

Mayo 2008

TÍTULO

Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero

Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios

Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Eurocode 3: Calcul des structures en acier. Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de las Normas Europeas EN 1993-1-1:2005 y EN 1993-1-1:2005/AC:2006.

OBSERVACIONES

Esta norma anula y sustituye a las Normas UNE-ENV 1993-1-1:1996, UNE-ENV 1993-1-1:1997 Erratum y UNE-ENV 1993-1-1/A1:1996.

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 140 *Eurocódigos Estructurales* cuya Secretaría desempeña SEOPAN.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 23997:2008

© AENOR 2008
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR

C Génova, 6
28004 MADRID-España

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Teléfono 91 432 60 00
Fax 91 310 40 32

105 Páginas

Grupo 58

AENOR

NORMA EUROPEA
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 1993-1-1

Mayo 2005

+AC

Febrero 2006

ICS 91.010.30; 91.080.10

Sustituye a ENV 1993-1-1:1992

Versión en español

Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero

Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios

Eurocode 3: Design of steel structures.
Part 1-1: General rules and rules for
buildings.

Eurocode 3: Calcul des structures en acier.
Partie 1-1: Règles générales et règles pour
les bâtiments.

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion
von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine
Bemessungsregeln und Regeln für den
Hochbau.

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2004-04-16.

Los miembros de CEN están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional. Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales pueden obtenerse en el Centro de Gestión de CEN, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CEN en su idioma nacional, y notificada al Centro de Gestión, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

CEN
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung
CENTRO DE GESTIÓN: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

© 2005 Derechos de reproducción reservados a los Miembros de CEN.

ÍNDICE

	Página
PRÓLOGO	6
1 GENERALIDADES.....	10
1.1 Objeto y campo de aplicación	10
1.2 Normas para consulta	11
1.3 Consideraciones.....	12
1.4 Distinción entre Principios y Reglas de aplicación	12
1.5 Términos y definiciones	12
1.6 Símbolos	13
1.7 Convenciones para los ejes de los elementos.....	23
2 BASES DE CÁLCULO.....	25
2.1 Requisitos	25
2.1.1 Requisitos básicos.....	25
2.1.2 Gestión de la fiabilidad	25
2.1.3 Vida útil, durabilidad y robustez	25
2.2 Principios del cálculo de los estados límites	26
2.3 Variables básicas	26
2.3.1 Acciones e influencias medioambientales.....	26
2.3.2 Propiedades de los materiales y de los productos.....	26
2.4 Verificación por el método de los coeficientes parciales	27
2.4.1 Valores de cálculo de las propiedades de los materiales	27
2.4.2 Valores de cálculo de los datos geométricos.....	27
2.4.3 Resistencias de cálculo	27
2.4.4 Verificación del equilibrio estático (EQU)	27
2.5 Comprobación estructural mediante ensayos.....	27
3 MATERIALES.....	28
3.1 Generalidades	28
3.2 Acero estructural.....	28
3.2.1 Propiedades del material	28
3.2.2 Ductilidad.....	28
3.2.3 Tenacidad de fractura.....	29
3.2.4 Resistencia transversal.....	30
3.2.5 Tolerancias.....	31
3.2.6 Valores de cálculo de las propiedades del material	31
3.3 Medios de unión	31
3.3.1 Pernos.....	31
3.3.2 Material de aportación	31
3.4 Otros productos prefabricados para edificación.....	31
4 DURABILIDAD.....	31
5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	32
5.1 Modelos estructurales para el análisis.....	32
5.1.1 Modelos estructurales e hipótesis básicas	32
5.1.2 Modelos para las uniones.....	32
5.1.3 Interacción suelo-estructura.....	33
5.2 Análisis global.....	33
5.2.1 Efectos de la geometría deformada de la estructura	33
5.2.2 Estabilidad global de entramados reticulares.....	35
5.3 Imperfecciones.....	36
5.3.1 Bases.....	36
5.3.2 Imperfecciones para el análisis global de entramados reticulares.....	37

5.3.3	Imperfecciones para el análisis de los sistemas de arriostramiento.....	41
5.3.4	Imperfecciones de los elementos aislados.....	43
5.4	Métodos de análisis considerando las no linealidades del comportamiento del material	43
5.4.1	Generalidades	43
5.4.2	Análisis global elástico	44
5.4.3	Análisis global plástico.....	44
5.5	Clasificación de secciones transversales	45
5.5.1	Bases	45
5.5.2	Clasificación.....	45
5.6	Requisitos relativos a las secciones para el análisis global plástico de la estructura..	46
6	ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS	50
6.1	Generalidades	55
6.2	Resistencia de las secciones transversales	51
6.2.1	Generalidades	51
6.2.2	Propiedades de la sección transversal	52
6.2.3	Esfuerzo axil de tracción	55
6.2.4	Esfuerzo axil de compresión.....	55
6.2.5	Momento flector	56
6.2.6	Esfuerzo cortante	57
6.2.7	Torsión	60
6.2.8	Flexión y cortante.....	60
6.2.9	Flexión y esfuerzo axil.....	61
6.2.10	Flexión, esfuerzo cortante y esfuerzo axil	63
6.3	Resistencia a pandeo de elementos	64
6.3.1	Elementos uniformes en compresión	64
6.3.2	Elementos uniformes sometidos a flexión	68
6.3.3	Elementos uniformes sometidos a compresión y flexión.....	73
6.3.4	Método general para pandeo por flexión fuera del plano y pandeo lateral	74
6.3.5	Pandeo lateral de elementos con rótulas plásticas.....	74
6.4	Elementos compuestos uniformes sometidos a compresión	78
6.4.1	Generalidades	78
6.4.2	Elementos comprimidos triangulados	80
6.4.3	Elementos comprimidos empresillados	82
6.4.4	Elementos compuestos con cordones próximos	84
7	ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO	85
7.1	Generalidades	85
7.2	Estados límite de servicio para edificios.....	85
7.2.1	Flechas verticales.....	85
7.2.2	Flechas horizontales	86
7.2.3	Efectos dinámicos	86
ANEXO A (Informativo)	MÉTODO 1: COEFICIENTES DE INTERACCIÓN k_{ij} DE LA FÓRMULA DE INTERACCIÓN DEL PUNTO (4) DEL APARTADO 6.3.3.....	87
ANEXO B (Informativo)	MÉTODO 2: COEFICIENTES DE INTERACCIÓN k_{ij} DE LA FÓRMULA DE INTERACCIÓN DEL PUNTO (4) DEL APARTADO 6.3.3.....	90
ANEXO AB (Informativo)	CLÁUSULAS ADICIONALES DE CÁLCULO	92
ANEXO BB (Informativo)	PANDEO DE COMPONENTES DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS	93

PRÓLOGO

Esta Norma Europea EN 1993, *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero*, ha sido elaborada por el Comité Técnico CEN/TC250 “Eurocódigos estructurales”, cuya Secretaría está desempeñada por BSI. El Comité CEN/TC 250 es responsable de todos los Eurocódigos Estructurales.

Esta norma europea debe recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a ella o mediante ratificación antes de finales de noviembre de 2005, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de marzo de 2010.

Este Eurocódigo anula y sustituye a la Norma Europea Experimental ENV 1993-1-1.

De acuerdo con el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, están obligados a adoptar esta norma europea los organismos de normalización de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

Prólogo del programa de Eurocódigos

En 1975, la Comisión de la Comunidad Europea decidió llevar a cabo un programa de actuación en el campo de la construcción, basado en el artículo 95 del Tratado. El objetivo de este programa era la eliminación de las barreras técnicas al comercio y la armonización de las especificaciones técnicas.

Dentro de este programa de actuación, la Comisión tomó la iniciativa de establecer un conjunto de reglas técnicas armonizadas para el proyecto de las estructuras que, en una primera etapa, sirviera como alternativa a las reglas nacionales en vigor en los Estados Miembro y, finalmente, las pudiera reemplazar.

Durante quince años, la Comisión, con la ayuda de un Comité Director con representantes de los Estados Miembro, condujo el desarrollo del programa de los Eurocódigos, lo que llevó en los años 80 a la primera generación de códigos europeos.

En 1989, los Estados Miembro de la UE y de la AELC decidieron, sobre la base de un acuerdo¹⁾ entre la Comisión y el CEN, transferir al CEN la preparación y publicación de los Eurocódigos mediante una serie de Mandatos, con el fin de dotarlos de un futuro estatus de Norma Europea (EN). Esto vincula de facto los Eurocódigos con las disposiciones de todas las Directivas del Consejo y Decisiones de la Comisión que hacen referencia a las normas europeas (por ejemplo, la Directiva del Consejo 89/106/CEE sobre productos de construcción - DPC - y las Directivas del Consejo 93/37/CEE, 92/50/CEE y 89/440/CEE sobre obras públicas y servicios y las Directivas de la AELC equivalentes iniciadas para conseguir la implantación del mercado interior).

El programa Eurocódigos Estructurales comprende las siguientes normas, compuestas generalmente de diversas Partes:

EN 1990 *Eurocódigo: Bases de cálculo de estructuras*

EN 1991 *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras*

EN 1992 *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón*

EN 1993 *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero*

EN 1994 *Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas*

EN 1995 *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera*

EN 1996 *Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica*

EN 1997 *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico*

EN 1998 *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes*

EN 1999 *Eurocódigo 9: Proyecto de estructuras de aluminio*

1) Acuerdo entre la Comisión de las Comunidades Europeas y el Comité Europeo de Normalización (CEN) referente al trabajo sobre los EUROCÓDIGOS para el proyecto de edificios y de obras de ingeniería civil. (BC/CEN/03/89).

Los Eurocódigos reconocen la responsabilidad de las autoridades reglamentadoras de cada Estado Miembro y han salvaguardado su derecho a determinar, en el ámbito nacional, los valores relacionados con temas reglamentarios de seguridad cuando éstos sigan siendo distintos de un Estado a otro.

Estatus y campo de aplicación de los eurocódigos

Los Estados Miembro de la UE y de la AELC reconocen que los Eurocódigos sirven como documentos de referencia para los siguientes fines:

- como medio para demostrar el cumplimiento de las obras de edificación y de ingeniería civil con los Requisitos Esenciales de la Directiva del Consejo 89/106/CEE, en particular con el Requisito Esencial nº 1 - Resistencia mecánica y estabilidad - y con el Requisito Esencial nº 2 - Seguridad en caso de incendio;
- como base para especificar los contratos de las obras de construcción y de los servicios de ingeniería correspondientes;
- como marco para redactar las especificaciones técnicas armonizadas de productos de construcción (ENs y DITEs).

Los Eurocódigos, en la medida en que están relacionados con las construcciones, tienen una relación directa con los Documentos Interpretativos²⁾ a los que hace referencia el artículo 12 de la DPC, aunque son de distinta naturaleza que las normas armonizadas de producto³⁾. Por ello, los Comités Técnicos del CEN y/o los Grupos de Trabajo de la EOTA que trabajen sobre normas de producto deben considerar adecuadamente los aspectos técnicos que surjan del trabajo de los Eurocódigos, con vistas a obtener la compatibilidad total entre estas especificaciones técnicas y los Eurocódigos.

Los Eurocódigos proporcionan reglas comunes de cálculo estructural para su uso diario en el proyecto de estructuras completas y de productos componentes de naturaleza tanto tradicional como innovadora. Las formas de construcción y condiciones de cálculo poco usuales no quedan cubiertas específicamente y requerirán, en tales casos, el estudio adicional del proyectista.

Las normas nacionales de aplicación de los eurocódigos

Las normas nacionales de aplicación de los Eurocódigos comprenderán el texto completo del Eurocódigo (incluyendo los anexos), tal y como se publique por el CEN, pudiendo venir precedido de una portada nacional y de un preámbulo nacional y terminado en un anexo nacional.

El anexo nacional sólo puede contener información sobre aquellos parámetros que queden abiertos en los Eurocódigos para la elección de una opción nacional, conocidos como Parámetros de Determinación Nacional, para su empleo en el proyecto de edificios y obras de ingeniería civil a construir en el país correspondiente, es decir:

- los valores y/o las clases cuando se ofrezcan alternativas en el Eurocódigo;
- los valores a emplear cuando sólo se dé un símbolo en el Eurocódigo;
- los datos específicos del país (geográficos, climatológicos, etc.), por ejemplo, el mapa de nieve;
- el procedimiento a emplear cuando los Eurocódigos ofrezcan procedimientos alternativos.
- referencia a información complementaria no contradictoria que ayude al usuario a aplicar el Eurocódigo.

2) De acuerdo con el artículo 3.3 de la DPC, los documentos interpretativos darán forma concreta a los requisitos esenciales (REs) con el fin de establecer los vínculos necesarios entre los requisitos esenciales y los mandatos para la elaboración de normas armonizadas y DITEs/Guías de DITEs.

3) De acuerdo con el artículo 12 de la DPC los documentos interpretativos deben:

- a) dar forma concreta a los requisitos esenciales mediante la armonización de la terminología y de las bases técnicas y la asignación, en su caso, de clases y niveles para cada requisito esencial;
- b) indicar los métodos para relacionar estas clases y niveles con las especificaciones técnicas, por ejemplo, métodos de cálculo y de prueba, reglas técnicas para el cálculo en proyectos, etc.;
- c) servir de referencia para el establecimiento de normas armonizadas y de guías para los Documentos de Idoneidad Técnica Europeos.

Los Eurocódigos, *de facto*, juegan un papel similar en el campo del RE 1 y en parte del RE 2.

Vínculos entre los eurocódigos y las especificaciones técnicas armonizadas (ENs Y DITEs) de productos

Hay una necesidad de consistencia entre las especificaciones técnicas armonizadas de producto y las reglas técnicas de las obras⁴⁾. Aún más, toda la información que acompañe al marcado CE de los productos de construcción que se refiera a los Eurocódigos debería mencionar con claridad qué Parámetros de Determinación Nacional se han tenido en cuenta.

Información adicional específica de la Norma Europea EN 1993-1

La Norma Europea EN 1993 está destinada a ser utilizada con los Eurocódigos EN 1990 *Bases de cálculo de estructuras*, EN 1991 *Acciones en estructuras* y EN 1992 a EN 1999, cuando se refieran a estructuras o componentes de acero.

La Norma Europea EN 1993-1 es la primera de las seis partes que componen la Norma Europea EN 1993 *Proyecto de estructuras de acero*. Proporciona normas genéricas de cálculo destinadas a ser utilizadas con las otras partes de las Normas EN 1993-2 a EN 1993-6. También proporciona reglas suplementarias aplicables únicamente a edificios.

La Norma Europea EN 1993-1 comprende doce subpartes, EN 1993-1-1 a EN 1993-1-12, relativas cada una a componentes, estados límites o materiales específicos.

La Norma Europea EN 1993-1 también puede utilizarse para casos de proyecto no cubiertos por los Eurocódigos (otras estructuras, otras acciones, otros materiales) sirviendo como documento de referencia para otros Comités Técnicos del CEN relativos a temas estructurales.

La Norma Europea EN 1993-1 está destinada a ser utilizada por:

- comités que elaboran normas de productos relacionados, ensayos o ejecución;
- clientes (por ejemplo para la formulación de sus requisitos específicos);
- calculistas y constructores;
- las autoridades pertinentes.

Los valores numéricos de los coeficientes parciales y otros parámetros de fiabilidad se recomiendan como valores básicos que tienen un aceptable nivel de fiabilidad. Han sido elegidos asumiendo la hipótesis de aplicación de un nivel apropiado de ejecución y de gestión de la calidad.

Anexo nacional de la Norma Europea EN 1993-1-1

Esta norma proporciona valores con notas que indican donde pueden realizarse elecciones nacionales. Por tanto, la norma nacional que adopte la Norma Europea EN 1993-1 debería tener un anexo nacional que contenga todos los Parámetros de Determinación Nacional necesarios para el proyecto de estructuras de acero que se vayan a construir en ese país determinado.

Se permite la elección nacional en los siguientes apartados de la Norma Europea EN 1993-1-1:

- 2.3.1 (1)
- 3.1 (2)
- 3.2.1 (1)
- 3.2.2 (1)
- 3.2.3 (1)

4) Véanse los artículos 3.3 y 12 de la DPC, así como los apartados 4.2, 4.3.1, 4.3.2 y 5.2 del Documento Interpretativo nº 1.

- 3.2.3 (3)B
- 3.2.4 (1)B
- 5.2.1 (3)
- 5.2.2 (8)
- 5.3.2 (3)
- 5.3.2 (11)
- 5.3.4 (3)
- 6.1 (1)
- 6.1 (1)B
- 6.3.2.2 (2)
- 6.3.2.3 (1)
- 6.3.2.3 (2)
- 6.3.2.4 (1)B
- 6.3.2.4 (2)B
- 6.3.3 (5)
- 6.3.4 (1)
- 7.2.1 (1)B
- 7.2.2 (1)B
- 7.2.3 (1)B
- BB.1.3 (3)B

1 GENERALIDADES

1.1 Objeto y campo de aplicación

1.1.1 Objeto y campo de aplicación del Eurocódigo 3

- (1) El Eurocódigo 3 es aplicable al proyecto de edificios y obras de ingeniería civil en acero. Es conforme con los principios y requisitos relativos a la seguridad y a la aptitud al servicio de las estructuras, sus bases de cálculo y verificación dadas en la Norma Europea EN 1990 *Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras*.
- (2) El Eurocódigo 3 se refiere únicamente a los requisitos de resistencia, aptitud al servicio, durabilidad y resistencia al fuego de las estructuras de acero. No se consideran otros requisitos, por ejemplo referentes al aislamiento térmico o acústico.
- (3) El Eurocódigo 3 está previsto para ser utilizado conjuntamente con los siguientes documentos:
 - EN 1990 *Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras*.
 - EN 1991 *Eurocódigo 1. Acciones en estructuras*.
 - ENs, DITEs y guías DITE para productos de construcción relevantes para estructuras de acero.
 - EN 1090 *Ejecución de estructuras de acero. Requisitos técnicos*.
 - EN 1992 a EN 1999 cuando se refieran a estructuras de acero.
- (4) El Eurocódigo 3 se subdivide en varias partes:
 - EN 1993-1 *Proyecto de estructuras de acero: Reglas generales y reglas para edificios*.
 - EN 1993-2 *Proyecto de estructuras de acero: Puentes*.
 - EN 1993-3 *Proyecto de estructuras de acero: Torres, mástiles y chimeneas*.
 - EN 1993-4 *Proyecto de estructuras de acero: Silos, depósitos y conducciones*.
 - EN 1993-5 *Proyecto de estructuras de acero: Pilotes y tablestacas*.
 - EN 1993-6 *Proyecto de estructuras de acero: Vigas carril*.
- (5) Las Normas Europeas EN 1993-2 a EN 1993-6 se refieren a reglas genéricas de la Norma Europea EN 1993-1 y sus reglas complementan a dichas reglas genéricas.
- (6) La Norma Europea EN 1993-1 *Reglas generales y reglas para edificios*, comprende las siguientes normas:
 - EN 1993-1-1 *Proyecto de estructuras de acero: Reglas generales y reglas para edificios*.
 - EN 1993-1-2 *Proyecto de estructuras de acero: Estructuras expuestas al fuego*.
 - EN 1993-1-3 *Proyecto de estructuras de acero: Perfiles y chapas de paredes delgadas conformadas en frío*.
 - EN 1993-1-4 *Proyecto de estructuras de acero: Aceros inoxidables*.
 - EN 1993-1-5 *Proyecto de estructuras de acero: Placas planas cargadas en su plano*.
 - EN 1993-1-6 *Proyecto de estructuras de acero: Láminas*.
 - EN 1993-1-7 *Proyecto de estructuras de acero: Placas planas cargadas transversalmente*.
 - EN 1993-1-8 *Proyecto de estructuras de acero: Uniones*.
 - EN 1993-1-9 *Proyecto de estructuras de acero: Fatiga*.
 - EN 1993-1-10 *Proyecto de estructuras de acero: Tenacidad de fractura y resistencia transversal*.
 - EN 1993-1-11 *Proyecto de estructuras de acero: Cables y tirantes*.

EN 1993-1-12 *Proyecto de estructuras de acero: Reglas adicionales para la aplicación de la Norma EN 1993 hasta aceros de grado S700.*

1.1.2 Objeto y campo de aplicación de la Parte 1.1 del Eurocódigo 3

- (1) La Norma Europea EN 1993-1-1 proporciona reglas básicas de cálculo para estructuras de acero con espesores de material $t \geq 3$ mm. También proporciona especificaciones suplementarias para el proyecto estructural de edificios de acero. Estas especificaciones complementarias se indican por la letra “B” después del número de párrafo, por ejemplo ()B.

NOTA Para perfiles y chapas conformados en frío, de pared delgada, con espesores $t < 3$ mm, véase la Norma Europea EN 1993-1-3.

- (2) La Norma Europea EN 1993-1-1 trata las siguientes materias:

Capítulo 1: Generalidades.

Capítulo 2: Bases de cálculo.

Capítulo 3: Materiales.

Capítulo 4: Durabilidad.

Capítulo 5: Análisis estructural.

Capítulo 6: Estados límites últimos.

Capítulo 7: Estados límites de servicio.

- (3) Los capítulos 1 y 2 proporcionan capítulos adicionales a aquellos dados en la Norma Europea EN 1990 *Bases de cálculo de estructuras*.
- (4) El capítulo 3 trata de las propiedades del material de los productos realizados con acero estructural de baja aleación.
- (5) El capítulo 4 proporciona reglas generales sobre durabilidad.
- (6) El capítulo 5 se refiere al análisis estructural de estructuras, para las que los componentes puedan modelarse como elementos lineales con suficiente precisión para su análisis global.
- (7) El capítulo 6 proporciona reglas detalladas para el cálculo de las secciones transversales y otros elementos.
- (8) El capítulo 7 proporciona reglas para la aptitud al servicio.

1.2 Normas para consulta

Esta norma europea incorpora disposiciones de otras publicaciones por su referencia, con o sin fecha. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados del texto de la norma y se relacionan a continuación. Para las referencias con fecha, no son aplicables las revisiones o modificaciones posteriores de ninguna de las publicaciones. Para las referencias sin fecha, se aplica la edición en vigor del documento normativo al que se haga referencia (incluyendo sus modificaciones).

1.2.1 Normas para consulta generales

EN 1090 *Ejecución de estructuras de acero.*

EN ISO 12944 *Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.*

EN 1461 *Recubrimientos galvanizados en caliente sobre productos acabados de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo.*

1.2.2 Normas para consulta de acero estructural soldable

EN 10025-1:2004 *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 1: Condiciones técnicas generales de suministro.*

EN 10025-2:2004 *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados.*

EN 10025-3:2004 *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 3: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales soldables de grano fino en la condición de normalizado/laminado de normalización.*

EN 10025-4:2004 *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 4: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales soldables de grano fino laminados termomecánicamente.*

EN 10025-5:2004 *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 5: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica*

EN 10025-6:2004 *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 6: Condiciones técnicas de suministro de los productos planos de aceros estructurales de alto límite elástico en la condición de templado y revenido.*

EN 10164:1993 *Aceros de construcción con resistencia mejorada a la deformación en la dirección perpendicular a la superficie del producto. Condiciones técnicas de suministro.*

EN 10210-1:1994 *Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado de grano fino. Parte 1: condiciones técnicas de suministro.*

EN 10219-1:1997 *Perfiles huecos para construcción conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.*

1.3 Consideraciones

(1) Además de las consideraciones generales de la Norma Europea EN 1990 son aplicables las siguientes hipótesis:

- La fabricación y el montaje son conformes con la Norma Europea EN 1090.

1.4 Distinción entre Principios y Reglas de aplicación

(1) Son aplicables las reglas del apartado 1.4 de la Norma Europea EN 1990.

1.5 Términos y definiciones

(1) Son aplicables las reglas del apartado 1.5 de la Norma Europea EN 1990.

(2) Los siguientes términos y definiciones se utilizan en la Norma Europea EN 1993-1-1, con el significado siguiente:

1.5.1 entramado:

La totalidad o parte de una estructura, que consta de un conjunto de elementos estructurales unidos directamente, y calculados para resistir la carga conjuntamente; este término se refiere a estructuras reticuladas y articuladas, sean planas o tridimensionales.

1.5.2 subestructura:

Una estructura que forma parte de un entramado, pero que puede considerarse como un entramado aislado en un análisis estructural.

1.5.3 tipos de entramados:

Los términos utilizados para distinguir entre distintos tipos de entramados son:

- **con uniones semirrígidas**, en los cuales las propiedades estructurales de los elementos y uniones necesitan una consideración explícita en el análisis global;
- **con uniones rígidas**, en los cuales sólo las propiedades estructurales de los elementos necesitan ser consideradas en el análisis global;
- **con uniones articuladas**, en los cuales las uniones no son requeridas para resistir momentos.

1.5.4 análisis global:

La determinación de un conjunto consistente de solicitaciones en una estructura, que están en equilibrio con un conjunto particular de acciones que actúan sobre la estructura.

1.5.5 longitud del sistema:

En un plano dado, distancia entre dos puntos consecutivos en los cuales un elemento tiene coaccionado su desplazamiento lateral en este plano, o entre uno de esos puntos y el extremo del elemento.

1.5.6 longitud de pandeo:

Longitud del sistema de un elemento biarticulado equivalente, que tiene la misma resistencia a pandeo que un elemento dado o segmento del elemento.

1.5.7 efecto de arrastre por cortante:

Distribución no uniforme de tensiones en alas anchas debido a la deformación por cortante; se tiene en cuenta mediante la determinación de un ancho “eficaz” de ala en las comprobaciones de la seguridad.

1.5.8 diseño por capacidad:

Método de diseño que trata de obtener la resistencia correspondiente a la deformación plástica de la sección de un elemento mediante un diseño de sus uniones y de las piezas conectadas a él de modo que no constituyan puntos débiles o limiten dicha resistencia (resistencia adicional).

1.5.9 elemento uniforme:

Elemento de sección transversal constante en toda su longitud.

1.6 Símbolos

- (1) Para el propósito de esta norma, son aplicables los siguientes términos.
- (2) Se definirán otros símbolos cada vez que aparezcan en el texto por primera vez.

NOTA Los símbolos están ordenados por orden de aparición en la Norma Europea EN 1993-1-1. Los símbolos pueden tener varios significados.

Capítulo 1

$x-x$	eje longitudinal de un elemento;
$y-y$	eje de una sección transversal;
$z-z$	eje de una sección transversal;
$u-u$	eje principal mayor (cuando éste no coincida con el eje $y-y$);
$v-v$	eje principal menor (cuando éste no coincida con el eje $z-z$);
b	anchura de una sección transversal;

h	canto de una sección transversal;
d	canto de la parte recta de un alma;
t_w	espesor del alma;
t_f	espesor del ala;
r	radio de acuerdo;
r_1	radio de acuerdo;
r_2	(radio de acuerdo);
t	espesor.

Capítulo 2

P_k	valor nominal del efecto del pretensado durante el montaje;
G_k	valor nominal del efecto de las acciones permanentes;
X_k	valores característicos de propiedades del material;
X_n	valores nominales de propiedades del material;
R_d	valor de cálculo de la resistencia;
R_k	valor característico de la resistencia;
γ_M	coeficiente parcial general;
γ_{Mi}	coeficiente parcial particular;
γ_{Mf}	coeficiente parcial para fatiga;
η	coeficiente de conversión;
a_d	valor de cálculo de datos geométricos.

Capítulo 3

f_y	límite elástico;
f_u	resistencia última;
R_{eh}	límite elástico obtenido de normas de producto;
R_m	resistencia última obtenida de normas de producto;
A_0	área inicial de la sección transversal original;
ε_y	deformación correspondiente al límite elástico;
ε_u	deformación última;
Z_{Ed}	valor de proyecto 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 proyecto de la resistencia del material a desgarro laminar;
E	modulo de elasticidad longitudinal;

G	módulo de elasticidad transversal;
ν	coeficiente de Poisson en rango elástico;
α	coeficiente de dilatación térmica lineal.

Capítulo 5

α_{cr}	coeficiente por el que resulta necesario multiplicar las cargas de cálculo para provocar la inestabilidad elástica del modelo de pandeo global de la estructura;
F_{Ed}	carga de cálculo actuando sobre la estructura;
F_{cr}	carga crítica de inestabilidad elástica para el pandeo de la estructura según un modo global, calculada con las rigideces elásticas iniciales;
H_{Ed}	valor de cálculo de la resultante horizontal, al nivel de la cota inferior de la planta considerada, de las cargas horizontales reales y ficticias;
V_{Ed}	valor de cálculo de la carga vertical total, al nivel de la cota inferior de dicha planta, ejercida sobre la estructura por encima de dicho nivel;
$\delta_{H,Ed}$	desplazamiento horizontal relativo del nivel superior de la planta con relación a su nivel inferior;
h	altura de planta;
$\bar{\lambda}$	esbeltez relativa;
N_{Ed}	valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión en el elemento considerado;
ϕ	defecto inicial global de verticalidad;
ϕ_0	valor de base del defecto inicial global de verticalidad;
α_h	coeficiente reductor, función de la altura h , aplicable a soportes;
h	altura de la estructura;
α_m	coeficiente reductor, función del número de soportes de una fila;
m	número de soportes en una fila;
e_0	imperfección (flecha del arco) de un elemento;
L	longitud del elemento;
η_{init}	amplitud de la imperfección única del modo de inestabilidad crítica elástica;
η_{cr}	forma de la deformada del modo global de inestabilidad crítica elástica;
$e_{0,d}$	valor de cálculo de la máxima amplitud de la imperfección de un elemento;
M_{Rk}	resistencia característica a flexión de la sección transversal crítica;
N_{Rk}	resistencia característica a esfuerzo axial de la sección transversal crítica;
α	factor de imperfección;
$EI \eta_{cr}''$	momento flector debido a la deformada η_{cr} en la sección transversal crítica;
χ	coeficiente reductor para la curva de pandeo considerada;

$\alpha_{ult,k}$	coeficiente mínimo de amplificación para alcanzar, sin tener en cuenta el pandeo, la resistencia característica;
α_{cr}	coeficiente mínimo de amplificación para alcanzar el pandeo crítico elástico;
q	fuerza equivalente de estabilización por unidad de longitud;
δ_q	flecha del sistema de arriostramiento en el plano de estabilización;
q_d	fuerza equivalente de estabilización 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 de un elemento;
ℓ	longitud;
ε	coeficiente dependiendo de f_y ;
c	anchura o longitud de una parte de una sección transversal;
α	parte de una sección transversal comprimida;
ψ	coeficiente de tensión o deformación;
k_σ	coeficiente de pandeo transversal o de alabeo;
d	diámetro exterior de secciones tubulares circulares.

Capítulo 6

χ_{M0}	coeficiente parcial para la resistencia de las secciones transversales, independientemente de la clase;
χ_{M1}	coeficiente parcial para la resistencia de los elementos a inestabilidad evaluado por la verificación de los elementos;
χ_{M2}	coeficiente parcial para la resistencia a fractura de las secciones transversales a tracción;
$\sigma_{x,Ed}$	valor de cálculo de la tensión longitudinal en el punto considerado;
$\sigma_{z,Ed}$	valor de cálculo de la tensión transversal en el punto considerado;
τ_{Ed}	valor de cálculo de la tensión tangencial en el punto considerado;
N_{Ed}	esfuerzo normal de cálculo;
$M_{y,Ed}$	momento flector de cálculo, eje y-y;
$M_{z,Ed}$	momento flector de cálculo, eje z-z;
N_{Rd}	valor de cálculo de la resistencia al esfuerzo normal;
$M_{y,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia al momento flector, eje y-y;
$M_{z,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia al momento flector, eje z-z;
s	paso del tresbolillo, distancia entre centros de dos agujeros consecutivos en la línea en zig-zag, medida paralelamente al eje del elemento;

p	distancia entre centros de los mismos agujeros consecutivos, medida perpendicularmente al eje del elemento;
n	numero de agujeros existentes en cualquier diagonal o línea en zig-zag a través del elemento o parte del mismo;
d_0	diámetro del agujero;
e_N	desplazamiento del centro de gravedad del área reducida A_{eff} con respecto al centro de gravedad de la sección transversal bruta;
ΔM_{Ed}	momento adicional debido al desplazamiento del centro de gravedad del área reducida A_{eff} con respecto al centro de gravedad de la sección transversal bruta;
A_{eff}	área reducida o de la sección transversal eficaz, según el caso;
$N_{\text{t,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia a tracción;
$N_{\text{pl,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a tracción de la sección transversal bruta;
$N_{\text{u,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia última a tracción de la sección transversal neta, considerando los agujeros para los elementos de unión;
A_{net}	área neta de la sección transversal;
$N_{\text{net,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a tracción de la sección transversal neta;
$N_{\text{c,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia de la sección transversal para un esfuerzo axial de compresión;
$M_{\text{c,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia a flexión alrededor de un eje principal de una sección transversal;
W_{pl}	módulo resistente plástico de la sección;
$W_{\text{el,min.}}$	módulo resistente elástico mínimo de la sección;
$W_{\text{eff,min.}}$	módulo resistente elástico mínimo de la sección reducida;
A_{f}	área del ala traccionada;
$A_{\text{f,net}}$	área neta del ala traccionada;
V_{Ed}	valor de cálculo del esfuerzo cortante;
$V_{\text{c,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia a esfuerzo cortante;
$V_{\text{pl,Rd}}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a cortante;
A_{v}	área sometida a cortante;
η	coeficiente para el área sometida a cortante;
S	momento estático;
I	momento de inercia de la sección transversal;
A_{w}	área del un alma;
A_{f}	área de un ala;
T_{Ed}	valor de cálculo del momento torsor total;
T_{Rd}	valor de cálculo de la resistencia a torsión;
$T_{\text{t,Ed}}$	valor de cálculo de la torsión de St. Venant;
$T_{\text{w, Ed}}$	valor de cálculo de la torsión de alabeo;
$\tau_{\text{t,Ed}}$	valores de cálculo de las tensiones tangenciales debidas a la torsión de St. Venant;

$\tau_{w,Ed}$	valores de cálculo de las tensiones tangenciales debidas a la torsión de alabeo;
$\sigma_{w,Ed}$	valores de cálculo de las tensiones normales longitudinales debidas al bimomento B_{Ed} ;
B_{Ed}	bimomento;
$V_{pl,T,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a cortante reducido por la presencia de momento torsor;
ρ	coeficiente para determinar la resistencia de cálculo a flexión, reducida por la presencia de esfuerzo cortante;
$M_{V,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia plástica a flexión, reducida por la presencia de esfuerzo cortante;
$M_{N,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a flexión, reducida por la presencia de esfuerzo axil;
n	cociente entre el valor de cálculo de la fuerza normal y el valor de cálculo de la resistencia plástica de la sección bruta al esfuerzo normal;
a	cociente entre el área del alma y el área bruta;
α	parámetro que introduce el efecto de la flexión biaxial;
β	parámetro que introduce el efecto de la flexión biaxial;
$e_{N,y}$	desplazamiento del centro de gravedad de la sección reducida respecto al de la sección bruta (eje y - y);
$e_{N,z}$	desplazamiento del centro de gravedad de la sección reducida respecto al de la sección bruta (eje z - z);
$W_{eff,min}$	módulo resistente mínimo de la sección transversal reducida;
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a pandeo de un elemento comprimido;
χ	coeficiente de reducción para el modo de pandeo considerado;
Φ	valor para determinar el coeficiente de reducción χ ;
a_0, a, b, c, d	denominaciones de las curvas de pandeo;
N_{cr}	esfuerzo axil crítico elástico para el modo de pandeo considerado, obtenido con las características de la sección transversal bruta;
i	radio de giro sobre el eje considerado, determinado usando las propiedades de la sección transversal bruta;
λ_1	valor de la esbeltez para determinar la esbeltez relativa;
$\bar{\lambda}_T$	esbeltez relativa para pandeo torsional o a 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 horizontal de las curvas de pandeo lateral-torsional para los perfiles laminados;
β	coeficiente de corrección para las curvas de pandeo lateral-torsional para los perfiles laminados;
$\chi_{LT,mod}$	coeficiente de reducción modificado para pandeo lateral-torsional;
f	coeficiente de modificación para χ_{LT} ;
k_c	coeficiente de corrección de la esbeltez para considerar la distribución de momentos entre puntos de arriostramiento;
ψ	relación de momentos en los extremos del segmento;
L_c	longitud entre rigidizadores laterales;
$\bar{\lambda}_f$	esbeltez del ala comprimida equivalente;
$i_{f,z}$	radio de giro del ala comprimida equivalente respecto al eje débil de la sección;
$I_{eff,f}$	momento de inercia del ala comprimida reducida respecto al eje débil de la sección;
$A_{eff,f}$	área del ala comprimida reducida;
$A_{eff,w,c}$	área de la parte comprimida reducida del alma;
$\bar{\lambda}_{c0}$	límite de esbeltez;
k_{fl}	factor de corrección;
ΔM_y	momentos debidos al desplazamiento del eje y - y del centro de gravedad;
ΔM_z	momentos debidos al desplazamiento del eje z - z del centro de gravedad;
χ_y	coeficiente de reducción debido al pandeo por flexión (eje y - y);
χ_z	coeficiente de reducción debido al pandeo por flexión (eje z - z);
k_{yy}	coeficiente de interacción;
k_{yz}	coeficiente de interacción;
k_{zy}	coeficiente de interacción;
k_{zz}	coeficiente de interacción;
$\bar{\lambda}_{op}$	esbeltez adimensional global de un componente estructural para pandeo fuera del plano;
χ_{op}	coeficiente de reducción correspondiente a la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_{op}$;
$\alpha_{ult,k}$	coeficiente mínimo de amplificación de carga a aplicar sobre las acciones de cálculo para alcanzar la resistencia característica de la sección transversal más crítica del componente estructural;
$\alpha_{cr,op}$	coeficiente mínimo de amplificación de carga a aplicar sobre las acciones de cálculo situadas en el plano para alcanzar la resistencia elástica crítica 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 al momento flector sobre el eje y - y ;
$M_{z,Rk}$	valor característico de la resistencia al momento flector sobre el eje z - z ;
Q_m	fuerza local aplicada en cada elemento estabilizado en las zonas de rótula plástica;

L_{stable}	longitud estable del elemento;
L_{ch}	longitud de pandeo del cordón;
h_0	distancia entre los centros de gravedad de los cordones para una columna compuesta;
a	distancia entre rigidizadores de cordones;
α	ángulo entre ejes de cordón y triangulaciones;
$i_{min.}$	radio mínimo de giro de ángulos simples;
A_{ch}	área de la sección transversal de un cordón de una columna compuesta;
$N_{ch,Ed}$	valor de cálculo del esfuerzo en un cordón en el centro de un elemento compuesto;
M_{Ed}^I	valor de cálculo del momento máximo en el centro de un elemento compuesto;
I_{eff}	momento de inercia efectivo del elemento compuesto;
S_v	rigidez a cortante de la triangulación usada para el enlace o del panel empresillado;
n	número de planos de enlaces (triangulaciones);
A_d	área de la sección transversal de una diagonal de una columna compuesta;
d	longitud de una diagonal de una columna compuesta;
A_v	área de la sección transversal de un montante (o elemento transversal) de una columna compuesta;
I_{ch}	momento de inercia de un cordón en el plano;
I_b	momento de inercia de una presilla en el plano;
μ	factor de eficiencia;
i_y	radio de giro (eje y-y).

Anexo A

C_{my}	factor de momento uniforme equivalente;
C_{mz}	factor de momento uniforme equivalente;
C_{mLT}	factor de momento uniforme equivalente;
μ_y	coeficiente;
μ_z	coeficiente;
$N_{cr,y}$	esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje y-y;
$N_{cr,z}$	esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje z-z;
C_{yy}	coeficiente;
C_{yz}	coeficiente;
C_{zy}	coeficiente;
C_{zz}	coeficiente;
w_y	coeficiente;

w_z	coeficiente;
n_{pl}	coeficiente;
$\bar{\lambda}_{máx.}$	valor 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 momentos en los extremos del segmento (eje y-y);
$C_{my,0}$	coeficiente;
$C_{mz,0}$	coeficiente;
a_{LT}	coeficiente;
I_t	Inercia de torsión de St. Venant;
I_y	Inercia de flexión con respecto al eje y-y;
$M_{i,Ed}(x)$	máximo momento de flexión de primer orden;
$ \delta_x $	flecha máxima local a lo largo del elemento.

Anexo B

α_s	coeficiente;
α_h	coeficiente;
C_m	factor de momento uniforme equivalente.

Anexo AB

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

Anexo BB

$\bar{\lambda}_{eff,v}$	esbeltez efectiva para el pandeo respecto al eje v-v;
$\bar{\lambda}_{eff,y}$	esbeltez efectiva para el pandeo respecto al eje y-y;
$\bar{\lambda}_{eff,z}$	esbeltez efectiva para el pandeo respecto al eje z-z;
L	longitud del elemento;
L_{cr}	longitud de pandeo;
S	rigidez a cortante proporcionada por la chapa;

I_w	Inercia de alabeo;
$C_{\varnothing,k}$	rigidez al giro ofrecida a la viga por el arriostramiento y por las uniones;
$K_{\varnothing}$	factor que considera el tipo de análisis;
$K_{\varnothing}$	factor que tiene en cuenta las distribución de momentos y el tipo de coacción;
$C_{\varnothing R,k}$	rigidez al giro de la unión entre la viga y el arriostramiento estabilizante suponiendo una unión rígida al elemento;
$C_{\varnothing C,k}$	rigidez al giro de la unión entre la viga y el arriostramiento estabilizante;
$C_{\varnothing D,k}$	rigidez al giro obtenida de un análisis de las distorsiones de la sección transversal de la viga;
L_m	longitud estable entre arriostramientos laterales adyacentes;
L_k	longitud estable entre coacciones a torsión adyacentes;
L_s	longitud estable entre rótula plástica y arriostramiento;
C_1	factor corrector para la distribución de momentos;
C_m	factor corrector para una ley lineal de momentos;
C_n	factor corrector para una ley no lineal de momentos;
a	distancia entre el centro donde se forma la rótula plástica y el centro de los elementos arriostrados;
B_0	coeficiente;
B_1	coeficiente;
B_2	coeficiente;
η	cociente de valores críticos de esfuerzos axiales;
i_s	radio de giro relativo al 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 lugar específico de un elemento;
R_2	momento en un lugar específico de un elemento;
R_3	momento en un lugar específico de un elemento;
R_4	momento en un lugar específico de un elemento;
R_5	momento en un lugar específico de un elemento;
R_E	máximo de R_1 o R_5 ;
R_s	máximo valor del momento flector en cualquier punto de la longitud L_y ;
c	factor de variación del canto;
h_h	canto adicional de la cartela o del tramo de canto variable;
$h_{\text{máx.}}$	máximo canto de la sección en la longitud L_y ;
$h_{\text{mín.}}$	mínimo canto de la sección en la longitud L_y ;
h_s	canto vertical de la sección no acartelada;

L_h longitud de la cartela incluida en la longitud L_y ;
 L_y distancia entre puntos coaccionados lateralmente.

1.7 Convenciones para los ejes de los elementos

(1) La convención para los ejes de los elementos es la siguiente:

$x-x$ Eje longitudinal de un elemento
 $y-y$ Eje de la sección transversal
 $z-z$ Eje de la sección transversal

(2) Para elementos de acero, las convenciones utilizadas para los ejes de las secciones transversales son:

- en general:
 - $y-y$ eje de la sección transversal paralelo a las alas
 - $z-z$ eje de la sección transversal 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 éste no coincida con el eje $y-y$)
 - $v-v$ eje principal menor (cuando éste no coincida con el eje $z-z$)

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

(4) La convención utilizada para los subíndices que indican los ejes para los momentos es: “Utilizar el eje sobre el cual actúa el momento”.

NOTA Todas las reglas dadas en este Eurocódigo se refieren a las propiedades de los ejes principales, que se encuentran generalmente definidos por los ejes $y-y$ y $z-z$, excepto para secciones angulares que se encuentran definidos por los ejes $u-u$ y $v-v$.

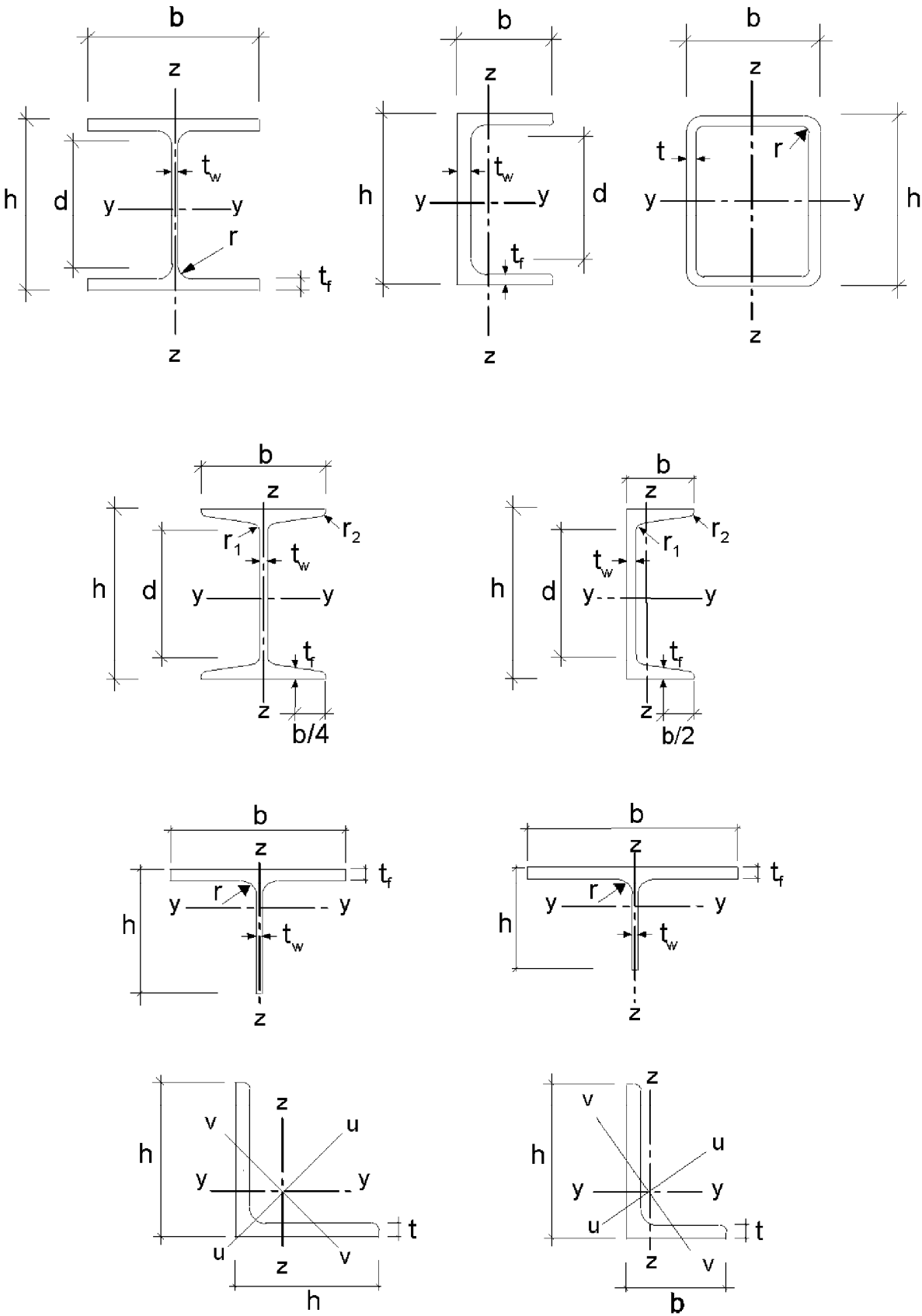


Figura 1.1 – Dimensiones y ejes de las secciones

2 BASES DE CÁLCULO

2.1 Requisitos

2.1.1 Requisitos básicos

- (1)P El proyecto de estructuras de acero debe ser conforme con las reglas generales dadas en la Norma Europea EN 1990.
- (2) Las disposiciones suplementarias para estructuras de acero dadas en este capítulo también deberían aplicarse.
- (3) Se debería considerar que se satisfacen los requisitos básicos del capítulo 2 de la Norma Europea EN 1990 allí donde el cálculo de los estados límites se utilice conjuntamente con el método de los coeficientes parciales y las combinaciones de carga dadas en la Norma Europea EN 1990 y las acciones incluidas en la Norma Europea EN 1991.
- (4) Deberían aplicarse también las reglas para las resistencias, aptitud al servicio y durabilidad dadas en las diferentes partes de la Norma Europea EN 1993.

2.1.2 Gestión de la fiabilidad

- (1) Cuando se requieran diferentes niveles de fiabilidad, éstos se deberían alcanzar preferentemente mediante la elección apropiada de la gestión de la calidad en el cálculo y ejecución, de acuerdo con el anexo C de la Norma Europea EN 1990 y con la Norma Europea EN 1090.

2.1.3 Vida útil, durabilidad y robustez

2.1.3.1 Generalidades

- (1)P Dependiendo del tipo de acción que afecte a la durabilidad y a la vida útil (véase la Norma Europea EN 1990), las estructuras de acero deben ser:
- calculadas frente a la corrosión por medio de:
 - la adecuada protección superficial (véase la Norma Europea EN ISO 12944);
 - el uso de aceros patinables;
 - el uso de aceros inoxidable (véase la Norma Europea EN 1993-1-4);
 - dotadas de detalles constructivos que aseguren la suficiente resistencia a fatiga (véase la Norma Europea EN 1993-1-9)
 - calculadas para resistir al desgaste;
 - calculadas frente a acciones accidentales (véase la Norma Europea EN 1993-1-7);
 - inspeccionadas y mantenidas.

2.1.3.2 Vida útil de los edificios

- (1)P,B La vida útil debe considerarse como el periodo para el cual se espera que la estructura de un edificio sea utilizada para un determinado propósito.
- (2)P,B Para la especificación de la vida útil prevista de un edificio permanente véase la tabla 2.1 de la Norma Europea 1990.
- (3)P,B Para elementos estructurales que no puedan ser proyectados para toda la vida útil del edificio, véase el punto 3(B) del apartado 2.1.3.3.

2.1.3.3 Durabilidad de los edificios

- (1)P,B Para asegurar la durabilidad, los edificios y sus componentes deben calcularse frente a acciones medioambientales y fatiga si fuera necesario o bien protegerse de sus efectos.
- (2)P,B Deben tenerse en cuenta los efectos del deterioro del material, corrosión o fatiga, allí donde sea relevante, mediante la apropiada elección del material, véanse las Normas Europeas EN 1993-1-4 y EN 1993-1-10, y para detalles constructivos, véase la Norma Europea EN 1993-1-9, o mediante redundancia estructural y la elección del adecuado sistema de protección anticorrosión.
- (3)B Si un edificio incluye componentes necesariamente reemplazables (por ejemplo apoyos en zonas de asiento de suelos), la posibilidad de su sustitución debería comprobarse como una situación de proyecto transitoria.

2.2 Principios del cálculo de los estados límites

- (1) Las resistencias de las secciones transversales y de otros elementos especificados en este Eurocódigo 3 para los estados límites últimos, tal como se definen en el apartado 3.3 de la Norma Europea EN 1990, están basadas en ensayos en los que el material ha demostrado la ductilidad suficiente para aplicar modelos de cálculo simplificados.
- (2) Las resistencias especificadas en esta parte del Eurocódigo pueden por tanto utilizarse cuando se satisfagan las condiciones del capítulo 3.

2.3 Variables básicas

2.3.1 Acciones e influencias medioambientales

- (1) Las acciones para el proyecto de estructuras de acero deberían tomarse de la Norma Europea EN 1991. Para la combinación de acciones y coeficientes parciales de acciones véase el anexo A de la Norma Europea EN 1990.

NOTA 1 El anexo nacional puede definir acciones para situaciones regionales, climáticas o accidentales particulares.

NOTA 2B Para la utilización de carga proporcional en el caso de aproximación incremental, véase el anexo AB.1.

NOTA 3B Para una disposición simplificada de las cargas, véase el anexo AB.2.

- (2) Las acciones a considerar en la fase de montaje se deberían tomar de la Norma Europea EN 1991-1-6.
- (3) Cuando se necesiten considerar los efectos de asentamientos previstos absolutos o diferenciales, deberían utilizarse las mejores estimaciones de deformaciones impuestas.
- (4) Los efectos de asentamientos irregulares o deformaciones impuestas u otras formas de pretensado impuestas durante el montaje deberían tenerse en cuenta mediante sus valores nominales P_k como acciones permanentes y agruparse con otras acciones permanentes G_k en una acción única ($G_k + P_k$).
- (5) Las acciones de fatiga no definidas en la Norma Europea EN 1991 deberían determinarse de acuerdo con el anexo A de la Norma Europea EN 1993-1-9.

2.3.2 Propiedades de los materiales y de los productos

- (1) Las propiedades materiales de los aceros y de otros productos de construcción y los datos geométricos necesarios para el cálculo deberían ser los especificados en las normas europeas EN, en los DITEs o en las Guías DITE relevantes, a no ser que se indique lo contrario en esta norma.

2.4 Verificación por el método de los coeficientes parciales

2.4.1 Valores de cálculo de las propiedades de los materiales

- (1)P Para el proyecto de estructuras de acero, los valores característicos X_k o nominales X_n de las propiedades de los materiales deben utilizarse según indica en este Eurocódigo.

2.4.2 Valores de cálculo de los datos geométricos

- (1) Los datos geométricos de las secciones transversales y de los sistemas pueden tomarse de las normas de producto armonizadas EN o de los planos de ejecución de la Norma Europea EN 1090 y tratarse como valores nominales.
- (2) Los valores de cálculo de las imperfecciones geométricas especificadas en esta norma son imperfecciones geométricas equivalentes que tienen en cuenta los efectos de:
- imperfecciones geométricas de elementos dentro de las tolerancias geométricas admitidas por las normas de producto o de ejecución;
 - imperfecciones estructurales debidas a la fabricación y montaje;
 - tensiones residuales;
 - variación del límite elástico.

2.4.3 Resistencias de cálculo

- (1) Para las estructuras de acero, son de aplicación las ecuaciones (6.6c) o (6.6d) de la Norma Europea EN 1990:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} = \frac{1}{\gamma_M} R_k (\eta_1 X_{k1}; \eta_1 X_{ki}; a_d) \quad (2.1)$$

donde

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

γ_M es el coeficiente parcial global para la resistencia particular.

NOTA Para las definiciones de η_1 , η_2 , X_{k1} , X_{ki} y a_d véase la Norma Europea EN 1990.

2.4.4 Verificación del equilibrio estático (EQU)

- (1) El formato de fiabilidad para la verificación del equilibrio estático de la tabla 1.2 (A) del anexo A de la Norma Europea EN 1990 también es aplicable a las situaciones de cálculo equivalentes a (EQU), por ejemplo para el cálculo de anclajes o la verificación del levantamiento de apoyos de vigas continuas.

2.5 Comprobación estructural mediante ensayos

- (1) Las resistencias R_k de esta norma han sido determinadas utilizando el anexo D de la Norma Europea EN 1990.
- (2) Para las clases recomendadas de los coeficientes parciales γ_{Mi} constantes, los valores característicos R_k fueron obtenidos de:

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

donde

R_d son los valores de cálculo de acuerdo con el anexo D de la Norma Europea EN 1990;

γ_{Mi} son los coeficientes parciales recomendados.

NOTA 1 Los valores numéricos de los coeficientes parciales recomendados γ_{Mi} han sido determinados de tal modo que R_k representa aproximadamente el fractil 5% para un número infinito de ensayos.

NOTA 2 Para los valores característicos de la resistencia a fatiga y coeficientes parciales γ_{MF} para la fatiga, véase la Norma Europea EN 1993-1-9.

NOTA 3 Para los valores característicos de la tenacidad de fractura para la comprobación de seguridad frente a la rotura frágil, véase la Norma Europea EN 1993-1-10.

- (3) Cuando deban determinarse mediante ensayos las resistencias R_k para productos prefabricados, debería seguirse el procedimiento mostrado en el punto (2).

3 MATERIALES

3.1 Generalidades

- (1) Los valores nominales de las propiedades de los materiales que se indican en este capítulo deberían adoptarse como característicos en los cálculos.
- (2) Esta parte de la Norma Europea EN 1993 contempla el cálculo de estructuras realizadas con los tipos de aceros incluidos en la tabla 3.1.

NOTA Para otros aceros y productos véase el anexo nacional.

3.2 Acero estructural

3.2.1 Propiedades del material

- (1) Los valores nominales del límite elástico f_y y de la resistencia última a tracción f_u de los aceros estructurales deberían obtenerse mediante uno de los métodos siguientes:
- a) adoptando los valores $f_y = R_{eh}$ y $f_u = R_m$ de acuerdo a la norma del producto;
- b) utilizando la simplificación que aparece en la tabla 3.1.

NOTA El anexo nacional puede fijar la opción.

3.2.2 Ductilidad

- (1) Para aceros se exige una ductilidad mínima que debería expresarse en términos de límites de:
- el cociente f_u/f_y de la resistencia última a tracción mínima f_u y el límite elástico mínimo f_y especificados;
 - la deformación remanente concentrada de rotura de una base de medida de longitud $5,65 \sqrt{A_0}$ (donde A_0 es el área de la sección transversal inicial);
 - la deformación última ϵ_u , donde ϵ_u corresponde a la resistencia última a tracción f_u .

NOTA Los valores límites del cociente f_u/f_y , la deformación remanente concentrada de rotura y la deformación última ϵ_u se pueden definir en el anexo nacional. Se recomiendan los siguientes valores:

- $f_u/f_y \geq 1,10$;
- la deformación remanente concentrada de rotura no inferior al 15%;
- $\epsilon_u \geq 15 \epsilon_y$, donde ϵ_y es la deformación correspondiente al límite elástico $\epsilon_y = \frac{f_y}{E}$.

- (2) Se debería considerar que los aceros incluidos en la tabla 3.1 cumplen estos requisitos.

3.2.3 Tenacidad de fractura

(1)P El material debe poseer una tenacidad de fractura suficiente para evitar la rotura frágil de los elementos sometidos a tracción a la menor temperatura prevista en servicio durante la vida estimada de la estructura.

NOTA La menor temperatura prevista en servicio empleada en los cálculos puede indicarse en el anexo nacional.

(2) No es necesaria ninguna comprobación adicional sobre la rotura frágil si se cumplen las condiciones que aparecen en la Norma Europea EN 1993-1-10 para la temperatura mínima.

(3)B Para los elementos sometidos a compresión en edificación, se recomienda elegir una tenacidad mínima adecuada.

NOTA B El anexo nacional puede aportar información sobre la elección de los valores de tenacidad para los elementos en compresión. Se recomienda la utilización de la tabla 2.1 de la Norma Europea EN 1993-1-10 con $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$

(4) Para la elección de aceros en elementos galvanizados en caliente, véase la Norma Europea EN 1461.

Tabla 3.1 – Valores nominales del límite elástico f_y y de la resistencia a tracción f_u para acero estructural laminado en caliente y para perfiles tubulares estructurales

Norma y tipo de acero	Espesor nominal del elemento t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		40 mm $< t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
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
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
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Norma y tipo de acero	Espesor nominal del elemento t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
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/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
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 Resistencia transversal

- (1) Cuando sean necesarios los aceros con propiedades mejoradas en el sentido del espesor según la Norma Europea EN 1993-1-10, se debería utilizar un acero que pertenezca al grado de calidad requerido en la Norma Europea EN 10164.

NOTA 1 Las directrices sobre la elección de las propiedades en la dirección del espesor se especifican en la Norma Europea EN 1993-1-10.

NOTA 2B Se debería prestar especial atención a las uniones soldadas viga-columna así como a las placas de borde soldadas sometidas a tracción en la dirección del espesor.

NOTA 3B El anexo nacional puede establecer una correspondencia adecuada entre los valores requeridos Z_{Ed} de acuerdo con el apartado 3.2(2) de la Norma Europea EN 1993-1-10 y al grado de la Norma Europea EN 10164. La correspondencia de la tabla 3.2 se recomienda en edificación.

Tabla 3.2 – Elección del grado según la Norma Europea EN 10164

Valor requerido Z_{Ed} según la Norma Europea EN 1993-1-10	Grado Z_{Rd} expresado en términos de valores de Z de acuerdo a la Norma Europea 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 dimensionales y de masa de las secciones de acero laminado, los perfiles huecos estructurales y las placas, deberían ajustarse a la norma de producto, al DITE o a la Guía DITE correspondiente, siempre que no se especifiquen tolerancias más severas.
- (2) Para los elementos soldados se deberían aplicar las tolerancias que establece la Norma Europea EN 1090.
- (3) Para el cálculo y diseño estructural se deberían utilizar los valores nominales de las dimensiones.

3.2.6 Valores de cálculo de las propiedades del material

- (1) Los valores de cálculo de las propiedades del material para los aceros estructurales contemplados en esta parte del Eurocódigo se deberían tomar como se indica a continuación:

- módulo de elasticidad $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
- módulo de elasticidad transversal $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81\,000\text{ N/mm}^2$
- coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$
- coeficiente de dilatación térmica lineal $\alpha = 12 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (para $T \leq 100\text{ °C}$)

NOTA Para calcular los efectos estructurales que produce una diferencia de temperaturas en una estructura mixta de acuerdo a la Norma Europea EN 1994, el valor del coeficiente de dilatación térmica lineal se tomará $\alpha = 10 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$.

3.3 Medios de unión

3.3.1 Pernos

- (1) Los requisitos de los pernos se especifican en la Norma Europea EN 1993-1-8.

3.3.2 Material de aportación

- (1) Los requisitos del material de aportación se especifican en la Norma Europea EN 1993-1-8.

3.4 Otros productos prefabricados para edificación

- (1)B Cualquier elemento prefabricado o semi prefabricado empleado en el diseño de estructuras de edificación debería cumplir la norma europea EN, el DITE o la Guía DITE específica del producto.

4 DURABILIDAD

- (1) Los requisitos fundamentales relativos a la durabilidad se especifican en la Norma Europea EN 1990.
- (2)P Los métodos de ejecución de los recubrimientos protectores en taller o en obra deben ser conformes con lo indicado en la Norma Europea EN 1090.

NOTA La Norma Europea EN 1090 relaciona los factores que afectan a la ejecución y que necesitan ser especificados en la fase de diseño.

- (3) Las zonas sometidas a corrosión, desgaste mecánico o fatiga deberían diseñarse de tal modo que sea posible la inspección, mantenimiento y reparación así como el acceso durante la vida en servicio.

(4)B Para las estructuras de edificación no es necesario considerar la fatiga excepto en las siguientes situaciones:

- a) Elementos que resisten cargas de ascensores o cargas rodantes.
- b) Elementos sometidos a cargas cíclicas producidas por máquinas rotativas.
- c) Elementos sometidos a vibraciones producidas por el viento.
- d) Elementos sometidos a oscilaciones producidas por el tránsito de personas.

(5)P Los elementos que no puedan ser inspeccionados se deben proteger contra la corrosión de forma adecuada.

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

5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

5.1 Modelos estructurales para el análisis

5.1.1 Modelos estructurales e hipótesis básicas

- (1)P El análisis estructural debe basarse en modelos de cálculo de la estructura apropiados para cada estado límite a considerar.
- (2) El modelo y las hipótesis básicas del cálculo deberían reflejar con una precisión adecuada el comportamiento estructural en el estado límite considerado, así como el tipo de comportamiento esperado de las secciones transversales, los elementos, las uniones y los apoyos.
- (3)P Los métodos de análisis utilizados deben ser coherentes con las hipótesis de cálculo adoptadas.
- (4)B En lo que se refiere a los modelos estructurales y las hipótesis básicas relativas a los elementos resistentes de edificios, véanse igualmente las Normas Europeas EN 1993-1-5 y EN 1993-1-11.

5.1.2 Modelos para las uniones

- (1) En general, pueden despreciarse los efectos del comportamiento de las uniones sobre la distribución de esfuerzos y momentos en una estructura, así como sobre las deformaciones globales de la misma. Deberían, en cambio, considerarse cuando dichos efectos sean significativos (por ejemplo, en el caso de las uniones semirrígidas), según se contempla en la Norma Europea EN 1993-1-8.
- (2) Para determinar si resulta necesaria la consideración de los efectos del comportamiento de las uniones en el análisis estructural global, puede establecerse la siguiente distinción entre tres tipos de uniones, según se contempla en el apartado 5.1.1 de la Norma Europea EN 1993-1-8:
 - unión articulada, en la que puede suponerse que no transmite ningún momento flector significativo;
 - unión rígida, en la que puede suponerse que su comportamiento no tiene ningún efecto sobre el análisis estructural global;
 - unión semirrígida, en la que resulta necesaria la consideración de su comportamiento en el análisis estructural global.
- (3) En la Norma Europea EN 1993-1-8 se establecen las exigencias relativas a los diferentes tipos de uniones antes definidos.

5.1.3 Interacción suelo-estructura

- (1) Las condiciones de deformación de los apoyos de la estructura en el terreno deberían tenerse en cuenta en el análisis estructural global cuando sus efectos sean significativos.

NOTA La Norma Europea EN 1997 establece directrices para el cálculo de la interacción suelo-estructura.

5.2 Análisis global

5.2.1 Efectos de la geometría deformada de la estructura

- (1) En general, las solicitaciones en la estructura pueden ser obtenidas por uno de los métodos siguientes:
- análisis en primer orden, utilizando la geometría inicial de la estructura;
 - análisis en segundo orden, tomando en consideración la influencia de la deformación de la estructura.
- (2) Debería tenerse en cuenta la geometría deformada (efectos de segundo orden) cuando aumenta los efectos de las acciones o modifica la respuesta estructural global de forma significativa.
- (3) Puede utilizarse el análisis de la estructura en primer orden cuando las deformaciones tienen una incidencia despreciable, tanto sobre el incremento de las solicitaciones consideradas como sobre el comportamiento estructural general. Dicha condición puede suponerse satisfecha si se cumple el siguiente criterio:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad \text{para los análisis elásticos} \quad (5.1)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \quad \text{para los análisis plásticos}$$

donde

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

F_{Ed} es la carga de cálculo actuando sobre la estructura, en la hipótesis de carga considerada;

F_{cr} es la carga crítica de inestabilidad elástica para el pandeo de la estructura según un modo global, calculada con las rigideces elásticas iniciales, para la hipótesis de carga considerada.

NOTA En la ecuación (5.1) se da un límite más elevado de α_{cr} para el análisis plástico, pues el comportamiento estructural global puede verse afectado de manera significativa por las propiedades no lineales del material en el estado límite último (por ejemplo, cuando se forman rótulas plásticas en una estructura, con la consiguiente redistribución de las leyes elásticas de momentos, o cuando pueden desarrollarse deformaciones no lineales significativas en las uniones semirrígidas). El anexo nacional puede dar, para cierto tipo de entramados reticulados, un límite más bajo de α_{cr} siempre que pueda justificarse mediante aproximaciones más precisas.

(4)B Los pórticos de cubiertas con débiles pendientes y los pórticos planos convencionales de edificios, de tipo reticulado dinteles-pilares, pueden comprobarse en estado límite último, frente a un modo de colapso por pandeo global traslacional, mediante un análisis en primer orden siempre y cuando se satisfaga el criterio (5.1) en cada una de sus plantas. En dichas estructuras, α_{cr} puede estimarse a partir de la siguiente fórmula aproximada, a condición de que el esfuerzo axial de compresión en los dinteles, de piso o cubierta, no sea significativo:

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

donde

H_{Ed} es el valor de cálculo de la resultante horizontal, al nivel de la cota inferior de la planta considerada, de las cargas horizontales reales y ficticias, véase el punto (7) del apartado 5.3.2 ejercidas sobre la estructura por encima de dicho nivel;

V_{Ed} es el valor de cálculo de la carga vertical total, al nivel de la cota inferior de dicha planta, ejercida sobre la estructura por encima de dicho nivel;

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

h es la altura de planta.

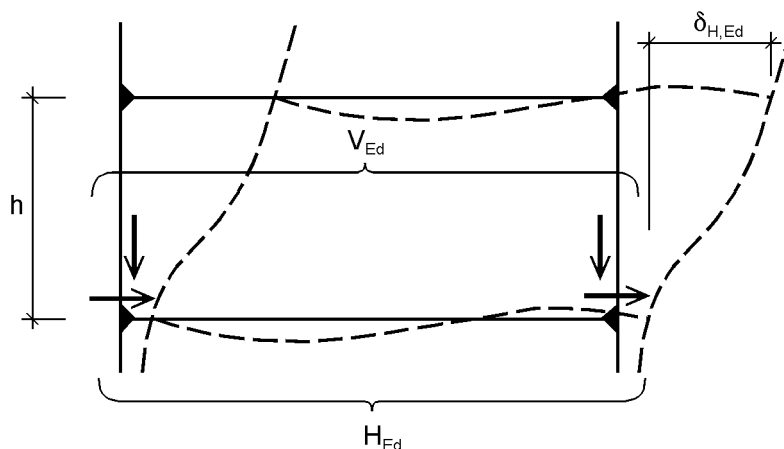


Figura 5.1 – Notaciones para 5.2.1 (2)

NOTA 1B En ausencia de informaciones más precisas, y para la aplicación del punto (4)B, puede considerarse que una pendiente de cubierta es débil cuando no supera la relación 1:2 (26°).

NOTA 2B En ausencia de informaciones más precisas, y para la aplicación del punto (4)B, el esfuerzo axial de compresión en dinteles, de piso o cubierta, puede considerarse significativo si

$$\bar{\lambda} \geq 0,3 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}} \quad (5.3)$$

donde

N_{Ed} es el valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión en el elemento considerado;

$\bar{\lambda}$ es la esbeltez relativa en el plano de cálculo para dicho dintel, de piso o cubierta, obtenida a partir de su longitud real y en la hipótesis de articulación en ambos extremos.

- (5) Según se establece en la Norma Europea EN 1993-1-5, deberían considerarse los efectos del arrastre por cortante y de la abolladura de paneles comprimidos de chapa sobre la pérdida de rigidez de los elementos, cuando dichos efectos influyan significativamente en el análisis global de la estructura.

NOTA Los efectos del arrastre por cortante pueden despreciarse en el caso de perfiles laminados o vigas armadas de dimensiones similares.

- (6) Los efectos del deslizamiento en los agujeros de los tornillos y de deformaciones similares en dispositivos de unión, tales como pernos y tornillos de anclaje, deberían tenerse en cuenta cuando se considere que pueden influir de manera significativa sobre el análisis global de la estructura.

5.2.2 Estabilidad global de entramados reticulares

- (1) Si cuando, de acuerdo con el apartado 5.2.1, debe considerarse la influencia de la deformación de la estructura en la verificación de la estabilidad global, debería aplicarse el procedimiento descrito en los puntos (2) a (6) del apartado 5.2.2.
- (2) La comprobación de la estabilidad global de los entramados, o de cada una de sus partes, debería realizarse considerando los efectos de las imperfecciones y los efectos de segundo orden.
- (3) En función del tipo de estructura y del tipo del análisis global, los efectos de segundo orden y de las imperfecciones pueden tenerse en cuenta mediante cualquiera de los métodos siguientes:
 - a) los dos tipos de efectos, en su totalidad, a través del análisis global;
 - b) en parte a través del análisis global y en parte por las comprobaciones individuales de la estabilidad de los elementos aislados, conforme a lo establecido en el apartado 6.3;
 - c) para ciertos casos elementales básicos, a través de comprobaciones individuales de estabilidad de elementos aislados equivalentes, según se establece en el apartado 6.3, mediante el uso de longitudes de pandeo apropiadas, estimadas a partir del modo global de inestabilidad de la estructura completa.
- (4) La consideración de los efectos de segundo orden puede abordarse por medio de un análisis global apropiado de la estructura (mediante métodos paso a paso u otro tipo de procedimientos iterativos). Para los entramados reticulados en los que el primer modo de inestabilidad, por pandeo global traslacional, es claramente predominante, debería efectuarse un análisis elástico en primer orden, seguido de una posterior amplificación de los efectos de las acciones consideradas (por ejemplo, momentos flectores) por medio de coeficientes apropiados.
- (5)B Para los pórticos de edificios de una sola planta, calculados a partir de un análisis global elástico, los efectos de segundo orden por deformación lateral, debidos a las cargas verticales, pueden ser considerados multiplicando las cargas horizontales H_{Ed} (por ejemplo, el viento), así como las cargas ideales equivalentes V_{Ed} ϕ , debidas a las imperfecciones (véase el punto (7) del apartado 5.3.2), y cualesquiera otros eventuales efectos de deformación lateral obtenidos a partir de análisis en primer orden, por el coeficiente:

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

con la condición de que $\alpha_{cr} \geq 3,0$,

donde

α_{cr} puede calcularse según la fórmula (5.2) del punto (4)B del apartado 5.2.1, siempre que la pendiente de la cubierta sea débil y que el axil de compresión en los dinteles, de piso o cubierta, no sea significativo, según se establece en el punto (4)B del apartado 5.2.1.

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

(6)B Para los pórticos de edificios de varias plantas, los efectos de segundo orden por deformación lateral pueden calcularse según el método dado en el punto (5)B, a condición de que todas las plantas sean similares en cuanto a:

- el reparto de las cargas verticales por planta; y
- el reparto de las cargas horizontales por planta; y
- la rigidez del marco de cada planta en relación a las cargas horizontales aplicadas.

NOTA B En cuanto a las limitaciones de este método, véase asimismo lo establecido en el punto (4)B del apartado 5.2.1.

(7) De acuerdo con lo establecido en el punto (3), debería comprobarse la estabilidad de los elementos aislados individuales por uno de los siguientes métodos:

- a) si los efectos de segundo orden en los elementos aislados, y las imperfecciones locales de los mismos definidos en el apartado 5.3.4, han sido totalmente considerados en el análisis global de la estructura, no resulta necesario efectuar ninguna comprobación adicional de la estabilidad individual de cada elemento según el apartado 6.3;
 - b) si los efectos de segundo orden en los elementos aislados, o ciertas imperfecciones locales de los mismos (por ejemplo, las imperfecciones del elemento para el pandeo por flexión y/o pandeo lateral, según el apartado 5.3.4), no han sido totalmente incorporados en el análisis global, debería comprobarse la estabilidad individual de cada elemento, según los correspondientes criterios establecidos en el apartado 6.3, bajo aquellos efectos no incluidos en el análisis global. Esta comprobación debería tener en cuenta las solicitaciones transmitidas en los extremos del elemento, estimadas a partir del análisis global efectuado para la estructura, incluyendo, si son significativos, los efectos de segundo orden globales y las imperfecciones globales (véase el apartado 5.3.2), y puede efectuarse adoptando una longitud de pandeo igual a la longitud del sistema (véase el apartado 1.5.5).
- (8) Cuando la estabilidad de una estructura reticulada sea controlada a partir de la comprobación establecida en el apartado 6.3 para los elementos aislados equivalentes (método de las longitudes de pandeo), deberían adoptarse unas longitudes de pandeo basadas en el modo de inestabilidad global de la estructura, considerando adecuadamente la rigidez de los elementos y de las uniones, la presencia de eventuales rótulas plásticas y la distribución de los esfuerzos axiales de compresión bajo las cargas de cálculo, en la hipótesis de carga considerada. En este caso, las solicitaciones a utilizar en la comprobación de resistencia serán calculadas según la teoría de primer orden, sin tener en cuenta las imperfecciones.

NOTA El anexo nacional puede dar información adicional relativa al ámbito de aplicación de este método.

5.3 Imperfecciones

5.3.1 Bases

- (1) El análisis estructural debería considerar, de manera apropiada, los efectos de las imperfecciones, incluyendo las tensiones residuales y las imperfecciones geométricas, tales como los defectos de verticalidad, los defectos de alineación, los defectos de planeidad, las tolerancias de ajuste y todas las pequeñas excentricidades presentes en las uniones de la estructura no cargada.
- (2) Como regla general, deberían utilizarse imperfecciones geométricas equivalentes, véanse los apartados 5.3.2 y 5.3.3, cuyos valores representan los eventuales efectos de todo tipo de imperfecciones, salvo en los casos en los que dichos efectos estén incluidos implícitamente en las fórmulas de resistencia utilizadas para la verificación de elementos, tal y como se contempla en el apartado 5.3.4.
- (3) Deberían considerarse las siguientes imperfecciones:
 - a) imperfecciones globales para las estructuras reticuladas y los sistemas de arriostramiento;
 - b) imperfecciones locales para los elementos aislados.

5.3.2 Imperfecciones para el análisis global de entramados reticulares

- (1) La consideración apropiada de las imperfecciones globales de la estructura y de las imperfecciones locales puede realizarse a partir del modo de pandeo elástico global de la estructura en el plano de inestabilidad considerado.
- (2) Las imperfecciones deberían aplicarse en la forma y el sentido más desfavorables, tanto para el pandeo en el plano de la estructura como para el pandeo fuera del plano de la misma, incluyendo el pandeo por torsión, según modos simétricos y asimétricos.
- (3) En el caso de estructuras pórticos susceptibles de pandeo global según un modo traslacional, debería incorporarse el efecto de las imperfecciones en el análisis de la estructura a través de una imperfección equivalente, bajo la forma de un defecto global de verticalidad inicial e imperfecciones locales por curvatura de los elementos. Así pues, las imperfecciones pueden estimarse como:

a) un defecto inicial global de verticalidad, véase la figura 5.2:

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (5.5)$$

donde

ϕ_0 es el valor de base: $\phi_0 = 1/200$;

α_h es el coeficiente reductor, función de la altura h , aplicable a los soportes:

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

h es la altura de la estructura, en metros;

α_m es el coeficiente reductor, función del número de soportes de 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 soportes 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.

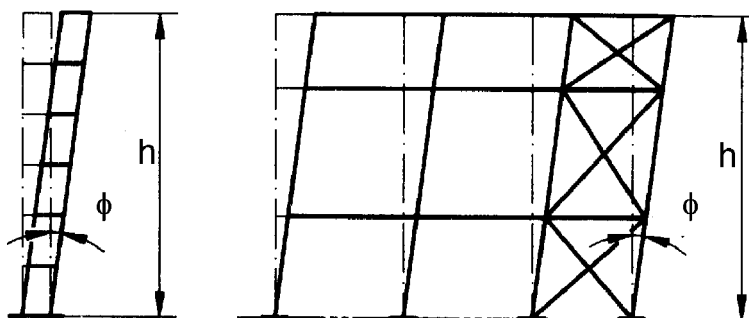


Figura 5.2 – Imperfecciones equivalentes de verticalidad

b) imperfecciones iniciales locales por curvatura de los elementos aislados para el pandeo por flexión, definidas por:

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

donde

L es la longitud del elemento

NOTA Los valores e_0/L pueden incluirse en el anexo nacional. En la tabla 5.1 se indican los valores recomendados.

Tabla 5.1 – Valores de cálculo de la imperfección local inicial en arco e_0/L

Curva de pandeo según la tabla 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 los pórticos de edificios los defectos de verticalidad pueden despreciarse cuando:

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

(5)B Para la estimación de las fuerzas horizontales ejercidas sobre los planos de arriostramiento de los forjados, debería aplicarse el esquema de imperfecciones dado en la figura 5.3, donde ϕ es una imperfección de verticalidad, obtenida a partir de la ecuación (5.5) suponiendo una planta única de altura h (véase el punto (3) a)).

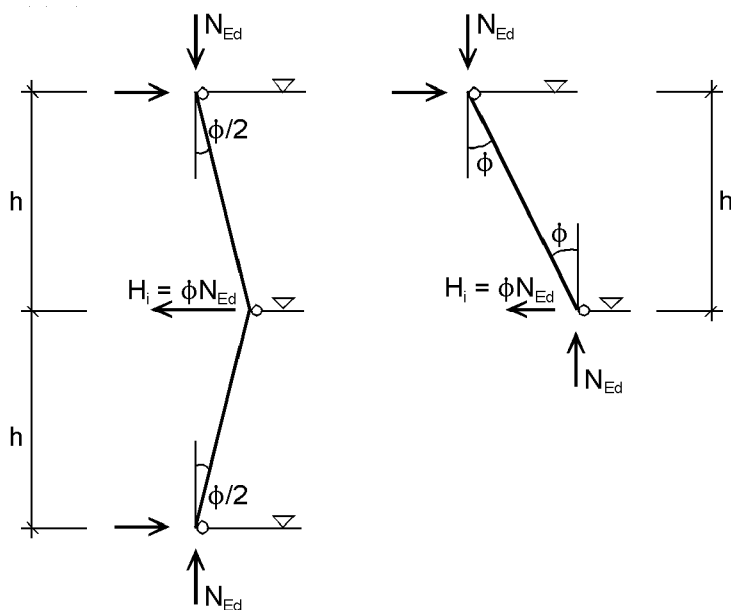


Figura 5.3 – Esquema de imperfecciones de verticalidad ϕ para la obtención de las fuerzas horizontales al nivel de los planos de arriostramiento de los forjados

- (6) En el análisis global, para la obtención de los esfuerzos y momentos en los extremos de los elementos, a utilizar en las comprobaciones de elementos aislados según el apartado 6.3, no es preciso considerar las imperfecciones locales por curvatura de dichos elementos aislados. Sin embargo, en el caso de estructuras sensibles a los efectos de segundo orden, en el análisis estructural global del entramado, deberían considerarse además de las imperfecciones globales de verticalidad [véase el punto (3) del apartado 5.2.1], las imperfecciones locales por curvatura de todos aquellos elementos comprimidos en los cuales se cumplan las dos condiciones siguientes:

- al menos uno de los extremos del elemento es capaz de transmitir momentos flectores;

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

donde

N_{Ed} es el valor de cálculo de esfuerzo axial de compresión;

$\bar{\lambda}$ es la esbeltez relativa en el plano de la estructura, calculada para el elemento supuesto articulado en ambos extremos.

NOTA Las imperfecciones locales por curvatura de los elementos se incluyen en las comprobaciones de estabilidad de los mismos, véase el punto (3) del apartado 5.2.2 y el apartado 5.3.4.

- (7) Los efectos de la imperfección inicial de verticalidad y de las imperfecciones locales por curvatura pueden ser asimilados a fuerzas horizontales equivalentes, introducidas en cada soporte según se indica en las figuras 5.3 y 5.4.

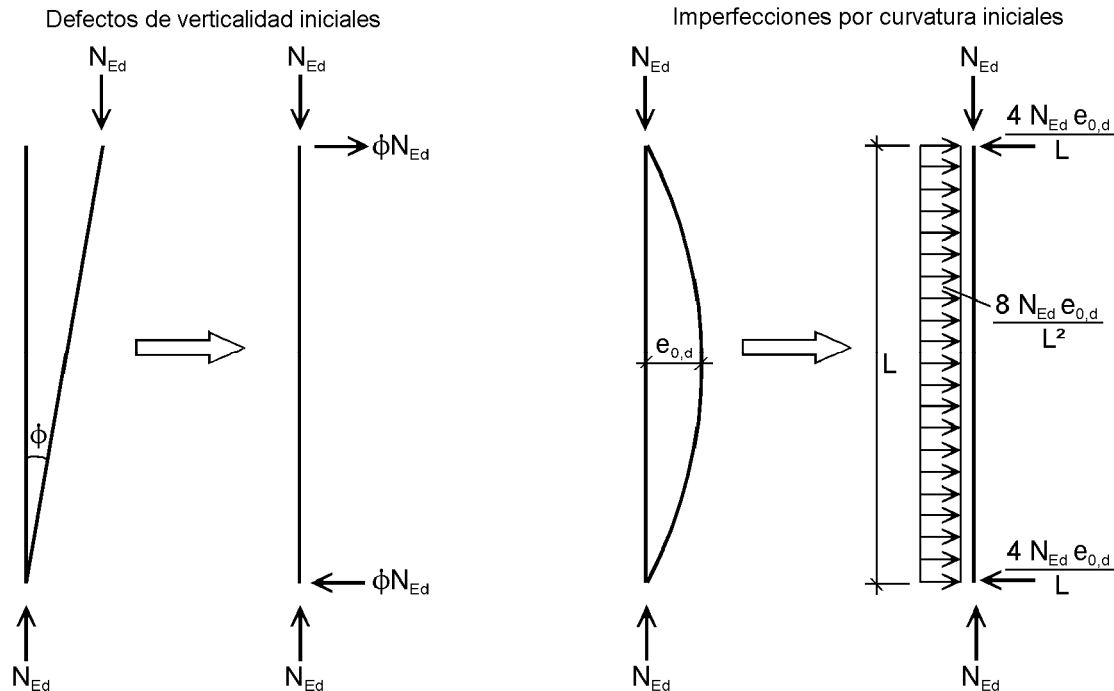
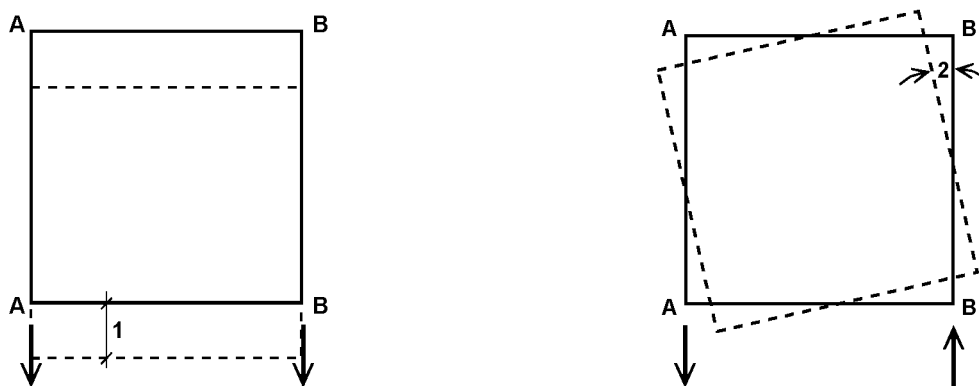


Figura 5.4 – Sustitución de las imperfecciones iniciales por fuerzas horizontales equivalentes

- (8) Deberían considerarse dichos defectos de verticalidad iniciales en todas las direcciones horizontales susceptibles de inestabilidad, pero en una sola dirección a la vez.

- (9)B Cuando se utilicen fuerzas horizontales equivalentes para el análisis de pórticos de edificios de múltiples plantas, de tipo dintel-pilar, dichas fuerzas deberían aplicarse en cada nivel de forjados y de cubierta.
- (10) Asimismo deberían considerarse los efectos de la torsión resultante de la aplicación asimétrica de imperfecciones de verticalidad sobre dos laterales opuestos de una estructura, según se indica en la figura 5.5.



(a) Imperfecciones de verticalidad de las caras A-A y B-B en la misma dirección

(b) Imperfecciones de verticalidad de las caras A-A y B-B en direcciones opuestas

Leyenda

1 Deformación de traslación

2 Deformación de torsión

Figura 5.5 – Efectos de traslación y de torsión (vista en planta)

- (11) Como alternativa a los puntos (3) y (6), puede aplicarse con carácter general una imperfección única, global y local, según una forma afín a la deformada η_{cr} del modo global de inestabilidad crítica elástica de la estructura, cuya amplitud puede ser obtenida por:

$$\eta_{init} = e_0 \frac{N_{cr}}{EI \eta_{cr, máx.}} \eta_{cr} = \frac{e_0}{\bar{\lambda}^2} \frac{N_{Rk}}{EI \eta_{cr, máx.}} \eta_{cr} \quad (5.9)$$

donde

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

y

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

α es el factor de imperfección para la curva de pandeo correspondiente, según las tablas 6.1 y 6.2;

χ es el coeficiente reductor para la curva de pandeo asociada a la sección transversal a considerar, según el apartado 6.3.1;

- $\alpha_{ult,k}$ es el coeficiente mínimo por el que hay que amplificar la configuración de los esfuerzos axiales N_{Ed} en los elementos para alcanzar, sin tener en cuenta el pandeo, la resistencia característica N_{Rk} de la sección transversal más comprimida axialmente;
- α_{cr} es el coeficiente mínimo por el que es preciso amplificar la configuración de los esfuerzos axiales N_{Ed} en los elementos para alcanzar el pandeo crítico elástico;
- M_{Rk} es la resistencia característica a flexión de la sección transversal crítica, por ejemplo $M_{el,Rk}$ o $M_{pl,Rk}$ según el caso;
- N_{Rk} es la resistencia característica a esfuerzo axial de la sección transversal crítica, es decir $N_{pl,Rk}$;
- $EI\eta''_{cr,máx.}$ es el momento flector, debido a la deformada η_{cr} en la sección transversal crítica;
- η_{cr} es la forma de la deformada del modo global de inestabilidad crítica elástica.

NOTA 1 Para el cálculo de los coeficientes de amplificación $\alpha_{ult,k}$ y α_{cr} , los elementos de la estructura pueden considerarse como solicitados únicamente por los esfuerzos axiales de cálculo N_{Ed} resultantes de un análisis elástico en primer orden de la estructura bajo las cargas de cálculo, en la hipótesis considerada de carga.

NOTA 2 El anexo nacional puede dar información adicional relativa al ámbito de aplicación del punto (11).

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, deberían tenerse en cuenta los efectos de las imperfecciones mediante el recurso a una imperfección-geométrica equivalente de los elementos a estabilizar, bajo la forma de una imperfección inicial en arco:

$$e_0 = \alpha_m L/500 \quad (5.12)$$

donde

L es la luz del sistema de arriostramiento;

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

m es el número de elementos a estabilizar.

- (2) Los efectos de las imperfecciones iniciales en arco de los elementos a estabilizar por un determinado sistema de arriostramiento pueden ser reemplazados por la fuerza equivalente de estabilización, según se indica en la figura 5.6:

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

donde

δ_q es la flecha del sistema de arriostramiento en el plano de estabilización, calculada según un análisis en primer orden bajo la actuación de todas las eventuales cargas exteriores q .

NOTA δ_q se puede considerar nula si se recurre a un análisis en segundo orden.

- (3) Cuando el sistema de arriostramiento deba estabilizar el ala comprimida de una viga flectada de canto constante, la fuerza N_{Ed} de la figura 5.6 puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

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

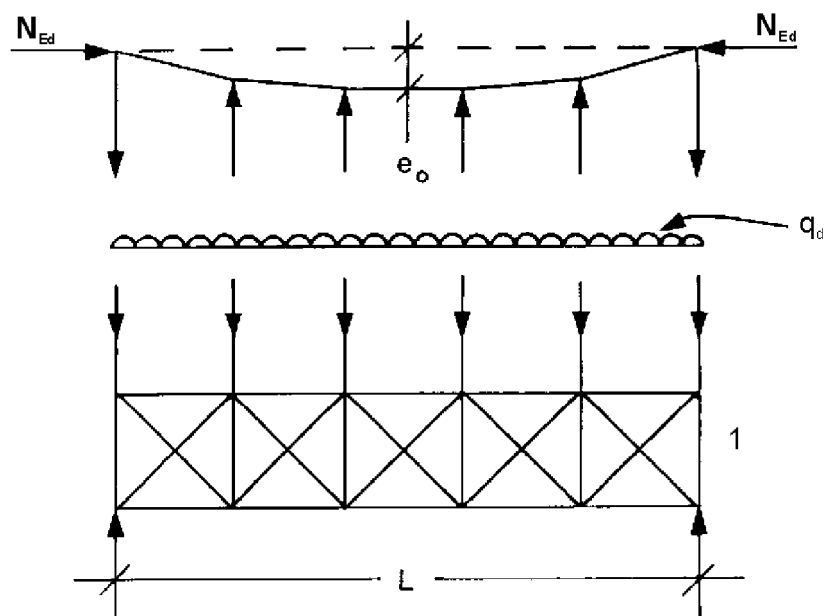
donde

M_{Ed} es el momento máximo ejercido sobre la viga; y

h es la altura total de la viga.

NOTA En el caso de una viga comprimida además de flectada, N_{Ed} debería integrar la parte correspondiente del esfuerzo normal de compresión sobre dicha viga.

- (4) Cuando un sistema de arriostramiento estabiliza las alas comprimidas de vigas o de elementos comprimidos que presentan una unión de empalme, debería verificarse que dicho sistema de arriostramiento es capaz de resistir una fuerza local igual a $\alpha_m N_{Ed}/100$ transmitida por cada viga o elemento comprimido afectado por la unión, y de transmitir dicha fuerza a los puntos de arriostramiento adyacentes de dicho elemento comprimido, según se indica en la figura 5.7.
- (5) Para la verificación descrita en el punto (4), deberían incluirse igualmente todas las cargas exteriores actuando sobre el sistema de arriostramiento, pudiendo en cambio omitirse las fuerzas provocadas por la imperfección definida en el punto (1).



Leyenda

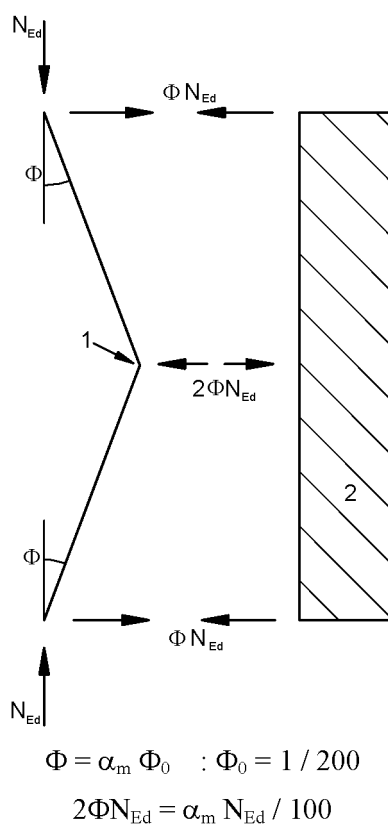
e_o es la imperfección

q_d es la fuerza equivalente por unidad de longitud

1 Sistema de arriostramiento

El esfuerzo normal N_{Ed} se supone uniforme sobre la luz L del sistema de arriostramiento. Para el caso de esfuerzos no uniformes, esta hipótesis resulta ligeramente conservadora

Figura 5.6 – Fuerza equivalente de estabilización



Leyenda

- 1 Unión de empalme
- 2 Sistema de arriostramiento

Figura 5.7 – Fuerzas de arriostramiento en las secciones de unión de empalme en elementos comprimidos

5.3.4 Imperfecciones de los elementos aislados

- (1) Los efectos de las imperfecciones locales por curvatura de los elementos están incorporadas implícitamente en las fórmulas de verificación de resistencia de los mismos frente a las inestabilidades contempladas en el apartado 6.3.
- (2) Cuando la estabilidad de los elementos aislados se controla a partir de un análisis en segundo orden según el punto (7) a) del apartado 5.2.2, se deberían considerar las imperfecciones e_o de los elementos comprimidos según los puntos (3) b), (5) y (6) del apartado 5.3.2.
- (3) En el caso de un análisis en segundo orden teniendo en cuenta el pandeo lateral de un elemento flectado, puede adoptarse una imperfección igual a $ke_{o,d}$, donde $e_{o,d}$ es la imperfección inicial equivalente en arco según el eje débil del perfil considerado. Generalmente no resulta necesario incluir además una imperfección de torsión.

NOTA El anexo nacional puede definir el valor de k , para el que se recomienda un valor de 0,5.

5.4 Métodos de análisis considerando las no linealidades del comportamiento del material

5.4.1 Generalidades

- (1) Las solicitaciones internas pueden obtenerse por medio de uno de los siguientes métodos:
 - a) análisis global elástico;

b) análisis global plástico.

NOTA Los análisis por el método de elementos finitos se contemplan en la Norma Europea EN 1993-1-5.

(2) El análisis global elástico es de aplicación en todos los casos.

(3) El análisis global plástico sólo puede utilizarse cuando la estructura posea una capacidad de rotación suficiente en las secciones donde se producen realmente rótulas plásticas, tanto si trata de los elementos o de las uniones. Cuando se desarrolla una rótula plástica en un elemento, se recomienda que las secciones transversales de dicho elemento sean bisimétricas, o monométricas con el plano de simetría coincidente con el plano de rotación de la rótula, y que se satisfagan además las exigencias establecidas en el apartado 5.6. Cuando una rótula plástica se desarrolla en una sección de unión, ésta debería tener una resistencia suficiente para asegurar que la rótula se desarrolla en la sección adyacente del elemento, o bien tener la ductilidad necesaria para garantizar que se mantiene su resistencia plástica bajo una rotación suficiente, según se contempla en la Norma Europea EN 1993-1-8.

(4)B Cuando a partir de un análisis elástico, la vigas continuas 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 internas en la estructura permanecen en equilibrio con las fuerzas aplicadas; y

b) las secciones transversales de todos aquellos elementos en los que se puedan reducir los momentos deberán ser secciones Clase 1 o Clase 2 (véase el apartado 5.5); y

c) se halla impedido el pandeo lateral de las vigas.

5.4.2 Análisis global elástico

(1) El análisis global elástico debería basarse en la hipótesis de un comportamiento tensión-deformación lineal del material, cualquiera que sea su nivel de tensiones.

NOTA En el caso de modelos de uniones semirígidas, véanse los puntos (2) a (4) del apartado 5.1.2.

(2) Las solicitaciones internas pueden calcularse mediante un análisis global elástico incluso cuando la resistencia de las secciones transversales se estima a partir de su resistencia plástica, según el apartado 6.2.

(3) El análisis global elástico puede asimismo utilizarse cuando la resistencia de las secciones transversales se halla limitada por la abolladura local de chapas metálicas comprimidas, según el apartado 6.2.

5.4.3 Análisis global plástico

(1) El análisis global plástico permite considerar los efectos de la no linealidad del comportamiento de los materiales en el cálculo de los esfuerzos debidos a las solicitaciones sobre un sistema estructural. Dichos modelos de comportamiento deberían establecerse por uno de los métodos siguientes:

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

- (2) El análisis global plástico puede utilizarse cuando los elementos tengan una capacidad de rotación suficiente para permitir el desarrollo de las redistribuciones requeridas de las leyes de momentos flectores, según los apartados 5.5 y 5.6.
- (3) Sólo debería utilizarse un análisis global plástico cuando la estabilidad de los elementos en las secciones de rótulas plásticas quede asegurada, según el apartado 6.3.5.
- (4) La relación tensión-deformación bilineal dada en la figura 5.8 puede utilizarse para todos los tipos de acero de construcción especificados en el capítulo 3. Alternativamente puede adoptarse una relación más precisa, tal y como se contempla en la Norma Europea EN 1993-1-5.

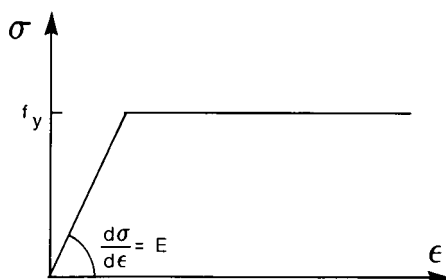


Figura 5.8 – Relación tensión-deformación bilineal

- (5) Puede aplicarse el análisis rígido-plástico cuando no resulte necesario considerar los efectos de la geometría deformada de la estructura (por ejemplo, los efectos de segundo orden). En este caso, las uniones se clasifican únicamente por su resistencia, según la Norma Europea EN 1993-1-8.
- (6) La consideración de los efectos debidos a la deformación geométrica de la estructura, así como a la estabilidad global lateral de estructuras reticuladas debería hacerse según los principios enunciados en el apartado 5.2.

NOTA La resistencia máxima de una estructura reticulada cuya geometría se halle deformada significativamente, puede alcanzarse antes de que lleguen a desarrollarse todas las rótulas plásticas del mecanismo de colapso plástico en primer orden.

5.5 Clasificación de secciones transversales

5.5.1 Bases

- (1) El papel de la clasificación de las secciones transversales es el de identificar en qué medida su resistencia y su capacidad de rotación pueden verse limitadas por la aparición y desarrollo de fenómenos de abolladura en las chapas comprimidas.

5.5.2 Clasificación

- (1) Se definen cuatro clases de secciones transversales de la forma siguiente:
 - las secciones transversales de Clase 1 son aquellas que pueden desarrollar rótulas plásticas, con la capacidad de rotación requerida para un análisis global plástico, sin reducción de la resistencia de la sección;
 - las secciones transversales de Clase 2 son aquellas que pueden alcanzar su momento resistente plástico, pero que poseen una capacidad de rotación limitada a causa de la aparición de fenómenos de inestabilidad local (abolladura);
 - las secciones transversales de Clase 3 son aquellas para las que la tensión calculada en la fibra comprimida más solicitada del elemento, suponiendo una distribución elástica de tensiones, puede alcanzar el límite de elasticidad del acero, pero en las que el desarrollo de fenómenos de inestabilidad local es susceptible de impedir el desarrollo del momento resistente plástico de la sección;

- las secciones transversales de Clase 4 son aquellas en las que la abolladura local se produce antes de alcanzarse el límite de elasticidad en una o varias zonas comprimidas de chapa de la sección transversal.
- (2) En las secciones de Clase 4 pueden utilizarse anchuras eficaces para considerar adecuadamente las reducciones de resistencia derivadas de los efectos de inestabilidad local, según se contempla en el apartado 5.2.2 de la Norma Europea EN 1993-1-5.
- (3) La clasificación de una sección transversal depende de la relación anchura/espesor de sus elementos comprimidos.
- (4) Los elementos comprimidos a considerar comprenden todas aquellas zonas de la sección transversal que se encuentran total o parcialmente comprimidas bajo la configuración de cargas considerada.
- (5) Los diversos elementos comprimidos de chapa en una sección transversal (por ejemplo, las alas o el alma) pueden, en general, ser de diferente clase.
- (6) La clase de una sección transversal se define por la clase más elevada (la menos favorable) de sus diferentes partes comprimidas. Se exceptúa lo indicado en el punto (10) del apartado 6.2.1 y en el punto (1) del apartado 6.2.2.4.
- (7) Alternativamente, la clasificación de una sección transversal puede establecerse mencionando a la vez la clase de las alas eventualmente comprimidas y la clase del alma.
- (8) Las proporciones límites para la clasificación de elementos comprimidos de chapa en Clase 1, 2 ó 3 deberían obtenerse de la tabla 5.2. Todo elemento de chapa que no satisfaga las relaciones límite dadas para la Clase 3 debería considerarse como de Clase 4.
- (9) Salvo lo indicado en el punto (10), las secciones de Clase 4 pueden ser tratadas como secciones de Clase 3 si las relaciones anchura/espesor son inferiores a las proporciones límite establecidas para la Clase 3 en la tabla 5.2, multiplicando ε por el valor $\sqrt{\frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}}$, donde $\sigma_{com,Ed}$ es el valor máximo de la tensión de cálculo de compresión que solicita el elemento de chapa considerado, obtenido a partir de un análisis en primer orden o, en caso necesario, en segundo orden.
- (10) Sin embargo, cuando la resistencia de un elemento frente a fenómenos de inestabilidad se verifica según el apartado 6.3, conviene siempre adoptar para la Clase 3 las proporciones límite establecidas explícitamente en la tabla 5.2.
- (11) Las secciones transversales cuyo alma se clasifica en Clase 3 y las alas en Clase 1 ó 2 pueden ser consideradas como de Clase 2, adoptando un alma eficaz de acuerdo con el apartado 6.2.2.4.
- (12) Cuando no se considere ninguna colaboración del alma a la resistencia de la sección transversal frente a esfuerzos normales y de flexión, limitándose la colaboración del alma a la resistencia frente a esfuerzo cortante, la sección transversal puede clasificarse como Clase 2, 3 ó 4, en función únicamente de la clasificación de sus alas.

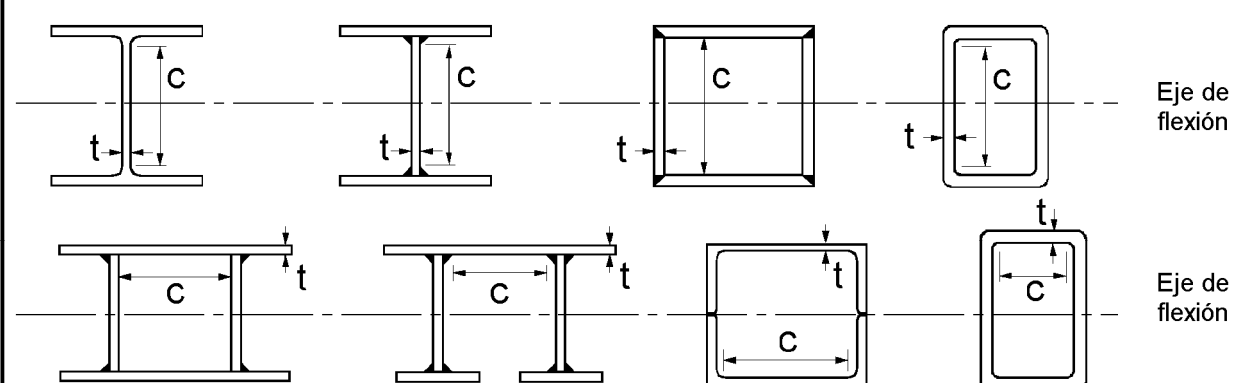
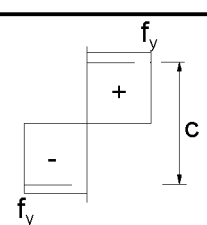
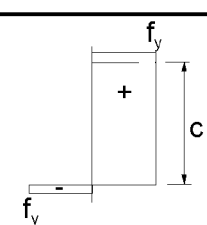
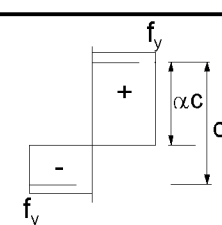
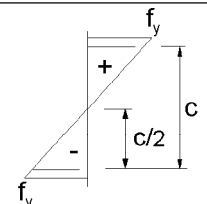
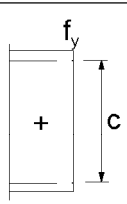
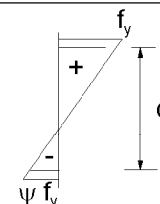
NOTA Para inestabilidad del alma inducida por la flexión del ala véase la Norma Europea EN 1993-1-5.

5.6 Requisitos relativos a las secciones para el análisis global plástico de la estructura

- (1) En cada emplazamiento de una rótula plástica, la sección transversal del elemento, en la que se forma dicha rótula plástica, debería poseer una capacidad de rotación no inferior a la requerida en dicho emplazamiento por el análisis global plástico de la estructura.
- (2) En un elemento de sección constante, la capacidad de rotación en la sección de una rótula plástica puede considerarse suficiente si se satisfacen los dos requisitos siguientes:
 - a) en la sección de las rótulas, las secciones transversales de los elementos son de Clase 1;

- b) en caso de existencia de fuerzas transversales superiores al 10% de la resistencia a esfuerzo cortante de la sección transversal, según el apartado 6.2.6, aplicadas sobre el alma en la sección correspondiente a una rótula plástica, deberían disponerse rigidizadores transversales de alma a una distancia no superior a $h/2$ del emplazamiento de dicha rótula, donde h es el canto de la sección transversal en dicha sección.
- (3) Cuando la sección transversal es variable a lo largo del elemento, deberían satisfacerse los criterios adicionales siguientes:
 - a) en la proximidad inmediata de las rótulas plásticas, se recomienda no reducir 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 deberían ser de Clase 1 en una distancia, medida sobre la longitud del elemento a ambos lados de la rótula plástica, que no debe de ser inferior al mayor de los siguientes valores:
 - $2d$, donde d se ha definido en el punto (3) a);
 - distancia medida hasta el punto en el que el momento actuando sobre la viga se reduce a 0,8 veces el momento plástico resistente existente en la sección considerada.
 - c) en todo el resto del elemento las alas comprimidas deberían ser de Clase 1 ó 2 y las almas de Clase 1, 2 ó 3.
- (4) En la proximidad inmediata de las rótulas plásticas, todo agujero de unión ubicado en zona traccionada debería satisfacer el punto (4) del apartado 6.2.5, 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 una estructura reticulada, y en lo que concierne a las exigencias relativas a las secciones transversales, la capacidad de redistribución plástica de las leyes de momentos puede suponerse asegurada si las exigencias establecidas en los puntos (2) a (4) se satisfacen en todos los elementos en los que existan rótulas plásticas, sean susceptibles de aparecer o se hallan desarrollado bajo las 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 exigidos en los puntos (2) a (5).

Tabla 5.2 (hoja 1 de 3) – Relaciones máximas anchura/espesor para los elementos comprimidos

Elementos de chapa comprimidos internos						
						
Clase	Chapa flectada	Chapa comprimida	Chapa flexo-comprimida			
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	cuando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ cuando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	cuando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ cuando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	cuando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ cuando $\psi \leq -1^*)$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ se aplica cuando la tensión de compresión sea $\sigma \leq f_y$, o cuando la deformación de tracción sea $\varepsilon_t > f_y/E$.

Tabla 5.2 (hoja 2 de 3) – Relaciones máximas anchura/espesor para los elementos comprimidos

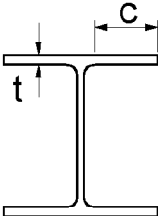
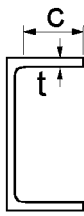
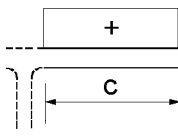
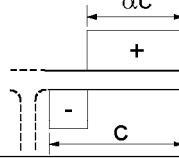
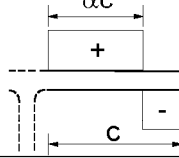
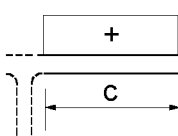
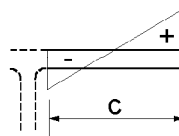
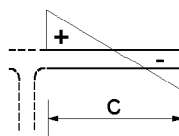
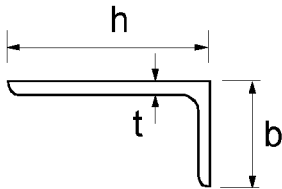
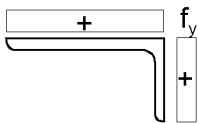
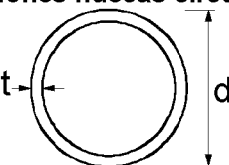
Alas en vuelo						
						
Secciones laminadas			Secciones soldadas			
Clase	Chapa comprimida	Chapa flexo-comprimida				
		Extremo comprimido		Extremo traccionado		
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ , véase la Norma Europea EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Tabla 5.2 (hoja 3 de 3) – Relaciones máximas anchura/espesor para los 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	$h / t \leq 15\varepsilon : \frac{b + h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
Secciones huecas circulares 						
Clase	Sección flectada y/o comprimida					
1	$d / t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d / t \leq 70\varepsilon^2$					
3	$d / t \leq 90\varepsilon^2$					
NOTA: Para $d / t > 90\varepsilon^2$, véase la Norma Europea 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

6 ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

6.1 Generalidades

- (1) En este capítulo, los coeficientes parciales χ_M definidos en el apartado 2.4.3 deberían aplicarse a los diferentes valores característicos de resistencia, tal como sigue:

- resistencia de secciones transversales sea cual sea la Clase de sección: χ_{M0}
- resistencia de elementos estructurales a inestabilidad, evaluada mediante comprobaciones de elemento: χ_{M1}
- resistencia a rotura de secciones transversales en tracción: χ_{M2}
- resistencia de uniones: véase la Norma Europea 1993-1-8

NOTA 1 Para otros valores numéricos recomendados, véanse las partes 2 a 6 de la Norma Europea EN 1993. Para estructuras no cubiertas por esas partes, el anexo nacional puede definir los coeficientes parciales γ_{M1} ; se recomienda emplear los coeficientes parciales γ_{M1} de la Norma Europea EN 1993-2.

NOTA 2B El anexo nacional puede definir los coeficientes parciales γ_{M1} para edificios. Se recomiendan los siguientes valores para edificios:

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$\gamma_{M1} = 1,00$$

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

6.2 Resistencia de las secciones transversales

6.2.1 Generalidades

- (1)P El valor de cálculo del efecto de una acción en cualquier sección transversal no debe exceder la resistencia de cálculo correspondiente, y si varios efectos de la acción actúan simultáneamente, el efecto combinado no debe exceder la resistencia para esa combinación.
- (2) Los efectos del arrastre por cortante y de la abolladura local deberían incluirse mediante una anchura eficaz, de acuerdo con la Norma Europea EN 1993-1-5. Los efectos de la abolladura por cortante también deberían considerarse de acuerdo con la Norma Europea EN 1993-1-5.
- (3) Los valores de cálculo de la resistencia deberían depender de la clasificación de la sección transversal.
- (4) La comprobación elástica puede realizarse para todas las clases de secciones transversales, siempre que para la comprobación de secciones transversales de Clase 4 se utilicen las características de la sección transversal reducida.
- (5) Para la comprobación elástica, se puede utilizar el siguiente criterio de plastificación para un punto crítico de la sección transversal, a menos que se aplique otra fórmula de interacción, véanse los apartados 6.2.8 a 6.2.10.

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

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 transversal en el punto considerado;

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

NOTA La comprobación de acuerdo con el punto (5) puede ser conservadora ya que no considera la plastificación parcial de la distribución de tensiones, lo cual es permitido en cálculo elástico. Por consiguiente, sólo debería aplicarse en aquellos casos en los que la interacción de esfuerzos en base a las resistencias de cálculo N_{Rd} , M_{Rd} , V_{Rd} no pueda realizarse.

- (6) La resistencia plástica de las secciones transversales debería comprobarse mediante la obtención de una distribución de tensiones que equilibre los esfuerzos de sollicitación, sin que se supere el límite elástico. Esta distribución de tensiones debería ser compatible con las deformaciones plásticas asociadas.

- (7) Como una aproximación conservadora, puede utilizarse para todas las clases de sección transversal un criterio basado en una suma lineal de los efectos de las resultantes de cada tensión. Para secciones transversales de Clase 1, Clase 2 o Clase 3, sometidas a la combinación de N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$, este método puede aplicarse utilizando el siguiente criterio:

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

donde

N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ y $M_{z,Rd}$ son los valores de cálculo de la resistencia, dependiendo de la clasificación de la sección transversal e incluyendo cualquier reducción que pueda estar causada por efecto del cortante, véase el apartado 6.2.8.

NOTA Para secciones transversales de Clase 4, véase el punto (2) del apartado 6.2.9.3.

- (8) Cuando todas las partes comprimidas de una sección transversal son, como mínimo, de Clase 2, puede considerarse que la sección transversal es capaz de desarrollar toda su resistencia plástica en flexión.
- (9) Cuando todas las partes comprimidas de una sección transversal son de Clase 3, su resistencia debería basarse en una distribución elástica de deformaciones a través de la sección transversal. Las tensiones de compresión en las fibras extremas deberían limitarse al límite elástico.

NOTA Para las comprobaciones de los estados límite últimos, puede suponerse que las fibras extremas se encuentran en el plano medio de las alas. Para fatiga, véase la Norma Europea EN 1993-1-9.

- (10) Cuando la plastificación ocurre primero en la zona traccionada de la sección transversal, puede utilizarse la reserva plástica de dicha zona considerando plastificación parcial al determinar la resistencia de una sección transversal de Clase 3.

6.2.2 Propiedades de la sección transversal

6.2.2.1 Sección transversal bruta

- (1) Las propiedades de la sección transversal bruta deberían determinarse utilizando las dimensiones nominales. No es necesario deducir los agujeros para los elementos de unión, pero sí deberían considerarse otros agujeros o aberturas mayores ejecutados con otro fin. No deberían incluirse los elementos de empalme.

6.2.2.2 Área neta

- (1) El área neta de una sección transversal debería obtenerse a partir del área bruta descontando las áreas correspondientes a todos los agujeros y otras aberturas.
- (2) Para calcular las propiedades de la sección neta, la deducción por un agujero debería ser el área bruta de éste en el plano de su eje. En el caso de agujeros avellanados, debería considerarse la porción avellanada.
- (3) Siempre que los agujeros de los elementos de unión no estén dispuestos al tresbolillo, el área total a deducir para los agujeros debería ser la suma máxima de áreas de las secciones de los agujeros en cualquier sección transversal perpendicular al eje del elemento (véase plano de rotura 2 en la figura 6.1).

NOTA La suma máxima denota la posición de la línea crítica de rotura.

- (4) Cuando los agujeros de los elementos de unión están dispuestos al tresbolillo, el área total a deducir debería ser la mayor de:
- a) la deducción para agujeros no dispuestos al tresbolillo, dada en el punto (3);

$$b) \quad t \left(n d_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right) \quad (6.3)$$

donde

s es el paso del tresbolillo, la distancia entre centros de dos agujeros consecutivos en la línea en zig-zag, medida paralelamente al eje del elemento;

p es la distancia entre centros de los mismos agujeros consecutivos, medida perpendicularmente al eje del elemento;

t es el espesor;

n es el número de agujeros existentes en cualquier diagonal o línea en zig-zag a través del elemento o parte del mismo, véase la figura 6.1.

d_0 es el diámetro del agujero

(5) En un angular o en otro elemento con agujeros en más de un plano, la distancia p debería medirse a lo largo de la línea media del espesor del material (véase la figura 6.2).

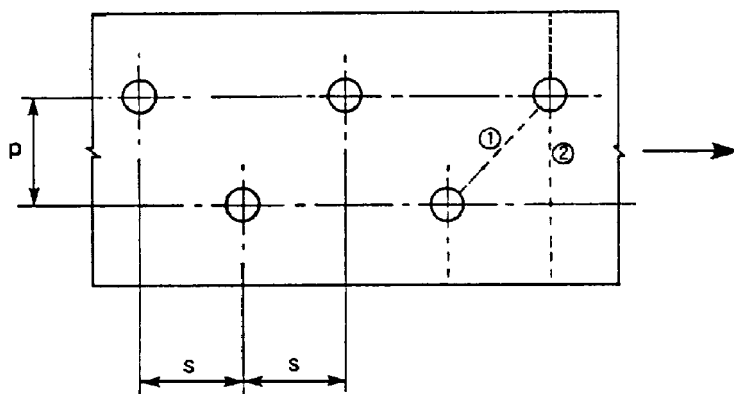


Figura 6.1 – Agujeros dispuestos al tresbolillo y líneas críticas de rotura 1 y 2

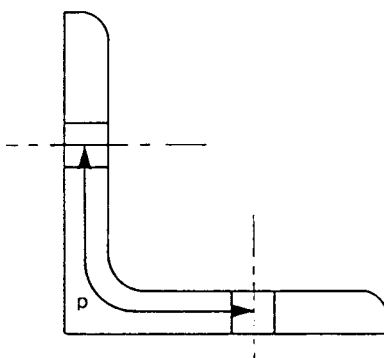


Figura 6.2 – Angulares con agujeros en ambos lados

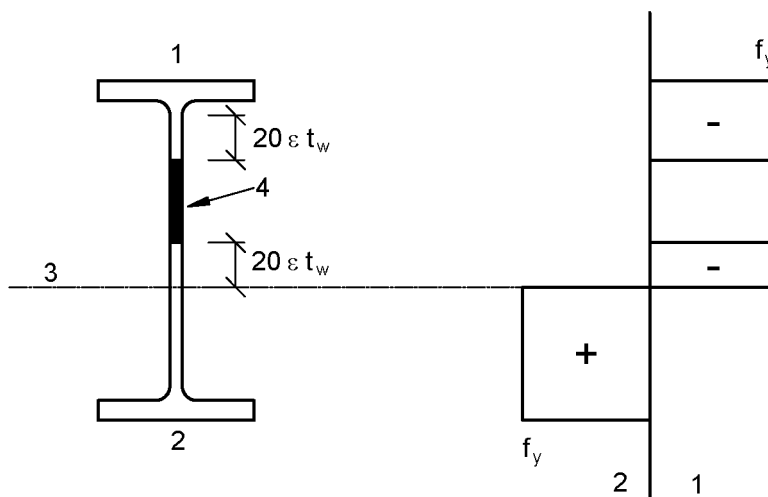
6.2.2.3 Efectos del arrastre por cortante

- (1) El cálculo de las anchuras eficaces está recogido en la Norma Europea EN 1993-1-5.
- (2) En secciones de Clase 4, la interacción entre los efectos del arrastre por cortante y de la abolladura local debería considerarse de acuerdo con la Norma Europea EN 1993-1-5.

NOTA Para elementos de pared delgada conformados en frío, véase la Norma EN Europea 1993-1-3.

6.2.2.4 Propiedades de la sección eficaz de secciones transversales con almas de Clase 3 y alas de Clase 1 ó 2

- (1) Cuando las secciones transversales con alma de Clase 3 y alas de Clase 1 ó 2 sean clasificadas como secciones transversales de Clase 2, véase el punto (11) del apartado 5.5.2, la porción de alma en compresión debería sustituirse por una parte de $20 \varepsilon t_w$, adyacente al ala comprimida, y otra parte de $20 \varepsilon t_w$, adyacente al eje neutro plástico de la sección transversal eficaz, de acuerdo con la figura 6.3.



- 1 compresión
- 2 tracción
- 3 eje neutro plástico
- 4 no considerar

Figura 6.3 – Alma eficaz de Clase 2

6.2.2.5 Propiedades de la sección reducida de secciones Clase 4

- (1) Las propiedades de la sección reducida de las secciones Clase 4 deberían obtenerse en base a las anchuras reducidas de las partes comprimidas.
- (2) Para secciones de paredes delgadas conformadas en frío, véase el punto (1) del apartado 1.1.2 y la Norma Europea EN 1993-1-3.
- (3) Las anchuras reducidas de las partes comprimidas planas deberían obtenerse de la Norma Europea EN 1993-1-5.
- (4) Cuando una sección transversal de Clase 4 está sometida a un esfuerzo axial de compresión, el método dado en la Norma Europea EN 1993-1-5 debería utilizarse para determinar el posible desplazamiento e_N del centro de gravedad de la sección reducida con respecto al centro de gravedad de la sección transversal bruta y determinar el momento adicional resultante:

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

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

(5) Para secciones huecas circulares con secciones transversales de Clase 4, véase la Norma Europea EN 1993-1-6.

6.2.3 Esfuerzo axil de tracción

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

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

(2) Para secciones con agujeros, la resistencia de cálculo a tracción $N_{t,Rd}$ debería tomarse como el menor de:

a) la resistencia plástica de cálculo de la sección transversal bruta:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

b) la resistencia última de cálculo de la sección transversal neta, considerando los agujeros para los elementos de unión

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

(3) Cuando se requiera un diseño por capacidad, véase la Norma Europea EN 1998, la resistencia plástica de cálculo $N_{pl,Rd}$ (como se da en el punto (2)a del apartado 6.2.3) debería ser menor que la resistencia última de cálculo de la sección transversal neta con agujeros para elementos de unión $N_{u,Rd}$ (como se da en el punto (2)b del apartado 6.2.3).

(4) En uniones de categoría C (véase el punto (1) del apartado 3.4.2 de la Norma Europea EN 1993-1-8), la resistencia de cálculo a tracción $N_{t,Rd}$ en el punto (1) del apartado 6.2.3 de la sección transversal neta con agujeros para los elementos de unión debería obtenerse como $N_{net,Rd}$, donde:

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

(5) Para angulares unidos a través de un lado, véase también el apartado 3.6.3 de la Norma Europea EN 1993-1-8. Una consideración similar debería darse también para otro tipo de secciones unidas a través de las alas voladas.

6.2.4 Esfuerzo axil de compresión

(1)P El valor de cálculo del esfuerzo axil de compresión N_{Ed} en cada sección transversal debe cumplir:

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

(2) La resistencia de cálculo de la sección transversal para un esfuerzo axil de compresión $N_{c,Rd}$ debería determinarse como sigue:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para secciones transversales de Clases 1, 2 ó 3} \quad (6.10)$$

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

- (3) Los agujeros para los elementos de unión no necesitan ser considerados en elementos comprimidos, siempre que aquéllos estén ocupados por tales elementos de unión, exceptuando los agujeros sobredimensionados o alargados, tal como se definen en la Norma Europea EN 1090.
- (4) En el caso de secciones transversales de Clase 4 no simétricas, el método dado en el apartado 6.2.9.3 debería utilizarse para tener en cuenta el momento adicional ΔM_{Ed} debido a la excentricidad del eje del centro de la gravedad de la sección reducida, véase punto (4) del apartado 6.2.2.5.

6.2.5 Momento flector

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

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

donde $M_{c,Rd}$ se determina considerando los agujeros para los elementos de unión, véanse los puntos (4) a (6).

- (2) La resistencia de cálculo a flexión alrededor de un eje principal de una sección transversal se determina como sigue:

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

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

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

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

- (3) Para flexión alrededor de ambos ejes, deberían utilizarse los métodos dados en el apartado 6.2.9.
- (4) Los agujeros para los elementos de unión en el ala traccionada pueden ignorarse siempre que para dicha ala se cumpla que:

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

donde A_f es el área del ala traccionada.

NOTA El criterio establecido en el punto (4) permite realizar un diseño por capacidad (véase el apartado 1.5.8) en la zona de las rótulas plásticas.

- (5) Los agujeros para los elementos de unión en la zona traccionada del alma no necesitan ser considerados siempre que se cumpla la limitación establecida en el punto (4) en toda la zona traccionada de la sección, incluyendo el ala traccionada y la zona traccionada del alma.
- (6) Los agujeros para los elementos de unión en la zona comprimida de la sección transversal, excepto los sobredimensionados o alargados, no necesitan ser considerados, siempre que los agujeros estén ocupados por los elementos de unión.

6.2.6 Esfuerzo cortante

(1)P El valor del cálculo del esfuerzo cortante V_{Ed} de cada sección transversal debe cumplir:

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

donde $V_{c,Rd}$ es la resistencia de cálculo a cortante. En dimensionamiento plástico $V_{c,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo a cortante, dada en el punto (2). En dimensionamiento elástico $V_{pl,Rd}$ es la resistencia elástica de cálculo a cortante, calculada utilizando los puntos (4) y (5).

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

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (6.18)$$

donde A_v es el área a cortante.

(3) El área a cortante A_v puede obtenerse como sigue:

- | | |
|--|--|
| a) Secciones de perfiles laminados en I o en H con carga paralela al alma | $A - 2bt_f + (t_w + 2r) t_f$
pero no menor que $\eta h_w t_w$ |
| b) Secciones de perfiles laminados en U con carga paralela al alma | $A - 2bt_f + (t_w + r) t_f$ |
| c) Secciones de perfiles laminados en T con carga paralela al alma | $0,9(A - bt_f)$ |
| d) Secciones de vigas armadas soldadas en I, en H y en cajón con carga paralela al alma | $\eta \sum (h_w t_w)$ |
| e) Secciones de vigas armadas soldadas en I, H, U y en cajón con carga paralela a las alas | $A - \sum (h_w t_w)$ |
| f) Secciones de espesor constante de perfiles huecos rectangulares: | |
| carga paralela al canto | $Ah/(b+h)$ |
| carga paralela al ancho | $Ab/(b+h)$ |
| g) Secciones de espesor constante de perfiles huecos circulares y tubos | $2A/\pi$ |

donde

- A es el área de la sección transversal;
 b es la anchura total de la sección;
 h es el canto total de la sección;
 h_w es la altura 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 del alma no es constante, t_w debería tomarse como el espesor mínimo);
 η véase la Norma Europea EN 1993-1-5.

NOTA η puede tomarse conservadoramente igual a 1,0.

- (4) Para la comprobación de la resistencia elástica de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$, puede utilizarse el siguiente criterio para cualquier punto crítico de la sección transversal, a menos que aplique la comprobación a abolladura establecida en el capítulo 5 de la Norma Europea EN 1993-1-5:

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

donde τ_{Ed} puede obtenerse de: $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t}$ (6.20)

donde

V_{Ed} es el valor del cálculo del esfuerzo cortante;

S es el momento estático, alrededor del eje que pasa por el centro de la 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 transversal;

t es el espesor en el punto considerado.

NOTA La comprobación de acuerdo con el punto (4) es conservadora ya que excluye una posible distribución parcial plástica de tensiones tangenciales, la cual es permitida en dimensionamiento elástico, véase el punto (5). Por lo tanto, dicha comprobación debería realizarse solamente cuando la comprobación sobre $V_{c,Rd}$, de acuerdo con la ecuación (6.17), no pueda llevarse a cabo.

- (5) Para secciones en I o en H, la tensión tangencial en el alma puede obtenerse como:

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

donde

A_f es el área de un ala;

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

- (6) Además, debería comprobarse la resistencia a abolladura por cortante en las almas sin rigidizadores intermedios, de acuerdo con el capítulo 5 de la Norma Europea EN 1993-1-5, si

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

Para η véase el capítulo 5 de la Norma Europea EN 1993-1-5.

NOTA η puede tomarse conservadoramente igual a 1,0.

- (7) Para la comprobación a cortante, los agujeros para los elementos de unión no necesitan ser considerados, excepto para la comprobación de la resistencia de cálculo a cortante en las zonas de uniones, tal como se expone en la Norma Europea EN 1993-1-8.

- (8) Cuando el esfuerzo cortante se combina con un momento torsor, la resistencia plástica a cortante $V_{pl,Rd}$ debería reducirse tal como se especifica en el punto (9) del apartado 6.2.7.

6.2.7 Torsión

- (1) Para elementos sometidos a torsión para los cuales las deformaciones de distorsión puedan ser despreciadas, el valor de cálculo del momento torsor T_{Ed} en cada sección transversal debería cumplir:

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

donde

T_{Rd} es la resistencia de cálculo a torsión de la sección transversal.

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

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

donde

$T_{t,Ed}$ es el valor de cálculo de la torsión de St. Venant;

$T_{w,Ed}$ es el valor de cálculo de la torsión de alabeo.

- (3) Los valores de $T_{t,Ed}$ y $T_{w,Ed}$ en cualquier sección transversal pueden determinarse a partir de T_{Ed} mediante un análisis elástico, teniendo en cuenta las características de la sección transversal del elemento, las condiciones de vinculación en los apoyos y la distribución de las acciones a lo largo del elemento.
- (4) Deberían considerarse las siguientes tensiones debidas a la torsión:
- las tensiones tangenciales $\tau_{t,Ed}$ debidas a la torsión de St. Venant $T_{t,Ed}$;
 - las tensiones normales longitudinales $\sigma_{w,Ed}$ debidas al bimomento B_{Ed} y las tensiones tangenciales $\tau_{w,Ed}$ debidas a la torsión de alabeo $T_{w,Ed}$.
- (5) Para la comprobación elástica puede aplicarse el criterio de plastificación indicado en el punto (5) del apartado 6.2.1.
- (6) Para determinar la resistencia plástica de cálculo a flexión de una sección transversal sometida a flexión y torsión, los efectos de la torsión ocasionados por el bimomento B_{Ed} deberían obtenerse a través de un análisis elástico, véase el punto (3).
- (7) De forma simplificada, para el caso de elementos con sección transversal hueca cerrada tales como los perfiles tubulares, los efectos de la torsión de alabeo pueden despreciarse. También de forma simplificada, en el caso de elementos con sección transversal abierta, tales como secciones en I y en H, pueden despreciarse los efectos de la torsión de St. Venant.
- (8) Para determinar la resistencia de cálculo a torsión T_{Rd} de secciones huecas cerradas, debería tenerse en cuenta la resistencia de cálculo a cortante de las partes individuales de la sección transversal de acuerdo con la Norma Europea EN 1993-1-5.

- (9) Para la acción combinada del esfuerzo cortante y momento torsor, la resistencia plástica de cálculo a cortante considerando los efectos de torsión debería reducirse de $V_{pl,Rd}$ a $V_{pl,T,Rd}$ y el valor de cálculo del esfuerzo cortante debería cumplir:

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

en la cual $V_{pl,T,Rd}$ puede obtenerse como sigue:

- para secciones en I o en H

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

- para secciones en U

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

- para secciones huecas

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

donde $V_{pl,Rd}$ se da en el apartado 6.2.6.

6.2.8 Flexión y cortante

- (1) Cuando exista esfuerzo cortante, debería llevarse a cabo una reducción de la resistencia a flexión.
- (2) Cuando el esfuerzo cortante sea menor que la mitad de la resistencia plástica de cálculo a cortante, su efecto sobre la resistencia a flexión puede despreciarse excepto cuando la abolladura por cortante reduzca la resistencia de la sección, véase la Norma Europea EN 1993-1-5.
- (3) De lo contrario, la resistencia reducida a flexión debería obtenerse como la resistencia de cálculo de la sección transversal, determinada utilizando un límite elástico reducido

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

para el área a cortante,

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

NOTA Véase también el punto (3) del apartado 6.2.10.

(4) Cuando exista torsión, ρ debería obtenerse como $\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2$, véase el apartado 6.2.7; si $V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,T,Rd}$, entonces $\rho = 0$.

(5) En secciones transversales en I con alas iguales y sometidas a flexión alrededor del eje principal de mayor inercia, la resistencia plástica de cálculo reducida considerando el esfuerzo cortante puede obtenerse alternativamente como sigue:

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

donde $M_{y,c,Rd}$ se obtiene del punto (2) del apartado 6.2.5;

y $A_w = h_w t_w$.

(6) Para la interacción de flexión, cortante y cargas transversales, véase el capítulo 7 de la Norma Europea EN 1993-1-5.

6.2.9 Flexión y esfuerzo axil

6.2.9.1 Secciones transversales de Clases 1 y 2

(1) Cuando exista esfuerzo axil, debería llevarse a cabo una reducción de la resistencia plástica de cálculo a flexión.

(2) Para secciones transversales de Clase 1 y 2, debe cumplirse el siguiente criterio:

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

donde $M_{N,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo a flexión reducida, debido a la existencia del esfuerzo axil N_{Ed} .

(3) Para una sección rectangular sin agujeros para elementos de unión $M_{N,Rd}$ debería obtenerse como:

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

(4) Para secciones doblemente simétricas, secciones en I y H, u otras secciones con alas, no es necesario hacer la reducción de la resistencia plástica de cálculo a flexión alrededor del eje y - y por efecto del esfuerzo axil, cuando se cumplan los dos siguientes criterios:

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

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

Para secciones doblemente simétricas en I y en H, no es necesario hacer la reducción de la resistencia plástica de cálculo a flexión alrededor del eje z - z por efecto del esfuerzo axil, cuando:

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

- (5) Para secciones transversales en las cuales los agujeros para los elementos de unión no sean considerados, pueden aplicarse las siguientes expresiones aproximadas para perfiles laminados estándares en I o en H y para secciones soldadas en I o H con alas iguales:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1-n)/(1-0,5a) \quad \text{con} \quad M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} \quad (6.36)$$

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

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

donde

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

$$a = (A - 2bt_f)/A \quad \text{con} \quad a \leq 0,5$$

Para secciones transversales en las cuales los agujeros para elementos de unión no sean considerados, pueden aplicarse las siguientes expresiones aproximadas para perfiles huecos rectangulares de espesor constante y para secciones en cajón soldadas con alas y almas iguales:

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

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

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 en cajón soldadas

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

$a_f = (A - 2ht_w)/A$ con $a_f \leq 0,5$ para secciones en cajón soldadas

- (6) Para el caso de flexión biaxial puede utilizarse el siguiente criterio:

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

en el cual α y β son constantes que, de manera conservadora, pueden tomarse igual a la unidad, o de lo contrario como sigue:

- secciones en I y en H:

$$\alpha = 2; \beta = 5n \quad \text{con} \quad \beta \geq 1$$

- secciones huecas circulares:

$$\alpha = 2; \beta = 2$$

- secciones huecas rectangulares:

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

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

6.2.9.2 Secciones transversales de Clase 3

- (1)P En ausencia de esfuerzo cortante, para secciones transversales de Clase 3, la tensión longitudinal máxima debe cumplir el criterio:

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

donde $\sigma_{x,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión longitudinal debida al momento y al esfuerzo axil, teniendo en cuenta los agujeros para los elementos de unión cuando éstos sean relevantes, véanse los apartados 6.2.3, 6.2.4 y 6.2.5.

6.2.9.3 Secciones transversales de Clase 4

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

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

donde

$\sigma_{x,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión longitudinal debido al momento y al esfuerzo axil, teniendo en cuenta los agujeros para los elementos de unión cuando éstos sean relevantes, véanse los apartados 6.2.3, 6.2.4 y 6.2.5.

- (2) Debería cumplirse el siguiente criterio:

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

donde

A_{eff} es el área de la sección transversal reducida cuando está sometida a compresión uniforme;

$W_{eff,min}$ es el módulo resistente de la sección transversal reducida (correspondiente a la fibra con la máxima tensión elástica), cuando ésta se ve sometida solamente a momento flector alrededor del eje considerado;

e_N es el desplazamiento del centro de gravedad cuando la sección transversal se ve sometida solamente a compresión uniforme, véase el punto (4) del apartado 6.2.2.5.

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

6.2.10 Flexión, esfuerzo cortante y esfuerzo axil

- (1) Cuando existan esfuerzo cortante y esfuerzo axil, debería llevarse a cabo la reducción de la resistencia de cálculo a flexión para considerar el efecto de ambos esfuerzos.
- (2) Siempre que el valor de cálculo del esfuerzo cortante V_{Ed} no exceda el 50% de la resistencia plástica de cálculo a cortante de la sección $V_{pl,Rd}$ no es necesario hacer ninguna reducción de las resistencias definidas para flexión y esfuerzo axil en el apartado 6.2.9, exceptuando aquellas situaciones en las que la abolladura por cortante reduzca la resistencia de la sección, véase la Norma Europea EN 1993-1-5.

- (3) Cuando V_{Ed} exceda el 50% de $V_{pl,Rd}$ la resistencia de cálculo de la sección transversal a momento flector y esfuerzo axial debería calcularse utilizando un límite elástico reducido.

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

para el área a cortante

donde

$\rho = (2V_{Ed}/V_{pl,Rd} - 1)^2$ y $V_{pl,R}$ y se obtienen del punto (2) del apartado 6.2.6.

NOTA En lugar de reducir el límite elástico, puede reducirse también el espesor de la parte pertinente de la sección transversal.

6.3 Resistencia a pandeo de elementos

6.3.1 Elementos uniformes en compresión

6.3.1.1 Resistencia a pandeo

- (1) Un elemento comprimido debería ser comprobado frente a pandeo como sigue:

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

donde

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

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

- (2) Para elementos con sección transversal Clase 4 no simétrica, debería considerarse el momento adicional ΔM_{Ed} debido a la excentricidad del eje que pasa por el centro de la gravedad de la sección reducida, véase también el punto (4) del apartado 6.2.2.5, y la interacción debería llevarse a cabo de acuerdo con los apartados 6.3.4 ó 6.3.3.
- (3) La resistencia de cálculo a pandeo de un elemento sometido a compresión debería determinarse como:

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

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{para secciones transversales de Clase 4} \quad (6.48)$$

donde χ es el coeficiente de reducción para el modo de pandeo considerado.

NOTA Para la determinación de la resistencia de pandeo de elementos con secciones de canto variable a lo largo de los mismos o con distribución no uniforme del esfuerzo axial de compresión, puede llevarse a cabo un análisis en segundo orden de acuerdo con el punto (2) del apartado 5.3.4. Para pandeo fuera de plano, véase también el apartado 6.3.4.

- (4) Al determinar A y A_{eff} , no es necesario tener en cuenta los agujeros para los elementos de unión que existen en las zonas extremas del pilar.

6.3.1.2 Curvas de pandeo

- (1) Para elementos sometidos a compresión, el valor de χ correspondiente a la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$ debería determinarse a partir de la curva de pandeo apropiada de acuerdo con:

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

donde

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

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para secciones transversales de Clases 1, 2 y 3;}$$

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

α es un coeficiente de imperfección;

N_{cr} es el esfuerzo axil crítico elástico para el modo de pandeo considerado, obtenido con las características de la sección transversal bruta.

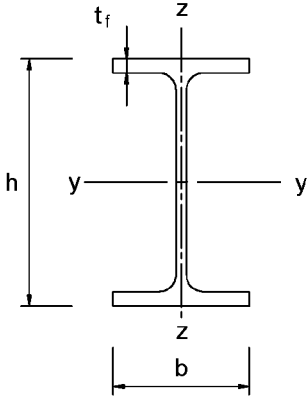
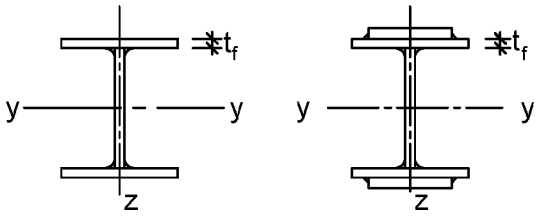
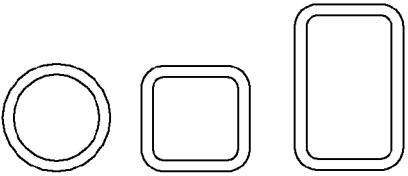
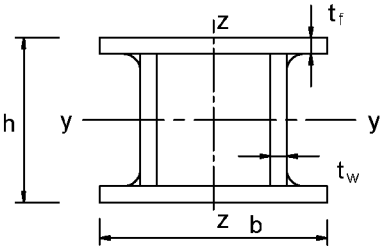
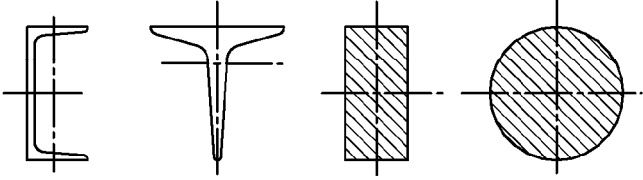
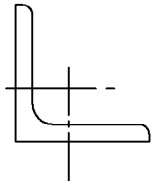
- (2) El valor del coeficiente de imperfección α para cada una de las curvas de pandeo debería obtenerse de las tablas 6.1 y 6.2.

Tabla 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 apropiada $\bar{\lambda}$ pueden obtenerse de la figura 6.4.
- (4) Para esbelteces $\bar{\lambda} \leq 0,2$ o para relaciones $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$ pueden ignorarse los efectos de pandeo, teniéndose que llevar a cabo únicamente las comprobaciones de resistencia de la sección transversal.

Tabla 6.2 – Elección de la curva de pandeo para cada sección transversal

Sección transversal		Límites		Pandeo alrededor del eje	Curva de pandeo	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Secciones de perfiles laminados		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b	a ₀ a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y - y z - z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d	c c
Secciones en I de vigas soldadas		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y - y z - z	b c	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$		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

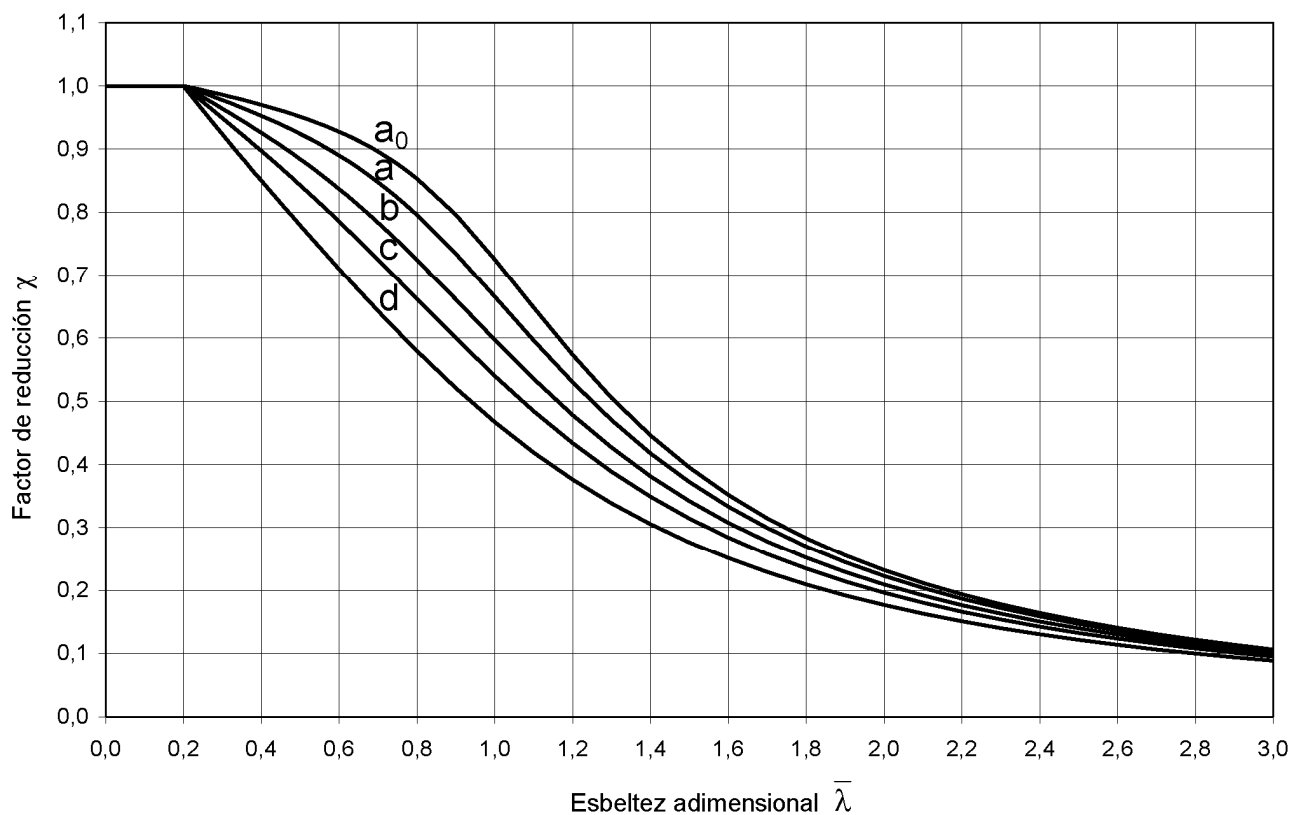


Figura 6.4 – Curvas de pandeo

6.3.1.3 Esbeltez para pandeo por flexión

(1) La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$ viene dada por:

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

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff}f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{para secciones transversales de Clase 4} \quad (6.51)$$

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 éste a partir de las características de la sección transversal bruta.

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

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

NOTA B Para pandeo elástico de componentes de estructuras de edificios, véase el anexo BB.

- (2) Para el pandeo por flexión, la curva de pandeo apropiada debería determinarse a partir de la tabla 6.2.

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

- (1) Para elementos con secciones transversales abiertas debería considerarse la posibilidad de que la resistencia del elemento frente al pandeo por torsión o al pandeo por torsión y flexión pudiera ser menor que su resistencia a pandeo por flexión.
- (2) La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_T$ para la comprobación frente al pandeo por torsión o al pandeo por torsión y flexión debería tomarse como:

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

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

donde

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \quad \text{con} \quad N_{cr} < N_{cr,T};$$

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

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

- (3) Para el pandeo por torsión o para el pandeo por torsión y flexión, la curva de pandeo apropiada puede determinarse a partir de la tabla 6.2, considerando la curva relativa al eje z-z.

6.3.2 Elementos uniformes sometidos a flexión

6.3.2.1 Resistencia a inestabilidad

- (1) Un elemento sin arriostramiento lateral sometido a flexión alrededor del eje fuerte debería comprobarse frente al pandeo lateral, conforme a:

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

donde

M_{Ed} es el valor de cálculo del momento;

$M_{b,Rd}$ es la resistencia de cálculo a flexión frente a pandeo lateral.

- (2) Las vigas con el ala comprimida suficientemente arriostrada no son sensibles al pandeo lateral. Asimismo, las vigas con ciertos tipos de secciones transversales, tales como secciones huecas circulares o cuadradas, tubos circulares o secciones en cajón cuadradas no son sensibles al pandeo lateral.
- (3) La resistencia de cálculo a pandeo lateral de una viga no arriostrada lateralmente, sometida a flexión, debería obtenerse como:

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

donde W_y es el módulo resistente apropiado de la sección:

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

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

NOTA 1 Para la determinación de la resistencia a pandeo lateral de vigas con sección de canto variable puede llevarse a cabo un análisis de segundo orden, de acuerdo con el punto (3) del apartado 5.3.4. Para pandeo fuera del plano, véase también el apartado 6.3.4.

NOTA 2B Para pandeo de componentes de estructuras de edificios, véase también el anexo BB.

- (4) Para la determinación de W_y no es necesario considerar los agujeros para los elementos de unión en los extremos de la viga.

6.3.2.2 Curvas de pandeo lateral-Caso general

- (1) A menos que se especifique lo contrario, véase el apartado 6.3.2.3, para elementos de sección transversal constante sometidos a flexión, el valor de χ_{LT} , para la esbeltez adimensional apropiada, $\bar{\lambda}_{LT}$ debería determinarse mediante:

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

donde

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

α_{LT} es un 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 obtiene considerando las características de la sección transversal bruta y teniendo en cuenta las condiciones de carga, la distribución real de momentos flectores y los arriostramientos laterales.

NOTA El coeficiente de imperfección α_{LT} correspondiente a la curva de pandeo apropiada puede obtenerse del anexo nacional. En la tabla 6.3 se dan los valores recomendados para dicho coeficiente α_{LT} .

Tabla 6.3 – Valores recomendados para el coeficiente de imperfección para las curvas de pandeo lateral

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

Las recomendaciones para la elección de la curva de pandeo se dan en la tabla 6.4.

Tabla 6.4 – Recomendaciones para la elección de la curva de pandeo lateral para secciones transversales utilizando la ecuación (6.56)

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

- (3) Los valores del coeficiente de reducción χ_{LT} para la esbeltez adimensional apropiada $\bar{\lambda}_{LT}$ pueden obtenerse de la figura 6.4.
- (4) Para esbelteces $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ (véase el apartado 6.3.2.3) o para relaciones $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$ (véase el apartado 6.3.2.3) pueden ignorarse los efectos del pandeo lateral, teniéndose que llevar a cabo únicamente las comprobaciones de resistencia de la sección transversal.

6.3.2.3 Curvas de pandeo lateral para secciones de perfiles laminados o secciones soldadas equivalentes

- (1) Para secciones transversales de perfiles laminados o secciones soldadas equivalentes sometidas a flexión, los valores de χ_{LT} para la correspondiente esbeltez adimensional pueden determinarse conforme a:

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

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

NOTA El anexo nacional puede dar los valores de los parámetros $\bar{\lambda}_{LT,0}$ y β , y dar cualquier limitación de validez en relación al canto de la viga o la relación h/b . Para secciones transversales de perfiles laminados o secciones soldadas equivalentes se recomiendan los siguientes valores:

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

$\beta = 0,75$ (valor mínimo)

Las recomendaciones para la elección de la curva de pandeo se dan en la tabla 6.5.

Tabla 6.5 – Recomendaciones para la 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 de momentos flectores entre arriostramientos laterales de los elementos, el coeficiente de reducción χ_{LT} puede modificarse como sigue:

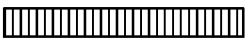
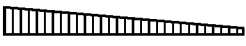
$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{siendo} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1 \quad (6.58)$$

NOTA El valor de f puede definirse en el anexo nacional. Se recomienda el siguiente valor mínimo:

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

k_c es un coeficiente de corrección que se obtiene de acuerdo con la tabla 6.6.

Tabla 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 simplificados de comprobación para vigas con arriostramientos en edificios

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

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

donde

$M_{y,Ed}$ es el valor de cálculo del momento flector máximo existente 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 un coeficiente de corrección de la esbeltez para tener en cuenta la distribución de momentos flectores entre puntos de arriostramiento, véase la tabla 6.6;

$i_{f,z}$ es el radio de giro del ala comprimida equivalente con respecto al eje débil de la sección, constituida aquella por la propia ala comprimida más la tercera parte del área del alma comprimida;

$\bar{\lambda}_{c,0}$ es un límite de esbeltez del ala comprimida equivalente definida anteriormente.

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

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

NOTA 1B Para secciones transversales de Clase 4, $i_{f,z}$ puede obtenerse como:

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

donde

$I_{eff,f}$ es el momento de inercia del ala comprimida reducida, respecto del eje débil de la sección;

$A_{eff,f}$ es el área del ala comprimida reducida;

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

NOTA 2B El anexo nacional puede dar el límite de esbeltez $\bar{\lambda}_{c,0}$. Se recomienda un valor límite, $\bar{\lambda}_{c,0} = \bar{\lambda}_{LT,0} + 0,1$ véase el apartado 6.3.2.3.

(2)B Si la esbeltez del ala comprimida $\bar{\lambda}_f$ excede el límite dado en el punto (1)B, la resistencia de cálculo a flexión frente a pandeo lateral puede obtenerse como:

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

donde

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

k_{fl} un factor de corrección que tiene en cuenta que el método del ala comprimida equivalente es conservador.

NOTA B El factor de corrección puede darse en el anexo nacional. Se recomienda un valor $k_{\eta} = 1,10$.

(3)B Las curvas de pandeo a utilizar en el punto anterior, en (2)B, deberían determinarse como sigue:

curva d para secciones soldadas siempre que: $\frac{h}{t_f} \leq 44\epsilon$

curva c para todas las otras secciones

donde

h es el canto total de la sección transversal;

t_f es el espesor del ala comprimida.

NOTA B Para pandeo lateral de componentes de estructuras de edificios con arriostramientos, véase también el capítulo BB.3.

6.3.3 Elementos uniformes sometidos a compresión y flexión

(1) A no ser que se haya llevado a cabo un análisis de segundo orden empleando las imperfecciones dadas en el apartado 5.3.2, la estabilidad de elementos uniformes con secciones transversales doblemente simétricas, no susceptibles a deformaciones por distorsión, debería comprobarse del modo que se presenta a continuación, donde se distingue entre:

- elementos que no son susceptibles a deformaciones por torsión, por ejemplo, elementos con secciones huecas circulares o secciones con torsión impedida;
- elementos que son susceptibles a deformaciones por torsión, por ejemplo, elementos con secciones transversales abiertas y con torsión no impedida.

(2) Además, la resistencia de las secciones transversales en cada extremo del elemento debería cumplir los requisitos dados en el apartado 6.2.

NOTA 1 Las fórmulas de interacción se basan en la modelación de elementos simplemente apoyados con condiciones de apoyo de horquilla en sus extremos y con o sin arriostramiento lateral continuo, sometidos a fuerzas axiales de compresión, momentos en extremos de barra y/o cargas transversales.

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

(3) Para elementos de sistemas estructurales, la comprobación de resistencia puede llevarse a cabo sobre el análisis de elementos individuales de un solo vano extraídos del sistema. Los efectos de segundo orden del sistema traslacional (efecto $P-\Delta$) se han de tener en cuenta, ya sea a través de los momentos en extremos del elemento o por medio de las correspondientes longitudes de pandeo respectivamente, véase el punto (3)c del apartado 5.2.2 y el punto (8) del apartado 5.2.2.

(4) Los elementos sometidos a compresión y flexión deberían satisfacer las siguientes condiciones:

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

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

donde

- N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$ son los valores de cálculo del esfuerzo axial de compresión y de los momentos flectores máximos a lo largo del elemento, alrededor de los ejes y - y y z - z respectivamente;
- $\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ son los momentos debidos al desplazamiento del eje del centro de la gravedad, de acuerdo con el apartado 6.2.9.3, en las secciones de Clase 4, véase la tabla 6.7;
- χ_y y χ_z son los coeficientes de reducción para pandeo por flexión, obtenidos del apartado 6.3.1;
- χ_{LT} es el coeficiente de reducción para pandeo lateral, obtenido del apartado 6.3.2;
- k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} son los coeficientes de interacción.

Tabla 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	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	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} , k_{zz} dependen del método que se elija para llevar a cabo la comprobación.

NOTA 1 Los coeficientes de interacción k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} y k_{zz} se han obtenido a partir de dos aproximaciones alternativas al problema. Los valores de estos coeficientes pueden obtenerse del anexo A (método alternativo 1) o del anexo B (método alternativo 2).

NOTA 2 El anexo nacional puede elegir entre ambos métodos alternativos.

NOTA 3 En aras de conseguir una mayor simplicidad, las comprobaciones pueden efectuarse en el rango elástico únicamente.

6.3.4 Método general para pandeo por flexión fuera del plano y pandeo lateral

- (1) El siguiente método puede emplearse cuando los métodos indicados 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 fuera del plano de componentes estructurales tales como

- elementos individuales, compuestos o no, uniformes o no, con condiciones de apoyo complejas o no, o
- entramados o subestructuras planas constituidas por tales elementos,

los cuales están sometidos a compresión y/o a flexión uniaxial en el plano, pero que no contienen rótulas plásticas.

NOTA El anexo nacional puede especificar el campo y los límites de aplicación de este método.

- (2) La resistencia global a pandeo fuera del plano para cualquier componente estructural de acuerdo con lo expuesto en el punto (1) puede comprobarse asegurando que:

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

donde

$\alpha_{ult,k}$ es el coeficiente mínimo por el que hay que multiplicar 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 fuera del plano, pero sí teniendo en cuenta todos los efectos debidos a las deformaciones geométricas e imperfecciones en el plano, globales y locales, cuando éstas sean relevantes;

χ_{op} es el coeficiente de reducción correspondiente a la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_{op}$, véase el punto (3), para tener en cuenta el pandeo fuera del plano.

(3) La esbeltez adimensional global $\bar{\lambda}_{op}$ para el componente estructural debería determinarse a partir de:

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} \quad (6.64)$$

donde

$\alpha_{ult,k}$ se ha definido en el punto (2);

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

NOTA Para la determinación de $\alpha_{cr,op}$ y $\alpha_{ult,k}$ puede emplearse el método de los elementos finitos.

(4) El coeficiente de reducción χ_{op} puede determinarse a partir de cualquiera de los siguientes métodos:

a) el valor mínimo de

χ para pandeo por flexión fuera del plano según el apartado 6.3.1;

χ_{LT} para pandeo lateral según el apartado 6.3.2.

cada uno calculado para la esbeltez global adimensional $\bar{\lambda}_{op}$.

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

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

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

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

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

6.3.5 Pandeo lateral de elementos con rótulas plásticas

6.3.5.1 Generalidades

(1)B Las estructuras pueden calcularse utilizando un análisis plástico siempre que el pandeo lateral en el pórtico esté impedido mediante:

- a) arriostramientos en las zonas de rótulas plásticas, véase el apartado 6.3.5.2, y
- b) comprobación de la longitud estable del segmento de elemento entre tales arriostramientos y otros arriostramientos laterales, véase el apartado 6.3.5.3.

(2)B Cuando bajo todas las combinaciones de acciones a considerar en la comprobación de los estados límite últimos, la rótula plástica no demande capacidad de rotación, no es necesario disponer arriostramientos para dicha rótula plástica.

6.3.5.2 Arriostramientos en rótulas plásticas

(1)B En cada zona en donde se forme una rótula plástica, la sección transversal debería tener un arriostramiento eficaz lateral y a torsión, con una resistencia adecuada a las fuerzas laterales y a la torsión inducidas por las deformaciones plásticas locales del elemento que tienen lugar en esa zona.

(2)B El arriostramiento eficaz debería proporcionarse para:

- elementos que soporten flexión o esfuerzo axial y flexión mediante un arriostramiento lateral en ambas alas. Ello puede conseguirse mediante el arriostramiento lateral de un ala y un arriostramiento rígido a torsión para la sección transversal impidiendo el desplazamiento lateral del ala comprimida en relación al ala traccionada, véase la figura 6.5;
- elementos que soporten flexión o esfuerzo axial de tracción y flexión en los cuales el ala comprimida esté en contacto con la losa de forjado, mediante un arriostramiento lateral y a torsión para el ala comprimida (por ejemplo, conectándola a la losa, véase la figura 6.6). Para secciones transversales más esbeltas que las secciones laminadas en I y en H, en las zonas de formación de rótulas plásticas debería impedirse la distorsión (por ejemplo, mediante un rigidizador de alma también conectado al ala comprimida mediante una unión rígida).

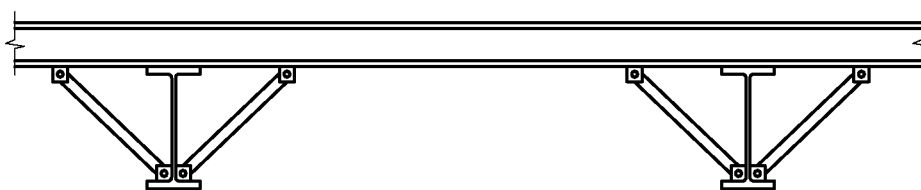
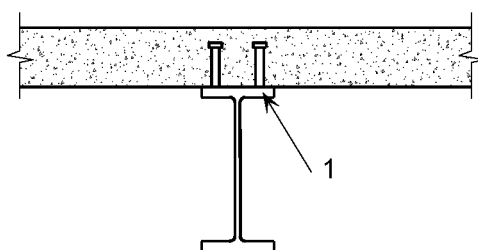


Figura 6.5 – Arriostramiento rígido a torsión



1 ala comprimida

Figura 6.6 – Arriostramiento lateral y a torsión para el ala comprimida mediante su conexión a una losa

- (3)B En la zona de rótula plástica, la unión (por ejemplo, tornillos) del ala comprimida al elemento resistente en esa zona (por ejemplo, correas) y cualquier elemento intermedio (por ejemplo, un arriostramiento diagonal) debería calcularse para resistir una fuerza local de como mínimo el 2,5% de $N_{f,Ed}$ (definido en el punto (5)B del apartado 6.3.5.2) transmitido por el ala en su plano y perpendicular al plano del alma, sin ninguna combinación con otras cargas.
- (4)B Cuando no sea factible proporcionar tal arriostramiento directamente en la zona de la rótula, el arriostramiento debería plantearse en una distancia de $h/2$ a lo largo de la longitud del elemento, siendo h el canto total en la zona de la rótula plástica.
- (5)B Para el cálculo de sistemas de arriostramiento, véase el apartado 5.3.3, debería llevarse a cabo una comprobación adicional a la comprobación para la imperfección, de acuerdo con el apartado 5.3.3 de que el sistema de arriostramiento es capaz de resistir los efectos de fuerzas locales Q_m aplicadas en cada elemento estabilizado en la zonas de rótula plástica, donde

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

donde

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

α_m de acuerdo con el punto (1) del apartado 5.3.3.

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

6.3.5.3 Comprobación de la longitud estable del segmento del elemento

- (1)B La comprobación frente a pandeo lateral de segmentos entre puntos de arriostramiento puede efectuarse comprobando que la longitud entre arriostramientos no es mayor que la longitud estable.

Para segmentos de vigas uniformes con secciones transversales en I o en H con $\frac{h}{t_f} \leq 40\varepsilon$ bajo una distribución lineal de momentos flectores y sin un esfuerzo axil de compresión significativo, la longitud estable puede tomarse como:

$$\begin{aligned} L_{\text{estable}} &= 35 \varepsilon i_z & \text{para } 0,625 \leq \psi \leq 1 \\ L_{\text{estable}} &= (60 - 40\psi) \varepsilon i_z & \text{para } -1 \leq \psi \leq 0,625 \end{aligned} \quad (6.68)$$

donde

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

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

NOTA B Para la longitud estable de un segmento de elemento, véase también el capítulo BB.3.

- (2)B Cuando se forma la rótula plástica en una zona inmediatamente adyacente al extremo de una cartela, el segmento de canto variable no necesita ser tratado como un segmento adyacente a la zona de la rótula plástica si se satisfacen los siguientes criterios:
- a) el arriostramiento en la zona de la rótula plástica debería estar en una distancia $h/2$ a lo largo de la longitud del segmento de canto variable, no del segmento uniforme;

- b) el ala comprimida de la cartela permanece en régimen elástico en toda su longitud.

NOTA B Para más información véase el capítulo BB.3.

6.4 Elementos compuestos uniformes sometidos a compresión

6.4.1 Generalidades

- (1) Los elementos compuestos uniformes sometidos a compresión con extremos articulados en los que se impide el movimiento lateral deberían calcularse con el siguiente modelo, véase la figura 6.7:

- 1 El elemento puede considerarse como una columna con una imperfección local $e_0 = \frac{L}{500}$.
- 2 Las deformaciones elásticas de las triangulaciones o de las presillas, véase la figura 6.7, pueden considerarse mediante una rigidez a cortante continua (repartida) S_v de la columna.

NOTA Para otras condiciones en los extremos del elemento, deberían llevarse a cabo las oportunas modificaciones.

- (2) El modelo de un elemento compuesto uniforme comprimido puede aplicarse cuando:

- 1 las triangulaciones o presillas se presentan a lo largo del elemento en módulos iguales sobre cordones que son paralelos;
- 2 el número mínimo de módulos en un elemento es tres.

NOTA Esta hipótesis de trabajo permite interpretar la estructura como regular y aproximar la estructura discreta a un elemento continuo.

- (3) El procedimiento de cálculo es aplicable a elementos compuestos con triangulaciones en dos planos, véase la figura 6.8.
- (4) Los cordones pueden ser elementos sólidos o pueden ser elementos triangulados o empresillados en el plano perpendicular.

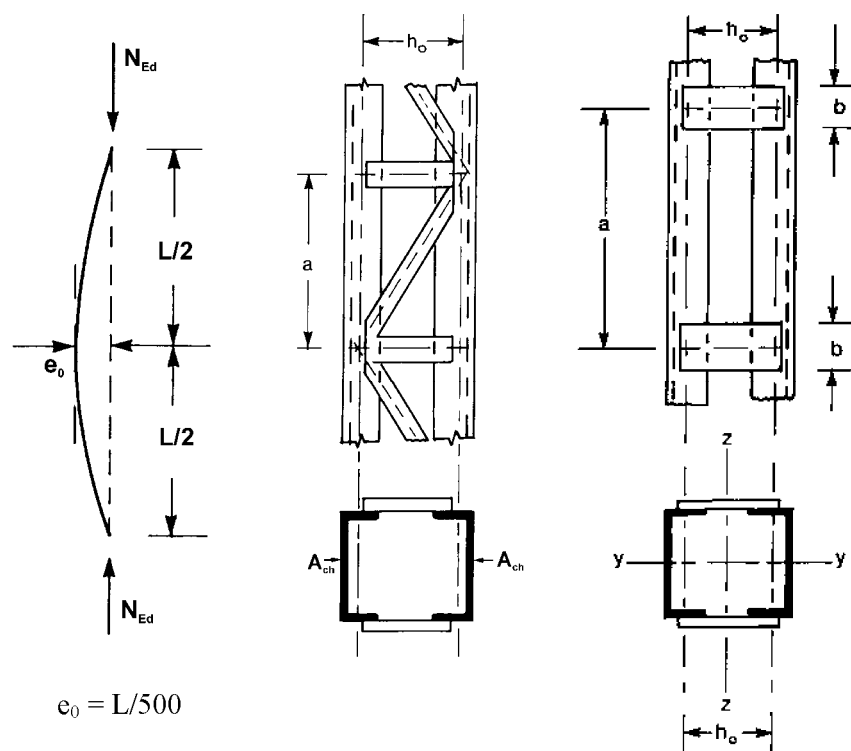


Figura 6.7 – Columnas compuestas uniformes con triangulaciones y presillas

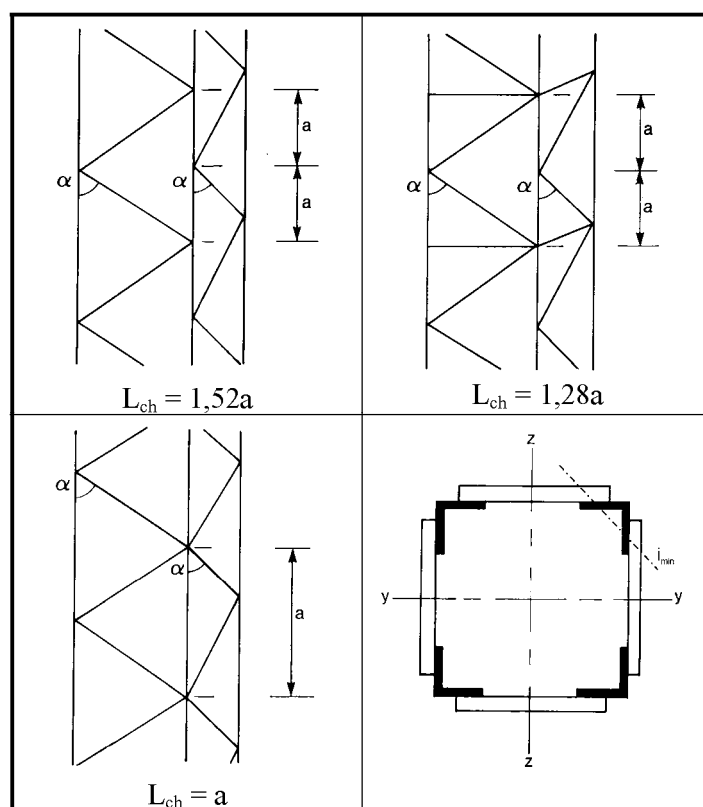


Figura 6.8 – Triangulaciones en cuatro caras y longitud de pandeo L_{ch} de los cordones

- (5) Las comprobaciones de los cordones deberían llevarse a cabo utilizando el esfuerzo axial de cálculo del cordón $N_{ch,Ed}$ inducido por los esfuerzos de compresión N_{Ed} y por los momentos flectores M_{Ed} en el centro del vano de los elementos compuestos.
- (6) Para un elemento con dos cordones idénticos el esfuerzo axial de cálculo $N_{ch,Ed}$ debería determinarse a partir de:

$$N_{ch,Ed} = 0,5N_{Ed} + \frac{M_{Ed}h_0A_{ch}}{2I_{eff}} \quad (6.69)$$

donde

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

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L^2} \quad \text{es el esfuerzo axial crítico elástico efectivo del elemento compuesto;}$$

N_{Ed} es el valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión del elemento compuesto;

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

M_{Ed}^I es el valor de cálculo del máximo momento flector en el centro del elemento compuesto sin considerar los 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 transversal de un cordón;

I_{eff} es la inercia efectiva del elemento compuesto, véanse los apartados 6.4.2 y 6.4.3;

S_v es la rigidez a cortante de la triangulación utilizada para el enlace o del panel empresillado, véanse los apartados 6.4.2 y 6.4.3.

- (7) Las comprobaciones de los elementos de enlace de las triangulaciones o de los paneles empresillados (determinación de momentos flectores y esfuerzos cortantes en los cordones y en las presillas) deberían realizarse para el panel extremo, considerando que actúa un esfuerzo cortante de valor:

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

6.4.2 Elementos comprimidos triangulados

6.4.2.1 Resistencia de componentes de elementos comprimidos triangulados

- (1) Los cordones y diagonales sometidos a compresión deberían dimensionarse frente a pandeo.

NOTA Los momentos secundarios pueden despreciarse.

- (2) Para los cordones, la comprobación frente a pandeo debería llevarse a cabo tal como sigue:

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

donde

$N_{ch,Ed}$ es el esfuerzo axial de cálculo de compresión en el cordón, en la mitad de la longitud del elemento compuesto, según el punto (6) del apartado 6.4.1;

$N_{b,Rd}$ es el valor de cálculo de la resistencia a pandeo del cordón, adoptando para la longitud de pandeo L_{ch} lo expuesto en la figura 6.8.

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

- (4) La inercia efectiva de los elementos compuestos triangulados puede obtenerse como:

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

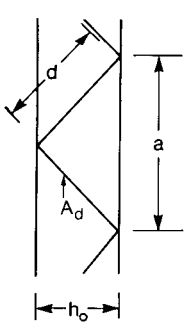
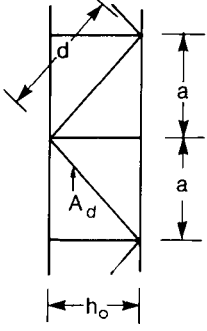
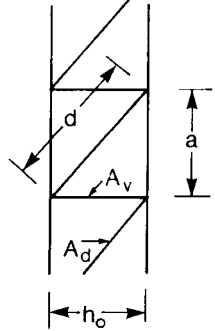
Sistema			
S_v	$\frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$
n es el número de planos de triangulación A_d y A_v son las áreas de la sección transversal de las diagonales y montantes			

Figura 6.9 – Rigidez a cortante de triangulaciones de elementos compuestos

6.4.2.2 Detalles constructivos

- (1) Los sistemas de triangulación en caras opuestas del elemento compuesto con dos planos triangulados paralelos deberían corresponderse con sistemas como los de la figura 6.10(a), colocados de tal forma que uno es la sombra de otro.
- (2) Cuando los sistemas de triangulación en caras opuestas del elemento compuesto con dos planos triangulados paralelos son opuestos tal como se muestra en la figura 6.10(b), deberían tenerse en cuenta los efectos resultantes de torsión.
- (3) Deberían disponerse paneles de cierre y enlace en los extremos de los sistemas de triangulación, en aquellos puntos en los que la triangulación se interrumpa y en uniones con otros elementos.

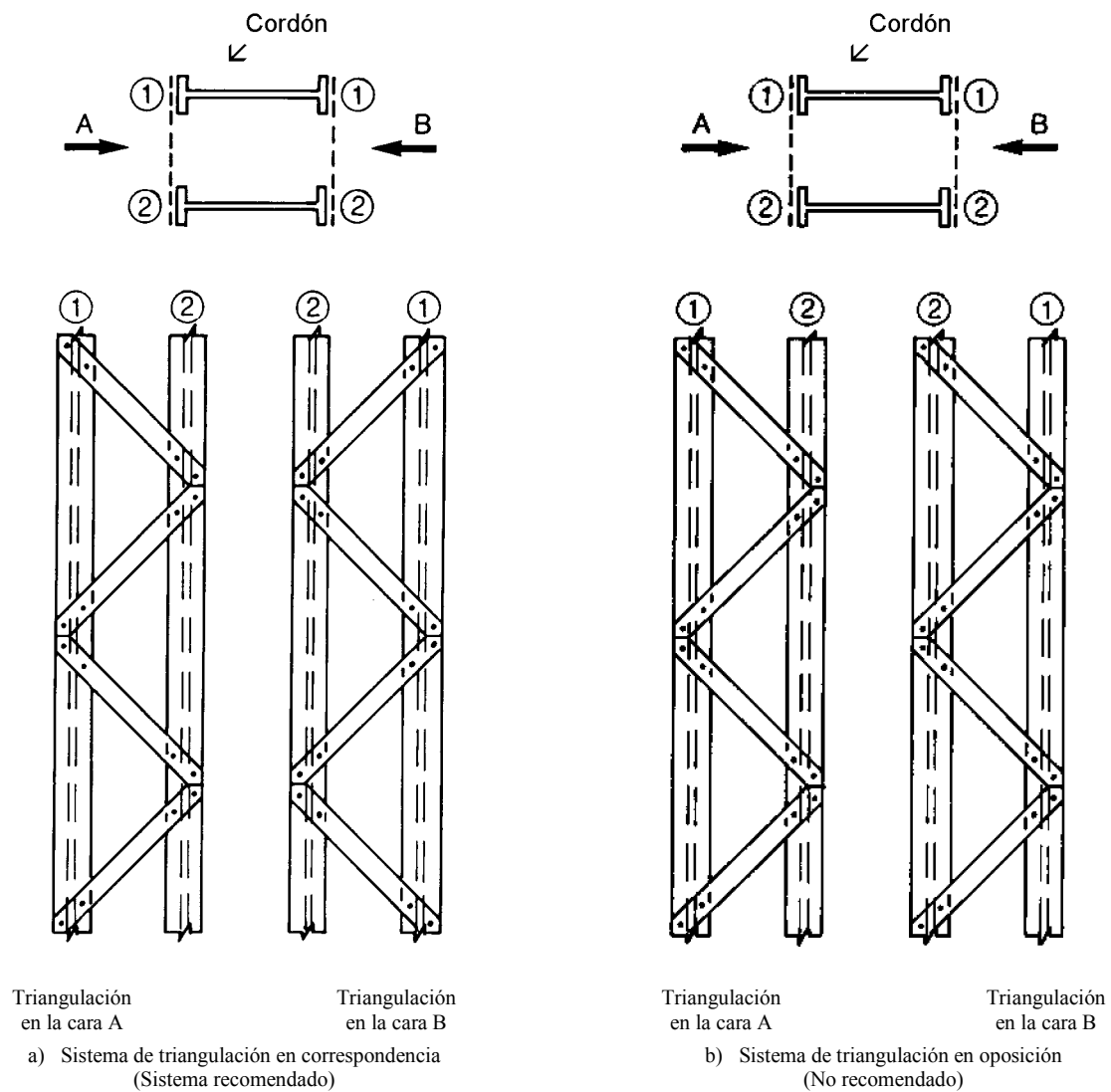


Figura 6.10 – Sistemas de triangulación en caras opuestas de un elemento compuesto con dos planos triangulados paralelos

6.4.3 Elementos comprimidos empresillados

6.4.3.1 Resistencia de componentes de elementos comprimidos empresillados

- (1) Los cordones y las presillas, y sus uniones a los cordones, deberían comprobarse para los esfuerzos que se inducen en el panel extremo y en el centro del elemento, tal como se indica en la figura 6.11.

NOTA De forma sencilla, el máximo esfuerzo axial de cálculo en el cordón $N_{ch,Ed}$ puede combinarse con el máximo esfuerzo cortante de cálculo V_{Ed} .

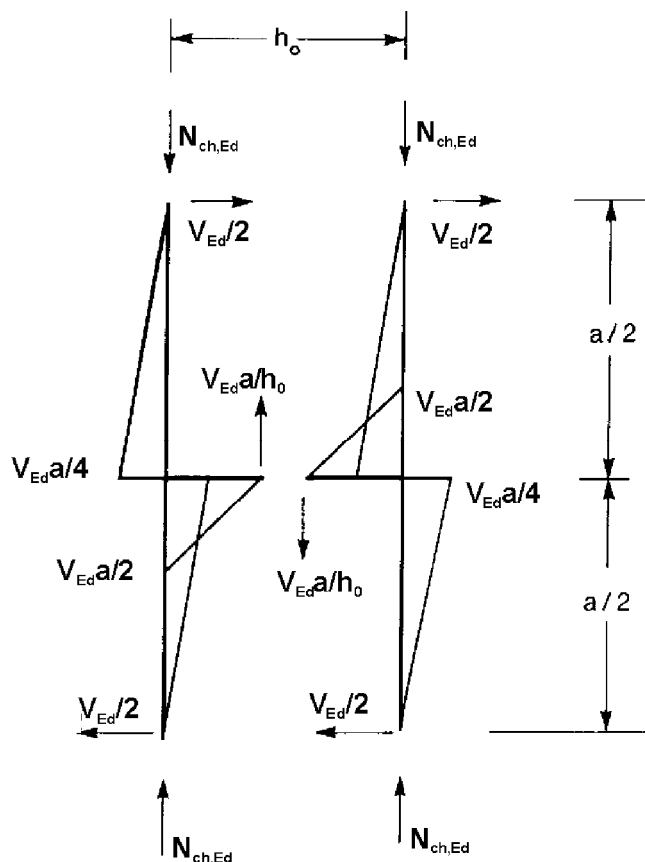


Figura 6.11 – Momentos y fuerzas en un panel extremo de un elemento compuesto empresillado

- (2) La rigidez a cortante S_v debería tomarse como sigue:

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

- (3) La inercia efectiva de elementos compuestos empresillados puede tomarse como:

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

donde

I_{ch} es la inercia de un cordón en el plano;

I_b es la inercia de una presilla en el plano;

μ es un factor de eficiencia que se obtiene de la tabla 6.8;

n número de planos de enlaces.

Tabla 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 $\lambda = \frac{L}{i_0}$; $i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2A_{ch}}}$; $I_1 = 0,5h_0^2 A_{ch} + 2I_{ch}$	

6.4.3.2 Detalles constructivos

- (1) Deberían disponerse presillas en cada extremo del elemento.
- (2) Cuando se planteen planos paralelos de presillas, éstas deberían disponerse enfrentadas.
- (3) También deberían disponerse presillas en puntos intermedios donde hubiera cargas aplicadas o se dispusiera de una coacción lateral.

6.4.4 Elementos compuestos con cordones próximos

- (1) Los elementos compuestos sometidos a compresión, constituidos por cordones en contacto o dispuestos próximos y unidos mediante forros discontinuos, véase la figura 6.12, o los elementos angulares unidos por pares de presillas en dos planos perpendiculares, véase la figura 6.13, deberían comprobarse a pandeo como un elemento individual ignorando el efecto de la rigidez a cortante ($S_v = \infty$) cuando se den las condiciones indicadas en la tabla 6.9.

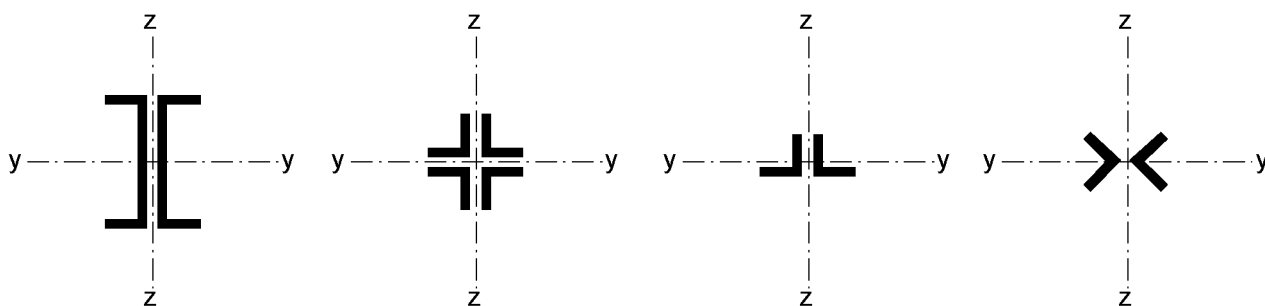


Figura 6.12 – Elementos compuestos con cordones próximos

Tabla 6.9 – Máximas distancias entre uniones contiguas para elementos con cordones próximos o para angulares unidos con presillas en planos perpendiculares

Tipo de elemento compuesto	Máxima distancia entre uniones*
Elementos de la figura 6.12 unidos por tornillos o soldaduras	$15 i_{\min.}$
Elementos de la figura 6.13 unidos por pares de presillas	$70 i_{\min.}$
* Distancia entre uniones de centro a centro. $i_{\min.}$ es el radio de giro mínimo de un cordón o de un angular.	

- (2) Los esfuerzos cortantes transmitidos por las presillas deberían determinarse a partir del punto (1) del apartado 6.4.3.1.
- (3) En el caso de angulares con lados desiguales, véase la figura 6.13, el pandeo alrededor del eje y - y puede comprobarse con:

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

donde

i_0 es el radio de giro mínimo del elemento compuesto.

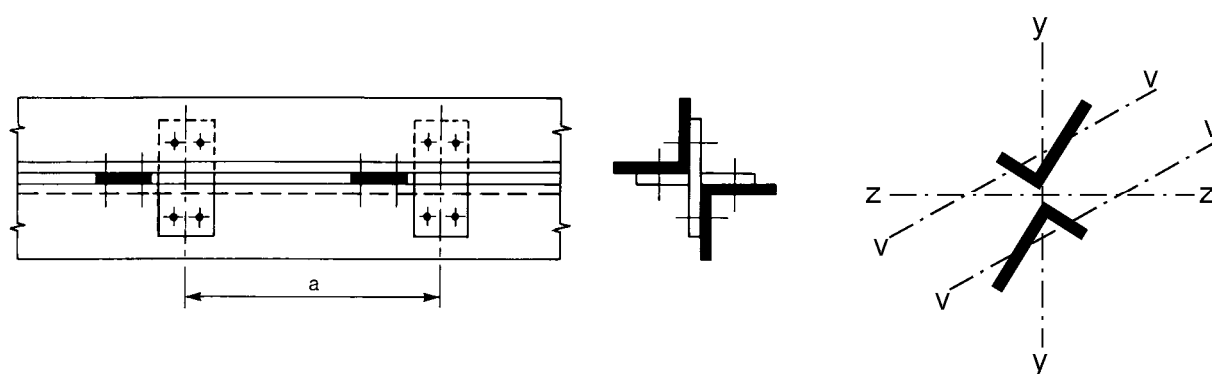


Figura 6.13 – Elementos angulares en cruz unidos con pares de presillas

7 ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

7.1 Generalidades

- (1) Una estructura de acero debería calcularse y construirse de manera que todos los criterios de servicio pertinentes se satisfagan.
- (2) Los requisitos básicos para los estados límite de servicio se dan en el apartado 3.4 de la Norma Europea EN 1990.
- (3) Cualquier estado límite de servicio y la carga asociada y el modelo de análisis debería especificarse mediante un proyecto.
- (4) Cuando se utilice el análisis global plástico para la comprobación de los estados límite últimos, pudiera ocurrir que se produjera una redistribución de esfuerzos en estado límite de servicio. Si fuera así, deberían considerarse tales efectos.

7.2 Estados límite de servicio para edificios

7.2.1 Flechas verticales

- (1)B Con referencia a la Norma Europea EN 1990, en su capítulo A1.4, los límites para las flechas verticales, a establecer de acuerdo con la figura A1.1, deberían especificarse para cada proyecto y acordarse con el cliente.

NOTA B El anexo nacional puede especificar dichos límites.

7.2.2 Flechas horizontales

- (1)B Con referencia a la Norma Europea EN 1990, en su capítulo A1.4, los límites para las flechas horizontales, a establecer de acuerdo con la figura A1.2, deberían especificarse para cada proyecto y acordarse con el cliente.

NOTA B El anexo nacional puede especificar dichos límites.

7.2.3 Efectos dinámicos

- (1)B Con referencia a la Norma Europea EN 1990, en su apartado A1.4.4, las vibraciones de aquellas estructuras sobre las cuales puede pasear público deberían limitarse para evitar incomodidades significativas a los usuarios, y los límites deberían especificarse para cada proyecto y acordarse con el cliente.

NOTA B El anexo nacional puede especificar los límites para la vibración de los pisos de los edificios.

ANEXO A (Informativo)

MÉTODO 1: COEFICIENTES DE INTERACCIÓN k_{ij} DE LA FÓRMULA DE INTERACCIÓN DEL PUNTO (4) DEL APARTADO 6.3.3Tabla A.1 – Coeficientes de interacción k_{ij} (6.3.3(4))

Coeficientes de interacción	Hipótesis de cálculo	
	Características elásticas de las secciones Secciones Clases 3 y 4	Características plásticas de las secciones Secciones Clases 1 y 2
k_{yy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}$
k_{yz}	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}$
k_{zy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}$
k_{zz}	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}$
Parámetros auxiliares:		
$y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$ $\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$ $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1,5$ $w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1,5$ $n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}}$ C_{my} véase la tabla A.2 $a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$	$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{máx.} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{máx.}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ con $b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$ $C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{máx.}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ con $c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$ $C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{máx.}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ con $d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}}$ $C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{máx.} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{máx.}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ con $e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$	

$$\bar{\lambda}_{\text{máx.}} = \text{máx.} \begin{cases} \bar{\lambda}_y \\ \bar{\lambda}_z \end{cases}$$

$\bar{\lambda}_0$ = esbeltez adimensional de pandeo lateral en el caso de ley de momentos flectores constante, es decir, $\Psi_y = 1,0$ en la tabla A.2.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} \quad \text{para secciones Clases 1, 2 y 3}$$

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

$N_{cr,y}$ = esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por flexión con respecto al eje y - y .

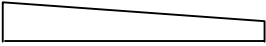
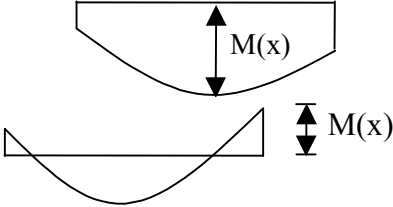
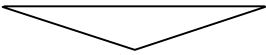
$N_{cr,z}$ = esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por flexión con respecto al eje z - z .

$N_{cr,T}$ = esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por torsión.

I_t = inercia de torsión St. Venant.

I_y = inercia de flexión con respecto al eje y - y .

Tabla A.2 – Factores de momento uniforme equivalente $C_{mi,0}$

Ley de momentos	$C_{mi,0}$
M_1  ψM_1 $-1 \leq \psi \leq 1$	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + \left(\frac{\pi^2 EI_i \delta_x }{L^2 M_{i,Ed}(x) } - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ $M_{i,Ed}(x)$ es el momento flector máximo $M_{y,Ed}$ o $M_{z,Ed}$ $ \delta_x $ es la flecha máxima del elemento
 	$C_{mi,0} = 1 - 0,18 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ $C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

ANEXO B (Informativo)

MÉTODO 2: COEFICIENTES DE INTERACCIÓN k_{ij} DE LA FÓRMULA DE INTERACCIÓN DEL PUNTO (4) DEL APARTADO 6.3.3Tabla B.1 – Coeficientes de interacción k_{ij} para elementos no susceptibles a deformaciones por torsión

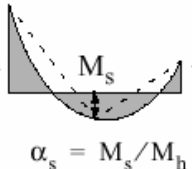
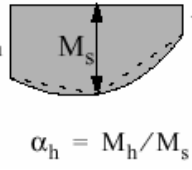
Coeficientes de interacción	Tipo de sección	Hipótesis de cálculo	
		Características elásticas de las secciones Secciones clases 3 y 4	Características plásticas de las secciones Secciones clases 1 y 2
k_{yy}	Secciones I Secciones huecas rectangulares	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	Secciones I Secciones huecas rectangulares	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	Secciones I Secciones huecas rectangulares	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	Secciones I	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	Secciones huecas rectangulares		$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$

Para secciones I y H y para secciones huecas rectangulares sometidas a axil y a flexión uniaxial $M_{y,Ed}$, se puede tomar $k_{zy} = 0$.

Tabla B.2 – Coeficientes de interacción k_{ij} para elementos susceptibles a deformación por torsión

Coeficientes de interacción	Hipótesis de cálculo	
	Características elásticas de las secciones Secciones clases 3 y 4	Características plásticas de las secciones Secciones clases 1 y 2
k_{yy}	k_{yy} de la tabla B.1	k_{yy} de la tabla B.1
k_{yz}	k_{yz} de la tabla B.1	k_{yz} de la tabla B.1
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$\left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ para $\bar{\lambda}_z < 0,4$: $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$
k_{zz}	k_{zz} de la tabla B.1	k_{zz} de la tabla B.1

Tabla B.3 – Factores de momento uniforme equivalente $C_{mi,o}$ en las tablas B.1 y B.2

Ley de momentos	rango		C_{my} y C_{mz} y C_{mLT}	
			carga uniforme	carga puntual
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s/M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h/M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 - 0,10\alpha_h(1+2\psi)$
Para elementos con modo de pandeo traslacional, se debería tomar el factor de momento equivalente como $C_{my} = 0,9$ o $C_{mz} = 0,9$, respectivamente				
C_{my} , C_{mz} y C_{mLT} se deberían calcular considerando la ley de momentos que existe entre los puntos que estén arriostrados, conforme a lo que sigue:				
Factor del momento	Eje de flexión	Puntos arriostrados en dirección		
C_{my}	y - y	z - z		
C_{mz}	z - z	y - y		
C_{mLT}	y - y	y - y		

ANEXO AB (Informativo)
CLÁUSULAS ADICIONALES DE CÁLCULO

AB.1 Análisis estructural considerando el comportamiento no lineal de los materiales

- (1)B En el caso en que se consideren en el cálculo las no linealidades de los materiales, los efectos de las acciones en la estructura se pueden determinar con un análisis incremental de las acciones de cálculo para las situaciones de proyecto consideradas.
- (2)B En este análisis incremental cada acción permanente o variable se debería incrementar de forma proporcional.

AB.2 Cláusulas simplificadas para el cálculo de vigas continuas de forjados

- (1)B En vigas continuas de edificios con losas y sin voladizos en las que sean predominantes las cargas uniformemente repartidas, es suficiente considerar exclusivamente los siguientes estados de carga:
- a) vanos alternos cargados con la carga permanente y con la sobrecarga de uso de cálculo ($\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k$), y el resto de los vanos cargados sólo con la carga permanente de cálculo $\gamma_G G_k$.
 - b) dos vanos cualesquiera adyacentes cargados con la carga permanente y con la sobrecarga de uso de cálculo ($\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k$), y el resto de los vanos cargados sólo con la carga permanente de cálculo $\gamma_G G_k$.

NOTA 1 a) es de aplicación para momentos positivos y b) lo es para momentos negativos.

NOTA 2 Este anexo se traspasará en un futuro a la Norma Europea EN 1990.

ANEXO BB (Informativo)

PANDEO DE COMPONENTES DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS

BB.1 Pandeo por flexión de elementos de estructuras trianguladas y de celosías

BB.1.1 Generalidades

- (1)B En los cordones, en general, y para el pandeo fuera del plano de la estructura de montantes y diagonales, se puede tomar como longitud de pandeo L_{cr} la longitud del elemento L , según el punto (1)B del apartado BB.1.3, a no ser que se pueda justificar con algún análisis un valor menor.
- (2)B La longitud de pandeo L_{cr} de un cordón con una sección I o H se puede tomar igual a $0,9L$ para el pandeo en el plano de la estructura, y $1,0L$ para el pandeo fuera del plano de la estructura, a no ser que se pueda justificar con algún análisis un valor menor.
- (3)B Para el cálculo a pandeo en el plano de la estructura de montantes y diagonales se puede considerar una longitud de pandeo menor que la longitud de cada elemento, siempre que los cordones supongan una cierta coacción a los extremos de las piezas y que las uniones extremas aporten una cierta fijación (al menos dos tornillos en el caso de uniones atornilladas).
- (4)B En estas circunstancias, la longitud de pandeo en el plano de la estructura de montantes y diagonales de estructuras trianguladas habituales se puede tomar igual a $0,9L$, excepto para angulares, véase el apartado BB.1.2.

BB.1.2 Montantes y diagonales formados por angulares

- (1)B Siempre que los cordones supongan una cierta coacción a los extremos de los montantes y diagonales formados por angulares y que las uniones extremas aporten una cierta fijación (al menos dos tornillos en el caso de uniones atornilladas) se podrán desprestigiar las excentricidades y se podrá considerar en el cálculo a compresión de los montantes y diagonales que los extremos son fijos. La esbeltez efectiva $\bar{\lambda}_{eff}$ se puede calcular como sigue:

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_{eff,v} &= 0,35 + 0,7 \bar{\lambda}_v && \text{para el pandeo con respecto al eje } v-v \\ \bar{\lambda}_{eff,y} &= 0,50 + 0,7 \bar{\lambda}_y && \text{para el pandeo con respecto al eje } y-y \\ \bar{\lambda}_{eff,z} &= 0,50 + 0,7 \bar{\lambda}_z && \text{para el pandeo con respecto al eje } z-z\end{aligned}\tag{BB.1}$$

donde $\bar{\lambda}$ se define en el apartado 6.3.1.2

- (2)B Si se utiliza un solo tornillo en las uniones extremas de montantes o diagonales constituidas por angulares, entonces se debería considerar la excentricidad conforme al apartado 6.2.9 y se debería tomar como longitud de pandeo L_{cr} la longitud del elemento L .

BB.1.3 Secciones huecas

- (1)B La longitud de pandeo L_{cr} de un cordón constituido por una sección hueca puede tomarse igual a $0,9L$ tanto para el pandeo en el plano de la estructura como para el pandeo fuera del plano de la estructura, donde L es la longitud que corresponda en cada plano de pandeo. Para el pandeo en el plano de la estructura, L es la distancia entre nudos. Para el pandeo fuera del plano de la estructura, L es la distancia entre puntos inmovilizados lateralmente, a no ser que se pueda justificar con algún análisis un valor menor.
- (2)B La longitud de pandeo L_{cr} de montantes y diagonales constituidos por secciones huecas con uniones atornilladas se puede considerar igual a $1,0L$ tanto para el pandeo en el plano de la estructura como para el pandeo fuera del plano de la estructura.

- (3)B Para vigas de celosía con cordones paralelos y montantes y diagonales en las que la relación entre los diámetros de los montantes o diagonales con respecto a los de los cordones o relación de anchura β es menor que 0,6, se puede considerar la longitud de pandeo L_{cr} del montante o diagonal constituido por una sección hueca sin recortes o aplanados en sus extremos, soldado en todo su perímetro a los cordones formados por secciones huecas, igual a $0,75L$, tanto para el pandeo en el plano de la estructura como para el pandeo fuera del plano de la estructura, a no ser que se pueda justificar con algún cálculo o mediante ensayos un valor menor.

NOTA El anexo nacional puede aportar más información relativa a las longitudes de pandeo.

BB.2 Arriostramiento continuo

BB.2.1 Arriostramiento lateral continuo

- (1)B Si la viga se encuentra unida a una chapa grecada de acuerdo a la Norma Europea EN 1993-1-3 y se cumple la condición expuesta en la ecuación (BB.2), entonces se puede considerar que la viga se encuentra arriostrada lateralmente en el plano de la chapa grecada.

$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2} \quad (\text{BB.2})$$

donde

S es la rigidez a cortante (por unidad de longitud de viga) proporcionada por la chapa grecada a la viga, con respecto a su deformación en el plano de la chapa grecada que se une a la viga en cada nervio;

I_w es la inercia de alabeo;

I_t es la inercia de torsión;

I_z es la inercia de flexión de la sección con respecto a su eje principal menor;

L es la longitud de la viga;

h es el canto de la viga.

Si la chapa grecada se une a la viga en nervios alternos, entonces S se debería sustituir por $0,20S$

NOTA La ecuación (BB.2) también se puede emplear para determinar la estabilidad lateral de alas de vigas sujetas a otro tipo de cerramiento que no sea el constituido por chapas grecadas, siempre que las uniones tengan un diseño correcto.

BB.2.2 Arriostramiento continuo a torsión

- (1)B Se puede considerar que una viga está suficientemente coaccionada a deformaciones por torsión si

$$C_{\vartheta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{EI_z} K_{\vartheta} K_v \quad (\text{BB.3})$$

donde

$C_{\vartheta,k}$ = rigidez al giro (por unidad de longitud de viga) proporcionada a la viga por el arriostramiento continuo (por ejemplo, la estructura de una cubierta) y por las uniones;

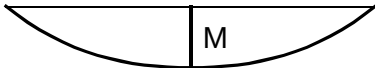
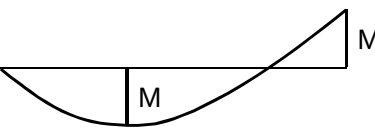
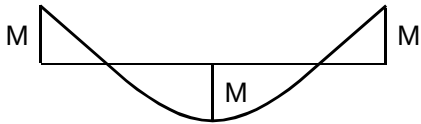
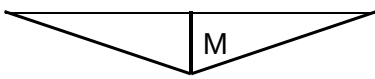
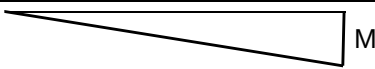
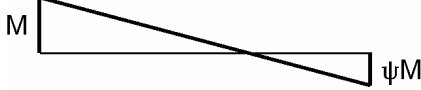
K_v = 0,35 para cálculo elástico;

K_v = 1,00 para cálculo plástico;

K_{ϑ} = factor que tiene en cuenta la distribución de momentos, véase la tabla BB.1 y el tipo de coacción;

$M_{pl,k}$ = valor característico del momento plástico de la viga.

Tabla BB.1 – Factor K_{ϑ} que tiene en cuenta la ley de momentos y el tipo de coacción

Caso	Ley de momentos	sin arriostramiento traslacional	con arriostramiento traslacional
1		4,0	0
2a		3,5	0,12
2b			0,23
3		2,8	0
4		1,6	1,0
5	 $\psi \leq -0,3$	1,0	0,7

(2)B La rigidez al giro que supone un arriostramiento continuo se puede calcular como

$$\frac{1}{C_{\vartheta,k}} = \frac{1}{C_{\vartheta R,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta C,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta D,k}} \quad (\text{BB.4})$$

donde

$C_{\vartheta R,k}$ = rigidez al giro (por unidad de longitud de viga) proporcionada a la viga por el arriostramiento continuo suponiendo una unión rígida al elemento;

$C_{\vartheta C,k}$ = rigidez al giro (por unidad de longitud de viga) de la unión entre la viga y el arriostramiento continuo;

$C_{\vartheta D,k}$ = rigidez al giro (por unidad de longitud de viga) obtenida de un análisis de las distorsiones de la sección transversal de la viga, cuando el ala comprimida no está coaccionada; si el ala comprimida es la que está conectada al arriostramiento continuo o si se pueden despreciar las distorsiones de la sección transversal (por ejemplo, en los perfiles laminados habituales) $C_{\vartheta D,k} = \infty$.

NOTA Para más información véase la Norma Europea EN 1993-1-3.

BB.3 Longitudes estables de segmentos de elementos que contienen rótulas plásticas por pandeo fuera del plano**BB.3.1 Elementos uniformes constituidos por perfiles laminados o por vigas armadas en I equivalentes****BB.3.1.1 Longitud estable entre arriostramientos laterales adyacentes**

(1)B Se pueden despreciar los efectos del pandeo lateral cuando la longitud L del segmento de elemento situado entre la sección coaccionada en la que aparece una rótula plástica y la siguiente sección que se encuentre coaccionada lateralmente no sea mayor que L_m , donde:

$$L_m = \frac{38i_z}{\sqrt{\frac{1}{57,4} \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756 C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{AI_t} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad (\text{BB.5})$$

donde

N_{Ed} es el esfuerzo axial de cálculo de compresión [N] en el elemento;

A es el área de la sección transversal [mm²] del elemento;

$W_{pl,y}$ es el módulo resistente plástico de la sección transversal del elemento;

I_t es la inercia de torsión uniforme de la sección transversal del elemento;

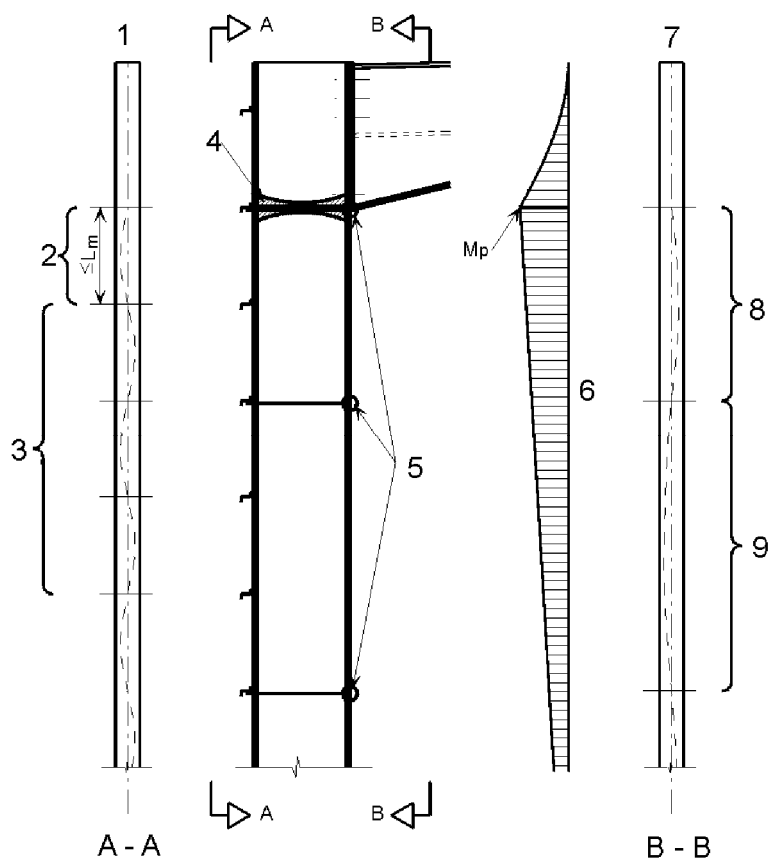
f_y es el límite elástico en [N/mm²];

C_1 es un factor que depende de la carga y de las condiciones de vinculación de los extremos, que puede obtenerse en la bibliografía técnica suponiendo que el elemento está coaccionado en la rótula, conforme a lo requerido en el apartado 6.3.5 y que el otro extremo del segmento está coaccionado:

- o por una coacción lateral del ala comprimida cuando una de las alas está comprimida en toda la longitud del segmento;
- o por una coacción a torsión;
- o por una coacción lateral en el extremo del segmento y por una coacción a torsión en el elemento a una distancia tal que se satisfagan los requisitos referentes a L_s ,

véanse las figuras BB.1, BB.2 y BB.3.

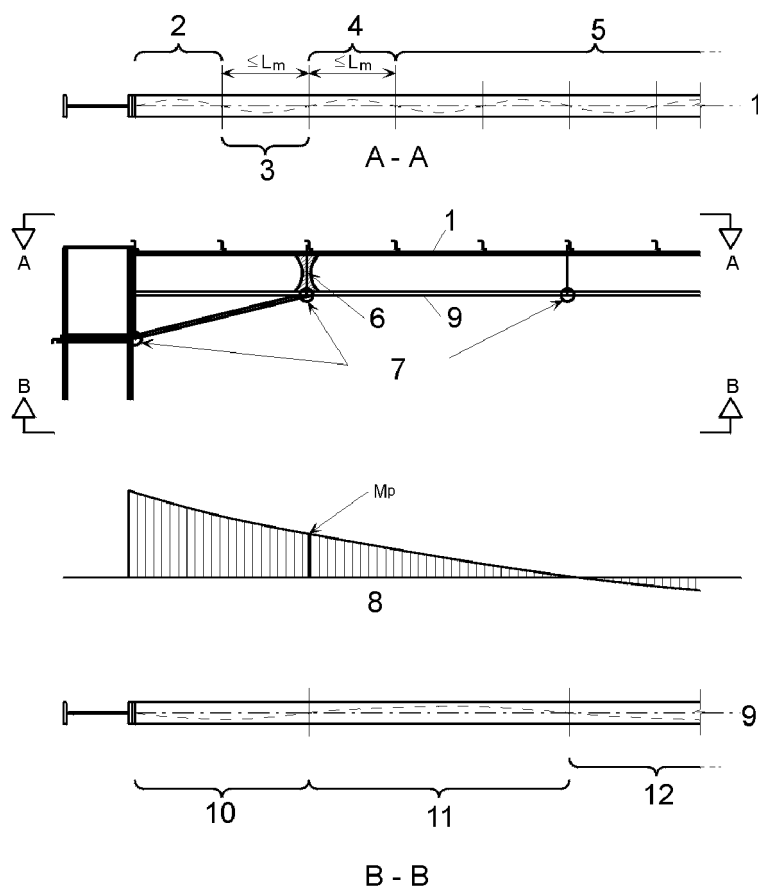
NOTA En general L_s es mayor que L_m .



Leyenda

- 1 Ala traccionada
- 2 Longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.1.1)
- 3 Secciones elásticas (véase el apartado 6.3)
- 4 Rótula plástica
- 5 Coacciones
- 6 Ley de momentos flectores
- 7 Ala comprimida
- 8 Zona plástica con coacción en el ala traccionada, longitud estable = L_s [véase el apartado BB.3.1.2, ecuación (BB.7) o (BB.8)]
- 9 Zona elástica con coacción en el ala traccionada (véase el apartado 6.3), χ y χ_{LT} deducidos de N_G y M_G incluyen la coacción del ala traccionada

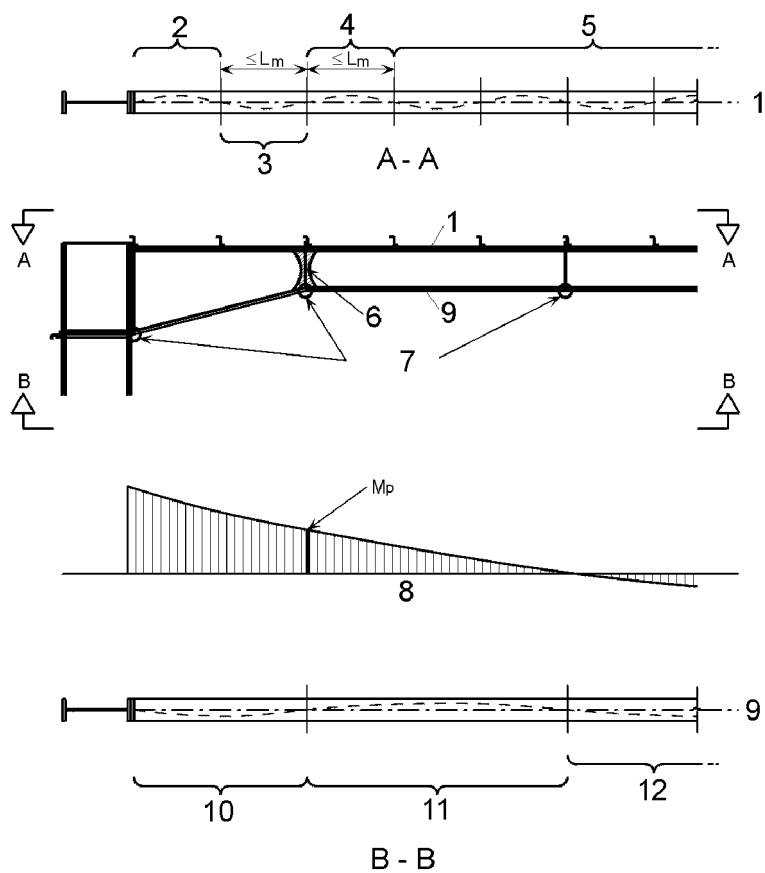
Figura BB.1 – Comprobaciones en un elemento sin variación de canto



Leyenda

- 1 ala traccionada
- 2 secciones elásticas (véase el apartado 6.3)
- 3 longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.2.1) o elástica (véase el punto (2)B del apartado 6.3.5.3)
- 4 longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.1.1)
- 5 secciones elásticas (véase el apartado 6.3)
- 6 rótula plástica
- 7 coacciones
- 8 ley de momentos flectores
- 9 ala comprimida
- 10 longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.2) o elástica (véase el punto (2)B del apartado 6.3.5.3)
- 11 longitud estable plástica (véase el apartado BB.3.1.2)
- 12 zona elástica (véase el apartado 6.3), χ y χ_{LT} deducidos de N_{cr} y M_{cr} incluyen la coacción del ala traccionada

Figura BB.2 – Comprobaciones en un elemento con tres alas en la zona acartelada



Leyenda

- 1 ala traccionada
- 2 secciones elásticas (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 secciones elásticas (véase el apartado 6.3)
- 6 rótula plástica
- 7 coacciones
- 8 ley 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 zona elástica (véase el apartado 6.3), χ y χ_{LT} deducidos de N_{cr} y M_{cr} incluyen la coacción del ala traccionada

Figura BB.3 – Comprobaciones en un elemento con dos alas en la zona acartelada

BB.3.1.2 Longitud estable entre coacciones a torsión

(1)B Se pueden despreciar los efectos del pandeo lateral en un elemento sometido a un momento constante cuando la longitud L del segmento del elemento comprendido entre la sección coaccionada en la que aparece una rótula plástica y la siguiente sección que se encuentre coaccionada a torsión, no sea mayor que L_k , siempre que

- el elemento esté coaccionado en la rótula conforme a lo requerido en el apartado 6.3.5 y
- haya una o más coacciones laterales intermedias entre las coacciones a torsión con una separación entre ellas que satisfaga los requisitos de L_m según el apartado BB.3.1.1,

$$L_k = \frac{\left(5,4 + \frac{600f_y}{E}\right) \left(\frac{h}{t_f}\right) i_z}{\sqrt{5,4 \left(\frac{f_y}{E}\right) \left(\frac{h}{t_f}\right)^2 - 1}} \quad (\text{BB.6})$$

(2)B Se pueden despreciar los efectos del pandeo lateral en un elemento sometido a una ley lineal de momentos y a un esfuerzo axil de compresión, cuando la longitud L del segmento del elemento comprendido entre la sección coaccionada en la que aparece una rótula plástica y la siguiente sección que se encuentre coaccionada a torsión, no sea mayor que L_s , siempre que

- el elemento esté coaccionado en la rótula conforme a lo requerido en el apartado 6.3.5 y
- haya una o más coacciones laterales intermedias entre las coacciones a torsión con una separación entre ellas que satisfaga los requisitos de L_m según el apartado BB.3.1.1

$$L_s = \sqrt{C_m} L_k \left(\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{N,y,Rk} + aN_{Ed}} \right) \quad (\text{BB.7})$$

donde

C_m es el factor de corrección para una ley lineal de momentos, véase el apartado BB.3.3.1;

a es la distancia entre el centro de gravedad del elemento donde se forma la rótula plástica y el centro de gravedad de los elementos arriostrados;

$M_{pl,y,Rk}$ es la resistencia característica plástica a flexión de la sección con respecto al eje y - y ;

$M_{N,y,Rk}$ es la resistencia característica plástica a flexión de la sección con respecto al eje y - y , reducida por el esfuerzo axil N_{Ed} .

(3)B Se pueden despreciar los efectos del pandeo lateral en un elemento sometido a una ley no lineal de momentos y a un axil de compresión, cuando la longitud L del segmento del elemento comprendido entre la sección coaccionada en la que aparece una rótula plástica y la siguiente sección que se encuentre coaccionada a torsión, no sea mayor que L_s , siempre que:

- el elemento esté coaccionado en la rótula conforme a lo requerido en el apartado 6.3.5 y
- haya una o más coacciones laterales intermedias entre las coacciones a torsión con una separación entre ellas que satisfaga los requisitos de L_m según el apartado BB.3.1.1

$$L_s = \sqrt{C_n} L_k \quad (\text{BB.8})$$

donde

C_n es el factor de corrección para una ley no lineal de momentos, véase el apartado BB.3.3.2 y las figuras BB.1, BB.2 y BB.3.

BB.3.2 Elementos acartelados o de sección variable constituidos por perfiles laminados o por vigas armadas I equivalentes

BB.3.2.1 Longitud estable entre arriostramientos laterales adyacentes

(1)B Se pueden despreciar los efectos del pandeo lateral cuando la longitud L del segmento de elemento comprendido entre la sección coaccionada en la que aparece una rótula plástica y la siguiente coacción lateral no sea mayor que L_m , donde:

– para elementos con tres alas en la zona acartelada (véase la figura BB.2)

$$L_m = \frac{38i_z}{\sqrt{\frac{1}{57,4} \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756 C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{AI_t} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad (\text{BB.9})$$

– para elementos con dos alas en la zona acartelada (véase la figura BB.3)

$$L_m = 0,85 \frac{38i_z}{\sqrt{\frac{1}{57,4} \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756 C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{AI_t} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad (\text{BB.10})$$

donde

N_{Ed} es el esfuerzo axial de cálculo [N] que actúa en el elemento;

$\frac{W_{pl,y}^2}{AI_t}$ es el máximo valor que se produce en el segmento;

A es el área de la sección transversal [mm²] en aquella sección en la cual $\frac{W_{pl,y}^2}{AI_t}$ es un máximo en el elemento de sección variable;

$W_{pl,y}$ es el módulo resistente plástico de la sección del elemento;

I_t es la inercia de torsión de la sección del elemento;

f_y es el límite elástico en [N/mm²];

i_z es el radio de giro mínimo de la sección.

siempre que el elemento esté coaccionado en la rótula conforme a lo requerido en el apartado 6.3.5 y que el otro extremo del segmento está coaccionado:

- o por una coacción lateral del ala comprimida cuando una de las alas está comprimida en toda la longitud del segmento;
- o por una coacción a torsión;
- o por una coacción lateral en el extremo del segmento y por una coacción a torsión en el elemento a una distancia tal que se satisfagan los requisitos referentes a L_s .

BB.3.2.2 Longitud estable entre coacciones a torsión adyacentes

(1)B Se pueden despreciar los efectos del pandeo lateral en elementos de canto variable con alas de sección constante sometidos a leyes lineales o no lineales de momentos flectores y a un esfuerzo axial de compresión, cuando la longitud L del segmento de elemento comprendido entre la sección coaccionada en la que aparece una rótula plástica y la siguiente sección que se encuentre coaccionada a torsión no sea mayor que L_s , siempre que:

- el elemento esté coaccionado en la rótula conforme a lo requerido en el apartado 6.3.5 y
- haya una o más coacciones laterales intermedias entre las coacciones a torsión, con una separación entre ellas que satisfaga los requisitos de L_m según el apartado BB.3.2.1,

donde

- para elementos con tres alas en la zona acartelada (véase la figura 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 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 el elemento de sección constante igual a la sección de menor canto, véase el apartado BB.3.1.2;

C_n véase el apartado BB.3.3.2;

c es el factor de variación de canto definido en el apartado BB.3.3.3.

BB.3.3 Factores de corrección para variaciones de momentos en elementos coaccionados lateralmente a lo largo del ala traccionada

BB3.3.1 Variación lineal de momentos

(1)B El factor de corrección C_m se puede determinar como

$$C_m = \frac{1}{B_0 + B_1 \beta_t + B_2 \beta_t^2} \quad (\text{BB.13})$$

donde

$$B_0 = \frac{1+10\eta}{1+20\eta}$$

$$B_1 = \frac{5\sqrt{\eta}}{\pi + 10\sqrt{\eta}};$$

$$B_2 = \frac{0,5}{1 + \pi\sqrt{\eta}} - \frac{0,5}{1 + 20\eta};$$

$$\eta = \frac{N_{crE}}{N_{crT}};$$

$$N_{crE} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_t^2};$$

L_t es la distancia entre coacciones a torsión;

$N_{crT} = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EI_z a^2}{L_t^2} + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} + GI_t \right)$ es el esfuerzo axial crítico elástico para pandeo por torsión de una sección en I, con una separación entre coacciones a torsión de 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 que arriostran, tales como correas arriostrando dinteles;

β_t es la relación entre el menor momento, en valor absoluto, en uno de los extremos del miembro y el momento mayor en el extremo opuesto. Los momentos que produzcan compresiones en el ala que no esté coaccionada se deberían tomar como positivos. Si la relación resulta menor que $-1,0$ se debería tomar β_t igual a $-1,0$, véase la figura BB.4.

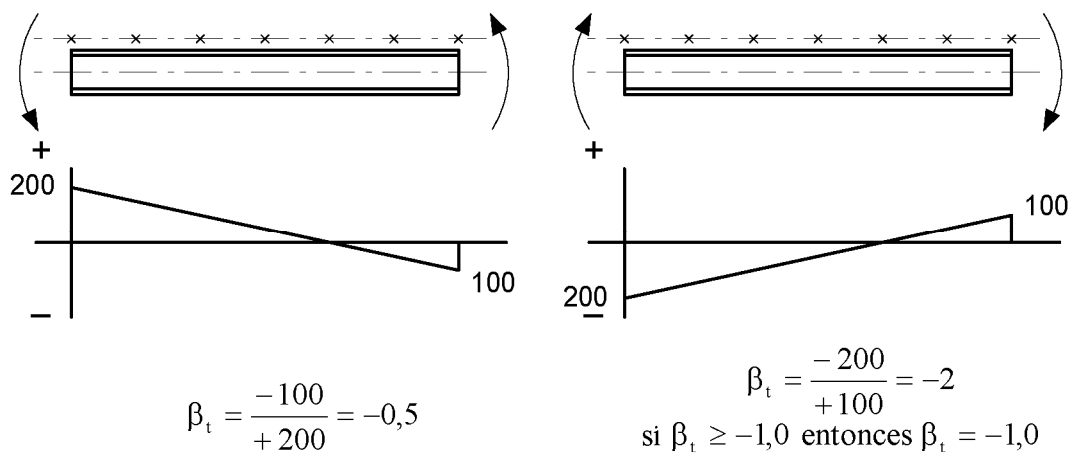


Figura BB.4 – Valor de β_t

BB.3.3.2 Variación no lineal de momentos

(1)B El factor de modificación C_n se puede determinar como:

$$C_n = \frac{12}{[R_1 + 3R_2 + 4R_3 + 3R_4 + R_5 + 2(R_S - R_E)]} \quad (\text{BB.14})$$

en donde R_1 a R_5 son los valores de R que se deducen del punto (2)B en los extremos, a cuartos de la luz y en centro de la luz, véase la figura BB.5; sólo se deberían considerar los valores positivos de R .

Además, sólo se deberían considerar los valores positivos de $(R_S - R_E)$, donde

- R_E es el mayor de R_1 y de R_5
- R_S es el máximo valor de R que se produce a lo largo de toda la longitud L_y

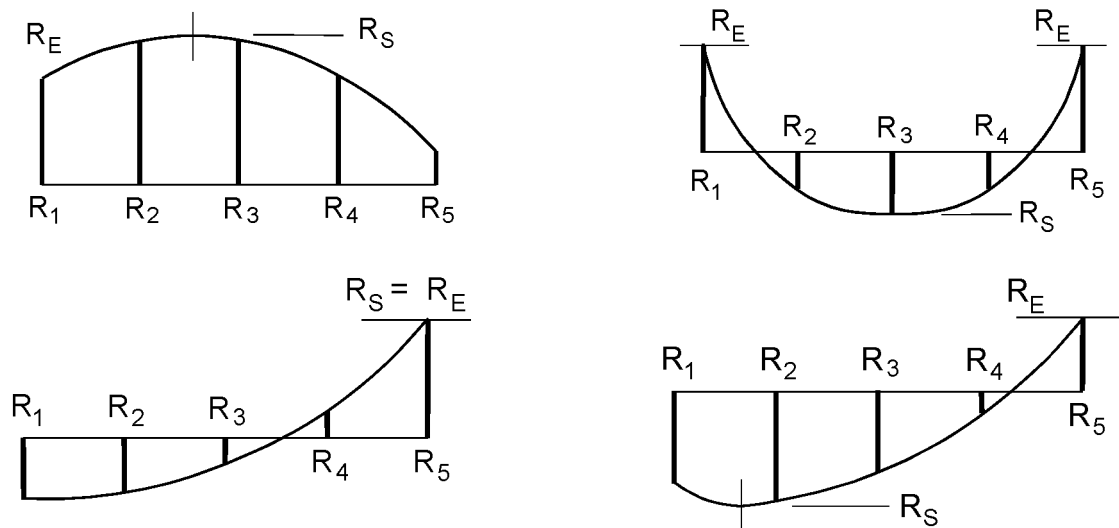


Figura BB.5 – Relación de momentos

(2)B El valor de R se debería obtener como:

$$R = \frac{M_{y,Ed} + a N_{Ed}}{f_y W_{pl,y}} \quad (\text{BB.15})$$

donde

a es la distancia entre el centro de gravedad del elemento y el centro de gravedad de los elementos que arriostran, tales como correas arriostrando dinteles.

BB.3.3.3 Factor de variación del canto

(1)B En elementos de canto variable con alas de sección constante, en los cuales se cumpla que $h \geq 1,2b$ y que $h/t_f \geq 20$, el factor de variación del canto, c , se debería obtener como sigue:

- para elementos o segmentos de canto variable, véase la figura BB.6(a):

$$c = 1 + \frac{3}{\left(\frac{h}{t_f} - 9\right)} \left(\frac{h_{\max.}}{h_{\min.}} - 1 \right)^{2/3} \quad (\text{BB.16})$$

- para elementos o segmentos acartelados, véanse las figuras BB.6(b) y BB.6(c):

$$c = 1 + \frac{3}{\left(\frac{h}{t_f} - 9\right)} \left(\frac{h_h}{h_s} \right)^{2/3} \sqrt{\frac{L_h}{L_y}} \quad (\text{BB.17})$$

donde

h_h es el canto adicional de la cartela o del tramo de canto variable, véase la figura BB.6;

$h_{\max.}$ es el máximo canto de la sección en la longitud L_y , véase la figura BB.6;

$h_{\min.}$ es el mínimo canto de la sección en la longitud L_y , véase la figura BB.6;

h_s es el canto vertical de la sección no acartelada, véase la figura BB.6;

L_h es la longitud de la cartela incluida en la longitud L_y , véase la figura BB.6;

L_y es la distancia entre puntos del ala comprimida coaccionados lateralmente.

(h/t_f) se obtiene considerando la sección de menor canto.

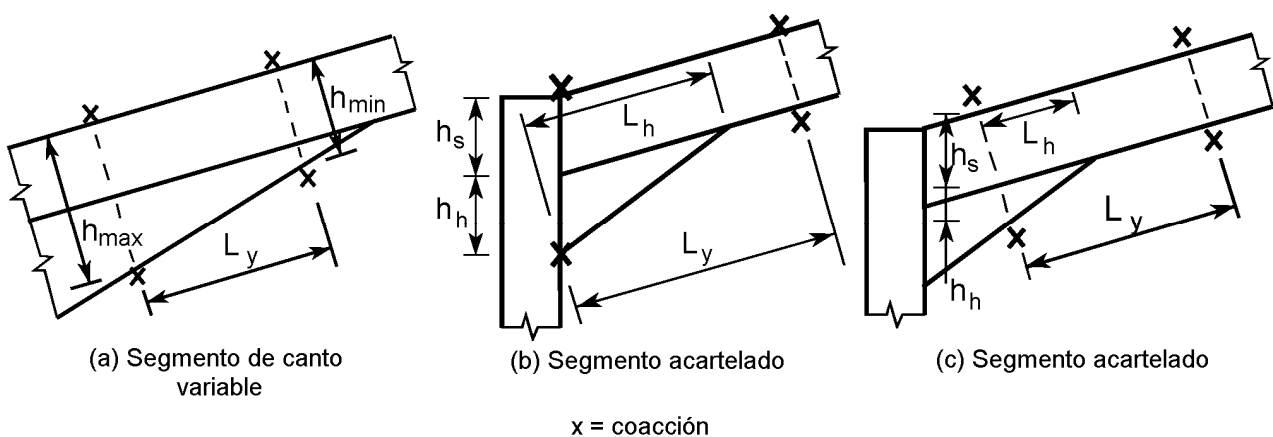


Figura BB.6 – Dimensiones para definir el factor de variación del canto

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD POLITECNICA MADRID