pandeo considerada
$\alpha_{ult,k}$	mínimo coeficiente de amplificación de las acciones de cálculo para alcanzar la resistencia característica de la sección transversal más crítica del componente estructural considerando su comportamiento en el plano, sin tener en cuenta el pandeo laterial o lateral torsional, pero sí teniendo en cuenta todos los efectos debidos a las deformaciones geométricas e imperfecciones en el plano, globales y locales, cuando estas sean relevantes
α_{cr}	mínimo coeficiente de amplificación para alcanzar el pandeo crítico elástico
q	fuerza equivalente por unidad de longitud
δ_q	flecha del sistema de arriostramiento en el plano de estabilización
q_d	fuerza equivalente de cálculo por unidad de longitud
M_{Ed}	momento flector de cálculo
k	coeficiente para $e_{0,d}$
ε	deformación
σ	tensión
$\sigma_{com,Ed}$	tensión de compresión máxima de cálculo en un elemento
l	longitud
ε	coeficiente dependiente de f_y
c	ancho o canto de una parte de una sección
α	parte de la sección transversal comprimida
Ψ	coeficiente de tensión o deformación
k_σ	factor de pandeo transversal o de alabeo

d	diámetro exterior de una sección tubular circular
Apartado 6	
γ_{M0}	coeficiente parcial de seguridad de la resistencia de la sección para cualquier Clase
γ_{M1}	coeficiente parcial de seguridad de la resistencia de los elementos a inestabilidad evaluada por la comprobación de los elementos
γ_{M2}	coeficiente parcial de seguridad de la resistencia a tracción de la sección en tracción para fracturar
$\sigma_{x,Ed}$	valor de cálculo de la tensión longitudinal en el punto considerado
$\sigma_{z,Ed}$	valor de cálculo de la tensión transversal
τ_{Ed}	valor de cálculo de la tensión tangencial
N_{Ed}	valor de cálculo del esfuerzo axil
$M_{y,Ed}$	valor de cálculo del momento en el eje y-y
$M_{z,Ed}$	valor de cálculo del momento en el eje z-z
N_{Rd}	valor de cálculo de la resistencia a esfuerzo axil
$M_{y,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a momentos en el eje y-y
$M_{z,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a momentos en el eje z-z
s	es el paso de alternancia, la distancia entre los centros de dos agujeros consecutivos en la secuencia medida paralela al eje del elemento
p	es el espacio de los centros de los mismos agujeros medidos perpendicular al eje del elemento
n	es el número de agujeros existentes en cualquier diagonal o línea en zigzag progresivamente a través del elemento o parte del mismo
d_0	es el diámetro del agujero
e_N	desplazamiento del centro de gravedad del área eficaz A_{eff} respecto del centro de gravedad de la sección bruta del elemento
ΔM_{Ed}	incremento del momento debido al desplazamiento del centro de gravedad del área eficaz respecto del centro de gravedad de la sección bruta
A_{eff}	área eficaz de la sección
$N_{t,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a tracción
$N_{pl,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a axil de la sección bruta
$N_{u,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia última a axil de la sección neta considerando los agujeros de las uniones
A_{net}	Área neta de la sección
$N_{net,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a esfuerzos normales de la sección neta
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a compresión uniforme, de la sección
$M_{c,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a flexión alrededor del eje principal de la sección
W_{pl}	módulo resistente plástico de la sección

$W_{el,min}$	módulo resistente elástico mínimo de la sección
$W_{eff,min}$	módulo resistente mínimo de la sección eficaz
A_f	área del ala traccionada
$A_{f,net}$	área neta del ala traccionada
V_{Ed}	valor de cálculo del esfuerzo cortante
$V_{c,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a esfuerzo cortante
$V_{pl,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a cortante
A_v	área de cortante
η	coeficiente del área de cortante
S	momento estático de la sección
I	momento de inercia de la sección
A	área de la sección transversal
A_w	área de un alma
A_f	área del ala
T_{Ed}	valor de cálculo de los momentos a torsión totales
T_{Rd}	valor de cálculo de la resistencia a los momentos torsores
$T_{t,Ed}$	valor de cálculo del momento torsor de Saint Venant
$T_{w,Ed}$	valor de cálculo del momento torsor por alabeo
$\tau_{t,Ed}$	valor de cálculo de la tensión tangencial de cálculo debida a la torsión de Saint Venant
$\tau_{w,Ed}$	valor de cálculo de la tensión tangencial de cálculo debida a la torsión por alabeo
$\sigma_{w,Ed}$	valor de cálculo de la tensión normal de cálculo debida al bimomento B_{Ed}
B_{Ed}	valor de cálculo del bimomento
$V_{pl,T,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a cortante plástico reducida por la presencia de momentos torsores
ρ	coeficiente de reducción del valor de cálculo de la resistencia a flexión, considerando la existencia de cortantes
$M_{V,Rd}$	valores de cálculo de la resistencia a flexión, reducida por la presencia de esfuerzos cortantes
$M_{N,Rd}$	valores de cálculo de la resistencia a flexión, reducida por la presencia de esfuerzo axil
n	cociente entre el valor de cálculo a esfuerzo axil y la resistencia plástica a axil de la sección bruta
a	cociente área del alma – área bruta
α	parámetro para introducir el efecto de la flexión biaxial
β	parámetro para introducir el efecto de la flexión biaxial
$e_{N,y}$	desplazamiento del centro de gravedad del área eficaz respecto del centro de gravedad de la sección bruta (eje y-y)

$e_{N,z}$	desplazamiento del centro de gravedad del área eficaz respecto del centro de gravedad de la sección bruta (eje z-z)
$W_{eff,min}$	módulo resistente mínimo de la sección eficaz
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a pandeo para un elemento comprimido
χ	coeficiente de reducción por el modo de pandeo considerado
Φ	valor para determinar el factor de reducción χ
a_0, a, b, c, d	denominación de las curvas de pandeo
N_{cr}	esfuerzo axil crítico elástico para el modo de pandeo considerado calculado con las propiedades de la sección bruta
i	radio de giro según el eje considerado, calculado con las propiedades correspondientes de la sección bruta
λ_1	valor de la esbeltez para determinar la esbeltez relativa
$\bar{\lambda}_T$	esbeltez relativa para pandeo por torsión o por flexo-torsión
$N_{cr,TF}$	esfuerzo axil crítico elástico para pandeo por flexión y torsión
$N_{cr,T}$	esfuerzo axil crítico elástico para pandeo por torsión
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a flexión frente a pandeo lateral
χ_{LT}	coeficiente de reducción para pandeo lateral torsional
Φ_{LT}	valor para determinar el coeficiente de reducción χ_{LT}
α_{LT}	coeficiente de imperfección
$\bar{\lambda}_{LT}$	esbeltez adimensional para pandeo lateral torsional
M_{cr}	momento elástico crítico para pandeo lateral torsional
$\bar{\lambda}_{LT,0}$	longitud para las curvas de pandeo lateral torsional para perfiles laminados y soldados
β	coeficiente de corrección para las curvas de pandeo lateral torsional para perfiles laminados y soldados
$\chi_{LT,mod}$	coeficiente de reducción modificado para pandeo lateral torsional
f	factor de modificación para χ_{LT}
k_c	coeficiente de corrección por la distribución de momentos
Ψ	relación entre momentos extremos de un segmento
$\mathrm{L_c}$	longitud entre coacciones laterales
$\bar{\lambda}_f$	esbeltez del ala comprimidas equivalente
$i_{f,z}$	radio de giro del ala comprimida alrededor del eje débil de la sección
$I_{eff,f}$	momento de inercia del área del ala comprimida reducida sobre el eje débil de la sección
$A_{eff,f}$	área eficaz del ala de compresión
$A_{eff,w,c}$	área eficaz de la parte comprimida del alma
$\overline{\lambda_{c0}}$	parámetro de esbeltez
k_{fl}	coeficiente de corrección

$\Delta M_{y,Ed}$	momento debido al desplazamiento del centro de gravedad del eje y-y
$\Delta M_{z,Ed}$	momento debido al desplazamiento del centro de gravedad del eje z-z
χ_y	coeficiente de reducción debido al pandeo por flexión del eje y-y
χ_z	coeficiente de reducción debido al pandeo por flexión del eje z-z
k_{yy}	coeficiente de interacción
k_{yz}	coeficiente de interacción
k_{yz}	coeficiente de interacción
k_{zz}	coeficiente de interacción
$\overline{\lambda_{op}}$	esbeltez adimensional global de un componente estructural para pandeo fuera de su plano
χ_{op}	coeficiente de reducción de la esbeltez adimensional $\overline{\lambda_{op}}$
$\alpha_{ult,k}$	factor mínimo de amplificación de las cargas de cálculo para alcanzar la resistencia máxima característica de la sección más crítica
$\alpha_{cr,op}$	factor mínimo de amplificación de las cargas situadas sobre un plano para alcanzar la carga crítica elástica del componente estructural con respecto al pandeo fuera del plano
N_{Rk}	valor característico de la resistencia a compresión
$M_{y,Rk}$	valor característico de la resistencia a momento flector alrededor del eje y-y
$M_{z,Rk}$	valor característico de la resistencia a momento flector alrededor del eje z-z
Q_m	fuerza local aplicada en cada elemento estabilizado en las rótulas plásticas
L_{stable}	longitud estable del segmento
L_{ch}	longitud de pandeo del cordón
h_0	distancia de los centros de los cordones de un pilar compuesto
a	distancia entre arriostramientos de los cordones
α	ángulo entre ejes de los cordones y las triangulaciones
i_{min}	mínimo radio de giro de los ángulos
A_{ch}	área de un cordón de un pilar compuesto
$N_{ch,Ed}$	valor de cálculo del esfuerzo de un cordón en el medio de un elemento compuesto
M_{Ed}^{I}	valor de cálculo del momento máximo de primer orden en el medio de un elemento compuesto
I_{eff}	momento de inercia eficaz del área del elemento compuesto
S_v	rigidez a cortante de la triangulación usada para el enlace o del panel empresillado
n	número de planos triangulados o presillas
A_d	área de una diagonal de un elemento compuesto
d	longitud de una diagonal de un elemento compuesto
A_V	área de un montante (o elemento transversal) de un pilar compuesto
I_{ch}	momento de inercia en el plano de un cordón

I_b	momento de inercia en el plano de una presilla
μ	coeficiente de eficacia
i_y	radio de giro del eje y-y

Apéndice A

C_{my}	coeficiente para la obtención de la distribución uniforme del momento equivalente
C_{mz}	coeficiente para la obtención de la distribución uniforme del momento equivalente
C_{mLT}	coeficiente para la obtención de la distribución uniforme del momento equivalente
μ_y	coeficiente
μ_z	coeficiente
$N_{cr,y}$	esfuerzo axil crítico elástico por pandeo por flexión alrededor del eje y-y
$N_{cr,z}$	esfuerzo axil crítico elástico por pandeo por flexión alrededor del eje z-z
C_{yy}	coeficiente
C_{yz}	coeficiente
C_{yz}	coeficiente
C_{zz}	coeficiente
w_y	coeficiente
w_z	coeficiente
n_{pl}	coeficiente
$\bar{\lambda}_{max}$	máximo de $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$
b_{LT}	coeficiente
c_{LT}	coeficiente
d_{LT}	coeficiente
e_{LT}	coeficiente
Ψ_y	relación de los momentos extremos del segmento (eje $y-y$)
$C_{my,0}$	coeficiente
$C_{mz,0}$	coeficiente
a_{LT}	coeficiente
I_t	constante a torsión de Saint Venant
I_y	inercia a flexión alrededor del eje y-y
$C1$	relación entre el momento crítico de flexión (el valor mayor a lo largo del elemento) y el momento de flexión
$M_{i,Ed}(x)$	momento máximo de primer orden
$\lvert\delta_x\rvert$	desplazamiento máximo del elemento a lo largo del mismo

Apéndice B

α_s	coeficiente, s=positivo
α_h	coeficiente, h=negativo
C_m	coeficiente para la obtención de la distribución uniforme del momento equivalente

Apéndice AB

γ_G	coeficiente parcial de seguridad para cargas permanentes
G_k	valor característico de las cargas permanentes
γ_Q	coeficiente parcial de seguridad para cargas variables
Q_k	valor característico de las cargas variables

Apéndice BB

$\bar{\lambda}_{eff,v}$	esbeltez adimensional efectiva para el pandeo alrededor del eje v-v
$\bar{\lambda}_{eff,y}$	esbeltez adimensional efectiva para el pandeo alrededor del eje y-y
$\bar{\lambda}_{eff,z}$	esbeltez adimensional efectiva para el pandeo alrededor del eje z-z
L	longitud del sistema
L_{cr}	longitud de pandeo
S	resistencia a cortante proporcionada por el laminado
I_w	constante de alabeo
$C_{\vartheta,k}$	rigidez al giro de la viga producida por el arriostramiento y las uniones
K_v	coeficiente para considerar el tipo de análisis
K_ϑ	factor que tiene en cuenta las distribuciones de momentos y el tipo de coacción
$C_{\vartheta R,k}$	rigidez al giro de la unión entre la viga y el arriostramiento estabilizante suponiendo una unión rígida al elemento
$C_{\vartheta C,k}$	rigidez al giro de la unión entre la viga y el arriostramiento estabilizante
$C_{\vartheta D,k}$	rigidez al giro obtenida de un análisis de las distorsiones de la sección transversal de la viga
L_m	longitud estable entre coacciones laterales adyacentes
L_k	longitud estable entre coacciones a torsión adyacentes
L_s	longitud estable entre rótulas plásticas y coacciones a torsión adyacentes
C_l	coeficiente de modificación para distribución de los momentos
C_m	coeficiente de modificación para gradiente lineal de los momentos
C_n	coeficiente de modificación para gradiente no lineal de los momentos
a	distancia entre el centro del elemento con las rótulas plásticas y el centro del elemento de arriostramiento
B_0	coeficiente
B_1	coeficiente
B_2	coeficiente

η	cociente de valores elásticos críticos de esfuerzos axiles
i_s	radio de giro respecto del centro de gravedad del elemento arriostrado
β_t	relación entre el menor momento, en valor absoluto, en uno de los extremos del elemento y el momento mayor en el extremo opuesto
R_1	momento en un punto localizado del elemento
R_2	momento en un punto localizado del elemento
R_3	momento en un punto localizado del elemento
R_4	momento en un punto localizado del elemento
R_5	momento en un punto localizado del elemento
R_E	momento en un punto localizado del elemento
R_s	máximo valor del momento flector en cualquier punto de la longitud L_y
c	coeficiente de canto variable
h_h	canto adicional de la cartela o elemento de refuerzo
h_{max}	canto máximo de la sección en la longitud L_y
h_{min}	canto mínimo de la sección en la longitud L_y
h_s	canto vertical de la sección no acartelada
L_h	longitud de la cartela en la longitud L_y
L_y	longitud entre coacciones

1.7 Convenio para los ejes

(1) El convenio para los ejes de los elementos es:

$x - x$ - directriz del elemento

$y - y$ - eje de la sección transversal

$z - z$ - eje de la sección transversal

(2) Para elementos metálicos, el convenio aplicado para los ejes de las secciones transversales es:

- generalmente:

$y - y$ - eje de la sección paralelo a las alas

$z - z$ - eje de la sección perpendicular a las alas

- para secciones angulares:

$y - y$ - eje paralelo al lado más pequeño

$z - z$ - eje perpendicular al lado más pequeño

- cuando sea necesario:

$u - u$ - eje principal mayor (cuando no coincida con el eje $y - y$)

$v - v$ - eje principal menor (cuando no coincida con el eje $z - z$)

(3) Los símbolos utilizados para las dimensiones y los ejes de los perfiles laminados se indican en la figura A22.1.1.

(4) El convenio de ejes indicados en los subíndices de los momentos es: “Utilizar el eje sobre el cual actúa el momento”.

NOTA: Todos los criterios establecidos en este anejo se refieren a las propiedades de los ejes principales, los cuales se definen generalmente como los ejes $y-y$ y $z-z$, pero para secciones tales como angulares se definen por los ejes $u-u$ y $v-v$.

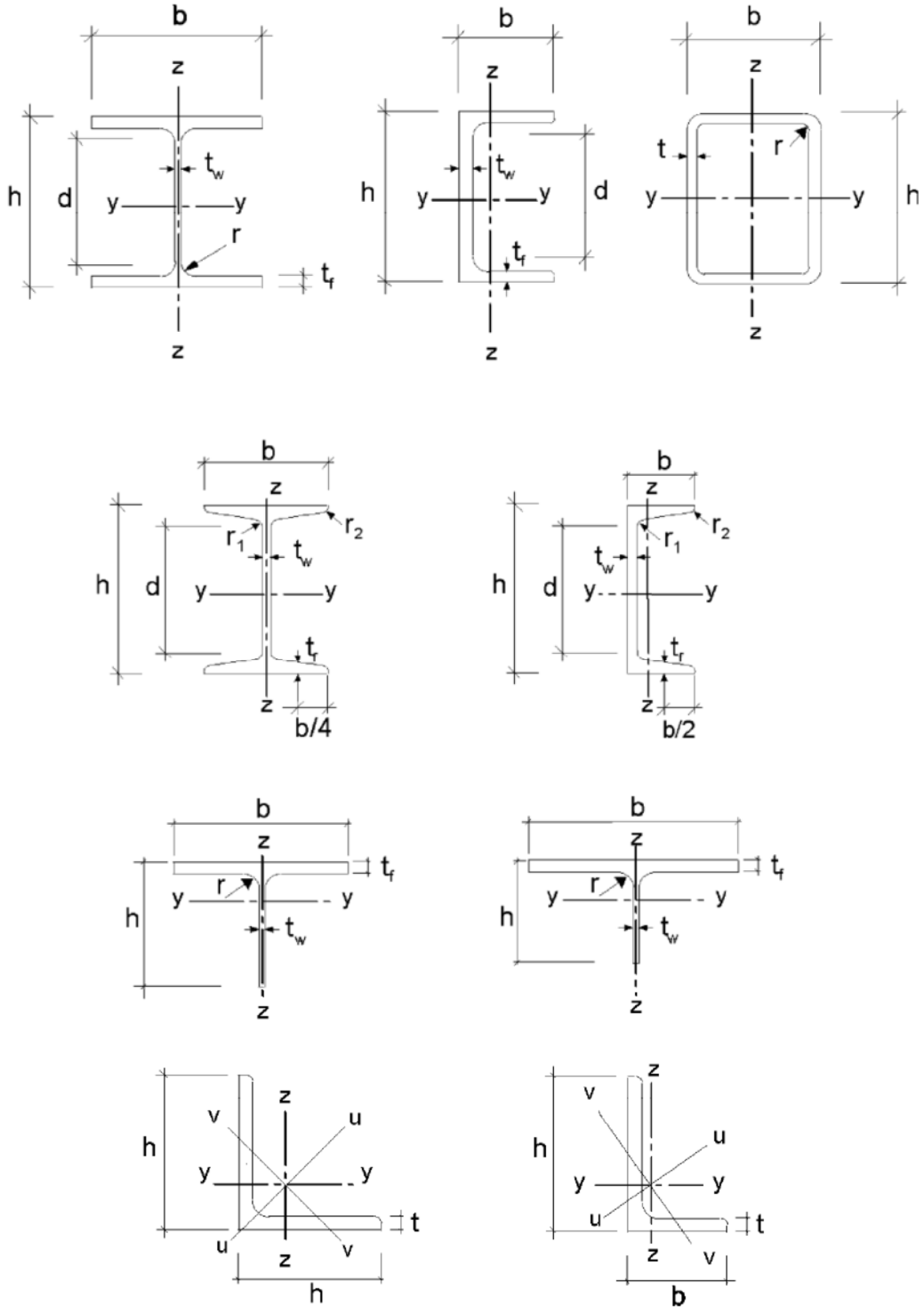


Figura A22.1.1 Dimensiones y ejes de las secciones

2. Bases de Cálculo

2.1 Requisitos

2.1.1 Requisitos básicos

(1) El proyecto de las estructuras de acero deberá estar de acuerdo con los criterios generales establecidos en el Anejo 18 o en la reglamentación específica vigente.

(2) También deberán aplicarse las disposiciones suplementarias para estructuras de acero dadas en este apartado.

(3) Deberán considerarse que se cumplen los requisitos básicos del Artículo 5 del Código Estructural donde los cálculos de estados límite se combinen con el método de los coeficientes parciales y la combinación de acciones establecidas en el Anejo 18 junto con las acciones establecidas en la reglamentación específica vigente.

(4) Deberán aplicarse los requisitos para resistencia, servicio y durabilidad establecidos en los Anejos 22 a 29.

2.1.2 Gestión de la fiabilidad

(1) Cuando se requieran distintos niveles de fiabilidad, éstos deberán ser acordes con el Capítulo 21 del Código Estructural y los Apéndices B y C del Anejo 18, con una elección apropiada de la gestión de la calidad en proyecto y ejecución, de acuerdo con los Capítulos 22 y 24 de este Código Estructural.

2.1.3 Vida útil, durabilidad y resistencia

2.1.3.1 Generalidades

(1) Dependiendo del tipo de acción que afecte a la durabilidad y a la vida útil (véase el Anejo 18), las estructuras de acero deberán:

- calcularse contra la corrosión mediante:
  - protección apropiada de la superficie (de acuerdo al Artículo 95 del Código Estructural);
  - uso de acero pasivado;
  - uso de acero inoxidable (véase el Anejo 24);
- empleo de detalles adecuados para alcanzar suficiente resistencia a fatiga (véase el Anejo 27);
- calcularse frente a desgaste;
- calcularse frente a acciones accidentales (véase la reglamentación específica vigente);
- inspeccionarse y mantenerse.

2.1.3.2 Vida útil en edificación

(1)B La vida útil deberá tomarse como el periodo de la estructura de un edificio en el que se espera que se le un determinado uso.

(2)B Para las especificaciones de la vida útil previsto para cada edificio, véase la tabla A18.2.1 del Anejo 18.

(3)B Para aquellos elementos que no puedan proyectarse para el total de la vida útil del edificio, véase el apartado 2.1.3.3(3)B.

2.1.3.3 Durabilidad de los edificios

(1)B Para garantizar la durabilidad, los edificios y sus componentes deberán calcularse tanto frente a acciones ambientales como a fatiga si fuera necesario o protegerlos de sus efectos.

(2)B En aquellos casos en los que los defectos de deterioro del material, corrosión o fatiga sean relevantes, deberán tenerse en cuenta mediante la apropiada elección del material, véanse los Anejos 24 y 28; y para detalles constructivos véase el Anejo 27, o mediante redundancia estructural y la elección de un apropiado sistema de protección ante la corrosión.

(3)B En aquellos edificios que contengan elementos que tengan que ser sustituidos (como apoyos en zonas de asientos), la posible reposición debe comprobarse como una situación de proyecto transitoria.

2.2 Principios de cálculo en estado límite

(1) La resistencia de las secciones y los elementos especificados en los Anejos 22 a 29 para los estados límite últimos como se definen en el apartado 3.3 del Anejo 18 están basados en ensayos en los que los materiales demuestran suficiente ductilidad como para aplicarles modelos de cálculo simplificados.

(2) La resistencia especificada en estos anejos podrá utilizarse en consecuencia cuando las condiciones de los materiales cumplan con el apartado 3.

2.3 Variables básicas

2.3.1 Acciones y condiciones ambientales

(1) Las acciones a tener en cuenta en el cálculo de estructuras de acero, así como la combinación de estas acciones y los coeficientes parciales deberán tomarse de la reglamentación específica vigente.

NOTA 2B: Para cargas proporcionales para aproximación por incrementos, véase el Apéndice AB.1.

NOTA 3B: Para una distribución de cargas simplificadas, véase el Apéndice AB.2.

(2) Las acciones a considerar en la fase de construcción deberán tomarse de la reglamentación específica vigente.

(3) Cuando se necesite considerar los efectos debidos a asientos diferenciales o absolutos previstos, deberán utilizarse las mejores estimaciones de las deformaciones impuestas.

(4) Los efectos producidos por asientos irregulares, deformaciones impuestas u otras formas de tensiones impuestas durante la construcción deberán tenerse en cuenta mediante su valor nominal P_k como acciones permanentes y agrupadas con otras acciones permanentes G_k como una única acción $(P_k + G_k)$.

(5) Las acciones de fatiga no definidas en la reglamentación específica vigente deberán determinarse de acuerdo al Apéndice A de Anejo 27 del Código Estructural.

2.3.2 Propiedades de los materiales y de los productos

(1) Las propiedades de los materiales de acero y otros productos de la construcción y los parámetros geométricos que vayan a utilizarse en el proyecto deberán seguir las especificaciones de este Código Estructural.

2.4 Comprobación por el método de los coeficientes parciales

2.4.1 Valores de cálculo de las propiedades de los materiales

(1) Para el proyecto de las estructuras de acero, se utilizarán los valores característicos X_k o los valores nominales X_n de las propiedades de los materiales, según se indica en los Anejos 22 a 29 del Código Estructural.

2.4.2 Valores de cálculo de los parámetros geométricos

(1) Los parámetros geométricos de las secciones y de los sistemas pueden tomarse de las normas de producto armonizadas o de los planos de ejecución del Capítulo 21 del Código Estructural, tratados como valores nominales.

(2) Los valores de cálculo de las imperfecciones especificadas en esta norma son las imperfecciones geométricas equivalentes que tienen en cuenta los efectos de:

- imperfecciones geométricas dentro de las tolerancias geométricas admitidas por este Código Estructural;
- imperfecciones estructurales debidas a fabricación y montaje;
- tensiones residuales;
- variación del límite elástico.

2.4.3 Resistencias de cálculo

(1) Para estructuras de acero, son de aplicación las ecuaciones (6.6c) o (6.6d) del Anejo 18 del Código Estructural:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} = \frac{1}{\gamma_M} R_k(\eta_1 X_{k,1};\ \eta_i X_{k,i};\ a_d) \qquad (2.1)$$

donde:

R_k es el valor característico de la resistencia particular determinada con valores nominales o característicos para las propiedades del material y dimensiones

γ_M es el coeficiente parcial de seguridad.

NOTA: Para las definiciones de η_1, X_{k1}, η_i, X_{ki} y a_d véase el Anejo 18 del Código Estructural.

2.4.4 Comprobación del equilibrio estático

(1) El formato de fiabilidad de aplicación en situaciones de cálculo equivalentes al estado de equilibrio estático, como son el cálculo de anclajes permanentes o la comprobación del levantamiento de apoyos en vigas continuas, se adoptará de acuerdo a la legislación específica vigente.

2.5 Cálculo asistido por ensayos

(1) Las resistencias R_k para esta norma deberán calcularse siguiendo el Apéndice D del Anejo 18 del Código Estructural.

(2) Para las clases recomendadas de los coeficientes parciales constantes γ_{Mi}, los valores característicos se obtendrán por la fórmula:

$$R_k = \gamma_{Mi} R_d \qquad (2.2)$$

donde:

R_d son las resistencias de cálculo de acuerdo al Apéndice D del Anejo 18 del Código Estructural

γ_{Mi} son los coeficientes de seguridad.

NOTA 1: Los valores numéricos de los coeficientes de seguridad γ_{Mi} se han determinado de forma que el valor de la resistencia característica sea de un cuantil del 5% para un número infinito de ensayos.

NOTA 2: Para valores característicos de la resistencia a fatiga y los coeficientes parciales de seguridad γ_{Mf} a fatiga, véase el Anejo 27 del Código Estructural.

NOTA 3: Para los valores característicos de la tenacidad de fractura para la comprobación de seguridad frente a rotura frágil, véase el Anejo 28 del Código Estructural.

(3) Cuando la resistencia característica de elementos prefabricados deba determinarse mediante ensayos, se seguirá el procedimiento indicado en (2).

3. Materiales

3.1 Generalidades

(1) Los valores nominales de las propiedades de los materiales presentados en este apartado deberán adoptarse como valores característicos en los cálculos de proyecto.

(2) Este anejo cubre los proyectos de estructuras de acero fabricadas con alguno de los aceros conformados que aparecen en el Artículo 83 del Código Estructural.

(3) Se tendrá en cuenta lo establecido en el Capítulo 18 de este Código Estructural.

3.2 Acero estructural

3.2.1 Propiedades del material

(1) Para acero estructural los valores nominales del límite elástico f_y y de la tensión de rotura f_u adoptados pueden ser obtenidos por alguno de los métodos siguientes:

a) adoptando los valores $f_y=R_{eH}$ y $f_u=R_m$ de acuerdo al Capítulo 18 del Código Estructural,

b) usando los valores de la tabla A22.3.1.

3.2.2 Requisitos de ductilidad

(1) Para aceros se exige una ductilidad mínima según se recoge en el apartado 82.3 del Código Estructural.

(2) Se deberá considerar que los aceros indicados en la tabla A22.3.1 cumplen estos requisitos.

3.2.3 Tenacidad de fractura

Sin perjuicio de lo establecido en el apartado 82.5.4 del Código Estructural, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos.

(1) El material deberá tener suficiente tenacidad a fractura como para evitar roturas frágiles de los elementos traccionados a la temperatura mínima de servicio estimada durante la vida útil de la estructura.

La temperatura mínima de servicio a considerar puede tomarse como la temperatura mínima absoluta registrada en el lugar de emplazamiento de la estructura durante los 50 años anteriores.

A falta de otros datos, pueden tomarse los valores publicados por el Instituto Nacional de Meteorología para la estación más cercana al emplazamiento, restando 0,5ºC por cada 100 metros de aumento de altitud, o sumando 0,5ºC por cada 100 metros de reducción de altitud.

(2) No serán necesarias más comprobaciones de la fragilidad de la fractura si se cumplen las condiciones indicadas en el Anejo 28 del Código Estructural para la temperatura mínima.

(3)B Para elementos sometidos a compresión en edificación, deberá tomarse una tenacidad mínima adecuada. Se utilizará el valor establecido en la tabla A28.2.1 del Anejo 28 del Código Estructural, para el caso de $\sigma_{Ed} = 0{,}25\ f_y(t)$, si bien se limita su empleo a aceros S 460 o de menor límite elástico.

(4) Para la selección de aceros en elementos galvanizados en caliente véase la norma UNE-EN ISO 1461.

Tabla A22.3.1 Valores nominales del límite elástico y de la tensión de rotura para acero estructural laminado en caliente y perfiles tubulares.

Norma y tipo de acero	Espesor nominal t (mm)			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
UNE-EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	440	550	410	550
UNE-EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
UNE-EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
UNE-EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	490	335	490
UNE-EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
UNE-EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
UNE-EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

3.2.4 Propiedades en el sentido del espesor

(1) Se tendrá en cuenta lo establecido en el apartado 83.2.5 de este Código Estructural.

NOTA 1: La guía para la elección de las propiedades en el sentido del espesor se proporciona en el Anejo 28 del Código Estructural.

NOTA 2B: Debe prestarse especial atención en uniones soldadas viga-columna y en chapas de testa soldadas con tracciones en el sentido del espesor.

En el caso de edificación, se podrá adoptar la equivalencia proporcionada por la tabla A22.3.2 para establecer la calidad necesaria del acero de acuerdo con la norma UNE-EN 10164 en función del valor requerido de Z_{Ed} que, a su vez, se determinará de acuerdo con el apartado 3.2(2) del Anejo 28.

Tabla A22.3.2 Elección de la clase de calidad de acuerdo con UNE-EN 10164

Valor requerido de Z_{Ed} de acuerdo con el Anejo 28	Valor requerido de Z_{Rd} expresado en términos de los valores de cálculo de Z, de acuerdo con UNE-EN 10164
$Z_{Ed} \leq 10$	-
$10 < Z_{Ed} \leq 20$	Z 15
$20 < Z_{Ed} \leq 30$	Z 25
$Z_{Ed} > 30$	Z 35

3.2.5 Tolerancias

(1) Las tolerancias de dimensiones y masa de secciones de acero laminado, perfiles tubulares estructurales y chapas deberán estar de acuerdo con este Código Estructural y con el Documento de Evaluación Europeo (DEE) correspondiente, salvo que se prescriban tolerancias más exigentes.

(2) Para componentes soldados, deberán aplicarse las tolerancias que se establecen en este Código.

(3) Se deben utilizar los valores nominales de las dimensiones para el cálculo y análisis estructural.

3.2.6 Valores de cálculo de los coeficientes de los materiales

(1) Los valores de cálculo de los coeficientes de los materiales para los aceros estructurales contemplados en este anejo deben tomarse como se indica a continuación:

- Módulo de elasticidad $E = 210.000\ N/mm^2$
- Módulo de elasticidad transversal $G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \approx 81.000 N/mm^2$
- Coeficiente de Poisson en régimen elástico $\upsilon = 0{,}3$
- Coeficiente de dilatación térmica lineal $\alpha = 12x10^{-6}[K^{-1}]$ $(para\ T \leq 100\ °C)$

NOTA: Para el cálculo de los efectos estructurales que produce una diferencia de temperaturas en estructuras mixtas según los Anejos 30 a 32 del Código Estructural, se toma como valor coeficiente de dilatación térmica lineal $\alpha = 10x10^{-6}[K^{-1}]$.

3.3 Dispositivos de unión

3.3.1 Fijaciones

(1) Los requisitos relativos a las fijaciones se establecen en el Anejo 26 del Código Estructural.

3.3.2 Material de aporte en soldaduras

(1) Los requisitos relativos al material de aporte de la soldadura se establecen en el Anejo 26 del Código Estructural.

3.4 Otros productos prefabricados para edificación

(1)B Cualquier elemento de construcción acabado o semi-acabado empleado en el proyecto de estructuras de edificios debe cumplir lo establecido en este Código Estructural.

4. Durabilidad

(1) Los requisitos fundamentales concernientes a la durabilidad se establecen en el Capítulo 19 del Código Estructural.

(2) Los medios de ejecución del tratamiento de protección realizados "*in situ*" o fuera de la obra deberán estar de acuerdo con el Artículo 95 del Código Estructural.

(3) Las zonas susceptibles a corrosión, desgaste mecánico o fatiga deben proyectarse de forma tal que la inspección, el mantenimiento y la reconstrucción puedan llevarse a cabo satisfactoriamente y que el acceso en servicio sea posible para inspección y mantenimiento.

(4)B En el caso de estructuras de edificación, normalmente no es necesario considerar la fatiga, salvo en los siguientes casos:

a) Elementos de soporte de dispositivos de elevación o cargas de rodadura.

b) Elementos sometidos a tensiones cíclicas producidas por maquinaria vibratoria.

c) Elementos sometidos a vibraciones producidas por el viento.

d) Elementos sometidos a vibraciones producidas por aglomeración de personas.

(5) Para aquellos elementos que no puedan inspeccionarse, los efectos eventuales de la corrosión deberán considerarse de manera apropiada.

(6)B La aplicación de una protección ante la corrosión no es necesaria en estructuras de edificación interiores, siempre que la humedad relativa interna no supere 80%.

5. Análisis estructural

5.1 Modelización de la estructura para el análisis

5.1.1 Modelización estructural e hipótesis básicas

(1) El análisis estructural debe basarse en modelos de cálculo de la estructura que sean adecuados para el estado límite considerado.

(2) El modelo de cálculo y las hipótesis básicas para los cálculos deben reflejar el comportamiento estructural en el estado límite correspondiente con una precisión adecuada, así como reflejar el tipo de comportamiento esperado de la sección, los elementos, las uniones y los apoyos.

(3) El método utilizado para el análisis debe ser coherente con las hipótesis de cálculo adoptadas.

(4)B Véase también el Anejo 25 del Código Estructural para el modelo de cálculo e hipótesis fundamentales para los componentes en edificación.

NOTA: Los cables y tirantes no están considerados en este anejo.

5.1.2 Modelización de uniones

(1) Generalmente, se pueden despreciar los efectos del comportamiento de las uniones sobre la distribución de las solicitaciones en una estructura, así como dichos efectos sobre las deformaciones globales de la estructura. Por el contrario, deben considerarse estos efectos cuando sean significativos (por ejemplo en el caso de uniones semi-continuas), véase el Anejo 26 del Código Estructural.

(2) Para determinar si se deben tener en cuenta en el análisis los efectos del comportamiento de las uniones, se pueden distinguir tres tipos de uniones siguientes, véase el apartado 5.1.1 del Anejo 26 del Código Estructural:

- articulada, para la cual se puede suponer que la unión no transmite momentos flectores,
- continua, para la cual se puede suponer que el comportamiento de la unión no tiene efectos sobre el análisis,
- semi-continua, para la cual es necesario tener en cuenta el comportamiento de la unión en el análisis.

(3) El Anejo 26 del Código Estructural recoge los requisitos para los distintos tipos de uniones.

5.1.3 Interacción suelo-estructura

(1) Las propiedades de deformación de los apoyos deben considerarse en el análisis cuando sus efectos sean significativos.

5.2 Análisis global

5.2.1 Efectos de la geometría deformada de la estructura

(1) En general, las solicitaciones se pueden obtener utilizando uno de los dos métodos siguientes:

- un análisis de primer orden, con la geometría inicial de la estructura, o
- un análisis de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.

(2) Los efectos de la geometría deformada (efectos de segundo orden) deben tenerse en cuenta si incrementan significativamente los efectos de las acciones o modifican significativamente el comportamiento estructural.

(3) Si el incremento de las solicitaciones o cualquier otro cambio en el comportamiento estructural producido por las deformaciones puede despreciarse, se puede utilizar el análisis de primer orden en la estructura, si se cumple el siguiente criterio:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \qquad \text{para el análisis elástico}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \qquad \text{para el análisis plástico} \qquad (5.1)$$

donde:

α_{cr} es el coeficiente por el que es necesario multiplicar las cargas de cálculo para producir una inestabilidad elástica del modo de pandeo global de la estructura

F_{Ed} es la carga de cálculo que actúa sobre la estructura

F_{cr} es la carga crítica de pandeo elástico que produce una inestabilidad del modo de pandeo global, calculada con las rigideces elásticas iniciales.

NOTA: En la ecuación (5.1) se establece un límite mayor de α_{cr} para el análisis plástico, debido a que el comportamiento estructural puede verse afectado por las propiedades no lineales de los materiales en el estado límite último (por ejemplo donde un pórtico forma rótulas plásticas con redistribución de momentos o cuando se produzcan deformaciones no lineales de uniones semirrígidas).

(4)B Los pórticos de cubiertas poco inclinadas y los pórticos planos convencionales en edificación se pueden comprobar, frente a un modo de fallo traslacional, utilizando un análisis de primer orden, si se cumple el criterio (5.1) para todas las plantas. En estas estructuras, el término α_{cr} se puede calcular con la siguiente fórmula aproximada, siempre que el esfuerzo axil de compresión en los dinteles no sea significativo.

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}}\right)\left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}}\right) \qquad (5.2)$$

donde:

H_{Ed} es el valor de cálculo de la carga horizontal total, incluyendo las fuerzas equivalentes transferidas por la planta (cortante) ejercidas sobre la estructua por encima de dicho nivel, véase el apartado 5.3.2(7)

V_{Ed} es el valor de cálculo de la carga vertical total ejercida sobre el entramado transferida por la planta (reacción de la planta)

$\delta_{H,Ed}$ es el desplazamiento horizontal relativo del nivel superior de la planta con respecto al nivel inferior de la planta, cuando la estructura está sometida a las cargas horizontales de cálculo (como el viento) y a las cargas horizontales ficticias aplicadas en cada forjado

h es la altura de la planta.

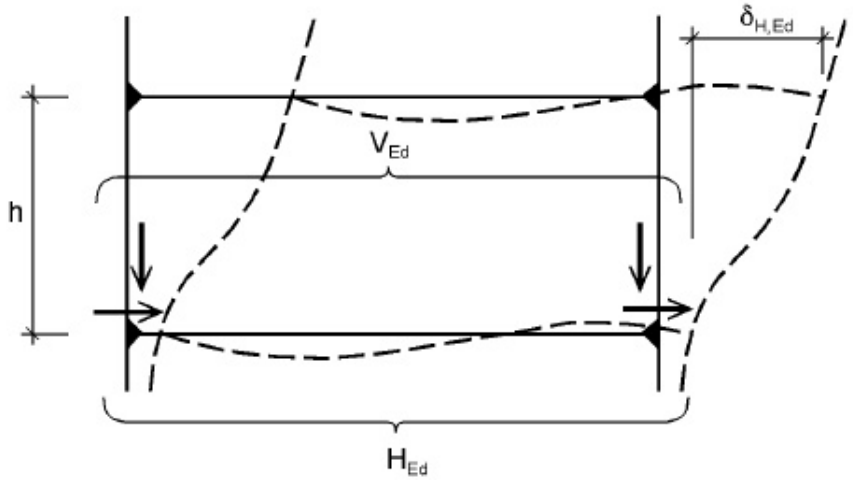


Figura A22.5.1 Notación para el apartado 5.2.1(4)

NOTA 1B: Para la aplicación de (4)B, en ausencia de información más detallada, se puede suponer que la pendiente de una cubierta es baja si no supera la relación 1:2 (26º).

NOTA 2B: Para la aplicación de (4)B, en ausencia de información más detallada, se puede suponer que el esfuerzo axil de compresión en las vigas o correas es significativo si:

$$\bar{\lambda} \geq 0{,}3\sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}} \qquad (5.3)$$

donde:

N_{Ed} es el valor de cálculo para la fuerza de compresión axial

$\bar{\lambda}$ es la esbeltez adimensional en el plano de cálculo de las vigas o correas considerado, obtenida a partir de su longitud real y bajo la hipótesis de extremos articulados.

(5) Se deben tener en cuenta los efectos del arrastre por cortante y del pandeo local sobre la rigidez si influyen de forma significativa en el análisis global, véase el Anejo 25 del Código Estructural.

NOTA: Para secciones soldadas y perfiles laminados de dimensiones similares, los efectos del arrastre por cortante pueden despreciarse.

(6) Los efectos sobre el análisis global del deslizamiento en los agujeros y otras deformaciones similares en los dispositivos de ensamblaje, tales como pernos y barras de anclaje, se deben considerar cuando sean significativos.

5.2.2 Estabilidad estructural de los pórticos

(1) Si, de acuerdo con el apartado 5.2.1, se ha considerado la deformación de la estructura, deben aplicarse los puntos (2) a (6) para considerar dichos efectos y comprobar la estabilidad estructural.

(2) La comprobación de la estabilidad de los pórticos o sus partes debe realizarse considerando las imperfecciones y los efectos de segundo orden.

(3) En función del tipo de pórtico y del tipo de análisis global, se pueden tratar los efectos de segundo orden y las imperfecciones por uno de los siguientes métodos:

a) considerando ambos en su totalidad, por medio del análisis global,

b) considerándolos en parte por el análisis global y en parte por la comprobación individual de la estabilidad de los elementos aislados, de acuerdo con el apartado 6.3,

c) para ciertos casos básicos, mediante comprobaciones individuales de la estabilidad en elementos aislados equivalentes, según se establece en el apartado 6.3, utilizando las longitudes de pandeo adecuadas con el modo de pandeo global de la estructura.

(4) Los efectos de segundo orden pueden considerarse mediante un análisis adecuado de la estructura (incluyendo procedimientos paso a paso u otros iterativos). En el caso de pórticos en los que el primer modo de pandeo traslacional sea predominante, debe realizarse un análisis elástico en primer orden, con la posterior amplificación de los efectos de las acciones correspondientes (por ejemplo los momentos flectores), por medio de coeficientes adecuados.

(5)B En pórticos de una sola planta en edificación, proyectados a partir de un análisis elástico global, se pueden considerar los efectos de segundo orden de deformación lateral debidos a cargas verticales, multiplicando las cargas horizontales H_{Ed} (como el viento), las cargas equivalentes $V_{Ed}\Phi$ debidas a las imperfecciones (véase el apartado 5.3.2(7)), así como otros posibles efectos de deformación lateral obtenidos con la teoría de primer orden, por el factor:

$$\frac{1}{1-1/\alpha_{cr}} \qquad (5.4)$$

siempre que $\alpha_{cr} \geq 3{,}0$,

donde:

α_{cr} puede calcularse de acuerdo con la fórmula (5.2) del apartado 5.2.1(4)B, siempre que la pendiente de la cubierta sea baja y la compresión en vigas o correas no sea significativa, como se define en el apartado 5.2.1(4)B.

NOTA B: Para $\alpha_{cr} < 3{,}0$ deberá realizarse un análisis de segundo orden más preciso.

(6)B Para pórticos de varias plantas, los efectos de segundo orden pueden calcularse por medio del método establecido en el punto (5)B, siempre y cuando todas las plantas del edificio sean similares en cuanto a:

- la distribución de cargas verticales,
- la distribución de cargas horizontales,
- la distribución de rigidez estructural a los efectos de las cargas horizontales.

NOTA B: Para las limitaciones de este método, véase además el apartado 5.2.1(4)B.

(7) De acuerdo con el punto (3), la estabilidad individual de los elementos debe comprobarse de acuerdo a lo que se indica a continuación:

a) si los efectos de segundo orden en los elementos y las imperfecciones locales apropiadas de los elementos (ver el apartado 5.3.4) son considerados totalmente en el análisis global de la estructura, no es necesario realizar una comprobación de la estabilidad individual de los elementos según el apartado 6.3,

b) si los efectos de segundo orden en los elementos o algunas imperfecciones locales de los elementos (por ejemplo imperfecciones del elemento para el pandeo por flexión y/o para el pandeo lateral, véase el apartado 5.3.4) no se consideran totalmente en el análisis global, deberá comprobarse la estabilidad individual de los elementos según los criterios dados en el apartado 6.3 para los efectos no incluidos en el análisis global. Esta comprobación debe considerar las solicitaciones de conectividad en los extremos extraídas del análisis global de la estructura efectuado, incluyendo cuando sea apropiado los efectos de segundo orden y las imperfecciones globales (véase el apartado 5.3.2), y la misma puede basarse en una longitud de pandeo igual a la longitud entre ejes.

(8) Cuando la estabilidad de un pórtico se evalúe mediante la comprobación con el método del soporte equivalente según el apartado 6.3, los valores de las longitudes de pandeo deben basarse en el modo de pandeo global de la estructura, teniendo en cuenta la rigidez de los elementos y de las uniones, la presencia de rótulas plásticas y la distribución de esfuerzos axiles de compresión bajo las cargas de cálculo. En este caso, los esfuerzos internos utilizados en la comprobación de resistencia se calcularán según la teoría de primer orden, sin considerar las imperfecciones.

5.3 Imperfecciones

5.3.1 Bases

(1) El análisis estructural debe considerar los efectos de las imperfecciones, incluyendo las tensiones residuales y las imperfecciones geométricas, tales como la falta de verticalidad, de rectitud, de horizontalidad o de ajuste, así como cualquier otra excentricidad mayor que las tolerancias dadas en la norma UNE-EN 1090-2 presente en las uniones de la estructura no cargada.

(2) En general, deben utilizarse las imperfecciones geométricas equivalentes, véanse los apartados 5.3.2 y 5.3.3, cuyos valores representan los posibles efectos de todos los tipos de imperfecciones, salvo si esos efectos se incluyen en las fórmulas de resistencia utilizadas para el cálculo del elemento, véase el apartado 5.3.4.

(3) Deben tenerse en cuenta las siguientes imperfecciones:

a) imperfecciones globales para los pórticos y los sistemas de arriostramiento,

b) imperfecciones locales para los elementos aislados.

5.3.2 Imperfecciones para el análisis global de pórticos

(1) La forma considerada de las imperfecciones globales y locales pueden obtenerse a partir del modo de pandeo elástico de la estructura en el plano de pandeo considerado.

(2) Deberá considerarse en la forma y sentido más desfavorable tanto el pandeo dentro del plano como el pandeo fuera del plano incluyendo el pandeo por torsión con los modos simétrico y asimétrico.

(3) Para los pórticos sensibles al pandeo en un modo traslacional, deberá tenerse en cuenta el efecto de las imperfecciones en el análisis de la estructura a través de una imperfección equivalente bajo la forma de un defecto de verticalidad inicial global y de imperfecciones locales en arco de los elementos. Las imperfecciones pueden determinarse como sigue:

a) Imperfecciones de pandeo iniciales y globales, véase la figura A22.5.2:

$$\Phi = \Phi_0 \alpha_h \alpha_m \qquad (5.5)$$

donde:

Φ_0 es el valor de base: $\Phi_0 = 1/200$

α_h es el factor de reducción por la altura h, aplicable a los soportes:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{con} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1{,}0$$

h es la altura de la estructura (en metros)

α_m es el coeficiente de reducción por el número de soportes en una fila:

$$\alpha_m = \sqrt{0{,}5\left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

m es el número de soportes en una fila, incluyendo únicamente aquellos que se encuentren solicitados por una carga vertical N_{Ed}, superior o igual al 50% del valor medio de la carga por soporte en el plano vertical considerado.

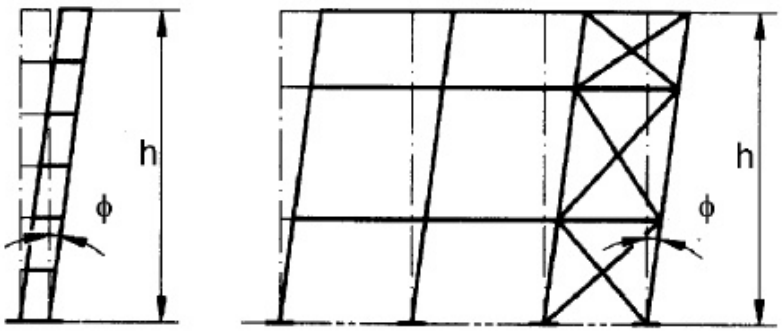


Figura A22.5.2 Imperfecciones equivalentes de verticalidad

b) imperfecciones iniciales locales en arco de los elementos para el pandeo por flexión definidas por:

$$e_0/L \qquad (5.6)$$

donde L es la longitud del elemento.

Los valores de e_0/L a utilizar se proporcionan en la tabla A22.5.1.

Tabla A22.5.1 Valores de cálculo de la imperfección inicial local por curvatura e_0/L

Curva de pandeo según la tabla A22.6.1	Análisis elástico	Análisis plástico
	e_0/L	e_0/L
a_0	$1/350$	$1/300$
a	$1/300$	$1/250$
b	$1/250$	$1/200$
c	$1/200$	$1/150$
d	$1/150$	$1/100$

(4)B Para pórticos en edificación, las imperfecciones de verticalidad se pueden despreciar cuando:

$$H_{Ed} \geq 0{,}15 V_{Ed} \qquad (5.7)$$

(5)B Para la determinación de fuerzas horizontales que se ejercen sobre un diafragma de forjado en edificación, debe aplicarse la configuración de las imperfecciones que se muestra en la figura A22.5.3, donde Φ es una imperfección traslacional obtenida a partir del apartado 5.5, suponiendo una única planta de altura h, véase (3) a).

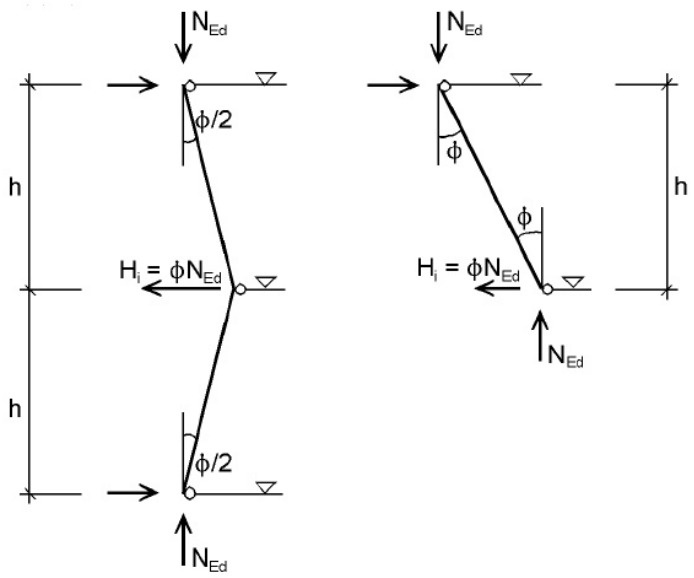


Figura A22.5.3 Configuración de las imperfecciones de verticalidad Φ para la obtención de fuerzas horizontales a nivel de un diafragma de un forjado

(6) Cuando se realiza el análisis global de la estructura para determinar las solicitaciones en extremos de barras para ser utilizados en las verificaciones de las mismas según el apartado 6.3, las imperfecciones iniciales locales en arco podrán despreciarse. Sin embargo, en el caso de estructuras sensibles a los efectos de segundo orden deben introducirse en el análisis de la estructura en adición a las imperfecciones locales en arco para cada elemento comprimido para la cual las dos condiciones siguientes se cumplen:

- al menos en un extremo hay una unión que transmita momentos

- $\bar{\lambda} > 0{,}5\sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}}$ (5.8)

donde:

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

$\bar{\lambda}$ es la esbeltez adimensional en el plano de la estructura, calculada considerando el elemento articulado en sus extremos.

NOTA: Las imperfecciones locales en arco se deben tener en cuenta en las comprobaciones de los elementos, véanse los apartados 5.2.2(3) y 5.3.4.

(7) Los efectos de las imperfecciones iniciales de verticalidad y de las imperfecciones locales en arco pueden sustituirse por sistemas equivalentes de fuerzas, introducidas en cada soporte, véanse las figuras A22.5.3 y A22.5.4.

Imperfecciones iniciales de verticalidad Imperfecciones iniciales en arco

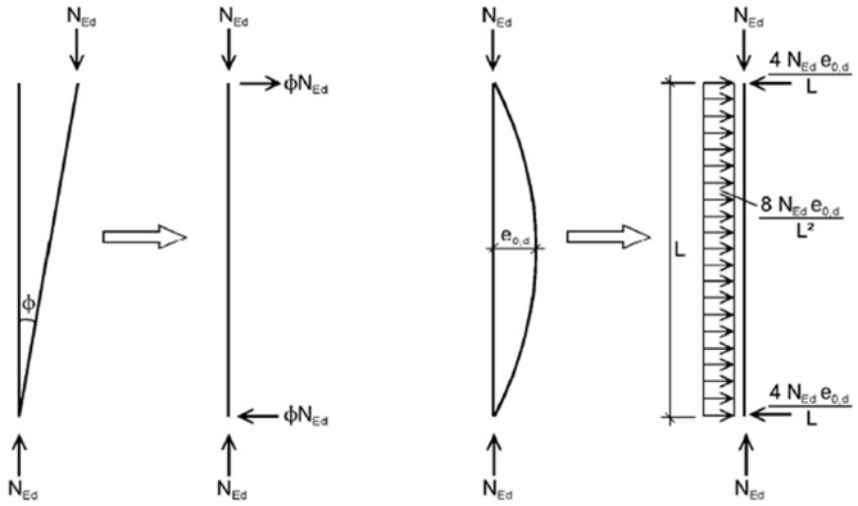
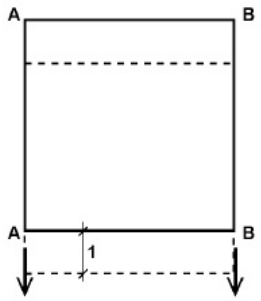


Figura A22.5.4 Sustitución de las imperfecciones iniciales por fuerzas equivalentes horizontales

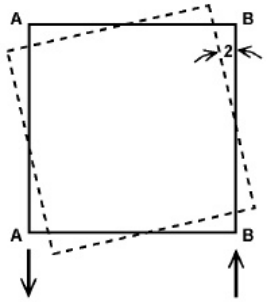
(8) Estas imperfecciones por verticalidad iniciales deben considerarse en todas las direcciones horizontales correspondientes, pero únicamente en una dirección a la vez.

(9)B Cuando se utilicen fuerzas equivalentes para el análisis de pórticos de edificios de múltiples plantas, dichas fuerzas deben aplicarse en cada nivel de forjado y de cubierta.

(10) Deben considerarse igualmente los efectos de torsión en la estructura, producidos por inclinaciones asimétricas en dos caras opuestas, véase la figura A22.5.5:



(a) Las caras A-A y B-B se desplazan en la misma dirección



(b) Las caras A-A y B-B se desplazan en direcciones opuestas

1 Deformación de traslación

2 Deformación por torsión

Figura A22.5.5 Efectos de torsión y traslacionalidad (vista en planta)

(11) Como alternativa a los puntos (3) y (6), la forma del modo crítico de pandeo elástico η_{cr} de la estructura puede aplicarse como una imperfección única global y local. La amplitud de esta imperfección puede obtenerse mediante:

$$\eta_{init} = e_0 \frac{N_{cr}}{EI \cdot \eta''_{cr,max}} \eta_{cr} = \frac{e_0}{\bar{\lambda}^2} \frac{N_{Rk}}{EI \cdot \eta''_{cr,max}} \eta_{cr} \qquad (5.9)$$

donde:

$$e_0 = \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \frac{1 - \frac{\chi \bar{\lambda}^2}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \bar{\lambda}^2} \qquad \text{para } \bar{\lambda} > 0{,}2 \qquad (5.10)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \qquad \text{es la esbeltez relativa de la estructura} \qquad (5.11)$$

α es el coeficiente de imperfección para la curva de pandeo correspondiente, véanse las tablas 6.1 y 6.2

χ es el coeficiente de reducción para la curva de pandeo correspondiente, que depende de la sección, véase el apartado 6.3.1

$\alpha_{ult,k}$ es el coeficiente mínimo por el que hay que multiplicar la configuración del axil N_{Ed} en los elementos para alcanzar la resistencia característica N_{Rk} de la sección más tensionada axialmente, sin tener en cuenta el pandeo

α_{cr} es el coeficiente mínimo por el que hay que multiplicar la configuración del axil N_{Ed} en los elementos para alcanzar el pandeo elástico crítico

M_{Rk} es la resistencia característica a flexión de la sección crítica, por ejemplo $M_{el,Rk}$ o $M_{pl,Rk}$, según corresponda

N_{Rk} es la resistencia característica a esfuerzo axil de la sección, por ejemplo $N_{pl,Rk}$

$EI\eta''_{cr,max}$ es el momento flector producido por la deformada η_{cr} en la sección crítica

η_{cr} es la deformada del modo crítico de pandeo elástico.

NOTA 1: Para el cálculo de los coeficientes de amplificación $\alpha_{ult,k}$ y α_{cr} se puede considerar que los elementos de la estructura se encuentran solicitados únicamente por los axiles de cálculo N_{Ed} resultantes de un análisis elástico de primer orden de la estructura para las cargas de cálculo.

5.3.3 Imperfecciones para el análisis de los sistemas de arriostramiento

(1) Para el análisis de los sistemas de arriostramiento utilizados para asegurar la estabilidad lateral a lo largo de las vigas o de los elementos comprimidos, los efectos de las imperfecciones deben tenerse en cuenta por medio de imperfecciones geométricas equivalentes de los elementos a estabilizar, bajo la forma de una imperfección inicial en arco:

$$e_o = \alpha_m L/500 \qquad (5.12)$$

donde:

L es el vano libre del sistema de arriostramiento y

$$\alpha_m = \sqrt{0{,}5\left(1+\frac{1}{m}\right)}$$

en la que m es el número de elementos a estabilizar.

(2) Por comodidad, los efectos de las imperfecciones iniciales en arco de los elementos a estabilizar por un sistema de arriostramiento, pueden sustituirse por una fuerza estabilizadora, como se muestra en la figura A22.5.6:

$$q_d = \sum N_{Ed}\, 8\frac{e_0+\delta_q}{L^2} \qquad (5.13)$$

donde:

δ_q es la flecha del sistema de arriostramiento en el plano de estabilización, debida a una q más todas las cargas externas calculadas en el análisis de primer orden.

NOTA: δ_q puede considerase como nula si se aplica la teoría de segundo orden.

(3) Cuando el sistema de arriostramiento sea necesario para estabilizar el ala comprimida de una viga de canto constante, la fuerza N_{Ed} en la figura A22.5.6 puede obtenerse por:

$$N_{Ed} = M_{Ed}/h \qquad (5.14)$$

donde:

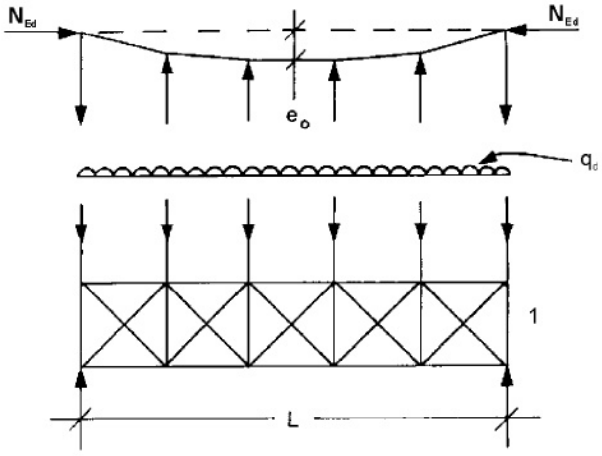
M_{Ed} es el momento máximo sobre la viga

h es el canto total de la viga.

NOTA: Deberá incluirse parte de la fuerza de compresión cuando una viga esté sometida a una compresión externa N_{Ed}.

(4) En aquellos puntos en los que la viga y elemento comprimido se unan, deberá comprobarse también que el sistema de arriostramiento es capaz de resistir una fuerza local igual a $\alpha_m N_{Ed}/100$ aplicada en él por cada viga o elemento comprimido que tenga una unión en el punto que la posea, y transmitir esa fuerza a puntos adyacentes en los que la viga o el elemento comprimido estén arriostrados, véase la figura A22.5.7.

(5) Para la comprobación descrita en el punto (4), cualquier carga exterior actuante sobre los sistemas de arriostramiento debe incluirse, pero las fuerzas debidas a la imperfección que se establece en el punto (1) pueden despreciarse.



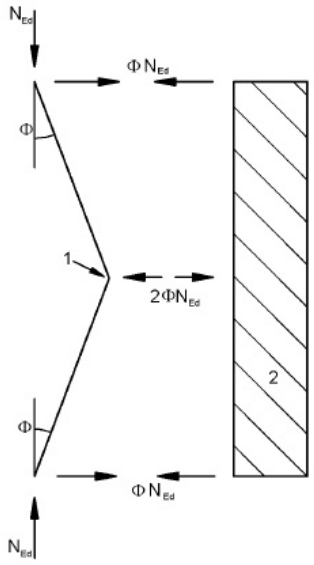
e_0 imperfección

q_d fuerza equivalente por unidad de longitud

1 sistema de arriostramiento

La fuerza N_{Ed} se supone uniforme sobre la luz L del sistema de arriostramiento. Para esfuerzos no uniformes, esta hipótesis es ligeramente conservadora.

Figura A22.5.6 Fuerza estabilizadora equivalente



$$\phi = \alpha_m \phi_0 : \phi_0 = 1/200$$

$$2\phi N_{Ed} = \alpha_m N_{Ed}/100$$

1 Unión de continuidad

2 Sistema de arriostramiento

Figura A22.5.7 Fuerzas de arriostramiento en las uniones de continuidad de elementos comprimidos

5.3.4 Imperfecciones de los elementos

(1) Los efectos de las imperfecciones locales en arco de los elementos se incluyen en las fórmulas dadas para la comprobación de la resistencia a pandeo del elemento, véase el apartado 6.3.

(2) Deben considerarse las imperfecciones e_0 de los elementos comprimidos, de acuerdo con los apartados 5.3.2(3)b, 5.3.2(5) o 5.3.2(6), cuando la estabilidad de los elementos se tenga en cuenta mediante un análisis de segundo orden, según el apartado 5.2.2(7)a).

(3) Las imperfecciones pueden adoptarse como $ke_{0,d}$ para el análisis de segundo orden, teniendo en cuenta el pandeo lateral por torsión de un elemento sometido a flexión, donde $e_{0,d}$ es la imperfección inicial en arco según el eje más débil del perfil considerado y $k = 0{,}5$. Generalmente, no es necesario incluir las imperfecciones de torsión.

5.4 Métodos de análisis considerando la no linealidad de los materiales

5.4.1 Generalidades

(1) Las solicitaciones pueden determinarse utilizando tanto:

a) un análisis global elástico, como

b) un análisis global plástico.

NOTA: Para los análisis por el método de elementos finitos, véase el Anejo 25 del Código Estructural.

(2) El análisis global elástico puede utilizarse en todos los casos.

(3) El análisis global plástico puede utilizarse únicamente cuando la estructura posea una capacidad de giro suficiente en las secciones donde se producen realmente rótulas plásticas, tanto si se trata de elementos como de uniones. Cuando la rótula plástica se produzca en un elemento, la sección del mismo debe ser bisimétrica, o simple con un plano de simetría coincidente con el plano de rotación de la rótula plástica, debiendo además satisfacer los requisitos que se establecen en el apartado 5.6. Cuando la rótula plástica se desarrolle en una unión, la unión deberá tener suficiente resistencia para asegurar que la rótula permanezca en el elemento o sea capaz de mantener la resistencia plástica con la rotación suficiente, véase el Anejo 26 del Código Estructural.

(4)B Cuando a partir de un análisis elástico, las vigas continuas en edificación presenten picos de momentos que no superen en más del 15% la resistencia plástica a flexión de la sección correspondiente, resulta posible, bajo las condiciones posteriormente enunciadas, redistribuir en el resto de la viga la parte en exceso de dichos picos de momentos, procediéndose así, de forma simplificada, a una redistribución plástica limitada. Para ello, deben satisfacerse las siguientes condiciones:

a) las solicitaciones en la estructura permanecen en equilibrio con las cargas aplicadas, y

b) las secciones de todos los elementos cuyos momentos son reducidos son de Clase 1 o 2 véase el apartado 5.5, y

c) se evita el pandeo lateral por torsión de los elementos.

5.4.2 Análisis global elástico

(1) El análisis global elástico deberá basarse en hipótesis de comportamiento tensión-deformación lineal del material a cualquier nivel de tensiones.

NOTA: Para la elección de modelos de uniones semi-rígidas véase el apartado 5.1.2.

(2) Las solicitaciones internas pueden calcularse de acuerdo con un análisis global elástico incluso si la resistencia de la sección se basa en su resistencia plástica, véase 6.2.

(3) El análisis elástico global puede también aplicarse en secciones cuyas resistencias se limiten por abolladura local, véase el apartado 6.2.

5.4.3 Análisis global plástico

(1) El análisis plástico global considera los efectos no lineales del material en el cálculo de los efectos de las acciones sobre un sistema estructural. El comportamiento deberá modelarse por uno de los siguientes métodos:

- por un análisis elasto-plástico en el que las secciones y/o uniones plastificadas se modelizan como rótulas plásticas,
- por un análisis plástico no lineal considerando la plastificación parcial de los elementos a lo largo de las zonas plásticas,
- por un análisis rígido-plástico en el que se desprecia el comportamiento elástico entre rótulas.

(2) El análisis global plástico puede aplicarse cuando los elementos tengan suficiente capacidad de giro para permitir las redistribuciones requeridas de los momentos flectores desarrollados, véanse los apartados 5.5 y 5.6.

(3) El análisis lineal plástico deberá aplicarse únicamente cuando la estabilidad de los elementos en las secciones de las rótulas plásticas pueda asegurarse, véase el apartado 6.3.5.

(4) La relación bilineal tensión-deformación indicada en la figura A22.5.8 puede utilizarse para todos los tipos de acero de construcción especificados en el apartado 3. También, podrá adoptarse una relación más precisa, véase el Anejo 25 del Código Estructural.

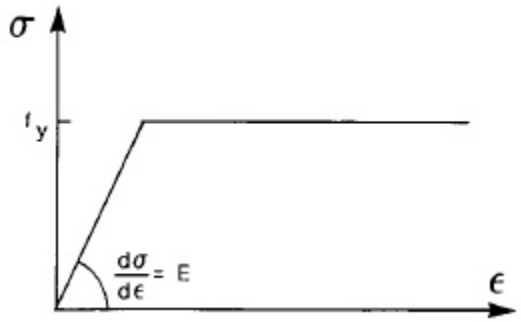


Figura A22.5.8 Relación bilineal tensión-deformación

(5) Podrá aplicarse el análisis rígido-plástico, si no se tienen que considerar los efectos de la geometría deformada (por ejemplo, efectos de segundo orden). En este caso las uniones se clasificarán únicamente por su resistencia, véase el Anejo 26 del Código Estructural.

(6) La consideración de los efectos debidos a la deformación geométrica de la estructura, así como la estabilidad global lateral de estructuras debe hacerse según los principios enunciados en el apartado 5.2.

NOTA: La resistencia máxima del pórtico cuya geometría se encuentre deformada significativamente puede alcanzarse antes que la formación de todas las rótulas del mecanismo de colapso plástico de primer orden.

5.5 Clasificación de las secciones

5.5.1 Bases

(1) La función de clasificar la sección es identificar en qué medida su resistencia y capacidad de giro se limitan por su resistencia a la abolladura local.

5.5.2 Clasificación

(1) A continuación se definen cuatro clases de secciones:

- Las secciones de Clase 1 son aquellas que pueden formar rótulas plásticas con la capacidad de giro requerida por un análisis plástico sin reducción de su resistencia.
- Las secciones de Clase 2 son aquellas que pueden desarrollar su momento resistente plástico, pero con limitada capacidad de giro por abolladura local.
- Las secciones de Clase 3 son aquellas en las que la tensión en la fibra más comprimida, suponiendo una distribución elástica de tensiones, puede alcanzar el límite elástico, pero la abolladura impide el desarrollo del momento resistente plástico.
- Las secciones de Clase 4 son aquellas cuya abolladura se producirá antes de llegar al límite elástico en una o más partes de la sección.

(2) En las secciones Clase 4, pueden aplicarse los anchos eficaces para considerar adecuadamente las reducciones de resistencias debidas a los efectos de abolladura, véase el apartado 4.4 del Anejo 25 del Código Estructural.

(3) La clasificación de las secciones depende de la relación ancho/espesor de las zonas comprimidas.

(4) Las zonas a compresión incluyen toda zona de la sección que se encuentre total o parcialmente a compresión sometida a la combinación de cargas considerada.

(5) Las diferentes zonas comprimidas de la sección (como ala o alma) pueden, en general, ser de diferentes Clases.

(6) Una sección se clasifica de acuerdo a la Clase más alta (menos favorable) de sus zonas comprimidas. Las excepciones se especifican en los apartados 6.2.1(10) y 6.2.2.4(1).

(7) De forma alternativa, la clasificación de la sección se puede definir indicando tanto la Clase del ala como la del alma.

(8) Las proporciones límites para la clasificación de las zonas comprimidas entre las Clases 1, 2 y 3 deberán obtenerse de la tabla A22.5.2. Una zona que no cumpla los límites para Clase 3 deberá tomarse como Clase 4.

(9) Excepto en lo establecido en (10), las secciones de Clase 4 pueden tomarse como secciones Clase 3, si las proporciones ancho/espesor son menores que las proporciones límites para Clase 3 obtenidas de la tabla A22.5.2, donde ε se multiplica por $\sqrt{\frac{f_y/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}}$ y donde $\sigma_{com,Ed}$ es la tensión de cálculo máxima en la zona obtenida de un análisis de primer orden o, en caso necesario, de un análisis de segundo orden.

(10) Sin embargo, cuando la resistencia a la abolladura se compruebe siguiendo el apartado 6.3, se adoptarán las proporciones límites para Clase 3 indicadas explícitamente en la tabla A22.5.2.

(11) Las secciones con alma Clase 3 y alas Clase 1 o 2, podrán clasificarse como secciones Clase 2 adoptando un alma eficaz de acuerdo con el apartado 6.2.2.4.

(12) Cuando se considere que el alma resiste únicamente esfuerzos cortantes y se asuma que no contribuye a la resistencia a flectores y axiles de la sección, la sección podrá definirse como Clase 2, 3 o 4, dependiendo únicamente de la Clase de las alas.

NOTA: Para abolladura del alma provocada por las alas, véase el Anejo 25 del Código Estructural.

5.6 Requisitos relativos a secciones para el análisis global plástico

(1) En cada emplazamiento de una rótula plástica, la sección del elemento en que se forme dicha rótula plástica deberá tener una capacidad de giro no menor que la requerida en dicho sitio por el anáisis global plástico de la estructura.

(2) En un elemento de sección constante la capacidad de rotación en la sección de una rótula plástica puede consderarse suficiente si se satisfacen los siguientes dos requisitos:

a) el elemento es de sección de Clase 1 en las rótulas plásticas;

b) en caso de existencia de fuerzas transversales superiores al 10% de la resistencia a esfuerzo cortante de la sección, según el apartado 6.2.6, aplicadas sobre el alma en la sección correspondiente a una rótula plástica, deberán disponerse rigidizadores transversales de alma a una distancia no superior a $h/2$ del emplazamiento de dicha rótula plástica, donde h es el canto de la sección transversal.

(3) Cuando la sección del elemento varíe a lo largo de su longitud, deberán cumplirse los siguientes criterios adicionales:

a) En la proximidad inmediata de las rótulas plásticas, no deberá reducirse el espesor del alma en una distancia de al menos $2d$, medida sobre la longitud del elemento, a partir del emplazamiento de la rótula plástica, donde d es la altura libre del alma en la sección de dicha rótula;

b) En la proximidad inmediata de las rótulas plásticas, las alas comprimidas deberán ser de Clase 1 en una distancia, medida sobre la longitud del elemento, a partir del emplazamiento de la rótula plástica, que no sea inferior al mayor de los siguientes valores:

- $2d$, donde d está definida en (3)a);
- la distancia medida hasta el punto en el que el momento actuando sobre la viga se reduce a $0{,}8$ veces el momento plástico resistente en la sección considerada.

c) En el resto de secciones del elemento, las alas comprimidas deberán ser de Clase 1 o 2 y las almas de Clase 1, 2 o 3.

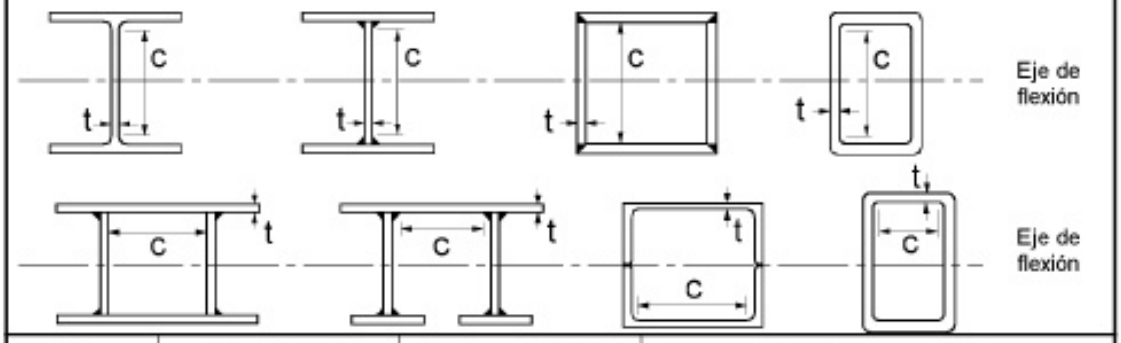
(4) En la proximidad inmediata de las rótulas plásticas, todo agujero de unión ubicado en zona traccionada deberá cumplir el apartado 6.2.5(4), en una distancia a lo largo del elemento, y a ambos lados de la rótula plástica, tal y como se ha definido en el punto (3)b).

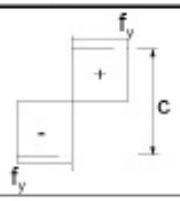
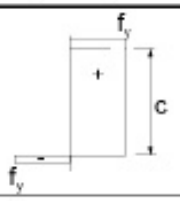
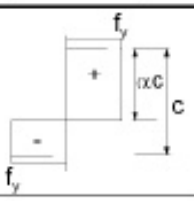
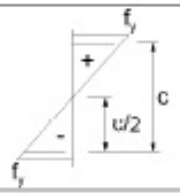
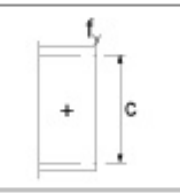
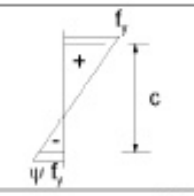
(5) Para el cálculo plástico de un pórtico reticulado, respecto a los requisitos de las secciones, la capacidad de redistribución plástica de la ley de momentos puede considerarse asegurada si los requisitos (2) a (4) se cumplen en todos los elementos donde existan rótulas plásticas, sean susceptibles de aparecer o se hallan desarrollado sometidos a cargas de cálculo.

(6) Cuando se utilice un método de análisis global plástico que permita la adecuada consideración de las leyes tensión-deformación reales sobre toda la longitud del elemento, incluyendo los efectos combinados de los fenómenos de abolladura de chapas, de pandeo de elementos aislados y de pandeo global de la estructura, no resulta necesario considerar los requisitos (2) a (5).

Tabla A22.5.2 (parte 1 de 3) Proporciones máximas ancho-espesor para zonas y elementos comprimidos

Elementos de chapa comprimidos internos



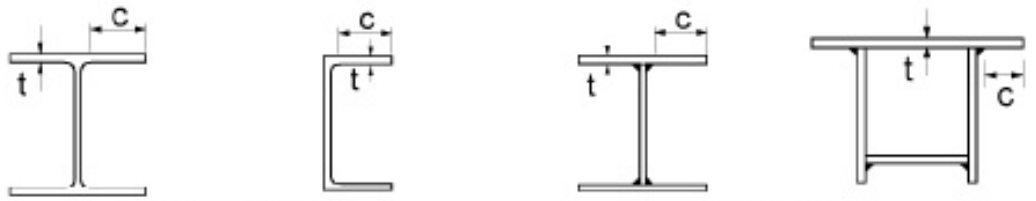
Clase	Chapa flectada	Chapa comprimida	Chapa flexo-comprimida
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)			
1	$c/t \le 72\varepsilon$	$c/t \le 33\varepsilon$	cuando $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ cuando $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \le 83\varepsilon$	$c/t \le 38\varepsilon$	cuando $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ cuando $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{41{,}5\varepsilon}{\alpha}$
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)			
3	$c/t \le 124\varepsilon$	$c/t \le 42\varepsilon$	cuando $\psi > -1$: $c/t \le \frac{42\varepsilon}{0{,}67 + 0{,}33\psi}$ cuando $\psi \le -1^{*)}$: $c/t \le 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

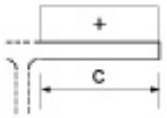
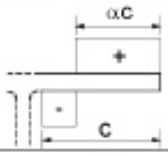
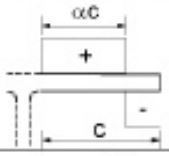
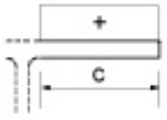
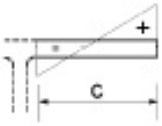
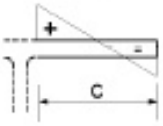
*) $\Psi \le -1$ será de aplicación cuando la tensión de compresión sea $\sigma \le f_y$ o la deformación de tracción sea $\varepsilon_y > f_y/E$.

Tabla A22.5.2 (parte 2 de 3) Proporciones máximas ancho-espesor para zonas y elementos comprimidos

Alas en vuelo



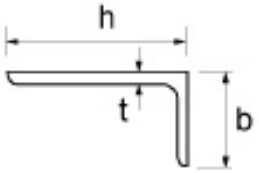
Secciones laminadas | Secciones soldadas

Clase	Chapa comprimida	Chapa flexo-comprimida	
		Extremo comprimido	Extremo traccionado
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)			
1	$c/t \le 9\varepsilon$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \le 10\varepsilon$	$c/t \le \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)			
3	$c/t \le 14\varepsilon$	$c/t \le 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ, véase el Anejo 25 del Código Estructural	

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

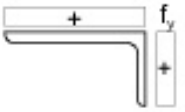
Tabla A22.5.2 (parte 3 de 3) Proporciones máximas ancho-espesor para zonas y elementos comprimidos

Angulares



Consultar análogamente "Alas en vuelo" (véase la hoja 2 de 3)

No se aplica a angulares en contacto continuo con otros componentes

Clase	Sección comprimida
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)	
3	$h/t \le 15\varepsilon$ y $\frac{b+h}{2t} \le 11{,}5\varepsilon$

Secciones huecas circulares



Clase	Sección flectada y/o comprimida
1	$d/t \le 50\varepsilon^2$
2	$d/t \le 70\varepsilon^2$
3	$d/t \le 90\varepsilon^2$
	NOTA: Para $d/t > 90\varepsilon^2$, véase la Norma UNE-EN 1993-1-6 (*)

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

(*) Las estructuras formadas por láminas queda fuera del ámbito de apliación de este Código.

6. Estados límite últimos

6.1 Generalidades

(1) Los coeficientes parciales de seguridad γ_M definidos en el apartado 2.4.3 deberán aplicarse a los distintos valores característicos de resistencia de las secciones de la forma siguiente:

- Resistencia de la sección, para cualquier Clase: γ_{M0}
- Resistencia de los elementos a inestabilidad evaluada por la comprobación del elemento: γ_{M1}
- Resistencia a fractura de secciones sometidas a tracción: γ_{M2}
- Resistencia de las uniones: Véase el Anejo 26 del Código Estructural

NOTA 1: Para otros valores numéricos recomendados en puentes véase el Anejo 29.

En el caso de edificación, los coeficientes parciales para la resistencia serán:

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

$\gamma_{M1} = 1{,}05$

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

Se podrán adoptar los coeficientes parciales $\gamma_{M0} = 1{,}0$ y $\gamma_{M1} = 1{,}0$, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

a) Tolerancias más estrictas según el Anejo 16 del Código Estructural.

b) Nivel de garantía superior 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.

c) Control de ejecución intenso según el Capítulo 24 del Código Estructural.

6.2 Resistencia de las secciones

6.2.1 Generalidades

(1) El valor de cálculo del efecto de una acción en cada sección no deberá superar la correspondiente resistencia de cálculo y, si varios efectos de acciones actúan simultáneamente, el efecto combinado no deberá superar la resistencia para tal combinación.

(2) Los efectos por arrastre por cortante y por abolladura deberán incluirse en el ancho eficaz de acuerdo con el Anejo 25 del Código Estructural. Los efectos por abolladura deberán considerarse también de acuerdo con el mismo anejo.

(3) Los valores de cálculo de la resistencia dependerán en general de la Clase de la sección.

(4) La comprobación elástica de acuerdo con la resistencia elástica podrá realizarse para toda Clases de sección siempre que se utilicen las propiedades reducidas de las secciones para la comprobación de las secciones de Clase 4.

(5) Para la comprobación elástica se podrá utilizar el siguiente criterio límite en el punto crítico de la sección salvo que se aplique otra fórmula de interacción, véanse los apartados 6.2.8 a 6.2.10.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2 \leq 1 \qquad (6.1)$$

donde:

$\sigma_{x,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión longitudinal en el punto considerado

$\sigma_{z,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión tangencial en la dirección $z-z$ en el punto considerado

τ_{Ed} es el valor de cálculo de la tensión tangencial en la dirección $y-y$ en el punto considerado.

NOTA: La comprobación, de acuerdo con (5) puede ser conservadora por excluir toda distribución plástica parcial de tensiones que se permite en el cálculo elástico. En consecuencia deberá aplicarse únicamente cuando no pueda realizarse la interacción de las resistencias N_{Rd}, M_{Rd} y V_{Rd}.

(6) La resistencia plástica de las secciones deberá comprobarse encontrando una distribución de tensiones que esté en equilibrio con los esfuerzos y los momentos sin superar el límite elástico. Esta distribución de tensiones deberá ser compatible con las deformaciones plásticas correspondientes.

(7) Para secciones de cualquier Clase, puede aplicarse como aproximación conservadora una suma lineal de relaciones de agotamiento propias a cada solicitación actuante. Se podrá aplicar este método para Clases 1, 2 o 3 sometidas a la combinación de N_{Rd}, $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$ utilizando el siguiente criterio:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \qquad (6.2)$$

donde N_{Rd}, $M_{y,Rd}$ y $M_{z,Rd}$ son valores de cálculo de la resistencia de la sección dependientes de la Clase de sección e incluyendo cualquier reducción debida a los efectos del cortante, véase el apartado 6.2.8.

NOTA: Para las secciones Clase 4 véase el apartado 6.2.9.3(2).

(8) Cuando todas las zonas comprimidas de una sección sean de Clase 1 o 2, podrá suponerse que la sección es capaz de desarrollar su resistencia plástica completa a flexión.

(9) Cuando todas las zonas comprimidas de una sección sean Clase 3, su resistencia deberá basarse en una distribución elástica de deformaciones en la sección. Las tensiones de compresión en las fibras extremas de la sección deberán limitarse al límite elástico.

NOTA: Las fibras extremas pueden suponerse en el plano medio de las alas para la comprobación al ELU. Para fatiga, véase el Anejo 27 del Código Estructural.

(10) Cuando la primera plastificación ocurra en la zona traccionada, la reserva plástica de esta zona podrá utilizarse considerando plastificación parcial al determinar la resistencia de una sección de Clase 3.

6.2.2 Propiedades de la sección

6.2.2.1 Sección bruta

(1) Las propiedades de la sección bruta pueden determinarse por las dimensiones nominales. No tendrán que reducirse los agujeros, pero sí tendrán que considerarse si son para las grandes aberturas. No se incluirán los materiales de unión.

6.2.2.2 Sección neta

(1) El área neta de una sección deberá tomarse como la sección bruta menos las reducciones por todos los agujeros y otras aberturas.

(2) Para el cálculo de las propiedades de la sección neta, la reducción para un agujero debe tomarse como el área bruta del agujero en el plano de su eje. Para agujeros avellanados deberán tomarse los márgenes apropiados para la porción avellanada.

(3) Si los agujeros no están al tresbolillo, el área total a reducir de los agujeros deberá ser la suma máxima de las áreas de los agujeros en cualquier sección perpendicular al eje del elemento (véase el plano de fallo 2 en la figura A22.6.1).

NOTA: La suma máxima denota la posición de la línea de fractura crítica.

(4) Cuando los agujeros para sujeciones estén dispuestas al tresbolillo, el área total a reducir de los agujeros deberá ser superior a:

a) la reducción de los agujeros no dispuestos al tresbolillo establecida en (3)

b) $t\left(n\, d_0 - \sum \frac{s^2}{4p}\right)$

donde:

s es el paso de tresbolillo, el espacio entre centros de agujeros consecutivos en la línea en zig-zag medido paralelo al eje del elemento

p es el espacio entre centros de agujeros medido perpendicular al eje del elemento

t es el espesor

n es el número de agujeros ampliando en cualquier diagonal o línea en zigzag progresivamente a través del elemento o parte del mismo, véase la figura A22.6.1

d_0 es el diámetro del agujero.

(5) En el ángulo u otro elemento con agujeros en más de un plano, el espaciamiento p deberá medirse a lo largo de los puntos medios del espesor del material (véase la figura A22.6.2).

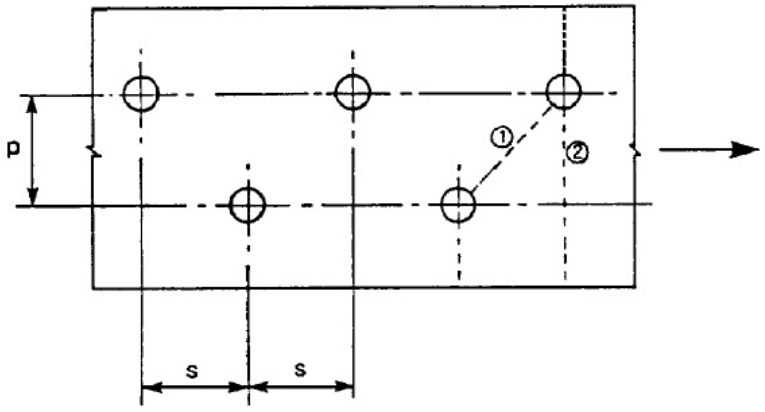


Figura A22.6.1 Agujeros al tresbolillo y líneas críticas de rotura 1 y 2.

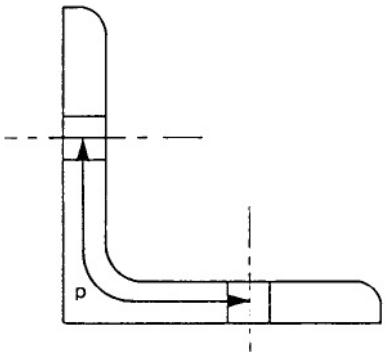


Figura A22.6.2 Angulares con pasantes en ambos lados

6.2.2.3 Efectos de arrastre por cortante

(1) El cálculo de los anchos eficaces se contempla en el Anejo 25 del Código Estructural.

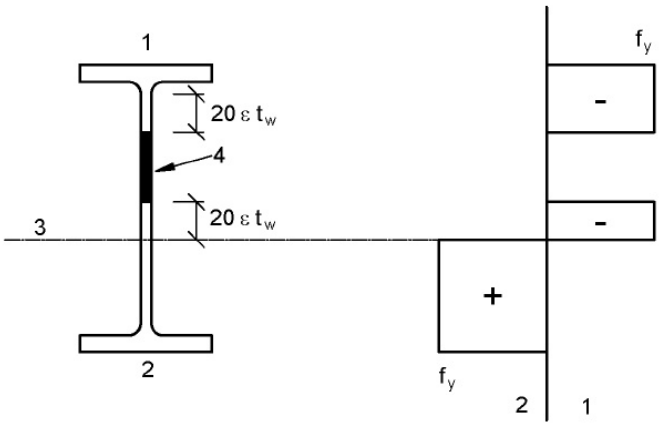
(2) En las secciones Clase 4 la interacción entre el arrastre por cortante y la abolladura deberá considerarse de acuerdo con el Anejo 25.

NOTA: Los perfiles de pared delgada conformados en frío no están considerados en este anejo.

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

(1) Cuando las secciones de alma Clase 3 y alas Clase 1 o 2 se clasifiquencomo Clase efectiva 2, véase apartado 5.5.2(11), la zona comprimida del alma deberá sustituirse por una zona de $20\varepsilon t_w$

adyacente al ala comprimida y otra zona de $20\varepsilon t_w$ adyacente a la fibra neutra plástica de la sección de acuerdo a la figura A22.6.3.



1 Compresión
2 Tracción
3 Fibra neutra plástica
4 Despreciar

Figura A22.6.3 Alma eficaz de Clase 2

6.2.2.5 Propiedades eficaces de la sección de Clase 4

(1) Las propiedades eficaces de la sección de Clase 4 deberán basarse en los anchos eficaces de las zonas comprimidas.

(2) Los perfiles de pared delgada conformados en frío no están considerados en este anejo.

(3) Los anchos eficaces de las zonas planas comprimidas deberán obtenerse del Anejo 25 del Código Estructural.

(4) Cuando la sección de Clase 4 esté sometida a una fuerza axil de compresión, deberá aplicarse el método establecido en el Anejo 25 del Código Estructural para determinar el posible desplazamiento e_N del centro de gravedad del área eficaz A_{eff} relativo al centro de gravedad de la sección bruta y el momento adicional resultante:

$$\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N \qquad (6.4)$$

NOTA: El signo del momento adicional dependerá del efecto en la combinación de esfuerzos, véase el apartado 6.2.9.3(2).

(5) Las secciones circulares huecas con sección de Clase 4 no están considerados en este anejo.

6.2.3 Tracción

(1) El valor de cálculo del esfuerzo axil de tracción N_{Ed} en toda sección debe cumplir:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.5)$$

(2) Para secciones con agujeros, la resistencia a tracción de cálculo N_{Ed} deberá tomarse como la menor de:

a) La resistencia plástica de cálculo de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.6)$$

b) La resistencia última de cálculo de la sección neta considerando los agujeros para los elementos de unión.

$$N_{u,Rd} = \frac{0{,}9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} \qquad (6.7)$$

(3) Cuando se requiera la capacidad de cálculo, véase el Anejo 26, la resistencia plástica de cálculo $N_{pl,Rd}$ (dada en el apartado 6.2.3(2)a)) deberá ser menor que la resistencia última de cálculo de la sección neta con agujeros $N_{u,Rd}$ (establecida en el apartado 6.2.3(2)b)).

(4) En las conexiones de categoría C (véase el apartado 3.4.1(1) del Anejo 26), la resistencia a tracción de cálculo $N_{t,Rd}$ en el apartado 6.2.3(1) de la sección neta con agujeros de sujeción deberá tomarse como $N_{net,Rd}$ donde:

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net}f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.8)$$

(5) Para angulares conectados por un lado, véase el apartado 3.10.3 del Anejo 26 del Código Estructural. Deberán darse disposiciones similares para otro tipo de secciones conectadas a través de alas voladas.

6.2.4 Compresión

(1) El valor de cálculo de la fuerza de compresión N_{Ed} deberá cumplir en toda sección:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.9)$$

(2) La resistencia de cálculo de la sección para compresiones uniformes $N_{c,Rd}$ deberá determinarse como sigue:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para Clases 1, 2 o 3} \qquad (6.10)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff}f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para Clase 4} \qquad (6.11)$$

(3) Los agujeros para los elementos de unión no necesitan considerarse en elementos comprimidos, siempre que aquellos estén ocupados por tales elementos de unión, exceptuando los agujeros sobredimensionados o alargados, tal como se definen en el Capítulo 21 del Código Estructural.

(4) En secciones de Clase 4 asimétricas, deberá aplicarse el método establecido en 6.2.9.3 para considerar el momento adicional ΔM_{Ed} debido a la excentricidad del centro de gravedad de la sección eficaz, véase el apartado 6.2.2.5(4).

6.2.5 Momento flector

(1) El valor de cálculo del momento flector M_{Ed} debe cumplir en cada sección:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.12)$$

donde $M_{c,Rd}$ se determinará considerando agujeros, véanse los puntos (4) a (6).

(2) El momento flector resistente de cálculo alrededor de un eje principal de la sección se determinará como:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para Clases 1 o 2} \qquad (6.13)$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min}f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para Clase 3} \qquad (6.14)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para Clase 4} \qquad (6.15)$$

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

(3) Para flexión esviada, deberán aplicarse los métodos establecidos en el apartado 6.2.9.

(4) Los taladros en el ala traccionada podrán despreciarse siempre que en ésta:

$$\frac{A_{f,net} 0{,}9 f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.16)$$

donde:

A_f es el área del ala traccionada.

NOTA: El criterio establecido en (4) permite realizar un cálculo de la capacidad (véase apartado 1.5.8).

(5) No tienen que considerarse los agujeros en la zona traccionada del alma, siempre que el límite establecido en el punto (4) se cumpla en toda la zona traccionada de la sección, abarcando el ala traccionada más la zona traccionada del alma.

(6) Excepto para agujeros sobredimensionados o avellanados, los taladros no tienen que considerarse en zonas a compresión de la sección, siempre que estén ocupados por sujeciones.

6.2.6 Cortante

(1) El cortante de cálculo V_{Ed} debe cumplir en toda sección:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.17)$$

donde:

$V_{c,Rd}$ es el cortante resistente de cálculo. Para el cálculo plástico de $V_{c,Rd}$ se tomará (2), el cortante resistente plástico de cálculo $V_{pl,Rd}$. Para el cálculo elástico de $V_{c,Rd}$ se tomará la resistencia de cálculo elástica a cortante de acuerdo con (4) y (5).

(2) En ausencia de torsión la resistencia plástica de cálculo a cortante viene dada como:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} \qquad (6.18)$$

donde:

A_v es el área de cortante.

(3) El área de cortante A_v viene establecida como:

a) Secciones de perfiles laminados I y H, cargas paralelas al alma: $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$ no menor que $\eta h_w t_w$.

b) Secciones de perfiles laminados U, cargas paralelas al alma: $A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$.

c) Secciones de perfiles laminados T con carga paralelas al alma:

- Para perfiles laminados en T: $A_v = A - bt_f + (t_w + 2r)\, t_f/2$
- Para perfiles soldados en T: $A_v = t_w (h - t_f/2)$

d) Secciones de vigas armadas I, H y cajón, cargas paralelas al alma: $\eta \sum (h_w t_w)$.

e) Secciones de vigas armadas I, H, U y cajón, cargas paralelas a las alas: $A - \sum (h_w t_w)$.

f) Secciones de perfiles rectangulares huecos laminados de espesor uniforme.

Carga paralela al canto $\frac{Ah}{b+h}$

Carga paralela al ancho $\frac{Ab}{b+h}$

g) Secciones de perfiles circulares huecos y tubos de espesor uniforme: $2A/\pi$

donde:

A es el área de la sección

b es el ancho total de la sección

h es el canto total

h_w es el canto del alma

r es el radio de acuerdo

t_f es el espesor del ala

t_w es el espesor del alma (si el espesor no es constante, se tomará como el mínimo espesor)

η véase el Anejo 25 del Código Estructural.

NOTA: η puede tomarse de forma conservadora como $1{,}0$.

(4) Para comprobar la resistencia de cálculo elástica a cortante $V_{c,Rd}$ se aplicará el siguiente criterio para cualquier punto crítico de la sección salvo que sea de aplicación la comprobación a abolladura del apartado 5 del Anejo 25 del Código Estructural:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\sqrt{3}\gamma_{M0}} \leq 1{,}0 \qquad (6.19)$$

donde τ_{Ed} puede obtenerse de:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}S}{It} \qquad (6.20)$$

donde:

V_{Ed} es el cortante de cálculo

S es el momento estático aldedor del eje que pasa por el centro de gravedad, del área de la parte de la sección transversal comprendida entre el punto en el cual se lleva a cabo la comprobación a cortante y el contorno de la sección transversal

I es el momento de inercia de la sección

t es el espesor en el punto considerado.

NOTA: La comprobación de acuerdo con (4) es conservadora al despreciar una posible distribución plástica parcial del cortante, lo cual está permitido en el cálculo elástico, véase (5). En consecuencia, únicamente deberá aplicarse cuando no pueda realizarse la comprobación de $V_{c,Rd}$ de acuerdo con la ecuación (6.17).

(5) Para secciones en I o H, la tensión tangencial en el alma podrá obtenerse de:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \quad \text{si} \quad A_f/A_w \geq 0{,}6 \qquad (6.21)$$

donde:

A_f es el área de un ala

A_w es el área del alma: $A_w = t_w h_w$.

(6) Además, deberá comprobarse la resistencia a abolladura de las almas sin rigidizadores intermedios de acuerdo con el apartado 5 del Anejo 25 del Código Estructural, si:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72\frac{\varepsilon}{\eta} \qquad (6.22)$$

Para η véase el apartado 5 del Anejo 25 del Código Estructural.

NOTA: η puede tomarse igual a 1,0 de forma conservadora.

(7) No deberán considerarse los agujeros en la comprobación del cortante excepto cuando se compruebe la resistencia a cortante de cálculo en las zonas de unión como establece el Anejo 26 del Código Estructural.

(8) Cuando el esfuerzo cortante se combine con un momento torsor, la resistencia plástica a cortante $V_{pl,Rd}$ deberá reducirse como se especifica en el apartado 6.2.7(9).

6.2.7 Torsión

(1) En los elementos sometidos a torsión, cuyas distorsiones torsionales puedan despreciarse, el momento torsor de cálculo T_{Ed} cumplirá en toda sección:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.23)$$

donde T_{Rd} es el momento torsor resistente de cálculo de la sección.

(2) El valor de cálculo del momento torsor total T_{Ed} en cualquier sección se considerará como la suma de dos efectos internos:

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed} \qquad (6.24)$$

donde:

$T_{t,Ed}$ es el valor de cálculo del momento torsor de Saint Venant

$T_{w,Ed}$ es el valor de cálculo del momento torsor por alabeo.

(3) Los valores de $T_{t,Ed}$ y $T_{w,Ed}$ en cualquier sección se determinarán a partir de T_{Ed} por análisis elástico, teniendo en cuenta las características de la sección del elemento, las condiciones de las coacciones en los apoyos y la distribución de las acciones a lo largo del elemento.

(4) Deberán considerarse las siguientes tensiones debidas a la torsión:

- Tensión tangencial $\tau_{t,Ed}$ debida a la torsión de Saint Venant $T_{t,Ed}$.
- Tensión normal $\sigma_{w,Ed}$ debida al bimomento B_{Ed} y a la tensión tangencial $\tau_{w,Ed}$ debida a la torsión por alabeo.

(5) Para la comprobación elástica se aplicará el criterio de plastificación del apartado 6.2.1(5).

(6) Para determinar el momento resistente plástico de una sección sometida a flexión y torsión, se calcularán únicamente los efectos de la torsión ocasionados por el bimomento B_{Ed} mediante el análisis elástico, véase el apartado (3).

(7) Como simplificación, los efectos de la torsión por alabeo se podrán despreciar, en el caso de que un elemento sea de sección hueca cerrada, tal como un perfil tubular. También como simplificación, los efectos de la torsión de Saint Venant se podrán despreciar, en el caso de un elemento de sección abierta, tales como I o H.

(8) Para el cálculo del momento resistente T_{Rd} de secciones huecas cerradas, el cortante resistente de cálculo de las partes individuales de la sección se tendrá en cuenta de acuerdo con el Anejo 25 del Código Estructural.

(9) Para la combinación de cortantes y momentos torsores, el cortante resistente plástico aplicado a efectos torsores deberá reducirse de $V_{pl,Rd}$ a $V_{pl,T,Rd}$ y el cortante de cálculo deberá cumplir:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.25)$$

donde $V_{pl,T,Rd}$ puede calcularse como sigue:

- Para secciones en I o H:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1{,}25\left(f_y/\sqrt{3}\right)/\gamma_{M0}}}\, V_{pl,Rd} \qquad (6.26)$$

- Para secciones en U:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1{,}25\left(f_y/\sqrt{3}\right)/\gamma_{M0}}} - \frac{\tau_{w,Ed}}{\left(f_y/\sqrt{3}\right)/\gamma_{M0}}\right] V_{pl,Rd} \qquad (6.27)$$

- Para secciones estructurales huecas:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{\left(f_y/\sqrt{3}\right)/\gamma_{M0}}\right] V_{pl,Rd} \qquad (6.28)$$

donde $V_{pl,Rd}$ está definido en el apartado 6.2.6.

6.2.8 Flexión y cortante

(1) En presencia de un esfuerzo cortante deberá considerarse su efecto en el momento resistente.

(2) Cuando el cortante sea menor que la mitad de la resistencia a cortante plástica, su efecto en el momento resistente puede despreciarse excepto cuando la abolladura por cortante reduzca la resistencia de la sección, véase el Anejo 25 del Código Estructural.

(3) De lo contrario, el momento resistente reducido deberá tomarse como la resistencia de cálculo de la sección, calculada a partir de la resistencia elástica reducida.

$$(1 - \rho) f_y \qquad (6.29)$$

Para el área de cortante, donde:

$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1\right)^2$ y $V_{pl,Rd}$ se obtiene del apartado 6.2.6(2).

NOTA: Véase también el apartado 6.2.10(3).

(4) Cuando haya torsión deberá calcularse a partir de $\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1\right)^2$, véase el apartado 6.2.7, pero se tomará como nula para $V_{Ed} \leq 0{,}5V_{pl,T,Rd}$.

(5) El momento resistente reducido plástico de cálculo considerando el cortante puede alternativamente calcularse para secciones en I con alas iguales y sometidas a flexión sobre su eje mayor como sigue:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4t_w}\right] f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \text{pero } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd} \qquad (6.30)$$

donde:

$M_{y,c,Rd}$ se obtiene de 6.2.5(2);

y $A_w = h_w t_w$.

(6) Para la interacción de flexión, cortante y cargas transversales, véase el apartado 7 del Anejo 25 del Código Estructural.

6.2.9 Flexión y axil

6.2.9.1 Secciones Clases 1 y 2

(1) En presencia de un esfuerzo axil deberá considerarse una reducción en el momento resistente plástico.

(2) En secciones Clase 1 y 2 deberá cumplirse el siguiente criterio:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \qquad (6.31)$$

donde:

$M_{N,Rd}$ es el momento resistente plástico reducido debido al esfuerzo axil N_{Ed}.

(3) Para secciones rectangulares macizas sin agujeros para tornillos $M_{N,Rd}$ deberá calcularse como:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd}\left[1 - \left(N_{Ed}/N_{pl,Rd}\right)^2\right] \qquad (6.32)$$

(4) Para secciones H, I u otras secciones con alas de doble simetría, no será necesario considerar la reducción por el efecto del esfuerzo axil en el momento resistente plástico sobre el eje $y - y$ cuando se cumplan los dos criterios siguientes:

$$N_{Ed} \leq 0{,}25 N_{pl,Rd} \text{ y} \qquad (6.33)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0{,}5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.34)$$

Para secciones H e I con doble simetría, no será necesario considerar la reducción por el efecto del esfuerzo axil en el momento resistente plástico sobre el eje $z - z$ cuando se cumpla:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.35)$$

(5) Para secciones de perfiles laminados en I o H o secciones armadas en I o H con alas iguales en las que los agujeros para tornillos no sean considerados, podrán aplicarse las siguientes aproximaciones:

$$M_{N,y,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}(1-n)}{1-0{,}5a} \qquad \text{cumpliendo } M_{N,yRd} \leq M_{pl,y,Rd} \qquad (6.36)$$

$$\text{para } n \leq a \qquad M_{N,z,Rd} = M_{pl,y,Rd} \qquad (6.37)$$

$$\text{para } n > a \qquad M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}\left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a}\right)^2\right] \qquad (6.38)$$

donde:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

$a = \frac{A-2bt_f}{A}$ con $a \leq 0{,}5$

Para secciones huecas rectangulares de espesor uniforme y para secciones cajón soldadas con alas iguales y almas iguales donde los agujeros para tornillos no sean considerados, podrán aplicarse las siguientes aproximaciones:

$$M_{N,y,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd}(1-n)}{1-0{,}5a_w} \quad \text{con } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} \qquad (6.39)$$

$$M_{N,z,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rd}(1-n)}{1-0{,}5a_f} \quad \text{con } M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd} \qquad (6.40)$$

donde:

$a_w = (A-2bt)/A$ con $a_w \leq 0{,}5$ para secciones huecas

$a_w = (A-2bt_f)/A$ con $a_w \leq 0{,}5$ para secciones cajón soldadas

$a_f = (A-2ht)/A$ con $a_f \leq 0{,}5$ para secciones huecas

$a_f = (A-2bt_w)/A$ con $a_f \leq 0{,}5$ para secciones cajón soldadas

(6) En flexión esviada se aplicarán los siguientes criterios:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Ed}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Ed}}\right]^{\beta} \leq 1 \qquad (6.41)$$

donde α y β son constantes que, de manera conservadora, pueden tomarse igual a la unidad, o bien obtenerse de:

- Secciones H e I:

  $\alpha = 2; \beta = 5n$ con $\beta \geq 1$

- Secciones circulares huecas:

  $\alpha = 2$; $\beta = 2$; $M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = M_{pl,Rd}\,(1\text{-}n^{1,7})$

- Secciones rectangulares huecas:

  $\alpha = \beta = \frac{1{,}66}{1-1{,}13n^2}$ con $\alpha = \beta \leq 6$

  donde:

  $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$

6.2.9.2 Secciones Clase 3

(1) En ausencia de esfuerzo cortante, para secciones Clase 3 la tensión normal máxima deberá satisfacer el criterio:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.42)$$

donde $\sigma_{x,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión normal local debida al momento y al axil teniendo en cuenta los agujeros para tornillos cuando corresponda, véanse los apartados 6.2.3, 6.2.4 y 6.2.5.

6.2.9.3 Secciones Clase 4

(1) En ausencia de esfuerzo cortante, para secciones Clase 4 la tensión longitudinal máxima $\sigma_{x,Ed}$ calculada utilizando la sección transversal reducida (véase el apartado 5.5.2(2)) deberá cumplir:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (6.43)$$

donde $\sigma_{x,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión normal debida al momento y al axil teniendo en cuenta los taladros para tornillos cuando corresponda, véanse los apartados 6.2.3, 6.2.4 y 6.2.5.

(2) Como alternativa al punto (1), se puede utilizar el siguiente criterio simplificado:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}+N_{Ed}e_{Ny}}{W_{eff,y,min}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed}+N_{Ed}e_{Nz}}{W_{eff,z,min}f_y/\gamma_{M0}} \leq 1 \qquad (6.44)$$

donde:

A_{eff} es el área efectiva de la sección bajo una compresión uniforme

$W_{eff,min}$ es el módulo efectivo de la sección (correspondiente a la fibra de máxima tensión elástica) de la sección sometida únicamente a la acción de un momento en el eje correspondiente

e_N es el desplazamiento del centro de gravedad correspondiente cuando la sección está únicamente bajo compresión, véase 6.2.2.5(4).

NOTA: Los signos de N_{Ed}, $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ y $\Delta M_i = N_{Ed}e_{Ni}$ dependerán de la combinación de las correspondientes tensiones normales.

6.2.10 Flexión, cortante y axil

(1) En presencia de esfuerzo cortante y axil, deberá considerarse una reducción por el efecto combinado de axil y cortante en el momento resistente.

(2) Si el valor de cálculo del cortante V_{Ed} no supera el 50% del cortante resistente plástico $V_{pl,Rd}$, no es necesario realizar las reducciones de las resistencias definidas para flexión y axil en el apartado 6.2.9, excepto donde la abolladura por cortante reduzca la resistencia de la sección, véase el Anejo 25 del Código Estructural.

(3) Cuando el V_{Ed} supere el 50% del $V_{pl,Rd}$, la resistencia de cálculo de la sección ante combinaciones de momentos y axiles deberá calcularse utilizando el límite elástico reducido.

$$(1-\rho)f_y \qquad (6.45)$$

para el área de cortante donde:

$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}-1}\right)^2$ y $V_{pl,Rd}$ se obtiene del apartado 6.2.6(2).

NOTA: En lugar de reducir el límite elástico se puede reducir el espesor de la placa de la parte correspondiente de la sección.

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) Los elementos comprimidos deberán comprobarse a pandeo como sigue:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.46)$$

donde:

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

$N_{b,Rd}$ es la resistencia de cálculo a pandeo del elemento comprimido.

(2) Para elementos con sección asimétrica de Clase 4 deberá considerarse el incremento de momento ΔM_{Ed} debido a la excentricidad del axil respecto del centro de gravedad de la sección efectiva, véase también el apartado 6.2.2.5(4), y la interacción deberá cumplir con los apartados 6.3.4 o 6.3.3.

(3) La resistencia de cálculo a pandeo de un elemento comprimido deberá determinarse como:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \qquad \text{para secciones Clases 1, 2 o 3} \qquad (6.47)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \qquad \text{para secciones Clases 4} \qquad (6.48)$$

donde χ es el coeficiente de reducción del modo de pandeo correspondiente.

NOTA: En la determinación de la resistencia a pandeo de los elementos con sección variable a lo largo del elemento o con una distribución no uniforme del esfuerzo de compresiones, podrá realizarse un análisis de segundo orden de acuerdo con el apartado 5.3.4(2). Para el pandeo exterior al plano véase 6.3.4.

(4) No será necesario considerar los agujeros para tornillos en los extremos de los pilares en la determinación del A y A_{eff}.

6.3.1.2 Curvas de pandeo

(1) Para la compresión axial en elementos, el valor de χ para la esbeltez adimensional apropiada $\bar{\lambda}$, deberá determinarse de la curva de pandeo correspondiente de acuerdo con:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \qquad \text{pero} \qquad \chi \leq 1{,}0 \qquad (6.49)$$

donde:

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right]$$

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$ para secciones de Clase 1, 2 y 3

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$ para secciones de Clase 4

α es el coeficiente de imperfección

N_{cr} es la fuerza crítica elástica para el modo de pandeo considerado basado en las propiedades de la sección bruta.

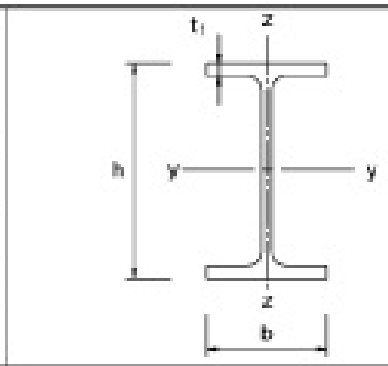
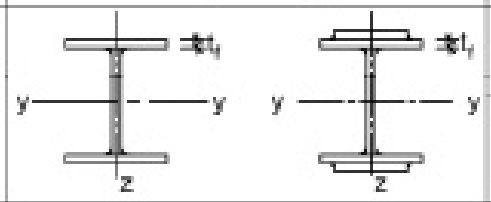
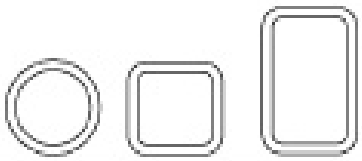
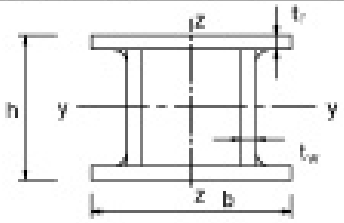
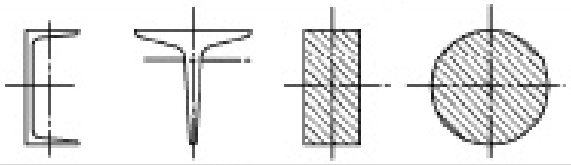
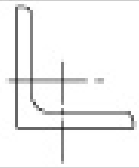
(2) El coeficiente de imperfección α correspondiente a la curva de pandeo considerada deberá obtenerse de las tablas 6.1 y 6.2.

Tabla A22.6.1 Coeficientes de imperfección para las curvas de pandeo					
Curva de pandeo	a_0	a	b	c	d
Coeficiente de imperfección α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

(3) Los valores del coeficiente de reducción χ para la esbeltez adimensional correspondiente $\bar{\lambda}$ podrá obtenerse de la figura A22.6.4.

(4) Para esbelteces $\bar{\lambda} \leq 0{,}2$ o para $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0{,}04$ los efectos del pandeo pueden despreciarse y únicamente se aplicarán las comprobaciones de sección.

Tabla A22.6.2 Elección de las curvas de pandeo para una sección

Sección transversal		Límites		Pandeo alrededor del eje	Curva de pandeo: S 235, S 275, S 355, S 420	Curva de pandeo: S 460
Secciones de perfiles laminados		h/b > 1,2	$t_f \leq 40$ mm	y – y z – z	a b	a_0 a_0
			40 mm < $t_f \leq 100$	y – y z – z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	$t_f \leq 100$ mm	y – y z – z	b c	a a
			$t_f > 100$ mm	y – y z – z	d d	c c
Secciones en I de vigas soldadas		$t_f \leq 40$ mm		y – y z – z	b c	b c
		$t_f > 40$ mm		y – y z – z	c d	c d
Secciones huecas		Acabados en caliente		cualquiera	a	a_0
		Conformados en frío		cualquiera	c (*)	c
Secciones en cajón de vigas soldadas		En general (excepto el caso del recuadro inferior)		cualquiera	b	b
		Soldaduras gruesas: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		cualquiera	c	c
Secciones en U o en simple T y secciones macizas				cualquiera	c	c
Secciones de perfiles de angulares				cualquiera	b	b

(*) Para perfiles huecos conformados en frío que acrediten mediante la posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido que el perfil hueco y la materia prima de partida son del mismo tipo de acero, se permite el uso de la curva de pandeo b.

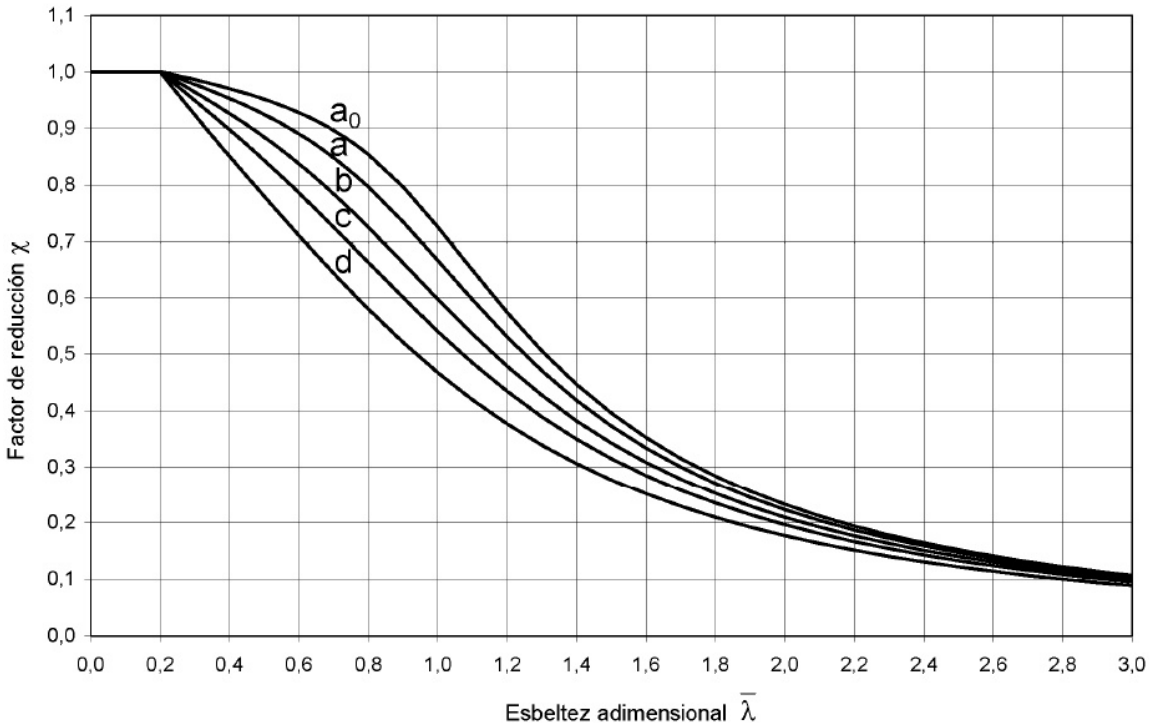


Figura A22.6.4 Curvas de pandeo

6.3.1.3 Esbeltez para el pandeo por flexión

(1) La esbeltez adimensional viene dada por:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\lambda_1}$$ para secciones de Clase 1, 2 y 3 (6.50)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff}f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\lambda_1}$$ para secciones de Clase 4 (6.51)

donde:

L_{cr} es la longitud de pandeo en el plano de pandeo considerado

i es el radio de giro alrededor del eje considerado, determinado a partir de las propiedades de la sección bruta.

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93{,}9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \qquad (f_y \text{ en } N/mm^2)$$

NOTA B: Para el pandeo elástico de componentes de estructuras de edificación véase el Apéndice BB.

(2) Para el pandeo por flexión, deberá elegirse la curva de pandeo apropiada de acuerdo con la tabla A22.6.2.

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

(1) Para elementos con secciones abiertas se considerará la posibilidad de que la resistencia a pandeo por torsión y por torsión y flexión pueda ser menor que su resistencia a pandeo por flexión.

(2) La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_T$ para pandeo por torsión y por torsión y flexión deberá tomarse como:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad \text{para secciones de Clase 1, 2 y 3} \qquad (6.52)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff}f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para secciones de Clase 4} \qquad (6.53)$$

donde:

$N_{cr} = N_{cr,TF}$ con $N_{cr} < N_{cr,T}$

$N_{cr,TF}$ es el esfuerzo para pandeo elástico por torsión y flexión

$N_{cr,T}$ es el esfuerzo para pandeo elástico por torsión.

(3) Para el pandeo por torsión y por torsión y flexión se deberá determinar la curva de pandeo apropiada de la tabla A22.6.2 considerando la curva correspondiente al eje $z - z$.

6.3.2 Elementos de canto constante a flexión

6.3.2.1 Resistencia a pandeo

(1) Un elemento no arriostrado lateralmente sometido a flexión alrededor de su eje fuerte deberá comprobarse a pandeo lateral según:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.54)$$

donde:

M_{Ed} es el momento de cálculo

$M_{b,Rd}$ es el momento resistente de cálculo a pandeo.

(2) Las vigas con suficiente arriostramiento en el ala comprimida no son susceptibles de pandear lateralmente. Además, las vigas con ciertos tipos de secciones, tales como secciones cuadradas o circulares huecas, secciones prefabricadas tubulares o cajón no son susceptibles de pandear lateralmente.

(3) El momento resistente de cálculo a pandeo de una viga no arriostrada lateralmente deberá tomarse como:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (6.55)$$

donde:

W_y es el módulo resistente de la sección:

- $W_y = W_{pl,y}$ para secciones de Clase 1 o 2
- $W_y = W_{el,y}$ para secciones de Clase 3
- $W_y = W_{eff,y}$ para secciones de Clase 4

χ_{LT} es el coeficiente de reducción para pandeo lateral.

NOTA 1: En la determinación de la resistencia a pandeo de las vigas con secciones variables podrá realizarse un análisis de segundo orden de acuerdo con el apartado 5.3.4(3). Para pandeo fuera del plano véase también el apartado 6.3.4.

NOTA 2B: Para pandeo en componentes de estructuras de edificación véase también el Apéndice BB.

(4) En la determinación de W_y, no será necesario tener en cuenta los agujeros para tornillos de los extremos de la viga.

6.3.2.2 Curvas de pandeo lateral por torsión. Caso general

(1) Salvo otras especificaciones, véase el apartado 6.3.2.3, para elementos sometidos a flexión de sección constante, el valor de χ_{LT} para la esbeltez adimensional correspondiente $\bar{\lambda}_{LT}$ deberá determinarse como:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \qquad \text{siendo} \qquad \chi_{LT} \leq 1{,}0 \qquad (6.56)$$

donde:

$$\Phi_{LT} = 0{,}5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$$

α_{LT} es el coeficiente de imperfección

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

M_{cr} es el momento crítico elástico de pandeo lateral.

(2) M_{cr} se obtendrá considerando las propiedades de la sección bruta y teniendo en cuenta las condiciones de carga, la distribución real del momento y los arriostramientos laterales.

Los valores del coeficiente de imperfección α_{LT}se establecen en la tabla A22.6.3.

Tabla A22.6.3 Valores recomendados para el factor de imperfección para las curvas de pandeo lateral por torsión

Curva de pandeo	a	b	c	d
Coeficiente de imperfección α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Las recomendaciones para la curva de pandeo vienen establecidas en la tabla A22.6.4.

Tabla A22.6.4 Valores recomendados para la curva de pandeo lateral de secciones según ecuación (6.56)

Sección transversal	Límites	Curva de pandeo
Secciones laminadas en I	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	a b
Secciones soldadas en I	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	c d
Otras secciones	-	d

(3) Los valores del coeficiente de reducción χ_{LT} para la esbeltez adimensional apropiada $\bar{\lambda}_{LT}$ puede obtenerse de la figura A22.6.4.

(4) Para esbelteces $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$(véase el apartado 6.3.2.3) o para $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}{}^2$ (véase el apartado 6.3.2.3) los efectos del pandeo lateral pueden despreciarse y aplicar únicamente las comprobaciones de sección.

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

(1) Para secciones laminadas o soldadas equivalentes sometidas a flexión, los valores de χ_{LT} para la esbeltez adimensional correspondiente pueden determinarse según:

(6.57) $$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}{}^2 - \beta\bar{\lambda}_{LT}{}^2}} \quad \text{, siendo} \quad \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1{,}0 \\ \chi_{LT} \leq \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}{}^2} \end{cases}$$

$$\Phi_{LT} = 0{,}5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}\right) + \beta\bar{\lambda}_{LT}{}^2\right]$$

Los parámetros para la determinación de χ_{LT} en pandeo lateral para secciones transversales de perfiles laminados o secciones soldadas equivalentes utilizando la ecuación 6.57 tendrán los siguientes valores:

$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0{,}4$ (valor máximo).

$\beta = 0{,}75$ (valor mínimo).

Se utilizarán las curvas de pandeo en función de la tabla A22.6.5.

Tabla A22.6.5 Elección de la curva de pandeo lateral para secciones transversales utilizando la ecuación 6.57

Sección transversal	Límites	Curva de pandeo
Secciones en I laminadas	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Secciones en I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

(2) Para tener en cuenta la distribución del momento flector entre los puntos de arriostramiento lateral de los elementos, el coeficiente de reducción puede modificarse como sigue:

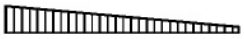
$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{siendo} \quad \begin{cases} \chi_{LT,mod} \leq 1 \\ \chi_{LT,mod} \leq \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}{}^2} \end{cases} \qquad (6.58)$$

donde:

$f = 1 - 0{,}5(1 - k_c)\left[1 - 2{,}0(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}8)^2\right]$ siendo $f \leq 1{,}0$

k_c es un factor de corrección de acuerdo con la tabla A22.6.6.

Tabla A22.6.6 Coeficientes de corrección k_c

Distribución de momentos	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1{,}33 - 0{,}33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

6.3.2.4 Métodos simplificadosde comprobación de vigas con arriostramientos laterales en edificios

(1)B Los elementos con arriostramiento lateral puntual del ala comprimida no son susceptibles al pandeo lateral si la longitud L_c entre arriostramientos o la esbeltez resultante $\bar{\lambda}_f$ del ala comprimida equivalente cumple:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{k_c L_c}{i_{f,z}\lambda_1} \leq \overline{\lambda_{c0}} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \qquad (6.59)$$

donde:

$M_{y,Ed}$ es el valor de cálculo del momento flector máximo entre puntos de arriostramiento

$M_{c,Rd} = W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$

W_y es el módulo resistente de la sección correspondiente al ala comprimida

k_c es el factor de corrección de la esbeltez para una distribución del momento entre arriostramientos, véase la tabla A22.6.6

$i_{f,z}$ es el radio de giro del ala comprimida equivalente respecto del eje débil de la sección, formada por el ala comprimida más $1/3$ de la parte comprimida del área del alma

$\overline{\lambda_{c0}}$ es el límite de esbeltez del ala comprimida equivalente, cuyo límite se define como $\bar{\lambda}_{c0} = \bar{\lambda}_{LT,0} + 0{,}1 = 0{,}5$. Está definida como:

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93{,}9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ en } N/mm^2)$$

NOTA 1B: Para secciones Clase 4 $i_{f,z}$ podrá tomarse como:

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{eff,f}}{A_{eff,f} + 1/3A_{eff,w,c}}}$$

donde:

$I_{eff,f}$ es el momento de inercia del área del ala comprimida sobre el eje débil de la sección

$A_{eff,f}$ es el área eficaz del ala de compresión

$A_{eff,w,c}$ es el área eficaz de la parte comprimida del alma.

(2)B Si la esbeltez del ala comprimida $\bar{\lambda}_f$ supera el límite establecido en el punto (1)B, el momento resistente a pandeo lateral de cálculo podrá tomarse como:

$$M_{b,Rd} = k_{fl}\chi M_{c,Rd} \quad \text{siendo } M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd} \qquad (6.60)$$

donde:

χ es el coeficiente de reducción del ala comprimida equivalente determinado con $\bar{\lambda}_f$

k_{fl} es el factor de corrección que tiene en cuenta que el método del ala comprimida equivalente es conservador. El valor a utilizar será $k_{fl} = 1{,}10$.

(3)B Las curvas de pandeo utilizadas en el punto (2)B deberán tomarse como:

- curva d para secciones soldadas que cumplan $\frac{h}{t_f} \leq 44\varepsilon$
- curva c para el resto de secciones

donde:

h es el canto total de la sección

t_f es el espesor del ala comprimida.

NOTA B: Para pandeo lateral de componentes de estructuras en edificación arriostradas véase también el Apéndice BB.3.

6.3.3 Elementos de sección constante sometidos a flexión y compresión

(1) Salvo que se realice un análisis de segundo orden aplicando las imperfecciones establecidas en el apartado 5.3.2, la estabilidad de los elementos de sección constante con doble simetría no susceptibles a deformaciones por torsión, deberá comprobarse como indican las siguientes disposiciones, donde se distingue entre:

- elementos no susceptibles a deformaciones por torsión, por ejemplo secciones circulares huecas o con torsión impedida,
- elementos susceptibles a deformaciones por torsión, por ejemplo elementos con secciones abiertas o con torsión no impedida.

(2) Además, la resistencia de la sección en cada extremo del elemento debe satisfacer los requisitos establecidos en el apartado 6.2.

NOTA 1: La fórmula de interacción está basada en el modelo de elementos de un vano simplemente apoyados y con o sin arriostramiento lateral continuo, sometido a compresiones, momentos en los extremos y/o cargas transversales.

NOTA 2: En el caso de que las condiciones de aplicación expresadas en los puntos (1) y (2) no se cumplan, véase el apartado 6.3.4.

(3) Para elementos de sistemas estructurales, la comprobación de la resistencia podrá realizarse en base a elementos individuales de un solo vano extraídos del sistema. Los efectos de segundo orden de sistemas traslacionales (efectosP-Δ)se tendrán en cuenta tanto por los momentos en los extremos del elemento como mediante las longitudes apropiadas de pandeo que correspondan, véanse los apartados 5.2.2(3)c) y 5.2.2 (8).

(4) Los elementos sometidos a la combinación de compresión y flexión deberán cumplir:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y,Ed}+\Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z,Ed}+\Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \qquad (6.61)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y,Ed}+\Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z,Ed}+\Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \qquad (6.62)$$

donde:

N_{Ed}, $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$ son los valores de cálculo del esfuerzo de compresión y de los momentos máximos alrededor de los ejes $y-y$ y $z-z$ a lo largo del elemento respectivamente

$\Delta M_{y,Ed}$ y $\Delta M_{z,Ed}$ son los momentos debidos al desplazamiento del centro de gravedad de acuerdo con el apartado 6.2.9.3 para secciones Clase 4, véase la tabla A22.6.7

χ_y y χ_z son los coeficientes de reducción de pandeo por flexión según el apartado 6.3.1

χ_{LT} es el coeficiente de reducción de pandeo lateral según el apartado 6.3.2

k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} y k_{zz} son los coeficientes de interacción.

Tabla A22.6.7 Valores para $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ y $\Delta M_{i,Ed}$

Clase	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	Wpl,y	Wpl,y	Wel,y	$Weff,y$
W_z	Wpl,z	Wpl,z	Wel,z	$Weff,z$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y}N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z}N_{Ed}$

NOTA: Para elementos no susceptibles a la deformación por torsión χ_{LT} sería $\chi_{LT} = 1{,}0$.

(5) Los coeficientes de interacción k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} y k_{zz} dependerán del método elegido. Los valores de estos coeficientes pueden obtenerse del Apéndice A (método alternativo 1) o del Apéndice B (método alternativo 2).

NOTA: Como simplificación podrán realizarse las comprobaciones únicamente en régimen elástico.

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

(1) El siguiente método podrá aplicarse cuando los métodos establecidos en los apartados 6.3.1, 6.3.2 y 6.3.3 no sean de aplicación. Permite la comprobación de la resistencia a pandeo lateral por torsión y por flexión de componentes estructurales tales como:

- elementos individuales, de sección compuesta o no, de sección constante o no, con condiciones de apoyos complejas o no, o
- pórticos planos o subestructuras compuestas por tales elementos, sometidos a compresiones y/o flexión uniaxial en el plano, pero sin rótulas plásticas.

(2) La resistencia global a pandeo fuera del plano de todo componente estructural conforme al punto (1) podrá verificarse comprobando que:

$$\frac{\chi_{op}\alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1{,}0 \qquad (6.63)$$

donde:

$\alpha_{ult,k}$ es el coeficiente mínimo por el que hay que multiplicar las cargas de cálculo para alcanzar la resistencia máxima característica de la sección más crítica del componente estructural considerando su comportamiento en el plano sin tener en cuenta el pandeo por flexión o torsión, pero sí todos los efectos debidos a las deformaciones geométricas dentro del plano y las imperfecciones globales y locales cuando corresponda

χ_{op} es el factor de reducción para la esbeltez adimensional $\overline{\lambda_{op}}$, véase el punto (3), para tener en cuenta el pandeo lateral por torsión y por flexión.

(3) La esbeltez adimensional global $\overline{\lambda_{op}}$ para componentes estructurales deberán determinarse a partir de la expresión siguiente:

$$\overline{\lambda_{op}} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} \qquad (6.64)$$

donde:

$\alpha_{ult,k}$ se define en (2)

$\alpha_{cr,op}$ es el coeficiente mínimo por el que hay que multiplicar las cargas de diseño actuando en el plano para alcanzar la resistencia crítica elástica del componente estructural con respecto al pandeo lateral o flexión sin tener en cuenta el pandeo por flexión en el plano.

NOTA: En la determinación de $\alpha_{cr,op}$ y $\alpha_{ult,k}$ se podrán aplicar Análisis por Elementos Finitos.

(4) El coeficiente de reducción χ_{op} se podrá determinar por cualquiera de los siguientes métodos:

a) el valor mínimo de

χ para pandeo de acuerdo al apartado 6.3.1

χ_{LT} para pandeo lateral de acuerdo al apartado 6.3.2.

Ambas se calcularán para la esbeltez adimensional global $\overline{\lambda_{op}}$.

NOTA: Por ejemplo, cuando $\alpha_{ult,k}$ se determine por la comprobación de la sección $\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}$ éste método conduce a:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq \chi_{op} \qquad (6.65)$$

b) un valor interpolado entre los valores χ y χ_{LT} como se determina en a) utilizando la fórmula para $\alpha_{ult,k}$ correspondiente a la sección crítica.

NOTA: Por ejemplo cuando $\alpha_{ult,k}$ se determine por la comprobación de la sección $\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}$ este método conduce a:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1 \qquad (6.66)$$

6.3.5 Pandeo lateral de los elementos con rótulas plásticas en edificación

6.3.5.1 Generalidades

(1)B Las estructuras podrán calcularse utilizando un análisis plástico siempre que el pandeo lateral en el pórtico sea impedido por los siguientes medios:

a) arriostramientos en la ubicación de las rótulas plásticas “rotadas”, véase el apartado 6.3.5.2, y

b) comprobación de la longitud estable del segmento entre tales arriostramientos y otros arriostramientos laterales, véase el apartado 6.3.5.3.

(2)B No será necesario arriostrar las rótulas plásticas que “no roten” bajo todas las combinaciones de cargas de estado límite último.

6.3.5.2 Arriostramiento en rótulas plásticas rotadas

(1)B En cada ubicación donde se encuentre una rótula plástica rotada la sección deberá tener un arriostramiento lateral y torsional eficaz con resistencia apropiada a las fuerzas laterales y torsión provocados por las deformaciones plásticas locales del elemento en este punto.

(2)B Los arriostramientos eficaces deberán disponerse para:

- elementos sometidos tanto a momentos como a momentos y esfuerzos axiles por un arriostramiento lateral en ambas alas. Esto puede conseguirse mediante el arriostramiento lateral de un ala y un arriostramiento rígido a torsión de la sección transversal para evitar el movimiento lateral del ala comprimida respecto del ala traccionada, véase la figura A22.6.5.
- elementos sometidos tanto únicamente a momentos como a momentos y esfuerzo de tracción en los que el ala comprimida está en contacto con una losa, por un arriostramiento lateral y tosional del ala comprimida (por ejemplo conectándola a la losa, véase la figura A22.6.6). Para aquellas secciones más esbeltas que las laminadas en I y H, la distorsión de la sección deberá evitarse en las rótulas plásticas (por ejemplo mediante un rigidizador del alma también conectado al ala comprimida con una unión rígida del ala comprimida con la losa).

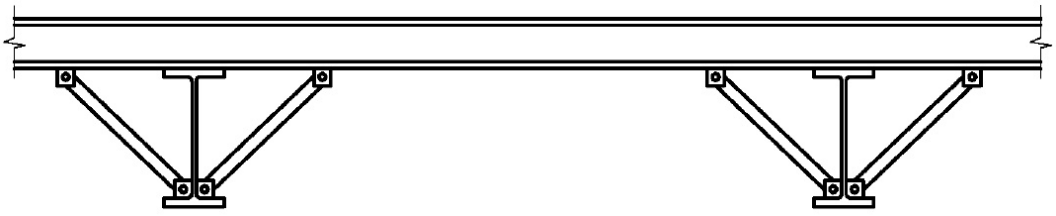
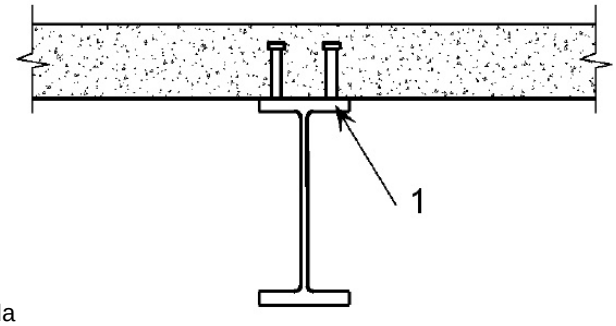


Figura A22.6.5 Arriostramiento torsional rígido típico



1 Ala comprimida

Figura A22.6.6 Arriostramiento lateral y torsional típico del ala comprimida por una losa

(3)B En cada rótula plástica, las uniones (por ejemplo los tornillos) del ala comprimida al elemento resistente en este punto (por ejemplo las correas), y todo elemento intermedio (por ejemplo una diagonal) deberán calcularse para resistir una fuerza local de al menos un 2,5% de $N_{f,Ed}$ (definido en el apartado 6.3.5.2(5)B) transmitido por las alas en su plano y perpendicular al plano del alma, sin combinación con otras cargas.

(4)B Cuando no sea posible realizar este arriostramiento directamente en la posición de la rótula, deberá disponerse en una distancia no mayor de $h/2$ medida a lo largo del elemento, donde h es la altura total del elemento en la rótula.

(5)B Para dimensionar el sistema de arriostramiento, véase el apartado 5.3.3, deberá realizarse una comprobación adicional a la relativa a la de imperfecciones definidas en el apartado 5.3.3, para asegurar que el sistema de arriostramiento sea capaz de resistir los efectos de las fuerzas locales Q_m aplicadas en cada elemento estabilizado en la posición las rótulas plásticas, donde:

$$Q_m = 1{,}5\alpha_m \frac{N_{f,Ed}}{100} \qquad (6.67)$$

donde

$N_{f,Ed}$ es el axil en el ala comprimida del elemento estabilizado en la ubicación de la rótula plástica

α_m se define en el apartado 5.3.3(1).

NOTA: Para la combinación con cargas externas véase también el apartado 5.3.3(5).

6.3.5.3 Verificación de la longitud estable del segmento

(1)B La resistencia a pandeo lateral de los segmentos entre arriostramientos puede realizarse comprobando que las longitudes entre arriostramientos no son superiores a la longitud estable.

Para segmentos de viga de sección uniforme en I o H de $\frac{h}{t_f} \leq 40\varepsilon$ sometidos a una variación lineal de momentos y sin compresión axial significativa, la longitud estable podrá obtenerse de:

$$L_{estable} = 35\varepsilon i_z \quad \text{para } 0{,}625 \leq \Psi \leq 1 \qquad (6.68)$$

$$L_{estable} = (60 - 40\Psi)\varepsilon i_z \quad \text{para } -1 \leq \Psi \leq 0{,}625$$

donde:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \left[\frac{N}{mm^2}\right]}}$$

$\Psi = \frac{M_{Ed,min}}{M_{pl,Rd}}$ = relación de los momentos en los extremos del segmento.

NOTA B: Para la longitud estable de un segmento véase también el Apéndice BB. 3.

(2)B Cuando se reduzca una rótula plástica inmediatamente próxima al extremo de una cartela, el elemento de altura variable no necesitará tratarse como segmento adyacente a una rótula plástica si se cumplen los criterios siguientes:

a) El arriostramiento en la ubicación de la rótula plástica deberá estar situado en una distancia menor a $h/2$ en la longitud del elemento de altura variable, y no en el de sección constante;

b) el ala comprimida de la cartela permanecerá en régimen elástico a lo largo de su longitud.

NOTA B: Para más información véase el Apéndice BB.3.

6.4 Elementos compuestos comprimidos

6.4.1 Generalidades

(1) Los elementos de sección constante compuesta comprimidos con extremos articulados apoyados lateralmente deberán calcularse con el modelo siguiente, véase la figura A22.6.7.

1. El elemento podrá considerarse como un pilar con una imperfección en arco $e_0 = \frac{L}{500}$.
2. Las deformaciones elásticas de las celosías y presillas, véase la figura A22.6.7, pueden considerarse como una resistencia constante (extendida) a cortante S_v del pilar.

NOTA: Para otras condiciones en los extremos se tomarán las modificaciones apropiadas.

(2) El modelo de un elemento de sección constante compuesto comprimido es de aplicación cuando:

1. La celosía y presillas constan de los mismos módulos que los cordones paralelos.
2. El número mínimo de módulos en un elemento es tres.

NOTA: Esta hipótesis permite a la estructura ser regular y extenderse de una estructura discreta a una continua.

(3) El procedimiento de cálculo es aplicable a elementos compuestos por celosías y presillas en dos planos, véase la figura A22.6.8.

(4) Los cordones pueden ser de alma llena o en celosías o empresillados en el plano perpendicular.

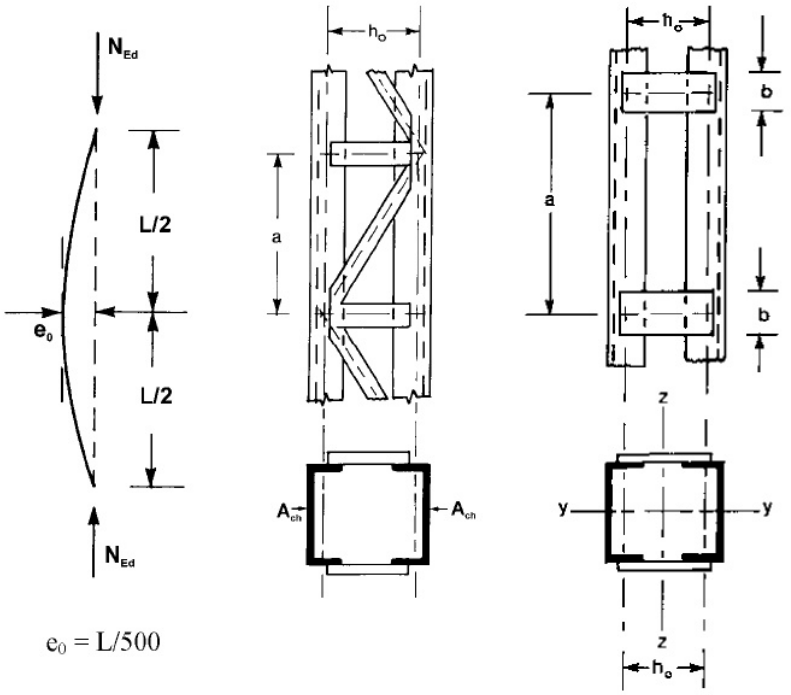


Figura A22.6.7 Pilares de sección compuesta constante con celosías y presillas

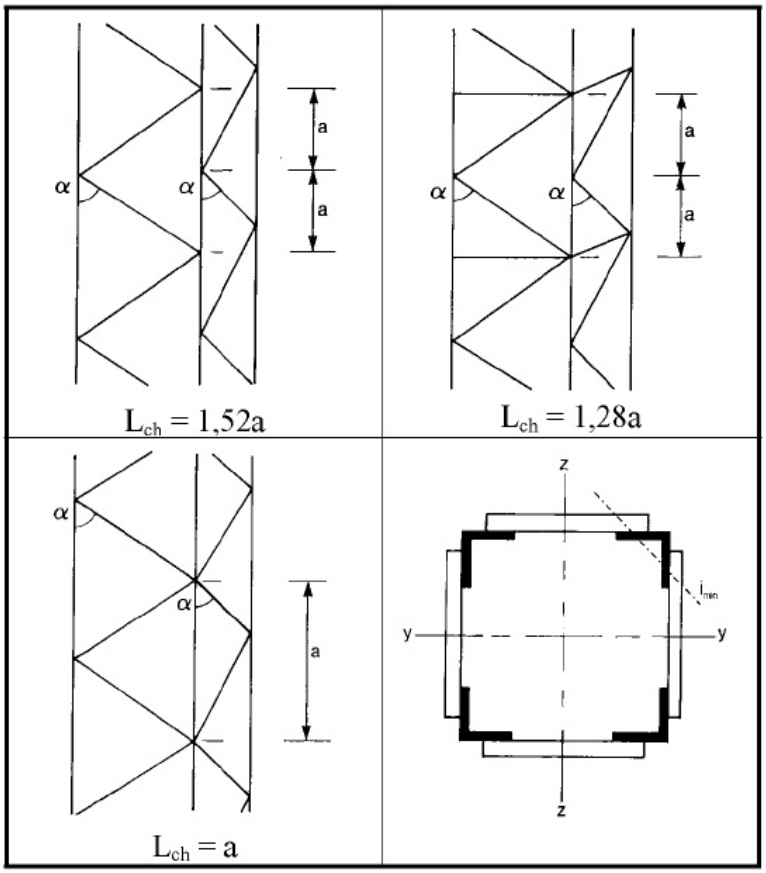


Figura A22.6.8 Triangulaciones en cuatro lados y longitud de pandeo L_{ch} de los cordones.

(5) Las comprobaciones deberán realizarse para los cordones utilizando los esfuerzos de cálculo $N_{ch,Ed}$ producidos por las fuerzas de compresión N_{Ed} y momentos M_{Ed} en el centro de vano de los elementos compuestos.

(6) Para un elemento con dos cordones iguales el esfuerzo axil de cálculo $N_{ch,Ed}$ deberá determinarse de:

$$N_{ch,Ed} = 0{,}5N_{Ed} + \frac{M_{Ed} h_0 A_{ch}}{2I_{eff}} \qquad (6.69)$$

donde:

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{eff}}{L^2}$ es el esfuerzo crítico eficaz del elemento compuesto

N_{Ed} es el valor de cálculo de la compresión del elemento compuesto

M_{Ed} es el valor de cálculo del máximo momento en el centro del elemento compuesto considerando efectos de segundo orden

M_{Ed}^I es el valor de cálculo del máximo momento en el centro del elemento compuesto sin considerar efectos de segundo orden

h_0 es la distancia entre los centros de gravedad de los cordones

A_{ch} es el área de la sección de un cordón

I_{eff} es el momento de inercia eficaz del elemento compuesto, véanse los apartados 6.4.2 y 6.4.3

S_v es la rigidez a cortante de las triangulaciones o del panel empresillado, véanse los apartados 6.4.2 y 6.4.3.

(7) Deberán realizarse las comprobaciones de las triangulaciones de los elementos compuestos triangulados o de los momentos y esfuerzos cortantes de los pórticos de los paneles de empresillados de los elementos compuestos para los paneles extremos considerando el cortante en el elemento compuesto:

$$V_{Ed} = \pi \frac{M_{Ed}}{L} \qquad (6.70)$$

6.4.2 Elementos triangulados comprimidos

6.4.2.1 Resistencia de los componentes de los perfiles triangulados comprimidos

(1) Los cordones y diagonales sometidos a compresiones deberán calcularse a pandeo.

NOTA: Podrán despreciarse momentos de segundo orden.

(2) Para los cordones, la comprobación a pandeo deberá realizarse como sigue:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (6.71)$$

donde:

$N_{ch,Ed}$ es la compresión de cálculo en el cordón a media longitud del elemento compuesto de acuerdo con el apartado 6.4.1(6)

$N_{b,Rd}$ es el valor de cálculo de la resistencia a pandeo del cordón teniendo en cuenta la longitud de pandeo L_{ch} de la figura A22.6.8.

(3) La rigidez a cortante S_v de las triangulaciones deberá tomarse de la figura A22.6.9.

(4) El momento de inercia eficaz del elemento compuesto triangulado podrá tomarse como:

$$I_{eff} = 0{,}5h_0^2 A_{ch} \qquad (6.72)$$

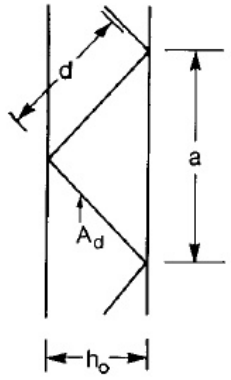
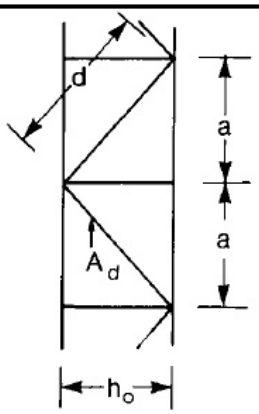
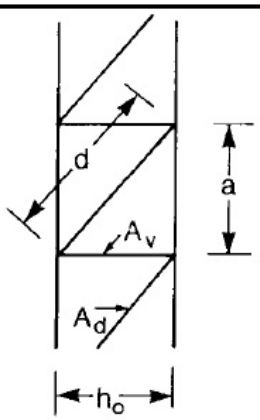
Sistema			
S_V	$\frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3\left[1+\frac{A_d h_0^3}{A_V d^3}\right]}$
n es el número de planos de triangulación A_d y A_V son las áreas de la sección transversal de las diagonales y montantes			

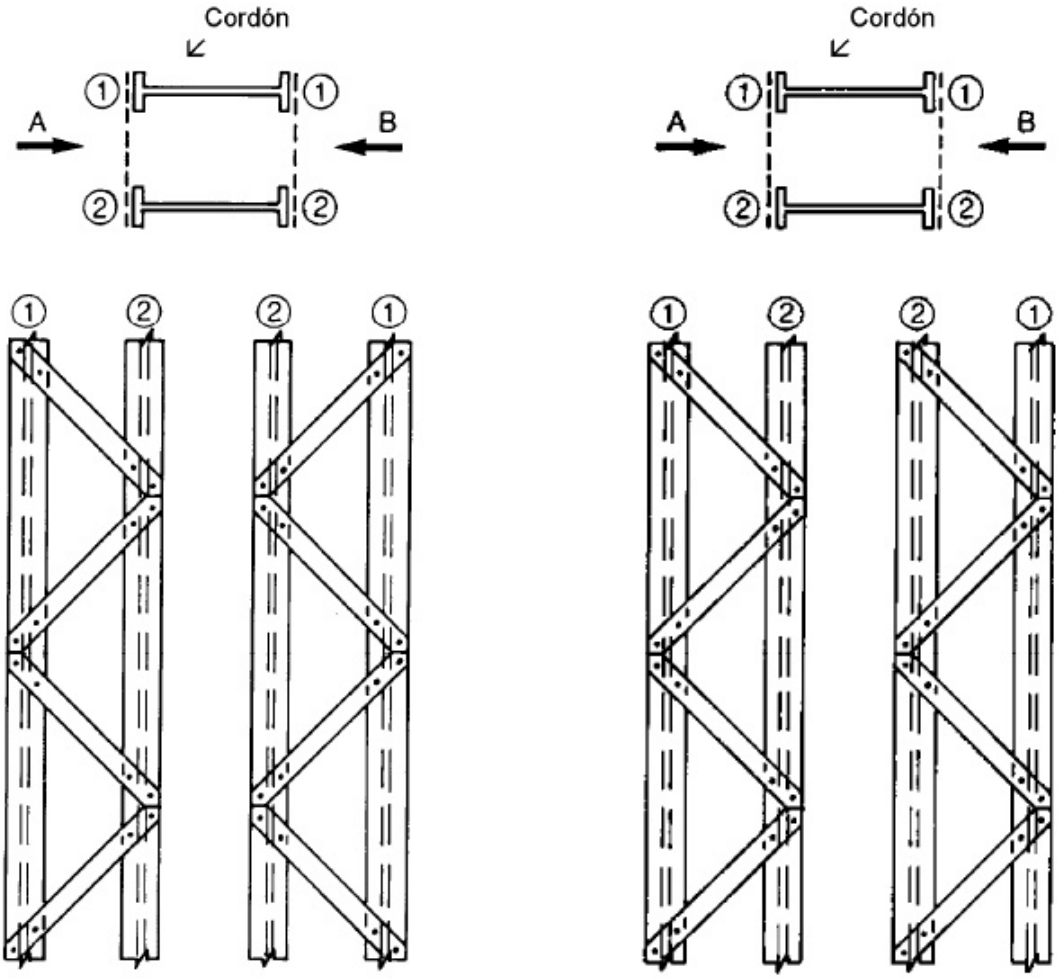
Figura A22.6.9 Rigidez a cortante de los elementos compuestos triangulados.

6.4.2.2 Detalles constructivos

(1) Los sistemas de triangulación en caras opuestas de los elementos compuestos con dos planos de triangulación paralelos deberán corresponderse a sistemas como el mostrado en la figura A22.6.10(a), dispuestos de forma que uno es el simétrico del otro.

(2) Cuando el sistema de triangulación en caras opuestas de los elementos compuestos con dos planos de triangulación paralelos se dispone de forma opuesta como indica la figura A22.6.10(b), los efectos resultantes de torsión en el elemento deberán tenerse en cuenta.

(3) Los paneles de unión deberán disponerse en los extremos de los sistemas de triangulación, en los puntos donde la triangulación se interrumpe y en juntas con otros elementos.



Triangulación en la cara A | Triangulación en la cara B

a) Sistema de triangulación simétrico (recomendado)

Triangulación en la cara A | Triangulación en la cara B

b) Sistema de triangulación opuesto (no recomendado)

Figura A22.6.10 Sistemas de triangulación en caras opuestas de un elemento compuesto con dos planos de triangulación paralelos

6.4.3 Elementos empresillados comprimidos

6.4.3.1 Resistencia de los elementos empresillados comprimidos

(1) Los cordones y los empresillados y sus juntas con los cordones deberán comprobarse para los momentos y fuerzas reales en un panel extremo y a media luz como indica la figura A22.6.11.

NOTA: Por simplicidad, los esfuerzos máximos en los cordones $N_{ch,Ed}$ podrán combinarse con el cortante máximo de cálculo V_{Ed}.

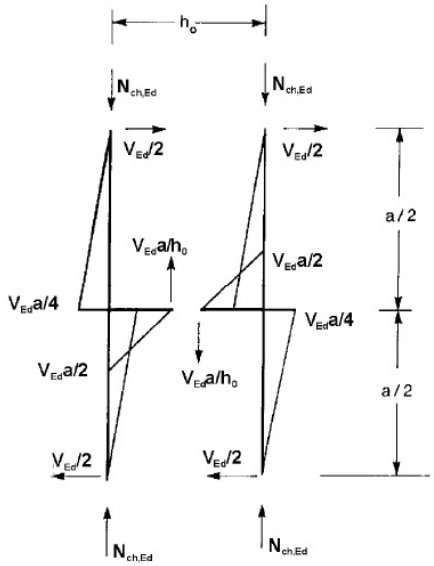


Figura A22.6.11 Momentos y fuerzas en un panel extremo de un elemento compuesto empresillado

(2) La rigidez a cortante S_v deberá tomarse como:

$$S_v = \frac{24EI_{ch}}{a^2\left[1+\frac{2I_{ch}h_0}{nI_b\ a}\right]} \leq \frac{2\pi^2 EI_{ch}}{a^2} \qquad (6.73)$$

(3) Las inercias eficaces de los elementos empresillados compuestos pueden tomarse como:

$$I_{eff} = 0{,}5h_0^2 A_{ch} + 2\mu I_{ch} \qquad (6.74)$$

donde:

I_{ch} inercia de un cordón en el plano

I_b inercia de una presilla en el plano

μ factor de eficiencia de la tabla A22.6.8

n número de planos de triangulación.

Tabla A22.6.8 Factor de eficiencia μ

Criterio	Factor de eficiencia μ
$\lambda \geq 150$	0
$75 < \lambda < 150$	$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75}$
$\lambda \leq 75$	$1{,}0$
donde $\lambda = L/i_0$; $i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2A_{ch}}}$; $I_1 = 0{,}5{h_0}^2 A_{ch} + 2I_{ch}$	

6.4.3.2 Detalles constructivos

(1) Deberán disponerse presillas en cada extremo del elemento.

(2) Donde las presillas estén dispuestas en planos paralelos, deberán disponerse los empresillados de forma enfrentada en cada plano.

(3) También deberán disponerse presillas en puntos intermedios donde se apliquen cargas o hayan arriostramientos laterales.

6.4.4 Elementos compuestos próximos

(1) Los elementos compuestos comprimidos con cordones en contacto o próximos y unidos por chapas, véase la figura A22.6.12, o elementos angulares unidos en estrella unidos por pares de presillas en dos planos perpendiculares, véase la figura A22.6.13, deberán comprobarse a pandeo como un elemento individual omitiendo el efecto de la rigidez a cortante ($S_v = \infty$), cuando se cumplan las condiciones de la tabla A22.6.9.

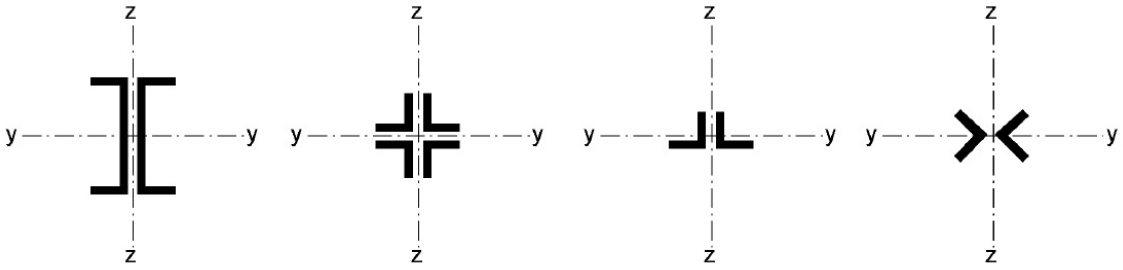


Figura A22.6.12 Elementos compuestos próximos

Tabla A22.6.9 Espaciamiento máximo entre interconexiones en elementos compuestos cercanos o angulares unidos en estrella

Tipo de elemento compuesto	Máximo espaciamiento entre conexiones *
Elementos de acuerdo a la figura A22.6.12 conectados por tornillos o soldaduras	$15i_{min}$
Elementos de acuerdo con la figura A22.6.13 conectados por pares de presillas	$70i_{min}$

* Distancia de centro a centro de las conexiones

i_{min} es el radio mínimo de giro de un cordón o angular

(2) Deberá determinarse los esfuerzos cortantes transmitidos por las presillas mediante el apartado 6.4.3.1(1).

(3) Para el caso de angulares con lados desiguales, véase la figura A22.6.13, deberá comprobarse el pandeo en el eje $y - y$ con:

$$i_y = \frac{i_0}{1{,}15} \qquad (6.75)$$

donde:

i_0 es el radio mínimo de giro del elemento compuesto.

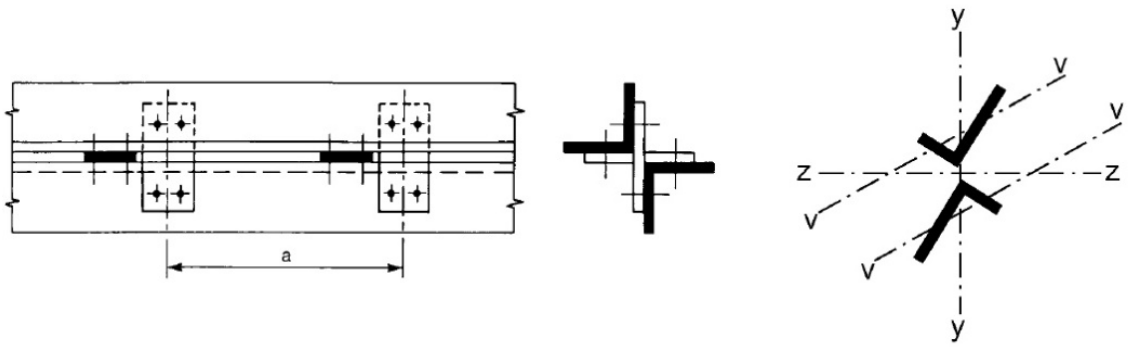


Figura A22.6.13 Elementos angulares unidos en estrella

7. Estados límite de servicio

7.1 Generalidades

(1) Una estructura de acero deberá calcularse y construirse de forma que se cumplan los criterios de servicio correspondientes.

(2) Los requisitos básicos de los estados límite de servicio se establecen en el apartado 3.4 del Anejo 18 del Código Estructural.

(3) Todos los estados límite de servicio y la carga y el modelo de análisis asociados deberán especificarse en un proyecto.

(4) Cuando se utilice un análisis plástico global para la comprobación de los estados límites últimos, podrá producirse una redistribución plástica de los esfuerzos en el estado límite de servicio. Si se produce, deberán considerarse los efectos.

7.2 Estados límite de servicio en edificación

7.2.1 Flechas verticales

(1)B Los límites de las flechas verticales, conformes a la legislación específica, deberán especificarse para cada proyecto acordándose con cada cliente.

La estructura deberá presentar unas deformaciones verticales admisibles, lo que se entenderá que se cumple cuando se satisfagan las limitaciones definidas por la Propiedad, de acuerdo con lo establecido en la reglamentación vigente. En el caso de las estructuras de edificación, se utilizarán las siguientes limitaciones indicadas en el apartado 4.3.3.1 del Documento Básico “Seguridad Estructural” del Código Técnico de la Edificación:

- Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando solo las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento, la flecha relativa es menor que:

  a) 1/500 en pisos con tabiques frágiles (como los de gran formato, rasillones, o placas) o pavimentos rígidos sin juntas;

  b) 1/400 en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas;

  c) 1/300 en el resto de los casos.

- Cuando se considere el confort de los usuarios, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando solamente las acciones de corta duración, la flecha relativa, es menor que 1/350.
- Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones casi permanente, la flecha relativa es menor que 1/300.

Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. En general, será suficiente realizar dicha comprobación en dos direcciones ortogonales.

En los casos en los que los elementos dañables (por ejemplo tabiques, pavimentos) reaccionan de manera sensible frente a las deformaciones (flechas o desplazamientos horizontales) de la estructura portante, además de la limitación de las deformaciones se adoptarán medidas constructivas apropiadas para evitar daños. Estas medidas resultan particularmente indicadas si dichos elementos tienen un comportamiento frágil.

7.2.2 Flechas horizontales

(1)B La estructura deberá presentar unas deformaciones horizontales admisibles, lo que se entenderá que se cumple cuando se satisfagan las limitaciones definidas por la Propiedad, de acuerdo con lo establecido en la reglamentación vigente. En el caso de las estructuras de edificación, se utilizarán las siguientes limitaciones indicadas en el apartado 4.3.3.2 del Documento Básico “Seguridad Estructural” del Código Técnico de la Edificación:

- Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones característica, el desplome (véase la figura A22.7.1) es menor de:

  a) desplome total: 1/500 de la altura total del edificio;

  b) desplome local: 1/250 de la altura de la planta, en cualquiera de ellas.
- Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones casi permanente, el desplome relativo (véase figura A22.7.1) es menor que 1/250.
- En general es suficiente que dichas condiciones se satisfagan en dos direcciones sensiblemente ortogonales en planta.

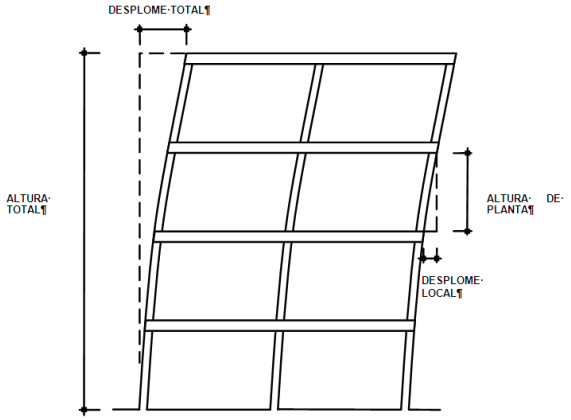


Figura A22.7.1 Desplome

7.2.3 Efectos dinámicos

(1)B La estructura deberá capacidad admisible frente a las vibraciones, lo que se entenderá que se cumple cuando se satisfagan las limitaciones definidas por la Propiedad, de acuerdo con lo establecido en la reglamentación vigente. En el caso de las estructuras de edificación, se utilizarán las siguientes limitaciones indicadas en el apartado 4.3.4 del Documento Básico “Seguridad Estructural” del Código Técnico de la Edificación:

- Un edificio se comporta adecuadamente ante vibraciones debidas a acciones dinámica, si la frecuencia de la acción dinámica (frecuencia de excitación) se aparta suficientemente de sus frecuencias propias.
- En el cálculo de la frecuencia propia se tendrán en cuenta las posibles contribuciones de los cerramientos, separaciones, tabiquerías, revestimientos, solados y otros elementos constructivos, así como la influencia de la variación del módulo de elasticidad y, en el caso de los elementos de hormigón, la de la fisuración.
- Si las vibraciones pueden producir el colapso de la estructura portante (por ejemplo debido a fenómenos de resonancia, o a la pérdida de la resistencia por fatiga) se tendrá en cuenta en la verificación de la capacidad portante, tal como se establece en el DB respectivo.
- Se admite que una planta de piso susceptible de sufrir vibraciones por efecto rítmico de las personas, es suficientemente rígida, si la frecuencia propia es mayor de:

  a) 8 hercios, en gimnasios y polideportivos;

  b) 7 hercios en salas de fiesta y locales de pública concurrencia sin asientos fijos;

  c) 3,4 hercios en locales de espectáculos con asientos fijos.

Apéndice A Método 1: coeficientes recomendados de interacción kij para la fórmula de interacción en 6.3.3(4)

Tabla A22.A.1 Coeficientes de interacción k_{ij} (6.3.3(4))

Coeficiente de interacción	Hipótesis de cálculo	
	Propiedades elásticas secciones Clase 3 o 4	Propiedades plásticas secciones Clase 1 o 2
k_{yy}	$C_{my}C_{mLT}\dfrac{\mu_y}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my}C_{mLT}\dfrac{\mu_y}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}\dfrac{1}{C_{yy}}$
k_{yz}	$C_{mz}\dfrac{\mu_y}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz}\dfrac{\mu_y}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}\dfrac{1}{C_{yz}}0{,}6\sqrt{\dfrac{w_z}{w_y}}$
k_{zy}	$C_{my}C_{mLT}\dfrac{\mu_z}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my}C_{mLT}\dfrac{\mu_z}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}\dfrac{1}{C_{zy}}0{,}6\sqrt{\dfrac{w_y}{w_z}}$
k_{zz}	$C_{mz}\dfrac{\mu_z}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz}\dfrac{\mu_z}{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}\dfrac{1}{C_{zz}}$

Términos auxiliares

$$\mu_y=\frac{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1-\chi_y\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$\mu_z=\frac{1-\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1-\chi_z\dfrac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$w_y=\frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}}\le 1{,}5$$

$$w_z=\frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}}\le 1{,}5$$

$$C_{yy}=1+(w_y-1)\left[\left(2-\frac{1{,}6}{w_y}C_{my}^2\bar{\lambda}_{max}-\frac{1{,}6}{w_y}C_{my}^2\bar{\lambda}^2{}_{max}\right)n_{pl}-b_{LT}\right]\ge\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

con $b_{LT}=0{,}5a_{LT}\bar{\lambda}_0^2\dfrac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}M_{pl,y,Rd}}\dfrac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$

$$C_{yz}=1+(w_z-1)\left[\left(2-\frac{14}{w_z{}^5}C_{mz}^2\bar{\lambda}^2{}_{max}\right)n_{pl}-c_{LT}\right]\ge 0{,}6\sqrt{\frac{w_z}{w_y}}\frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

con $c_{LT}=10a_{LT}\dfrac{\bar{\lambda}_0^2}{5+\bar{\lambda}_z^4}\dfrac{M_{y,Ed}}{C_{my}\chi_{LT}M_{pl,y,Rd}}$

$$C_{zy}=1+(w_y-1)\left[\left(2-\frac{14}{w_y{}^5}C_{my}^2\bar{\lambda}^2{}_{max}\right)n_{pl}-d_{LT}\right]\ge 0{,}6\sqrt{\frac{w_y}{w_z}}\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_{M0}}$ C_{my} véase tabla A22.A.2 $a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$	con $d_{LT} = 2a_{LT}\frac{\bar{\lambda}_0}{0{,}1+\bar{\lambda}_z^4}\frac{M_{y,Ed}}{C_{my}\chi_{LT}M_{pl,y,Rd}}\frac{M_{z,Ed}}{C_{mz}M_{pl,z,Rd}}$ $C_{zz} = 1 + (w_z - 1)\left[\left(2 - \frac{1{,}6}{w_z}C_{mz}^2\bar{\lambda}_{max} - \frac{1{,}6}{w_z}C_{mz}^2\bar{\lambda}^2_{max} - e_{LT}\right)n_{pl}\right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ con $e_{LT} = 1{,}7a_{LT}\frac{\bar{\lambda}_0}{0{,}1+\bar{\lambda}_z^4}\frac{M_{y,Ed}}{C_{my}\chi_{LT}M_{pl,y,Rd}}$

$\bar{\lambda}_{max} = \max(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z)$

$\bar{\lambda}_0$ = Esbeltez adimensional de pandeo lateral cuando actúa un momento uniforme, es decir, cuando $\psi_y = 1{,}0$ en la tabla A22.A.2

$\bar{\lambda}_{LT}$ = Esbeltez adimensional de pandeo lateral

Para $\bar{\lambda}_0 \leq 0{,}2\sqrt{C_1}\sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}$

$C_{my} = C_{my,0}$

$C_{mz} = C_{mz,0}$

$C_{mLT} = 1{,}0$

Para $\bar{\lambda}_0 > 0{,}2\sqrt{C_1}\sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}$

$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0})\frac{\sqrt{\varepsilon_y}a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y}a_{LT}}$

$C_{mz} = C_{mz,0}$

$C_{mLT} = C_{my}^2\frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} \geq 1$

$C_{mi,0}$ véase la tabla A22.A.2

$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}}\frac{A}{W_{el,y}}$ para secciones de Clase 1, 2 y 3.

$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}}\frac{A_{eff}}{W_{eff,y}}$ para secciones de Clase 4.

$N_{cr,y}$ Esfuerzo axil crítico elástico por pandeo por flexión alrededor del eje y-y.

$N_{cr,z}$ Esfuerzo axil crítico elástico por pandeo por flexión alrededor del eje z-z.

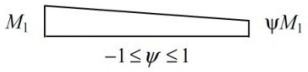
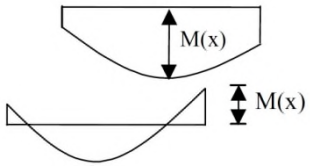
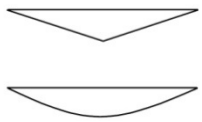
$N_{cr,T}$ Esfuerzo axil crítico elástico por pandeo por torsión.

I_t Módulo de torsión uniforme.

I_y Inercia a flexión alrededor del eje y-y.

C_1 Es un coeficiente que depende de la carga y de las condiciones de vinculación de los extremos y que puede tomarse como k_c^{-2}, donde k_c se toma de la tabla A22.6.6.

Tabla A22.A.2 Coeficientes $C_{mi,0}$ para la obtención del momento equivalente uniforme

Diagrama de momento	$C_{mi,0}$
	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33)\frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + \left(\frac{\pi^2 \cdot EI_i \cdot \lvert\delta_x\rvert}{L^2 \lvert M_{i,Ed}(x)\rvert} - 1\right)\frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ $M_{i,Ed}(x)$ es el máximo momento $M_{y,Ed}$ o $M_{z,Ed}$ $\lvert\delta_x\rvert$ es la máxima flecha a lo largo del elemento
	$C_{mi,0} = 1 - 0,18\frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + 0,03\frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Apéndice B Método 2: Coeficientes recomendados de interacción k_{ij} para la fórmula de interacción 6.3.3(4)

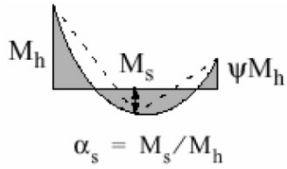
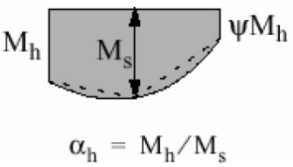
Tabla A22.B.1 Coeficientes de interacción k_{ij} para elementos no susceptibles a deformaciones por torsión

Coeficiente de interacción	Tipo de sección	Hipótesis de cálculo	
		Propiedades elásticas secciones Clase 3 o 4	Propiedades plásticas secciones Clase 1 o 2
k_{yy}	Secciones en I Huecas rectangulares (SHR)	$C_{my}\left(1+0{,}6\cdot\bar{\lambda}_y\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$ $\le C_{my}\left(1+0{,}6\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$	$C_{my}\left(1+(\bar{\lambda}_y-0{,}2)\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$ $\le C_{my}\left(1+0{,}8\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$
k_{yz}	Secciones en I SHR	k_{zz}	$0{,}6\cdot k_{zz}$
k_{zy}	Secciones en I SHR	$0{,}8\cdot k_{yy}$	$0{,}6\cdot k_{yy}$
k_{zz}	Secciones en I	$C_{mz}\left(1+0{,}6\cdot\bar{\lambda}_z\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$ $\le C_{mz}\left(1+0{,}6\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$	$C_{mz}\left(1+(2\bar{\lambda}_z-0{,}6)\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$ $\le C_{mz}\left(1+1{,}4\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$
	SHR		$C_{mz}\left(1+(\bar{\lambda}_z-0{,}2)\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$ $\le C_{mz}\left(1+0{,}8\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right)$
Para secciones I y H y SHR bajo axiles de compresión y momentos en un eje $M_{y,Ed}$, el coeficiente k_{zy} podrá tomarse nulo.			

Tabla A22.B.2 Coeficientes de interacción k_{ij} para elementos susceptibles a deformaciones por torsión

Coeficiente de interacción	Hipótesis de cálculo	
	Propiedades elásticas secciones Clase 3 o 4	Propiedades plásticas secciones Clase 1 o 2
k_{yy}	se adopta el valor de la tabla A22.B.1	se adopta el valor de la tabla A22.B.1
k_{yz}	se adopta el valor de la tabla A22.B.1	se adopta el valor de la tabla A22.B.1
k_{zy}	$\left[1-\frac{0,05\cdot\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z\cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$ $\geq\left[1-\frac{0,05}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z\cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$	$\left[1-\frac{0,1\cdot\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z\cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$ $\geq\left[1-\frac{0,1}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z\cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$ Para $\bar{\lambda}_z<0,4$: $k_{zy}=0,6+\bar{\lambda}_z\leq$ $1-\frac{0,1\cdot\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z\cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}$
k_{zz}	se adopta el valor de la tabla A22.B.1	se adopta el valor de la tabla A22.B.1

Tabla A22.B.3 Coeficientes C_m para la obtención del momento equivalente uniforme en tablas A22.B.1 y A22.B.2

Diagrama de momento	Rango		C_{my} y C_{mz} y C_{myLT}	
			Carga uniforme	Carga puntual
	$-1 \le \psi \le 1$		$0,6+0,4 \cdot \psi \ge 0,4$	
	$0 \le \alpha_S \le 1$	$-1 \le \psi \le 1$	$0,2+0,8 \cdot \alpha_S \ge 0,4$	$0,2+0,8 \cdot \alpha_S \ge 0,4$
	$-1 \le \alpha_S < 0$	$0 \le \psi \le 1$	$0,1-0,8 \cdot \alpha_S \ge 0,4$	$-0,8\,\alpha_S \ge 0,4$
		$-1 \le \psi < 0$	$0,1(1-\psi)-0,8 \cdot \alpha_S \ge 0,4$	$0,2 \cdot (-\psi)-0,8 \cdot \alpha_S \ge 0,4$
	$0 \le \alpha_h \le 1$	$-1 \le \psi \le 1$	$0,95+0,05 \cdot \alpha_h$	$0,90+0,1 \cdot \alpha_h$
	$-1 \le \alpha_h < 0$	$0 \le \psi \le 1$	$0,95+0,05 \cdot \alpha_h$	$0,90+0,1 \cdot \alpha_h$
		$-1 \le \psi < 0$	$0,95+0,05 \cdot \alpha_h \cdot (1+2\psi)$	$0,90+0,1 \cdot \alpha_h \cdot (1+2\psi)$

Para elementos con modo de pandeo traslacional el momento equivalente uniforme deberá tomarse como $C_{my} = 0,9$ o $C_{mz} = 0,9$.

$C_{my} = 0,9$, $C_{mz} = 0,9$ y $C_{mLT} = 0,9$ deberán obtenerse de acuerdo con el diagrama de momentos flectores entre los puntos de refuerzo como sigue:

Coeficiente de momento	eje flector	puntos reforzados en la dirección
C_{my}	y-y	z-z
C_{mz}	z-z	y-y
C_{mLT}	y-y	y-y

Apéndice AB Disposiciones adicionales de cálculo recomendadas en edificación

AB.1 Análisis estructural considerando la no linealidad de los materiales

(1)B En caso de no linealidades del material los efectos de las acciones en una estructura pueden determinarse por un método de incremento de las cargas de cálculo a considerar para la situación de cálculo correspondiente.

(2)B En este método incremental cada acción permanente o variable deberá aumentarse proporcionalmente.

AB.2 Disposiciones simplificadas para el cálculo de vigas contínuas de forjados

(1)B Para vigas continuas de edificios con losas y sin voladizos en las que la distribución de cargas uniforme es dominante, será suficiente considerar únicamente las siguientes disposiciones de cargas:

a) vanos alternos cargados con las cargas permanentes y variables de cálculo $(\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k)$, el resto soportan únicamente la carga permanente de cálculo $\gamma_G G_k$,

b) pares de vanos adyacentes cargados con las cargas permanentes y variables de cálculo $(\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k)$, el resto soportan únicamente la carga permanente de cálculo $\gamma_G G_k$.

NOTA 1: a) es de aplicación en momentos positivos, b) es de aplicación en momentos negativos.

Apéndice BB Recomendaciones sobre pandeo en estructuras de edificación

BB.1 Pandeo estructural de elementos de estructuras trianguladas y en celosía

BB.1.1 Generalidades

(1)B Para cordones, en general, y para el pandeo fuera del plano para montantes y diagonales, la longitud de pandeo L_{cr} podrá tomarse igual a la longitud del sistema L, véase el apartado BB.1.3(1)B, salvo que un análisis justifique un valor menor.

(2)B La longitud de pandeo L_{cr} de cordones con secciones I y H podrá tomarse como $0{,}9\,L$ para pandeos en el plano y $1{,}0\,L$ fuera de él, salvo que un análisis justifique un valor menor.

(3)B Para el cálculo a pandeo en el plano de montantes y diagonales se puede considerar una longitud de pandeo menor que la del sistema, siempre que los cordones estén dispuestos con las coacciones apropiadas y las conexiones en los extremos tengan la fijación apropiada (al menos dos tornillos si son atornilladas)

(4)B Bajo estas condiciones, en estructuras trianguladas normales, la longitud de pandeo L_{cr} para montantes y diagonales con pandeo en el plano de la estructura puede tomarse $0{,}9\,L$, excepto en secciones angulares, véase el apartado BB.1.2.

BB.1.2 Montantes y diagonales formados por angulares

(1)B Siempre que los cordones supongan una coacción en los extremos de los montantes y diagonales formados por angulares y que las uniones extremas aporten cierta fijación (al menos dos tornillos en uniones atornilladas) se podrán despreciar las excentricidades y se podrá considerar que los extremos son fijos en el cálculo de los montantes y diagonales a compresión:

$$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0{,}35 + 0{,}7\bar{\lambda}_v \qquad \text{para pandeo en el eje } v-v$$
$$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0{,}50 + 0{,}7\bar{\lambda}_y \qquad \text{para pandeo en el eje } y-y \qquad \text{(BB. 1)}$$
$$\bar{\lambda}_{eff,z} = 0{,}50 + 0{,}7\bar{\lambda}_z \qquad \text{para pandeo en el eje } z-z$$

donde $\bar{\lambda}$ se define en el apartado 6.3.1.2.

(2)B Cuando se utilice únicamente un tornillo para conexiones en los extremos de montantes y diagonales formados por angulares, se deberá considerar la excentricidad según el apartado 6.2.9 y la longitud de pandeo L_{cr} deberá tomarse igual a la longitud del elemento L.

BB.1.3 Elementos de sección hueca

(1)B La longitud de pandeo L_{cr} de un cordón de sección hueca deberá tomarse como $0{,}9\,L$ tanto para el pandeo en plano como fuera del mismo, donde L es la longitud del sistema del plano correspondiente. La longitud del sistema en el plano es la distancia entre uniones. La longitud del sistema fuera del plano es la distancia entre apoyos laterales, salvo que un análisis justifique un valor menor.

(2)B La longitud de pandeo L_{cr} para montantes y diagonales de sección hueca con conexiones atornilladas podrá tomarse como $1{,}0\,L$ para ambos pandeos dentro y fuera del plano.

(3)B Para grandes vigas en celosía con cordones paralelos y montantes y diagonales, para cuya relación de diámetros o anchos β entre montantes o diagonales con respecto al cordón sea menor de 0,6, la longitud de pandeo L_{cr} de los montantes y diagonales de sección hueca sin recortes o aplanados, soldado alrededor de su perímetro al cordón de la sección hueca, podrá generalmente

tomarse como $0{,}7\,L$ para ambos pandeos dentro y fuera del plano, salvo que ensayos o cálculos justifiquen un valor menor.

BB.2 Arriostramientos continuos

BB.2.1 Arriostramiento continuo lateral

(1)B Si la chapa nervada se conecta a una viga correctamente, y la condición expresada en la forma (BB.2) se cumple, la viga en la conexión podrá considerarse coaccionada lateralmente en el plano de la chapa.

$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_T + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0{,}25h^2\right)\frac{70}{h^2} \qquad \text{(BB.2)}$$

donde:

S es la rigidez a cortante (por unidad de longitud de la viga) proporcionada por la chapa a la viga con respecto de su deformación en el plano de la chapa conectada que se une a la parte inferior de la viga en cada nervio

I_w es la inercia de alabeo

I_t es la inercia de torsión

I_z es la inercia del área de la sección sobre el eje débil de la sección

L es la longitud de la viga

h es el canto de la viga.

Si la chapa está conectada a la viga únicamente cada dos nervios, S deberá sustituirse por $0{,}2S$.

NOTA: La ecuación (BB.2) podrá utilizarse también para determinar la estabilidad lateral de las alas de la viga en combinación con otros tipos de cerramientos distintos de la chapa nervada, asegurando que las conexiones se calculen adecuadamente.

BB.2.2 Arriostramiento continuo a torsión

(1)B La deformación a torsión de una viga podrá considerarse suficientemente coaccionada si:

$$C_{\vartheta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{EI_z} K_\vartheta K_\upsilon \qquad \text{(BB.3)}$$

donde:

$C_{\vartheta,k}$ es la rigidez al giro (por unidad de longitud de la viga) proporcionada a la viga por el arriostramiento continuo (por ejemplo estructuras de tejado) y las conexiones

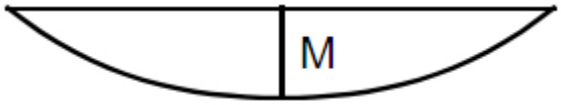
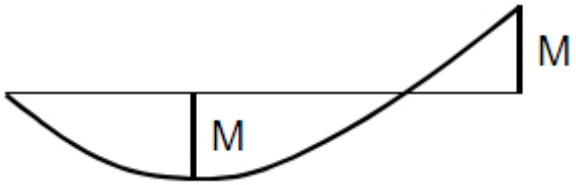
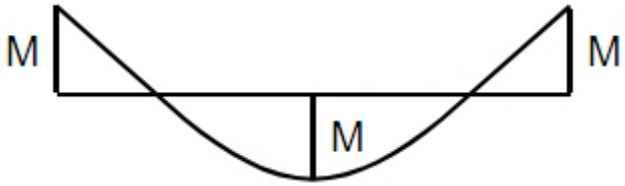
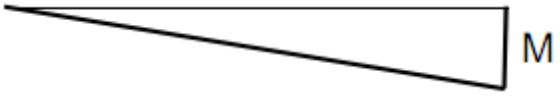
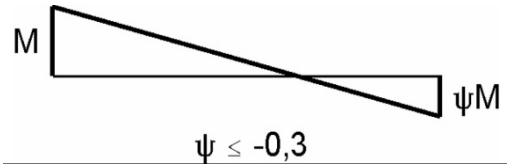
$K_\upsilon = 0{,}35$ para análisis elásticos

$K_\upsilon = 1{,}0$ para análisis plásticos

K_ϑ coeficiente que tiene en cuenta la distribución de momentos, véase la tabla A22.BB.1, y el tipo de coacción

$M_{pl,k}$ valor característico del momento plástico de la viga.

Tabla A22.BB.1 Coeficiente K_ϑ para considerar la distribución de momentos y el tipo de coacción

Caso	Distribución de momentos	Sin coacción traslacional	Con coacción traslacional
1		4,0	0
2a		3,5	0,12
2b			0,23
3		2,8	0
4		1,6	1,0
5		1,0	0,7

(2)B La rigidez a la torsión mediante la estabilización continua se puede calcular como:

$$\frac{1}{C_{\vartheta,k}} = \frac{1}{C_{\vartheta R,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta C,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta,Dk}} \qquad \text{(BB.4)}$$

donde:

$C_{\vartheta R,k}$ es la rigidez a torsión (por unidad de longitud de la viga) dada por los estabilizadores continuos a la viga asumiendo conexiones rígidas al elemento

$C_{\vartheta C,k}$ es la rigidez a torsión (por unidad de longitud de la viga) de la conexión entre viga y estabilizador continuo

$C_{\vartheta D,k}$ es la rigidez a torsión (por unidad de longitud de la viga) obtenida del análisis de la distorsión angular de las secciones de la viga cuando el ala comprimida está libre; cuando el ala comprimida está conectada o cuando la flecha de torsión de las secciones puede despreciarse (por ejemplo en perfiles laminados) $C_{\vartheta D,k} = \infty$.

BB.3 Longitudes estables de segmentos con rótulas plásticas por pandeo fuera del plano

BB.3.1 Vigas armadas de sección equivalentes

BB.3.1.1 Longitudes estables entre arriostramientos laterales adyacentes

(1)B Los efectos de pandeo lateral por torsión podrán despreciarse cuando la longitud L del segmento del elemento entre secciones coaccionadas en rótulas plásticas y la siguiente sección que se encuentre coaccionada lateralmente no sea superior a L_m, donde:

$$L_m = \frac{38 i_z}{\sqrt{\frac{1}{57{,}4}\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{1}{756 C_1^2}\frac{W_{pl,y}^2}{A I_T}\left(\frac{f_y}{235}\right)^2}} \qquad \text{(BB.5)}$$

donde:

N_{Ed} es el valor de cálculo del axil [N] en el elemento

A es el área [mm^2] de la sección transversal del elemento

$W_{pl,y}$ es el módulo plástico de la sección del elemento

I_T es la inercia a torsión del elemento

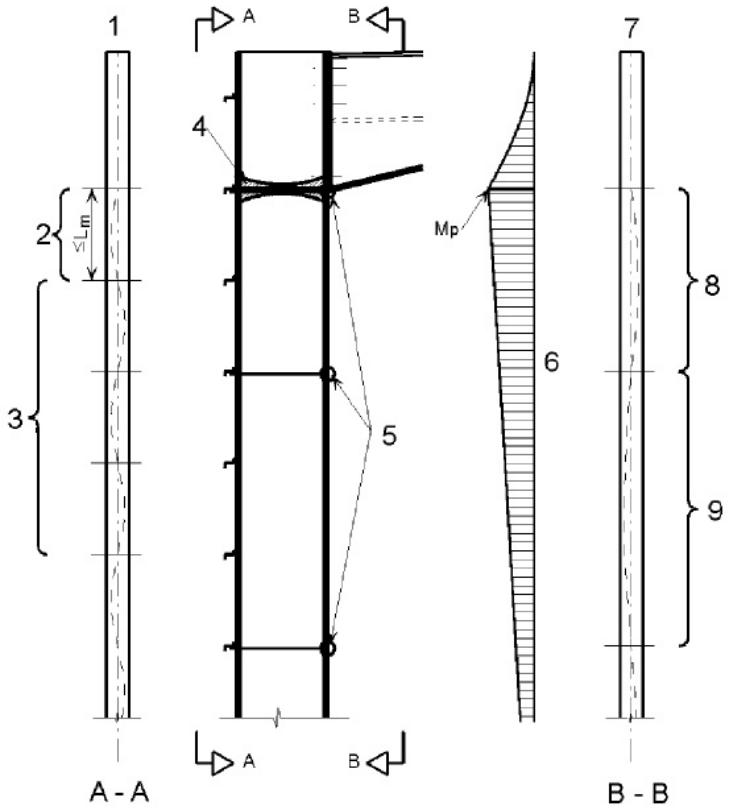
f_y es el límite elástico en [N/mm^2]

C_1 es un coeficiente dependiente de la carga y de las vinculaciones de los extremos, que pueden tomarse como $C_1=k_c^{-2}$, donde K_c se toma de la tabla A22.6.6 suponiendo que el elemento está coaccinado en la rótula, como impone el apartado 6.3.5 y que el otro extremo del segmento esté coaccionado:

- por una coacción lateral del ala comprimida donde un ala está comprimida en toda la longitud del segmento,
- o por una coacción a la torsión,
- o por una coacción lateral en el extremo del segmento y una coacción a torsión a una distancia que cumpla los requisitos de L_s,

véanse la figura A22.BB.1, la figura A22.BB.2 y la figura A22.BB.3.

NOTA: En general L_s es mayor que L_m.



1 Ala traccionada

2 Longitud plástica estable (véase el apartado BB.3.1.1)

3 Sección elástica (véase el apartado 6.3)

4 Rótula plástica

5 Coacciones

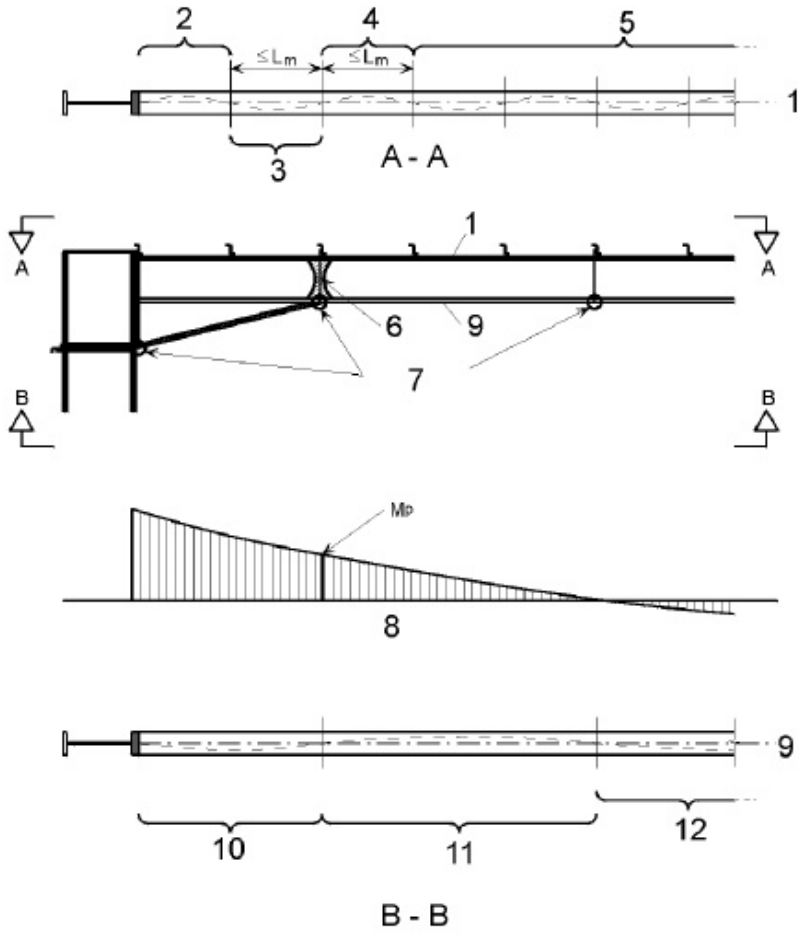
6 Diagrama de momentos flectores

7 Ala comprimida

8 Zona plástica con coacción del ala traccionada, longitud estable $= L_s$ (véase el apartado BB.3.1.2, ecuación (BB.7) o (BB.8))

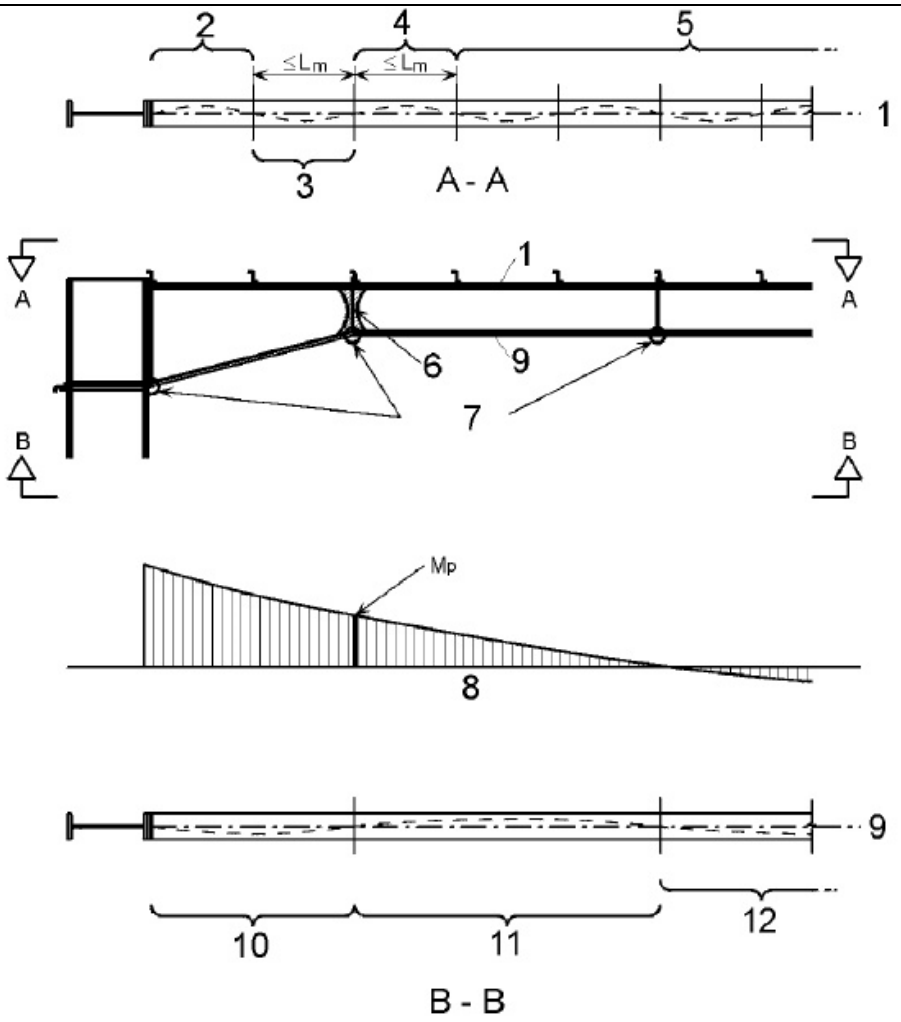
9 Zona elástica con coacción del ala traccionada (véase el apartado 6.3), χ y χ_{LT} de N_{cr} y M_{cr} incluyendo la coacción del ala traccionada

Figura A22.BB.1 Comprobaciones en un elemento de canto constante



1 Ala traccionada
2 Sección elástica (véase el apartado 6.3)
3 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.2.1) o elástica (véase el apartado 6.3.5.3(2)B)
4 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.1.1)
5 Sección elástica (véase el apartado 6.3)
6 Rótula plástica
7 Coacciones
8 Diagrama de momentos flectores
9 Ala comprimida
10 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.2) o elástica (véase el apartado 6.3.5.3(2)B)
11 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.1.2)
12 Sección elástica (véase el apartado 6.3), χ y χ_{LT} de N_{cr} y M_{cr} incluyendo la coacción del ala traccionada

Figura A22.BB.2 Comprobaciones en un elemento con tres alas en la zona acartelada



1 Ala traccionada
2 Sección elástica (véase el apartado 6.3)
3 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.2.1)
4 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.1.1)
5 Sección elástica (véase el apartado 6.3)
6 Rótula plástica
7 Coacciones
8 Diagrama de momentos flectores
9 Ala comprimida
10 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.2)
11 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.1.2)
12 Sección elástica (véase el apartado 6.3), χ y χ_{LT} de N_{cr} y M_{cr} incluyendo la coacción del ala traccionada

Figura A22.BB. 3 Comprobaciones en un elemento con dos alas en la zona acartelada

BB.3.1.2 Longitudes estables entre coacciones a torsión

(1)B Los efectos de pandeo lateral por torsión podrán despreciarse cuando la longitud L del segmento del elemento entre secciones coaccionadas en la que aparece una rótula plástica y la siguiente sección que se encuentre coaccionada sometida a un momento constante no sea mayor que L_k, siempre que:

- el elemento esté coaccionado en la rótula como impone el apartado 6.3.5 y
- haya uno o más arriostramientos laterales entre las coacciones a torsión en una separación que cumpla los requisitos de L_m, véase el apartado BB.3.1.1,

donde:

$$L_k = \frac{\left(5{,}4+\frac{600f_y}{E}\right)\left(\frac{h}{t_f}\right)i_z}{\sqrt{5{,}4\left(\frac{f_y}{E}\right)\left(\frac{h}{t_f}\right)^2-1}} \qquad \text{(BB.6)}$$

(2)B Los efectos del pandeo lateral por torsión podrán despreciarse cuando la longitud L del segmento de un elemento entre secciones arriostradas sometidas a una distribución de momentos lineal y a axiles de compresión en las que aparecen rótulas plásticas no sea superior a L_s, siempre que:

- el elemento esté coaccionado en la rótula como impone el apartado 6.3.5 y
- haya uno o más arriostramientos laterales entre las coacciones a torsión con una separación que cumpla los requisitos de L_m, véase el apartado BB.3.1.1,

donde:

$$L_s = \sqrt{C_m}L_k\left(\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{N,y,Rk}+\alpha N_{Ed}}\right) \qquad \text{(BB.7)}$$

C_m es el factor de corrección para distribuciones de momentos lineales, véase el apartado BB. 3.3.1

α es la distancia entre el centro de gravedad del elemento donde se forma la rótula plástica y el eje de los elementos de arriostramiento

$M_{pl,y,Rk}$ es el momento plástico característico resistente de la sección en el eje $y-y$

$M_{N,y,Rk}$ es el momento plástico característico resistente de la sección en el eje $y-y$ con la reducción debida al axil N_{Ed}.

(3)B Los efectos debidos al pandeo lateral por torsión podrán despreciarse cuando la longitud L del segmento de un elemento entre la sección en la que aparece una rótula plástica y la siguiente sección que se encuentra coaccionada a torsión, sometido a la distribución de momentos no lineal y a un axil de compresión, no sea mayor que L_s, siempre que:

- el elemento esté arriostrado en la rótula como impone el apartado 6.3.5 y
- haya uno o más arriostramientos laterales entre las coacciones a torsión con una separación que cumpla los requisitos de L_m, véase el apartado BB 3.1.1

donde:

$$L_s = \sqrt{C_n}L_k \qquad \text{(BB.8)}$$

C_n es el factor de corrección de la distribución de momentos no lineal, véase el apartado BB.3.3.2 y las figuras A22.BB.1, A22.BB.2 y A22.BB.3.

BB.3.2 Cartelas o elementos de canto variable de secciones laminadas o secciones I armadas equivalentes

BB.3.2.1 Longitud estable entre arriostramientos laterales adyacentes

(1)B Los efectos del pandeo lateral podrán ignorarse cuando la longitud L del segmento de un elemento entre la sección arriostrada en la que aparece la rótula plástica y el arriostramiento lateral adyacente no sea mayor que L_m donde:

- para elementos con tres alas en la zona acartelada (véase la figura A22.BB.2)

$$L_m = \frac{38 i_z}{\sqrt{\frac{1}{57{,}4}\left(\frac{N_{Ed}}{A}\right)+\frac{1}{756 C_1^2}\left(\frac{W_{pl,y}^2}{A I_T}\right)\left(\frac{f_y}{235}\right)^2}} \qquad \text{(BB.9)}$$

- para elementos con dos alas en la zona acartelada (véase la figura A22.BB.3)

$$L_m = 0{,}85\frac{38 i_z}{\sqrt{\frac{1}{57{,}4}\left(\frac{N_{Ed}}{A}\right)+\frac{1}{756 C_1^2}\left(\frac{W_{pl,y}^2}{A I_T}\right)\left(\frac{f_y}{235}\right)^2}} \qquad \text{(BB.10)}$$

donde:

N_{Ed} es el valor de cálculo del axil de compresión [N] en el elemento

$\frac{W_{pl,y}^2}{A I_t}$ es el valor máximo en el segmento

A es el área de la sección [mm^2] en el punto donde $\frac{W_{pl,y}^2}{A I_T}$ es el máximo del elemento de canto variable

C_1 es un coeficiente que depende de la carga y de las condiciones de vinculación de los extremos y que puede tomarse como $C_1 = k_c^{-2}$, donde k_c se toma de la tabla A22.6.6

$W_{pl,y}$ es el módulo plástico de la sección del elemento

I_T es la inercia a torsión del element;

f_y es el límite elástico [N/mm^2]

i_z es el valor mínimo del radio de giro en el segmento.

Siempre que el elemento esté arriostrado en la rótula como impone el apartado 6.3.5 y que el otro extremo del segmento esté coaccionado:

- por una coacción lateral en el ala comprimida a lo largo de todo el segmento,
- o una coacción a torsión,
- o una coacción lateral en el extremo de un segmento y otra a torsión en el elemento a una distancia que cumpla los requisitos de L_s.

BB.3.2.2 Longitud estable entre coacciones a torsión

(1)B Para elementos de canto variable con alas de sección constante sometidas a una distribución de momentos lineales o no lineales de momentos flectores y axiles de compresión, los efectos de pandeo lateral podrán despreciarse cuando la longitud L del segmento de un elemento entre la sección coaccionada en la que aparece una rótula plástica y la coacción a torsión adyacente no sea mayor que L_s, siempre que:

- el elemento esté coaccionado en la rótula como impone el apartado 6.3.5 y
- haya una o más coacciones laterales entre las coacciones a torsión a una distancia que cumpla los requisitos de L_m, véase el apartado BB 3.2.1,

donde:

- para elementos con tres alas en la zona acartelada (véase la figura A22.BB.2)

$$L_s = \frac{\sqrt{C_n} L_k}{c} \quad \text{(BB.11)}$$

- para elementos con dos alas en la zona acartelada (véase la figura A22.BB.3)

$$L_s = 0{,}85 \frac{\sqrt{C_n} L_k}{c} \quad \text{(BB.12)}$$

donde:

L_k es la longitud calculada suponiendo un elemento de canto constante con una sección igual a la sección de menor canto, véase BB.3.1.2

C_n véase BB.3.3.2

c es el factor en una función del canto variable definido en el apartado BB.3.3.3.

BB.3.3 Factores de corrección para variaciones de la distribución de momentos en los elementos coaccionados lateralmente a lo largo del ala traccionada

BB.3.3.1 Variación lineal de momentos

(1)B El coeficiente C_m podrá determinarse como:

$$C_m = \frac{1}{B_0 + B_1 \beta_t + B_2 \beta_t^2} \quad \text{(BB.13)}$$

donde:

$$B_0 = \frac{1 + 10\eta}{1 + 20\eta}$$

$$B_1 = \frac{5\sqrt{\eta}}{\pi + 10\sqrt{\eta}}$$

$$B_2 = \frac{0{,}5}{1 + \pi\sqrt{\eta}} - \frac{0{,}5}{1 + 20\eta}$$

$$\eta = \frac{N_{crE}}{N_{crT}}$$

$$N_{crE} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_t^2}$$

L_t es la distancia entre coacciones a torsión

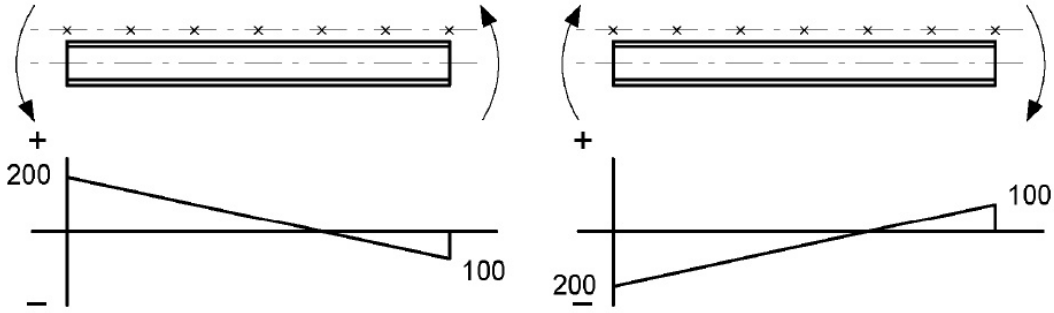
$N_{crT} = \frac{1}{i_s^2}\left(\frac{\pi^2 E I_z a^2}{L_t^2} + \frac{\pi^2 E I_w}{L_t^2} + G I_T\right)$ es el esfuerzo crítico elástico de pandeo para una sección I con un espacio entre coacciones a torsión L_t con coacciones laterales intermedias en el ala traccionada

$$i_s^2 = i_y^2 + i_z^2 + a^2$$

donde:

a es la distancia entre el centro de gravedad del elemento y el centro de gravedad de los elementos de arriostramiento, tales como rigidizadores

β_t es la relación entre los momentos en los extremos mayores y menores. Los momentos que producen compresión en el ala no arriostrada deberán tomarse como positivos. Si la relación es menor que $-1{,}0$ el valor de β_t deberá tomarse como $-1{,}0$, véase la figura A22.BB. 4.



$$\beta_t = \frac{-100}{+200} = -0{,}5 \qquad \beta_t = \frac{-200}{+100} = -2$$

si $\beta_t \geq -1{,}0$ entonces $\beta_t = -1{,}0$

≤

Figura A22.BB.4 Valores de β_t

BB.3.3.2 Variación de momentos no lineales

(1)B El coeficiente C_n podrá obtenerse de:

$$C_n = \frac{12}{[R_1+3R_2+4R_3+3R_4+R_5+2(R_s-R_E)]} \qquad \text{(BB.14)}$$

donde de R_1 a R_5 son valores de R de acuerdo con (2)B en los extremos a cuartos y en centro de la luz, véase la figura A22.BB.5, y únicamente deberán incluirse los valores positivos de R.

Además se incluirán únicamente los valores positivos de $(R_s - R_E)$, donde:

- R_E es mayor que R_1 o R_5,
- R_s es el valor máximo de R en cualquier punto de la longitud L_y.

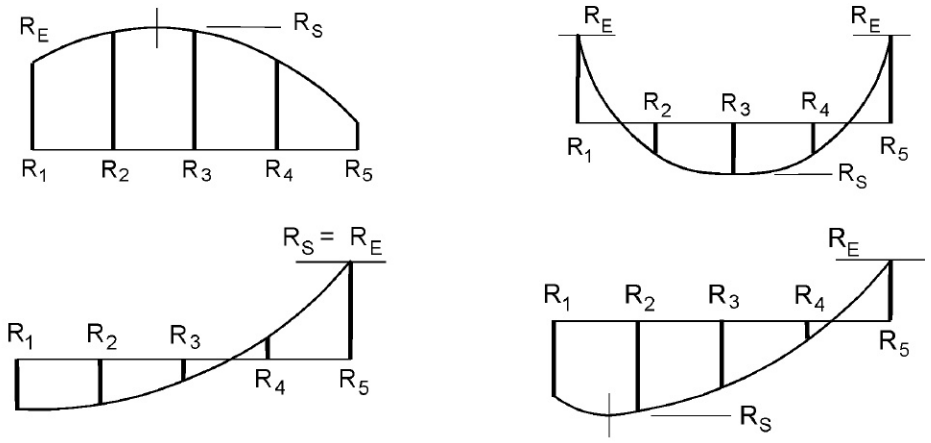


Figura A22.BB.5 Coeficientes de los momentos

(2)B El valor de R deberá obtenerse de:

$$R = \frac{M_{y,Ed} + aN_{Ed}}{f_y W_{pl,y}} \qquad \text{(BB.15)}$$

donde:

a es la distancia entre el centro de gravedad del elemento y el centro de los elementos de arriostramiento, tales como rigidizadores.

BB.3.3.3 Factor de variación del canto

(1)B Para elementos de canto variable con alas constantes, en los que $h \geq 1{,}2\, b$ y $h/t_f \geq 20$, el canto variable deberá obtenerse como sigue:

- para elementos o segmentos de canto variable, véase la figura A22.BB.6(a):

$$c = 1 + \frac{3}{\frac{h}{t_f} - 9}\left(\frac{h_{max}}{h_{min}} - 1\right)^{2/3} \qquad \text{(BB.16)}$$

- para elementos o segmentos acartelados, véanse las figuras A22.BB.6(b) y (c):

$$c = 1 + \frac{3}{\frac{h}{t_f} - 9}\left(\frac{h_h}{h_s}\right)^{2/3} \sqrt{\frac{L_h}{L_y}} \qquad \text{(BB.17)}$$

donde:

h_h es el canto adicional de la cartela o elemento de refuerzo, véase figura A22.BB.6

h_{max} es el canto máximo de la sección en la longitud L_y, véase figura A22.BB.6

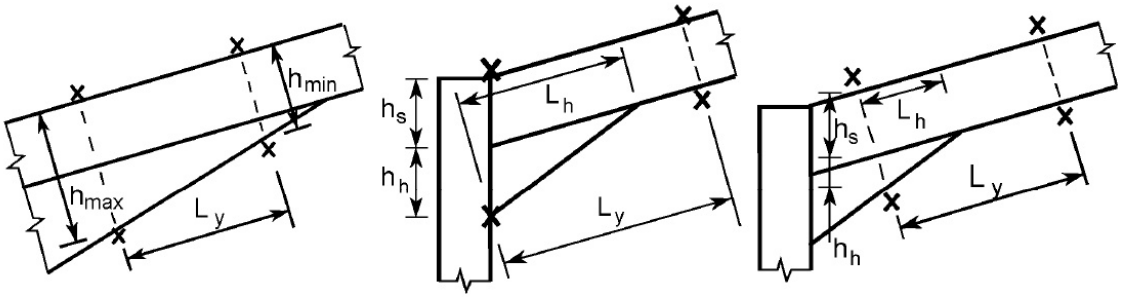
h_{min} es el canto mínimo de la sección en la longitud L_y, véase figura A22.BB.6

h_s es el canto vertical de la sección sin la cartela en el extremo, véase figura A22.BB.6

L_h es la longitud de la cartela en la longitud L_y, véase la figura A22.BB.6

L_y es la longitud entre puntos de coacción lateral del ala comprimida

h/t_f es calculada para la sección de menor canto.



(a) Segmento de canto variable (b) Segmento acartelado (c) Segmento acartelado

x = coacción

Figura A22.BB.6 Dimensiones para definir el factor de variación del canto

Apéndice C Selección de la clase de ejecución

Para la definición de las clases de ejecución en los elementos de acero estructural se tendrá en cuenta lo indicado en el apartado 14.3 del Código Estructural.