

EUROCÓDIGOS

NORMA EUROPEA
EXPERIMENTAL

UNE-ENV 1999-1-1
Febrero 2000



EUROCÓDIGO 9

PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO

PARTE 1-1: REGLAS GENERALES
REGLAS GENERALES Y
REGLAS PARA EDIFICACIÓN

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

9

Parte 1-1

PREÁMBULO

Esta publicación recoge en sus páginas la Norma UNE-ENV 1999-1-1:1998 "Proyecto de estructuras de aluminio. Parte 1-1: Reglas generales. Reglas generales y reglas para edificación.

La mencionada norma experimental, es la versión española de la correspondiente norma europea experimental y contiene un conjunto de especificaciones técnicas no obligatorias relativas al establecimiento de las bases generales para el proyecto de edificios y obras de ingeniería civil, así como de elementos estructurales, realizados con aleaciones de aluminio.

La aplicación correcta de esta norma experimental precisa de la utilización conjunta de la misma y de otras normas experimentales que se citan a lo largo de su texto.

En España, es conocido el hecho de que existen especificaciones técnicas a utilizar para el proyecto y ejecución de edificios, que constituyen materia regulada de obligado cumplimiento "reglamentaciones técnicas", como, a título de ejemplo, las Normas Básicas: NBE CT-79 "Condiciones térmicas en los edificios"; NBE CA-88 relativa a las condiciones acústicas; NBE AE-88 relativa a acciones en la edificación; NBE CPI-96 relativa a protección contra incendios, aprobadas todas ellas por diferentes Reales Decretos, y, asimismo, en materia de carreteras cabe citar el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, aprobado por Orden del entonces Ministro de Obras Públicas.

En todo caso, esta publicación servirá para familiarizar a los técnicos españoles con los requisitos relativos a la calidad, durabilidad y estabilidad de las estructuras y elementos estructurales realizados con aleaciones de aluminio.

La traducción de esta norma experimental, desde su versión original en inglés a su texto en español, ha sido realizada por el Subcomité 9 del Comité Técnico de Normalización 140 Eurocódigos Estructurales de AENOR.

Andrés Doñate Megías
Subdirector General de Normativa
y Estudios Técnicos y Análisis Económico

Secretaría General Técnica

MINISTERIO DE FOMENTO

norma española experimental

UNE-ENV 1999-1-1

Febrero 2000

TÍTULO

EUROCÓDIGO 9: Proyecto de estructuras de aluminio

Parte 1-1: Reglas generales

Reglas generales y reglas para edificación

Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1-1: General rules. General rules and rules for buildings.

Eurocode 9: Conception et dimensionnement des structures en aluminium. Partie 1-1: Règles générales. Règles générales et règles pour les bâtiments.

CORRESPONDENCIA

Esta norma experimental es la versión oficial, en español, de la Norma Europea Experimental ENV 1999-1-1 de mayo 1998.

OBSERVACIONES

En esta norma UNE se han incorporado las modificaciones a la Norma ENV 1999-1-1 recibidas mediante escrito de CEN de fecha 18 de junio 1998.

ANTECEDENTES

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

ICS 91.010.30; 91.080.10

Descriptores: Ingeniería civil, construcción metálica, aluminio, diseño, códigos de edificación, cálculo, generalidades.

Versión en español

EUROCÓDIGO 9: Proyecto de estructuras de aluminio
Parte 1-1: Reglas generales
Reglas generales y reglas para edificación

Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 1-1: General rules.
General rules and rules for buildings.

Eurocode 9: Conception et dimensionnement des structures en aluminium. Partie 1-1: Règles générales.
Règles générales et règles pour les bâtiments.

Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten.
Teil 1-1: Allgemeine Regeln. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.

Esta norma europea experimental (ENV) ha sido aprobada por CEN el 1997-10-26 como una norma experimental para su aplicación provisional. El período de validez de esta norma ENV está limitado inicialmente a tres años. Pasados dos años, los miembros de CEN enviarán sus comentarios, en particular sobre la posible conversión de la norma ENV en norma europea (EN).

Los miembros de CEN deberán anunciar la existencia de esta norma ENV utilizando el mismo procedimiento que para una norma EN y hacer que esta norma ENV esté disponible rápidamente y en la forma apropiada a nivel nacional. Se permite mantener (en paralelo con la norma ENV) las normas nacionales que estén en contradicción con la norma ENV hasta que se adopte la decisión final sobre la posible conversión de la norma ENV en norma EN.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, 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
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

ÍNDICE

	Página
PREÁMBULO	10
1 GENERALIDADES	13
1.1 Campo de aplicación	13
1.2 Distinción entre Principios y Reglas de Aplicación.....	14
1.3 Normas de referencia	14
1.4 Hipótesis.....	18
1.5 Definiciones.....	18
1.6 Unidades S.I.....	20
1.7 Símbolos usados en esta norma europea experimental.....	21
2 BASES DE CÁLCULO	27
2.1 Requisitos fundamentales	27
2.2 Definiciones y clasificaciones	27
2.3 Requisitos de diseño	31
2.4 Durabilidad	33
2.5 Resistencia al fuego.....	33
3 MATERIALES	34
3.1 Generalidades.....	34
3.2 Aluminio estructural	34
3.3 Medios de unión.....	40
3.4 Durabilidad y protección frente a la corrosión	43
3.5 Criterios de selección de aleaciones de aluminio.....	47
4 ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO	49
4.1 Bases	49
4.2 Flechas.....	49
4.3 Vibraciones.....	51
4.4 Efectos dinámicos	51
5 ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (PIEZAS)	52
5.1 Bases	52
5.2 Cálculo de sollicitaciones internas (esfuerzos y momentos internos)	54
5.3 Resistencia de las secciones transversales.....	55
5.4 Clasificación de las secciones transversales.....	57
5.5 Reblandecimiento HAZ adyacente a la soldadura	65
5.6 Resistencia de vigas	68
5.7 Resistencia de elementos traccionados.....	76
5.8 Resistencia de elementos comprimidos	77
5.9 Resistencia de elementos bajo esfuerzo axial y flexión biaxial	87
5.10 Resistencia de placas sin rigidizar bajo cargas en el plano	94
5.11 Resistencia de placas rigidizadas sometidas a cargas en su plano.....	98
5.12 Resistencia de vigas de alma llena	106
6 UNIONES SOMETIDAS A CARGA ESTÁTICA	120
6.1 Bases para uniones atornilladas, roblonadas y soldadas	120
6.2 Intersecciones para uniones atornilladas, roblonadas y soldadas	121
6.3 Uniones cargadas a cortadura sometidas a vibración y/o cambio de sentido de las cargas.....	122

6.4	Clasificación de las uniones	122
6.5	Uniones con tornillos, roblones o bulones.....	127
6.6	Uniones soldadas.....	144
6.7	Uniones híbridas	153
6.8	Uniones mediante adhesivos.....	154
7	FABRICACIÓN Y MONTAJE	157
7.1	Generalidades.....	157
7.2	Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto	157
7.3	Preparación del material	158
7.4	Uniones atornilladas.....	160
7.5	Soldadura.....	161
7.6	Adhesivos estructurales	164
7.7	Protección	164
7.8	Inspección y seguridad	168
8	PROYECTO ASISTIDO POR ENSAYOS.....	169
8.1	Bases	169
8.2	Planificación de ensayos.....	169
8.3	Ejecución de ensayos	170
8.4	Interpretación de resultados	170
8.5	Documentación.....	170
	ANEXO A (Normativo) ENSAYO DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO	171
A.1	Propósito del ensayo.....	171
A.2	Variables significativas.....	171
A.3	Probetas de ensayo	171
A.4	Procedimiento de ensayo.....	172
A.5	Ensayo de creep ampliado	172
A.6	Resultados de ensayo.....	173
	ANEXO B (Informativo) SELECCIÓN DE MATERIALES.....	176
B.1	Generalidades.....	176
B.2	Productos forjados.....	176
B.3	Productos fundidos.....	180
	ANEXO C: (Informativo) CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS Y DE LOS MOMENTOS	
	INTERNOS.....	181
C.1	Análisis global	181
C.2	Hipótesis de cálculo	185
C.3	Sistema estructural.....	186
C.4	Consideración de las imperfecciones.....	187
C.5	Estabilidad lateral.....	191
	ANEXO D (Informativo) MÉTODOS DE ANÁLISIS GLOBAL.....	194
D.1	Generalidades.....	194
D.2	Verificación de la demanda de ductilidad	195
D.3	Aplicación del método de las rótulas plásticas	196
	ANEXO E (Informativo) MODELOS ANALÍTICOS PARA RELACIONES ENTRE	
	TENSIONES Y DEFORMACIONES UNITARIAS.....	201
E.1	Campo de aplicación	201
E.2	Modelos analíticos.....	201

ANEXO F (Informativo) ESTABILIDAD DE PÓRTICOS.....	208
F.1 Generalidades.....	208
F.2 Análisis elástico de pórticos traslacionales	208
F.3 Análisis plástico de pórticos traslacionales.....	209
F.4 Requisitos en las columnas para análisis plástico (con o sin endurecimiento).....	209
 ANEXO G (Informativo) COMPORTAMIENTO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES MÁS ALLÁ DEL LÍMITE ELÁSTICO	 211
G.1 Generalidades.....	211
G.2 Definición de los estados límites de la sección transversal.....	211
G.3 Clasificación de la secciones transversales en función de los estados límites	212
G.4 Evaluación del esfuerzo axial último.....	212
G.5 Evaluación del momento flector último	213
G.6 Predicción de la capacidad de rotación.....	214
 ANEXO H (Informativo) PANDEO LATERAL CON TORSIÓN	 217
H.1 Momento crítico elástico y esbeltez	217
H.2 Esbeltez	221
 ANEXO J (Informativo) PROPIEDADES A LA TORSIÓN DE PERFILES DE PARED DELGADA	 225
J.1 Inercia a la torsión	225
J.2 Posición del centro de cortante	225
J.3 Constante de alabeo.....	225

PREÁMBULO

Objetivos de los Eurocódigos

Los Eurocódigos Estructurales comprenden un grupo de normas para el diseño de edificaciones y obras de ingeniería civil desde el punto de vista estructural y geotécnico.

Se pretende que sirvan como documentos de referencia para los siguientes propósitos:

- Como medio de que los trabajos de edificación e ingeniería civil cumplan con los requisitos esenciales de la Directiva de Productos de Construcción (CPD).
- Como marco para desarrollar especificaciones técnicas armonizadas para los productos de construcción.

Cubren la ejecución y el control, solamente hasta el punto que es necesario para indicar la calidad de los productos de construcción y el nivel de ejecución necesario para cumplir con las prescripciones de las reglas de proyecto.

Hasta que el conjunto necesario de especificaciones técnicas armonizadas para los productos y para los métodos de ensayo de los mismos esté disponible, algunos de los Eurocódigos Estructurales cubren estos aspectos en anexos informativos.

Antecedentes al programa de Eurocódigos

La Comisión de las Comunidades Europeas (CCE) inició el trabajo de establecer un conjunto de reglas técnicas armonizadas para el proyecto de edificaciones y trabajos de ingeniería civil que sirviese, inicialmente, como una alternativa a las diferentes reglas vigentes en los distintos estados miembros y que, finalmente, las sustituyese. Estas reglas técnicas se hicieron conocidas como los "Eurocódigos Estructurales".

En 1990, después de consultar a sus respectivos Estados Miembros, la CEC transfirió el trabajo del futuro desarrollo, puesta al día y distribución de los Eurocódigos al CEN, al mismo tiempo que la Secretaría de la EFTA estuvo de acuerdo en apoyar el trabajo del CEN.

El Comité Técnico CEN/TC 250 de CEN es el responsable de todos los Eurocódigos Estructurales.

Programa de Eurocódigos

El trabajo se está desarrollando en los siguientes Eurocódigos Estructurales, estando formado cada uno por un determinado número de partes:

EN 1991	Eurocódigo 1	Bases de proyecto y acciones sobre las 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 de hormigón y acero
EN 1995	Eurocódigo 5	Proyecto de estructuras de madera
EN 1996	Eurocódigo 6	Proyecto de estructuras de mampostería
EN 1997	Eurocódigo 7	Proyecto geotécnico
EN 1998	Eurocódigo 8	Reglas de proyecto para la resistencia al sismo de las estructuras
EN 1999	Eurocódigo 9	Proyecto de estructuras de aluminio

Se han formado subcomités independientes por CEN/TC 250 para el trabajo en los distintos Eurocódigos mencionados.

Esta parte de los Eurocódigos Estructurales para el Proyecto de Estructuras de Aluminio es considerada por el CEN como una norma europea experimental (ENV) con una vida inicial de tres años.

Esta norma europea experimental se pretende que se aplique de manera experimental en el proyecto de edificaciones y trabajos de ingeniería civil incluidos en el campo de aplicación indicado en el apartado 1.1.2 y que se remitan los oportunos comentarios.

Después de dos años, aproximadamente, los miembros del CEN, serán invitados a remitir comentarios y opiniones más formales a fin de que se tengan en cuenta para determinar acciones futuras.

Mientras tanto, las observaciones y comentarios a esta Norma Experimental se deben enviar a la Secretaría del Subcomité CEN/TC 250/SC 9 a la siguiente dirección:

Secretariat of CEN/TC 250/SC 9
c/o Norwegian Council for Building Standardization
Postboks 129 Blindern
N – 0314 OSLO

o al Organismo Nacional de Normalización correspondiente.

NOTA NACIONAL – El Organismo Nacional de Normalización en España:

AENOR
Génova, 6
28004 MADRID
Teléfono: 91-4326000
Fax: 91-3104976

Documentos nacionales de aplicación

En vista de las responsabilidades de las autoridades de los Estados Miembros sobre la seguridad, salud y otras materias cubiertas por los requisitos esenciales de la DPC (Directiva Europea de Productos de Construcción), a algunos elementos que afectan a la seguridad en esta Norma Experimental se les ha asignado valores indicativos que están identificados por un recuadro □. Las autoridades de cada estado miembro serán las responsables de asignar los definitivos valores a estos elementos que afectan a la seguridad.

Muchas de las normas de apoyo armonizadas no van a estar disponibles en el momento de la publicación de esta Norma Experimental. Está previsto que cada estado miembro o su Organismo de Normalización, publique un Documento Nacional de Aplicación (DNA) que dé valores definitivos para los elementos que afecten a la seguridad y que referencie normas de apoyo compatibles y dé una guía nacional para la aplicación de esta Norma Experimental.

Se pretende que esta Norma Experimental sea usada con el DNA (Documento Nacional de Aplicación) vigente en el país donde las edificaciones o los trabajos de ingeniería civil estén localizados.

Materias específicas de esta norma experimental

Generalidades

El campo de aplicación del Eurocódigo 9 está definido en el apartado 1.1.1 y el campo de aplicación de esta Parte del Eurocódigo 9 está definido en el apartado 1.1.2.

Cuando se use esta norma europea experimental en la práctica, se debe prestar especial consideración a los supuestos y condiciones indicados en el apartado 1.4.

Durante el desarrollo de esta norma europea experimental, se han producido documentos de trabajo, que proporcionan comentarios y justificaciones de algunas de las especificaciones de la misma.

Uso de los anexos

Los ocho capítulos de esta norma europea experimental se complementan con unos anexos, unos de carácter normativo y otros informativo.

Los anexos normativos tienen el mismo rango que los capítulos correspondientes. La mayor parte se han formado trasladando algunas de las Reglas de Aplicación más detalladas, las cuales se utilizan sólo en casos particulares, de la parte principal del texto para darle mayor claridad.

Concepto de Normas de Referencia

Para la utilización de esta norma europea experimental se necesita hacer referencia a varias normas CEN o ISO. Estas se utilizan para definir las características de los productos y procesos que se han supuesto al formular las reglas de cálculo.

Esta norma europea experimental menciona ciertas "Normas de Referencia". Cuando alguna norma de referencia CEN o ISO no está aún disponible, debe consultarse el Documento Nacional de Aplicación para saber que norma debe utilizarse en su sustitución. Se supone que sólo se pueden usar los grados y calidades consignados en el capítulo 3 para edificios u obras de ingeniería civil diseñados con esta norma europea experimental.

Coefficientes parciales de seguridad

Esta norma europea experimental da reglas generales, para el proyecto de estructuras de aluminio, que controlan los estados límites de los elementos, tales como rotura en tracción, ruina debida a fenómenos de inestabilidad o rotura de uniones.

La mayor parte de las reglas se han calibrado a partir de resultados de ensayos para obtener valores realistas de los coeficientes parciales de seguridad para las resistencias γ_M .

A fin de no tener una variedad excesiva de valores del coeficiente γ_M , se han establecido sólo dos categorías:

- γ_{M1} aplicable a las resistencias basadas en el límite elástico práctico con deformación del 0,2% $f_{0,2}$ (por ejemplo para todos los fenómenos de inestabilidad).
- γ_{M2} aplicable a las resistencias basadas en la resistencia última a tracción f_u (por ejemplo resistencia de la sección neta en tracción o para la resistencia de tornillos y soldaduras).

Fabricación y montaje

El capítulo 7 de esta norma europea experimental está destinado a indicar el nivel mínimo de calidad de ejecución y las tolerancias normales que se han considerado al establecer las reglas de cálculo dadas en esta norma europea experimental.

Indica también al proyectista las informaciones que es necesario proporcionar, en cada estructura particular, para definir las exigencias de ejecución.

Además, define las holguras normales y otros detalles prácticos que el proyectista necesita para los cálculos.

Proyecto asistido por ensayos

El capítulo 8 no es necesario en los proyectos corrientes, pero está previsto para usarlo en las circunstancias especiales en las cuales pueda resultar útil.

1 GENERALIDADES

1.1 Campo de aplicación

1.1.1 Campo de aplicación del Eurocódigo 9

- (1) ENV 1999 Eurocódigo 9 se aplica al proyecto de edificios, trabajos de ingeniería civil y estructural con aluminio. Está subdividido en varias partes diferentes, véase apartado 1.1.2.
- (2) Este Eurocódigo se refiere únicamente a los requisitos de resistencia, servicio y durabilidad de las estructuras. No se consideran otros requisitos, como por ejemplo, los relativos a aislamiento térmico o acústico.
- (3) La ejecución se trata con la amplitud necesaria para indicar la calidad de los materiales y productos de construcción que deben utilizarse, así como el nivel de mano de obra a pie de obra necesario para cumplir con las hipótesis de las reglas de proyecto. En general, las reglas relativas a la ejecución y a la cualificación de la mano de obra han de considerarse como requisitos mínimos, que pueden tener que desarrollarse más ampliamente para tipos particulares de edificaciones o para trabajos de ingeniería civil y estructural y procedimientos de ejecución.
- (4) ENV 1999 Eurocódigo 9 no cubre los requisitos especiales para el cálculo sísmico.
- (5) En ENV 1999 Eurocódigo 9 no se dan los valores numéricos de las acciones que tienen que considerarse para el proyecto de los edificios y obras de ingeniería civil y estructural. Estos se incluyen en la Norma ENV 1991 Eurocódigo 1, "Bases de proyecto y acciones en estructuras", el cual es aplicable a todos los tipos de construcciones.

1.1.2 Campo de aplicación de la Parte 1-1 de ENV 1999 Eurocódigo 9

- (1) Esta norma europea experimental da las bases generales para el proyecto de edificios y obras de ingeniería civil y estructural realizadas con aleaciones de aluminio.
- (2) En esta versión inicial de esta norma europea experimental se tratan las siguientes materias:
 - Capítulo 1: Generalidades.
 - Capítulo 2: Bases de cálculo.
 - Capítulo 3: Materiales.
 - Capítulo 4: Estados límites de servicio.
 - Capítulo 5: Estados límites últimos (elementos).
 - Capítulo 6: Uniones sometidas a cargas estáticas.
 - Capítulo 7: Fabricación y montaje.
 - Capítulo 8: Proyecto asistido por ensayos.
- (3) Muchos de los contenidos de los capítulos 1 y 2 son comunes a todos los Eurocódigos estructurales, con la excepción de algunos apartados adicionales que son específicos de cada Eurocódigo.
- (4) Esta norma europea experimental no cubre:
 - la resistencia frente al fuego;
 - aquellos casos en los que sea necesario adoptar medidas especiales para limitar las consecuencias de los accidentes;
 - fatiga.

1.2 Distinción entre Principios y Reglas de Aplicación

- (1) En este Eurocódigo se distingue entre principios y reglas de aplicación dependiendo del carácter de los diferentes apartados particulares.
- (2) Los Principios comprenden:
 - declaraciones y definiciones generales para las cuales no existe alternativa, así como;
 - requisitos y modelos analíticos para los cuales no se permite alternativa, salvo que se establezca específicamente.
- (3) Los Principios se identifican por la letra P a continuación del número de párrafo.
- (4) Las Reglas de Aplicación son reglas generalmente reconocidas que siguen los Principios y que cumplen sus requisitos.
- (5) Se permitirá el uso de reglas de cálculo alternativas, diferentes a las Reglas de Aplicación dadas en el Eurocódigo, siempre que se demuestre que las reglas alternativas están de acuerdo con los Principios correspondientes y que son al menos equivalentes en lo que respecta a resistencia, capacidad de servicio y durabilidad de la estructura.
- (6) En este Eurocódigo las Reglas de Aplicación se identifican con un número entre paréntesis, como en este párrafo.

1.3 Normas de referencia

- (1)P Esta norma europea experimental incorpora, con referencias fechadas y sin fechar, previsiones para otras publicaciones. Estas normas de referencia se citan en el lugar apropiado en el texto y la lista de las publicaciones se expone a continuación. Para aplicar las referencias sin fechar hay que remitirse a la última edición.

1.3.1 Referencias en aleaciones de aluminio

1.3.1.1 Composición química, forma y definición de los tratamientos de los productos de forja

EN 573-1:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de productos de forja. Parte 1: Sistema de designación numérica.*

EN 573-2:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de productos de forja. Parte 2: Sistema de designación simbólica.*

EN 573-3:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de productos de forja. Parte 3: Composición química.*

EN 573-4:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de productos de forja. Parte 4: Forma de los productos.*

EN 515:1993 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Productos de forja. Designación de los estados de tratamiento.*

1.3.1.2 Condiciones técnicas de suministro

EN 485-1:1993 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Chapas, bandas y planchas. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro e inspección.*

prEN 586-1:1996 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas forjadas. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro e inspección.*

prEN 754-1:1996 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro e inspección.*

prEN 755-1:1996 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro e inspección.*

prEN 1592-1:1996 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. HF tubos con junta soldada. Parte 1 Condiciones técnicas de suministro e inspección.*

prEN 12020-1:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Perfiles extruidos con precisión en aleación EN AW-6060 y EN AW-6063. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro e inspección.*

1.3.1.3 Dimensiones y propiedades mecánicas

EN 485-2:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Chapas, bandas y planchas. Parte 2: Propiedades mecánicas.*

EN 485-3:1993 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Chapas, bandas y planchas. Parte 3: Tolerancias de forma y dimensionales de productos laminados en caliente.*

EN 485-4:1993 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Chapas, bandas y planchas. Parte 4: Tolerancias de forma y dimensionales de productos laminados en frío.*

prEN 508-2:1996 – *Productos de cubrición a base de chapas metálicas. Especificaciones para productos autoportantes de acero, aluminio o acero inoxidable. Parte 2: Aluminio.*

EN 586-2:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas forjadas. Parte 2: Propiedades mecánicas y otras propiedades exigidas.*

prEN 586-3:1996 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas forjadas. Parte 3: Tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 754-2:1996 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 2: Propiedades mecánicas.*

EN 754-3:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 3: Barras redondas, tolerancias dimensionales y de forma.*

EN 754-4:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 4: Barras cuadradas, tolerancias dimensionales y de forma.*

EN 754-5:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 5: Barras rectangulares, tolerancias dimensionales y de forma.*

EN 754-6:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 6: Barras hexagonales, tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 754-7:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 7: Tubos sin soldadura, tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 754-8:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras y tubos estirados en frío. Parte 8: Tubos de varios huecos, tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 755-2:1996 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 2: Propiedades mecánicas.*

EN 755-3:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 3: Barras redondas, tolerancias dimensionales y de forma.*

EN 755-4:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 4: Barras cuadradas, tolerancias dimensionales y de forma.*

EN 755-5:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 5: Barras rectangulares, tolerancias dimensionales y de forma.*

EN 755-6:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 6: Barras hexagonales, tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 755-7:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 7: Tubos sin soldadura, tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 755-8:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 8: Tubos con varios huecos, tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 755-9:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 9: Perfiles, tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 12020-2:1995 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Perfiles extruidos con precisión en aleación EN AW-6060 y EN AW-6063. Parte 2: Tolerancias dimensionales y de forma.*

prEN 1592-2:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. HF tubos con junta soldada. Parte 2: Propiedades mecánicas.*

prEN 1592-3:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. HF tubos con junta soldada. Parte 3: Tolerancias dimensionales y de forma en tubos circulares.*

prEN 1592-4:1994 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. HF tubos con junta soldada. Parte 4: Tolerancias dimensionales y de forma de tubos cuadrados, rectangulares y tubos con forma.*

1.3.1.4 Fundiciones de aleaciones de aluminio

prEN 1559-1 – *Fundiciones. Condiciones técnicas de suministro. Parte 1: General.*

prEN 1559-2 – *Fundiciones. Condiciones técnicas de suministro. Parte 4: Requisitos adicionales para fundiciones de aleaciones de aluminio.*

prEN 1706:1993 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas fundidas. Composición química y propiedades mecánicas.*

prEN 190/120 – *Piezas fundidas. Sistema de tolerancias dimensionales y sobreespesores de mecanizado.*

1.3.2 Referencias de soldadura

EN 287-2:1992 – *Cualificación de soldadores. Soldeo por fusión. Parte 2: Aluminio y aleaciones de aluminio.*

EN 288-1:1992 – *Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 1: Reglas generales para el soldeo por fusión.*

EN 288-4:1992 – *Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 4: Cualificación del procedimiento de soldeo por arco de aluminio y sus aleaciones.*

prEN 288-13 – *Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 13: Cualificación del procedimiento de soldeo por arco de fundición de aluminio y combinaciones de materiales fundidos y forjados.*

EN 439:1994 – *Productos de aportación para el soldeo. Gases de protección para el soldeo y para el corte por arco.*

prEN 970 – *Inspección no destructiva de soldaduras. Inspección visual.*

prEN 1011-1 – *Soldadura. Soldero por fusión de materiales metálicos. Parte 1: Generalidades.*

prEN 1011-4 – *Requisitos para el soldeo por fusión de materiales metálicos. Parte 4: Aluminio y aleaciones de aluminio.*

prEN 1418 – *Soldadores. Ensayos de cualificación de soldadores para soldeo por fusión y de operadores de soldadura por resistencia para soldeo completamente mecanizado y soldeo automático de materiales metálicos.*

EN 30042:1994 – *Uniones de aluminio soldadas por arco y de sus aleaciones soldables. Guía de niveles de calidad de las imperfecciones.*

prEN (WI 121127) – *Productos de aportación para el soldeo. Electrodo de alambre, varillas y redondos para soldeo por arco de aluminio y aleaciones de aluminio. Clasificación.*

prEN (WI 121214) – *Productos de aportación para el soldeo. Electrodo recubiertos para soldeo manual por arco de aluminio y aleaciones de aluminio. Clasificación.*

1.3.3 Otras referencias

ENV 1991-1:1994 – *Eurocódigo 1. Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 1: Bases de proyecto.*

ENV 1991-2-1:1995 – *Eurocódigo 1. Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2.1: Acciones en estructuras. Densidades, pesos propios y cargas exteriores.*

ENV 1991-2-2:1994 – *Eurocódigo 1. Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2.2: Acciones en estructuras expuestas al fuego.*

ENV 1991-2-3:1995 – *Eurocódigo 1. Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2.3: Acciones en estructuras. Cargas de nieve.*

ENV 1991-2-4:1995 – *Eurocódigo 1. Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2.4: Acciones en estructuras. Acciones del viento.*

ENV 1993-1-1:1992 – *Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero. Parte 1.1: Reglas generales y reglas para edificación.*

ENV 1999-1-2 – *Eurocódigo 9. Proyecto de estructuras de aluminio. Parte 1.2: Proyecto de estructuras sometidas a fuego.*

ENV 1999-2 – *Eurocódigo 9. Proyecto de estructuras de aluminio. Parte 2: Estructuras sometidas a fatiga.*

ISO 1000:1981 – *Unidades SI y recomendaciones para el empleo de sus múltiplos y de algunas otras unidades.*

ISO 8930:1987 – *Principios generales de fiabilidad de estructuras. Lista de términos equivalentes.*

ISO 468:1982 – *Rugosidad de superficies. Parámetros, sus valores y reglas generales para determinar las especificaciones.*

ISO 11003-1:1993 – *Adhesivos. Determinación del comportamiento a cortadura de enlaces estructurales. Parte 1: Método de ensayo de torsión usando cilindros huecos adheridos en el extremo.*

ISO 11003-2:1993 – *Adhesivos. Determinación del comportamiento a cortadura de enlaces estructurales. Parte 2: Método de ensayo del adherente grueso.*

ISO 468:1982 – *Rugosidad de superficies. Parámetros, sus valores y reglas generales para determinar las especificaciones.*

ISO 1302:1992 – *Técnicas de dibujo. Métodos de indicación de la textura superficial.*

1.4 Hipótesis

(1) Se aplican las siguientes hipótesis:

- Las estructuras están proyectadas y calculadas por personas cualificadas y con la experiencia adecuada.
- En las fábricas, talleres y obra, se dispone de una supervisión y un control de calidad adecuados.
- La construcción es llevada a cabo por personal con la formación y la experiencia adecuadas.
- Los materiales y los productos de construcción se utilizan como se indica en este Eurocódigo o en las especificaciones del material o producto correspondiente.
- La estructura tendrá un mantenimiento adecuado (véase apartado 7.7).
- La estructura se utilizará de acuerdo con las hipótesis del proyecto respectivo.

(2) Los métodos de cálculo son válidos únicamente cuando se cumplan también los requisitos de ejecución y de mano de obra recogidos en el capítulo 7.

(3) Los valores numéricos identificados por un recuadro □ son indicativos. Los estados miembros pueden especificar otros valores.

1.5 Definiciones

1.5.1 Términos comunes a todos los Eurocódigos

(1) Si no se especifica lo contrario, la terminología utilizada es la de la Norma Internacional ISO 8930:1987.

(2) Los términos siguientes, con sus significados correspondientes, son comunes a todos los Eurocódigos Estructurales:

- **obra de construcción:** Todo aquello que está construido o que resulta de las operaciones de construcción. Este término corresponde tanto a edificaciones como a trabajos de ingeniería civil y estructural. Se refiere al conjunto de la construcción, incluyendo elementos estructurales y no estructurales.
- **ejecución:** La actividad de crear una edificación o una obra de ingeniería civil o estructural. El término se refiere al trabajo a pie de obra; también puede significar el montaje en obra de elementos prefabricados.

NOTA – En ciertos contextos donde no exista ambigüedad, en inglés puede utilizarse el término "construcción" en vez de "ejecución", (por ejemplo: "durante la construcción").

- **estructura:** Combinación organizada de partes conectadas entre sí diseñada para proporcionar un cierto grado de rigidez y de resistencia. Este término se refiere a aquellas partes sometidas a carga.

- **naturaleza del edificio o trabajo de ingeniería civil y estructural:** El tipo de "obra de construcción" indicando su destino; por ejemplo, edificio residencial, edificio industrial, puente de carretera, vagón de ferrocarril, vehículo automóvil, estructura marítima, mástil o torre.

NOTA – En inglés no se emplea el término "Naturaleza de la construcción".

- **tipología de la estructura:** Define la disposición de los elementos estructurales; por ejemplo, viga, estructura triangulada, estructura tubular, arco.
- **material de construcción:** Un material utilizado en un trabajo de construcción, por ejemplo, hormigón, acero, madera, albañilería, aluminio.
- **modo de construcción:** Indica el material estructural principal; por ejemplo, construcción de hormigón armado, construcción de acero, construcción de madera, construcción de albañilería, construcción de aluminio.
- **procedimiento de ejecución:** Forma mediante la cual la construcción se lleva a cabo, por ejemplo, soldado in situ, prefabricada, en voladizo.
- **sistema estructural:** Son los elementos que soportan la carga de una edificación o de una obra de ingeniería civil o estructural y la forma en la que se supone que trabajan a efectos de su modelización.

- (3) Los términos equivalentes en varios idiomas se dan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1
Lista de términos equivalentes en varios idiomas

Inglés	Francés	Alemán
Construction works	Construction	Bauwerk
Execution	Exécution	(Bau)-Ausführung
Structure	Structure	Tragwerk
Type of building or civil engineering works	Nature de construction	Art des Bauwerks
Form of structure	Type de structure	Art des Tragwerks
Construction material	Matériau de construction	Baustoff; Werkstoff* (* nur im Stahlbau)
Type of construction	Mode de construction	Bauweise
Method of construction	Procédé d'exécution	Bauverfahren
Structural system	Système structural	Tragsystem

Tabla 1.1
Lista de términos equivalentes en varios idiomas (Continúa)

Italiano	Holandés	Español
Costruzione	Bouwwerk	Construcción
Esecuzione	Uitvoering	Ejecución
Struttura	Draagconstructie	Estructura
Tipo di Costruzione	Type Bouwwerk	Naturaleza de la construcción
Tipo di struttura	Type draagconstructie	Tipo de estructura
Materiale da costruzione	Constructie materiaal	Material de construcción
Sistema costruttivo	Bouwwijze	Modo de construcción
Procedimento esecutivo	Bouwmethode	Procedimiento de ejecución
Sistema strutturale	constructief systeem	Sistema estructural

Tabla 1.1
Lista de términos equivalentes en varios idiomas (Continúa)

Portugués	Sueco	Noruego
Construção	Byggnadsverk	Byggverk
Execução	Utförande	Utføreise
Estrutura	Bärverk	Baerende konstruksjon
Tipo de edificio ou de obras de engenharia civil	Typ av byggnadsverk	Type byggverk
Tipo de estrutura	Typ av bärverk	Konstruksjonsform
Material de construção	Byggmaterial	Byggemateriale
Tipo de construção	Typ av konstruktion med avseende på material	Konstruksjonstype (etter hovedmateriale)
Processo construtivo	Byggnadssätt	Utføreisesmetode
Sistema estrutural	Bärande system	Baerende system

Tabla 1.1
Lista de términos equivalentes en varios idiomas (Fin)

Finlandés	Danés	Griego
Rakennuskohde	Bygge- og anlægsarbejde	Κατασκευές
Työnsuoritus	Udførelse	Εκτέλεση έργου
Rakenne	Baerende konstruktion	Κατασκευή
Rakennuksen tai maa- ja vesirakennuskohteen tyyppi	Arten af bygge- og anlægsarbejde	Είδος κατασκευής
Rakenteen muoto	Konstruktionsprincip	Είδος ξορεα
Rakennusmateriaali	Konstruktionsmateriale	Υλικο κατασκευής
Rakenteen materiaali	Konstruktionstype	Τροπος εκτελεσης
Rakentamistapa	Udførelsesmetode	Μεθοδος εκτελεσης
Rakennejärjestelmä	Baerende system	Φορεας

1.6 Unidades S.I.

- (1) Las Unidades S.I. deberán utilizarse de acuerdo con la Norma Internacional ISO 1000: 1981.
- (2) Para los cálculos se recomiendan las siguientes unidades:
 - esfuerzos y cargas: kN, kN/m, kN/m²
 - densidad: kg/m³
 - peso específico: kN/m³
 - tensiones y resistencias: N/mm² (= MN/m² o MPa)
 - momentos (flectores,...): kNm

1.7 Símbolos usados en esta Norma Europea Experimental

1.7.1 Letras latinas mayúsculas

<i>A</i>	Acción accidental; Área
<i>B</i>	Esfuerzo de atornillado
<i>C</i>	Capacidad; Valor constante; Coeficiente
<i>D</i>	Daño (comprobación a la fatiga)
<i>E</i>	Módulo de elasticidad longitudinal
<i>F</i>	Acción
<i>F</i>	Esfuerzo
<i>G</i>	Acción permanente
<i>G</i>	Módulo de elasticidad transversal
<i>H</i>	Carga o reacción horizontal total
<i>I</i>	Momento de inercia de un área
<i>K</i>	Coeficiente de rigidez (I/L)
<i>L</i>	Longitud; Luz del vano; Longitud del sistema
<i>M</i>	Momento en general
<i>M</i>	Momento flector
<i>N</i>	Esfuerzo axil
<i>Q</i>	Acción variable
<i>R</i>	Resistencia, Reacción
<i>S</i>	Esfuerzos y momentos internos (con subíndices d o k)
<i>S</i>	Rigidez (rigidez a cortante, a rotación con subíndices v, j, \dots)
<i>T</i>	Momento torsor; Temperatura
<i>V</i>	Esfuerzo cortante; carga o reacción vertical total
<i>W</i>	Módulo de la sección
<i>X</i>	Valor de una propiedad de un material

1.7.2 Letras griegas mayúsculas

Δ	Incremento de ... (precede al símbolo principal)
----------	--

1.7.3 Letras latinas minúsculas

<i>a</i>	Distancia; Dato geométrico
<i>a</i>	Espesor de garganta de una soldadura; Relación de áreas
<i>b</i>	Anchura; amplitud
<i>c</i>	Distancia; saliente
<i>d</i>	Diámetro; Canto; Longitud de la diagonal
<i>e</i>	Excentricidad; Desviación del eje neutro (o del centro de gravedad)
<i>e</i>	Distancia al borde (transversal); Distancia al extremo (longitudinal)
<i>f</i>	Resistencia (de un material)
<i>g</i>	Separación; coeficiente del gradiente de tensiones
<i>h</i>	Altura
<i>i</i>	Radio de giro; número entero
<i>k</i>	Coeficiente; Factor

l (o ℓ o L)	Longitud; Luz del vano; Longitud del sistema
n	Razón de esfuerzos normales o de tensiones normales
n	Número de ...
p	Paso; separación (entre agujeros)
q	Fuerza uniformemente distribuida
r	Radio; Radio de la raíz
s	Paso al tresbolillo; Distancia
t	Espesor
u, v, w	Componentes de la flecha
uu	Eje mayor
vv	Eje menor
xx, yy, zz	Ejes rectangulares

1.7.4 Letras griegas minúsculas

α (alpha)	Ángulo; Razón; Coeficiente
α	Coeficiente de dilatación térmica lineal
β (beta)	Ángulo; Razón; Coeficiente
γ (gamma)	Coeficiente parcial de seguridad; razón o relación
ε (epsilon)	Deformación unitaria
η (eta)	Coeficiente
ϑ (theta)	Ángulo; pendiente
λ (lambda)	Esbeltez; Razón o relación
μ (mu)	Coeficiente de rozamiento; Coeficiente
ν (nu)	Coeficiente de Poisson
ρ (rho)	Coeficiente de reducción; Densidad
σ (sigma)	Tensión normal
τ (tau)	Tensión tangencial
ϕ (phi)	Giro; Pendiente; Razón o relación
χ (chi)	Coeficiente de reducción (para pandeo)
ψ (psi)	Razón de tensiones; Coeficiente de reducción
ψ	Coeficientes que definen los valores representativos de las acciones variables

1.7.5 Subíndices

A	Accidental; área
a	Capacidad local de una sección neta en tracción o compresión
$a, b \dots$	Primero, segundo ... alternativo
b	Capacidad de soporte; Pandeo
b	Tornillo; Viga; Presilla
C	Capacidad; consecuencias
c	Sección recta o transversal
c	Hormigón; columna
com	Compresión
cr	Crítico
d	De cálculo; Diagonal

<i>dst</i>	Desestabilizador
<i>E</i>	Efecto de las acciones (con <i>d</i> o <i>k</i>)
<i>E</i>	Euler
<i>eff</i>	Eficaz
<i>e</i>	Eficaz (con otro subíndice)
<i>el</i>	Elástico
<i>ext</i>	Externo
<i>f</i>	Ala; elemento de fijación
<i>fic</i>	Ficticio
<i>g</i> (o <i>gr</i>)	Bruta
<i>G</i>	Acción permanente
<i>h</i>	Altura; más alto; Horizontal
<i>haz</i>	Zona afectada por el calor
<i>i</i>	Interior
<i>inf</i>	Inferior; más bajo
<i>i, j, k</i>	Indices (sustituyendo a números)
<i>j</i>	Unión
<i>k</i>	Característico
<i>l</i>	Más bajo
<i>L</i>	Largo
<i>LT</i>	Lateral-torsional
<i>M</i>	Material
<i>M</i>	(Tener en cuenta el) momento flector
<i>m</i>	Flexión; Medio
<i>máx.</i>	Máximo
<i>mín.</i>	Mínimo
<i>N</i>	(Tener en cuenta el) esfuerzo axil
<i>n</i>	Normal
<i>net</i>	Neto
<i>nom</i>	Nominal
<i>o</i>	Agujero; Inicial; Exterior
<i>o</i>	Conjunto de la fluencia en tracción y compresión
<i>o</i>	Punto de momento nulo
<i>ov</i>	Solape
<i>p</i>	Chapa; Perno de articulación; Forro
<i>p</i>	Pretensado (esfuerzo de)
<i>p</i>	Parcial; Punzonamiento
<i>pl</i>	Plástico
<i>Q</i>	Acción variable
<i>R</i>	Resistencia
<i>r</i>	Roblón; restricción o coacción
<i>rep</i>	Representativo
<i>S</i>	Esfuerzo interno; Momento interno
<i>s</i>	Tensión de tracción (área); conjunto de la estabilidad al pandeo
<i>s</i>	Rozamiento; Planta o piso de edificio
<i>st</i>	Rígido; Rigidizador
<i>ser</i>	Servicio (estado límite de)
<i>stb</i>	Estabilizador

<i>sup</i>	Superior; Más alto
<i>t</i> (o <i>ten</i>)	Tracción; Tensión
<i>t</i> (o <i>tor</i>)	Torsión
<i>u</i>	Eje mayor de la sección transversal
<i>u</i>	Última (resistencia a tracción)
<i>ult</i>	Último (estado límite)
<i>V</i>	(Tener en cuenta el) esfuerzo cortante
<i>v</i>	Cortante; Vertical
<i>v</i>	Eje menor de la sección transversal
<i>vec</i>	Efectos vectoriales
<i>w</i>	Alma; Soldadura; Alabeo
<i>x</i>	Eje longitudinal de la pieza; Extensión o alargamiento
<i>y</i>	Eje de la sección transversal
<i>z</i>	Eje de la sección transversal
σ	Tensión normal
τ	Tensión tangencial
\perp	Perpendicular
//	Paralelo
0,2	Límite elástico práctico con el 0,2% de deformación

1.7.6 Uso de los subíndices en esta norma europea experimental

- (1) Las resistencias y propiedades de los materiales de aleaciones de aluminio son valores nominales, tratados como valores característicos, pero escritos como se indica a continuación:

$f_{0,2}$	límite elástico práctico, notación simplificada : f_0
f_{haz}	resistencia en la zona afectada por el calor
f_u	resistencia última
E	módulo de elasticidad longitudinal

- (2) En esta norma europea experimental se dan la totalidad de los subíndices con el fin de evitar ambigüedades, pero en la práctica, algunos de ellos pueden omitirse siempre que su omisión no origine ambigüedad alguna.
- (3) Cuando sea necesaria la utilización de símbolos con varios subíndices, estos se colocan en el siguiente orden:
- parámetro principal: por ejemplo: M, N, β
 - tipo de variante: por ejemplo: pl, eff, b, c
 - sentido: por ejemplo: t, v
 - eje: por ejemplo: y, z
 - posición: por ejemplo: 1, 2, 3
 - naturaleza: por ejemplo: R, E
 - nivel: por ejemplo: d, k
 - índice: por ejemplo: 1, 2, 3
- (4) Para separar subíndices en pares de caracteres se utilizan comas, excepto en los siguientes casos:
- No se subdividen subíndices con más de un carácter.
 - Ejemplo: No se subdividen las combinaciones Rd, Sd , etc.

- (5) Cuando para definir un parámetro sean necesarios dos subíndices del tipo variante, estos pueden separarse mediante una coma:

por ejemplo: M, ψ

1.7.7 Convenios para los ejes de piezas

- (1) En general el convenio para ejes de piezas es:

xx - a lo largo de la pieza
 yy - eje de la sección recta o transversal
 zz - eje de la sección recta o transversal

- (2) Los convenios utilizados para los ejes de la sección transversal de las piezas en I de aleación de aluminio son:

– en general:

yy - eje de la sección transversal, paralelo a las alas
 zz - eje de la sección transversal, perpendicular a las alas

– para los angulares:

yy - eje paralelo al lado más corto
 zz - eje perpendicular al lado más corto

– cuando sea necesario:

uu - eje mayor (cuando éste no coincida con el eje yy)
 vv - eje menor (cuando éste no coincida con el eje zz)

- (3) Una muestra de perfiles extruidos de aleación de aluminio se presenta en la figura 1.1.

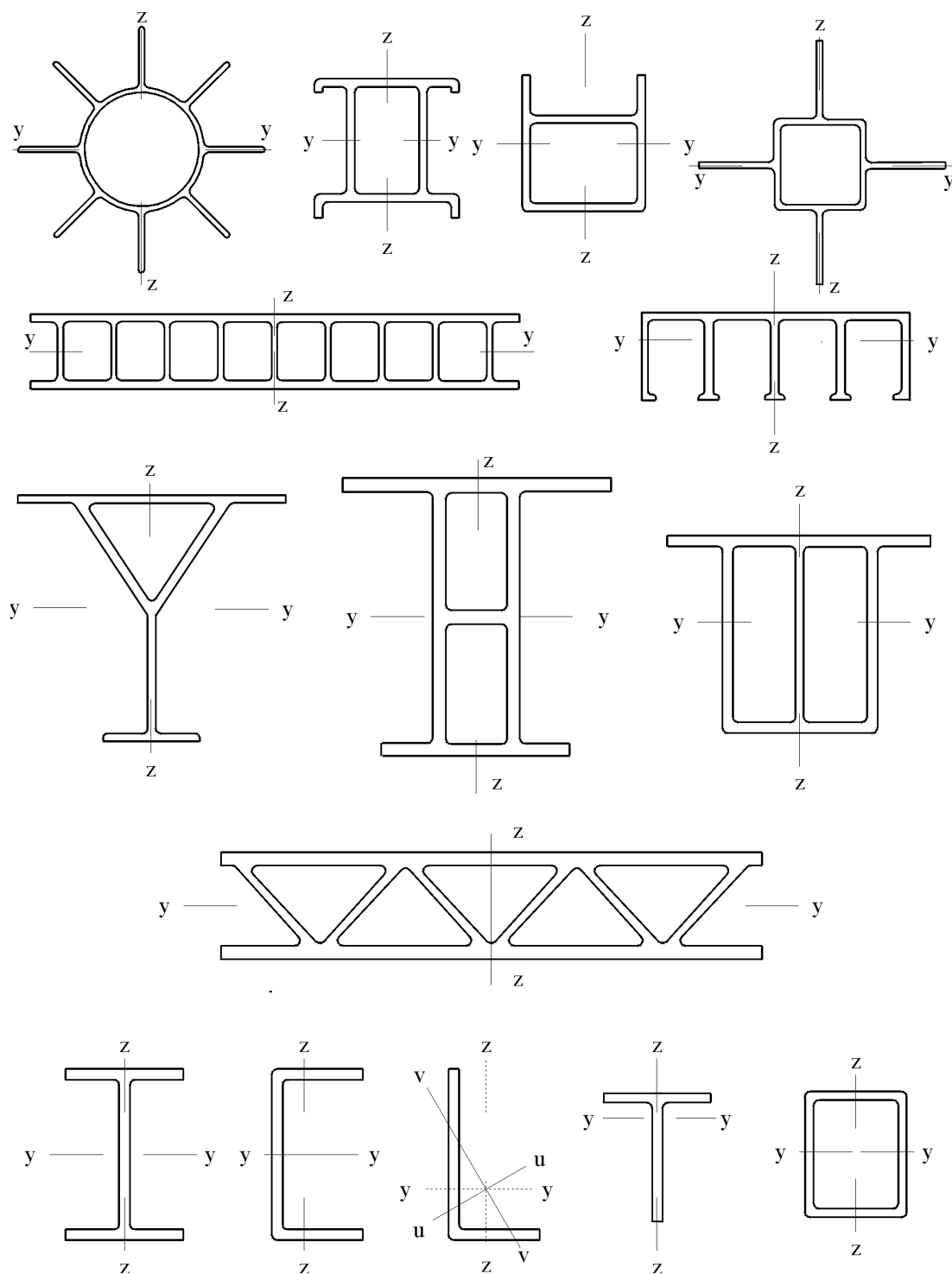


Fig. 1.1 – Perfiles de aleación de aluminio

- (4) El convenio utilizado para aquellos subíndices que definen los ejes de los momentos es:
"Utilizar el eje alrededor del cual actúa el momento".
- (5) Por ejemplo, en un perfil en I, un momento que actúe en el plano del alma se denominará M_y porque actúa alrededor del eje de la sección transversal paralelo a las alas.

2 BASES DE CÁLCULO

2.1 Requisitos fundamentales

- (1)P Una estructura se deberá proyectar y construir de forma que:
- con una probabilidad aceptable, permanecerá apta para el uso requerido, considerando su vida prevista y su coste; y
 - con un grado de fiabilidad apropiado, soportará todas las acciones e influencias probables que ocurran durante su ejecución y su uso y tendrá una durabilidad adecuada en relación con sus costes de mantenimiento.
- (2)P Una estructura se proyectará también de forma que no sea dañada por hechos como explosiones, impacto o consecuencias de errores humanos, en una extensión desproporcionada con relación a la causa que los originó.
- (3)P El daño potencial deberá limitarse o evitarse por medio de la elección apropiada de una o varias de las siguientes actuaciones:
- evitar, eliminar o reducir los riesgos potenciales que ha de soportar la estructura;
 - elegir una tipología estructural que sea poco sensible a los riesgos considerados;
 - interconectar el conjunto de la estructura;
 - elegir el tipo y el diseño de la estructura de modo que pueda sobrevivir de forma adecuada, tras la pérdida accidental de uno de sus elementos.
- (4)P Los requisitos anteriores deberán satisfacerse mediante la elección de materiales adecuados, el proyecto y el grado de detalle apropiado y unos procedimientos de control específicos para la producción, construcción y uso aplicables a cada proyecto concreto.

2.2 Definiciones y clasificaciones

2.2.1 Estados límite y situaciones de proyecto

2.2.1.1 Estados límites

- (1)P Estados límites son aquellos estados más allá de los cuales la estructura deja de satisfacer los requisitos de proyecto. Los estados límites se clasifican en:
- estados límites últimos;
 - estados límites de servicio.
- (2)P Estados límites últimos son aquellos que están asociados con el colapso, o con otras formas de fallo estructural que puedan poner en peligro la seguridad de las personas.
- (3)P Los estados previos al colapso estructural que, por simplicidad, se consideren en lugar del colapso propiamente dicho, se clasificarán y tratarán también como estados límites últimos.
- (4)P Entre los estados límites últimos, que es necesario tener en cuenta, están los siguientes:
- pérdida de equilibrio de la estructura o de cualquier parte de ella, considerada como un cuerpo rígido;
 - fallo por deformación excesiva, rotura o pérdida de estabilidad de la estructura o cualquier parte de ella, incluyendo apoyos y cimentaciones.

- (5) Los estados límites de servicio corresponden a estados que si son superados no se cumplirían las condiciones especificadas de uso.
- (6) Entre los estados límites de servicio, que es necesario tener en cuenta están los siguientes:
- las deformaciones o flechas que afecten negativamente a la apariencia, o a la efectividad del uso previsto de la estructura (incluyendo el mal funcionamiento de máquinas o servicios), o causen daño a acabados o elementos no estructurales;
 - la vibración que causa incomodidad a las personas, daño al edificio o sus contenidos, o que limita su eficacia funcional.

2.2.1.2 Situaciones de proyecto

- (1)P Las situaciones de proyecto se clasifican en:
- situaciones duraderas correspondientes a las condiciones normales de uso de la estructura;
 - situaciones transitorias, por ejemplo durante la construcción o reparación;
 - situaciones accidentales. Las situaciones accidentales incluyen situaciones excepcionales que pueden no ser el resultado de un accidente.

2.2.2 Acciones

2.2.2.1 Definiciones y clasificación principal¹⁾

- (1)P Una acción (F) es:
- una fuerza (carga) aplicada a la estructura (acción directa); o
 - una deformación impuesta (acción indirecta); por ejemplo, efectos de la temperatura o asientos de la cimentación.
- (2)P Las acciones se clasifican:
- a) por su variación en el tiempo:
- acciones permanentes (G), como el peso propio de la estructura, accesorios, equipamiento auxiliar y fijo;
 - acciones variables (Q), como las cargas de explotación, cargas de vehículos, cargas de viento, cargas de nieve, cargas debidas a olas;
 - acciones accidentales (A), como explosiones, impacto de masas volantes, impacto debido a colisiones.
- b) por su variación en el espacio:
- acciones fijas, como el peso propio (véase, sin embargo, el apartado 2.3.2.3 (2), sobre estructuras muy sensibles a las variaciones en el peso propio);
 - acciones libres, las cuales producen diferentes disposiciones de las acciones, como las cargas de explotación móviles, cargas de viento, cargas de nieve, cargas debidas a olas.
- (3) En los apartados específicos se dan clasificaciones suplementarias, las cuales están vinculadas a la respuesta de la estructura.

1) Se pueden encontrar definiciones más completas de la clasificación de las acciones en la Norma ENV 1991-1.

2.2.2.2 Valores característicos de las acciones

- (1)P Los valores característicos F_k se especifican:
- en el Eurocódigo 1 Parte 2 (ENV 1991-2-1, ENV 1991-2-2, ENV 1991-2-3, ENV 1991-2-4) o en otros códigos específicos de acciones, o
 - por el cliente, o por el proyectista de acuerdo con el cliente, siempre que se observen los valores mínimos especificados en los códigos de acciones correspondientes o los exigidos por la autoridad competente.
- (2)P Para las acciones permanentes cuyo coeficiente de variación es grande o cuando sea probable que varíen las acciones durante la vida de la estructura (por ejemplo, algunas cargas permanentes añadidas), se distinguen dos valores característicos, uno superior ($G_{k,sup}$) y uno inferior ($G_{k,inf}$). En el resto de los casos, es suficiente un único valor característico (G_k).
- (3) El peso propio de la estructura puede calcularse en la mayoría de los casos, basándose en las dimensiones nominales y en las densidades medias.
- (4) Para acciones variables, el valor característico (Q_k) corresponde a uno de los siguientes:
- el valor superior que tiene una determinada probabilidad de no ser superado, o el valor inferior que tiene una determinada probabilidad de no ser alcanzado, durante un período de referencia, teniendo en cuenta el tiempo de vida útil proyectado para la estructura o la duración considerada de la situación de proyecto; o
 - el valor especificado.
- (5) Para acciones accidentales, el valor característico A_k (cuando sea necesario) es generalmente un valor especificado.

2.2.2.3 Valores representativos de acciones variables²⁾

- (1)P El valor representativo principal es el valor característico Q_k .
- (2)P Otros valores representativos están relacionados con el valor característico Q_k por medio de un coeficiente ψ .
Estos valores están definidos como:
- valor de combinación: $\psi_0 Q_k$ (véase apartado 2.3.2.2)
 - valor frecuente: $\psi_1 Q_k$ (véase apartado 2.3.4)
 - valor cuasi-permanente: $\psi_2 Q_k$ (véase apartado 2.3.4).
- (3)P Para la comprobación a fatiga y para el análisis dinámico se utilizan valores representativos suplementarios.
- (4)P Los coeficientes ψ_0 , ψ_1 y ψ_2 están especificados:
- en la Norma Europea Experimental ENV 1991 Eurocódigo 1 o en otros códigos específicos de acciones; o
 - por el cliente, o por el proyectista de acuerdo con el cliente, siempre que se observen los valores mínimos especificados en los códigos de acciones correspondientes o los exigidos por la autoridad competente.

2) Se pueden encontrar definiciones más completas de los valores representativos en la Norma ENV 1991-1.

2.2.2.4 Valores de cálculo para las acciones

- (1)P El valor de cálculo de una acción F_d se expresa de forma general como:

$$F_d = \gamma_F F_k \quad (2.1)$$

donde

γ_F es el coeficiente parcial de seguridad adoptado para la acción considerada, que tiene en cuenta, por ejemplo, una posible desviación desfavorable de la magnitud de las acciones, la posibilidad de una modelización poco precisa de las acciones o las incertidumbres en la evaluación de los efectos de las acciones y las incertidumbres en la evaluación del estado límite considerado.

- (2) Ejemplos específicos del uso de γ_F se dan en la Norma Europea Experimental ENV 1991-1.

2.2.2.5 Valores de cálculo de los efectos de las acciones

- (1)P Los efectos de las acciones (E), son la respuesta (por ejemplo, esfuerzos y momentos internos, tensiones, deformaciones unitarias) de la estructura a las acciones. Los valores de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) se determinan a partir de los valores de cálculo de las acciones, de los datos geométricos y de las propiedades del material cuando procede:

$$E_d = E(F_d, a_d, \dots) \quad (2.2)$$

donde

a_d se define en el apartado 2.2.4.

2.2.3 Propiedades de los materiales

2.2.3.1 Valores característicos

- (1)P Una propiedad de un material se representa por un valor característico X_k que corresponde generalmente a un cuantil de la distribución estadística supuesta para dicha propiedad del material; viene fijada por normas específicas y se controla bajo condiciones especificadas.
- (2) En ciertos casos, se utiliza un valor nominal como valor característico.
- (3) Las propiedades de los materiales para estructuras de aluminio se representan generalmente por valores nominales usados como valores característicos.

NOTA – Un valor mínimo garantizado puede ser definido como un valor nominal, véase apartado 3.1 (1).

- (4) Una propiedad del material puede tener dos valores característicos, el valor superior y el valor inferior. En la mayoría de los casos, sólo se necesita tener en cuenta el valor inferior. Sin embargo, deben considerarse los valores más altos del límite elástico con 0,2% de deformación, por ejemplo en aquellos casos especiales en los que los efectos de las sobrerresistencias puedan producir reducción de la seguridad.

2.2.3.2 Valores de cálculo

- (1)P El valor de cálculo X_d de una propiedad de un material se define generalmente como:

$$X_d = X_k / \gamma_M$$

donde

γ_M es el coeficiente parcial de seguridad de la propiedad del material.

- (2)P En estructuras de aleación de aluminio, la resistencia de cálculo R_d generalmente se determina directamente a partir de los valores característicos de las propiedades del material y de los datos geométricos:

$$R_d = R(X_k, a_k \dots) / \gamma_M \quad (2.3)$$

donde

γ_M es el coeficiente parcial de seguridad para la resistencia.

- (3) El valor característico R_k se puede determinar mediante ensayos. Se da una guía en el capítulo 8.

2.2.4 Datos geométricos

- (1)P Los datos geométricos se representan generalmente por sus valores nominales:

$$a_d = a_{nom} \quad (2.4)$$

- (2) En algunos casos, los valores geométricos de cálculo se definen mediante:

$$a_d = a_{nom} + \Delta a \quad (2.5)$$

Los valores de Δa se dan en los apartados apropiados.

- (3) Para las imperfecciones que deben adoptarse en el análisis global de la estructura, véase Anexo D.

2.2.5 Distribuciones de carga e hipótesis de carga³⁾

- (1)P Una distribución de carga identifica la posición, magnitud y dirección de una acción libre, véase la Norma Europea Experimental ENV 1991-1.
- (2)P Una hipótesis de carga identifica las disposiciones de cargas compatibles, los conjuntos de deformaciones y las imperfecciones consideradas en una comprobación concreta.

2.3 Requisitos de diseño

2.3.1 Generalidades

- (1)P Deberá verificarse que no se supera ningún estado límite relevante.
- (2)P Deberán considerarse todas las situaciones de cálculo y las hipótesis de carga significativas.
- (3)P Deberán considerarse las posibles desviaciones de los valores supuestos en la dirección o posición de las acciones.
- (4)P Los cálculos se harán utilizando los modelos de cálculo adecuados (complementados, si es necesario, por ensayos) teniendo en cuenta todas las variables significativas. Dichos modelos deberán ser lo suficientemente precisos como para poder predecir el comportamiento de la estructura de acuerdo con el nivel deseado de control de la ejecución y con la fiabilidad de la información en la que se basa el proyecto.

3) Se dan reglas detalladas acerca de distribuciones de cargas e hipótesis de cargas en la Norma ENV 1991-1.

2.3.2 Estados límites últimos

2.3.2.1 Condiciones de verificación

- (1)P Cuando se considere un estado límite de equilibrio estático o de grandes desplazamientos o deformaciones de la estructura, se debe verificar que:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab} \quad (2.6)$$

donde

$E_{d,dst}$ son los valores de cálculo de los efectos de las acciones desestabilizadoras;

$E_{d,stab}$ son los valores de cálculo de los efectos de las acciones estabilizadoras.

- (2)P Cuando se considere un estado límite de rotura o de deformación excesiva de una sección, elemento o unión (excluida la fatiga) se debe verificar que:

$$E_d \leq R_d \quad (2.7)$$

donde

E_d es el valor de cálculo de un esfuerzo interno o momento flector (o del vector correspondiente a varios esfuerzos internos o momentos flectores);

R_d es la correspondiente resistencia de cálculo.

- (3)P Cuando se considere el estado límite de la transformación de la estructura en un mecanismo, deberá verificarse que no se llega a producir dicho mecanismo a no ser que las acciones superen sus valores de cálculo, habiendo asignado a todas las propiedades de la estructura los correspondientes valores de cálculo.
- (4)P Cuando se considere un estado límite de inestabilidad inducida por efectos de segundo orden, deberá verificarse que no se produce la inestabilidad, a no ser que las acciones superen sus valores de cálculo, habiendo asignado a todas las propiedades de la estructura los correspondientes valores de cálculo. Además, las secciones se comprobarán de acuerdo con el punto (2) anterior
- (5)P Cuando se considere un estado límite de rotura provocada por fatiga, se deberá verificar que el valor de cálculo del indicador de daño D_d no supera la unidad; véase la Norma Europea Experimental ENV 1999-2.

2.3.2.2 Combinaciones de acciones

- (1)P Para cada hipótesis de carga se deberán determinar los valores de cálculo E_d de los efectos de las acciones a partir de las reglas de combinación que incluyan los valores de cálculo de las acciones dadas en la Norma Europea Experimental ENV 1991-1.

2.3.2.3 Coeficientes parciales de seguridad para resistencias (Estados Límites Últimos)

- (1) Los coeficientes parciales de seguridad para resistencias se dan en los apartados específicos de los capítulos 5 y 6.
- (2) Cuando las propiedades estructurales se determinen mediante ensayos, véase el capítulo 8.
- (3) Para las comprobaciones a fatiga, véase el proyecto de Norma Europea Experimental prENV 1999-2.

2.3.4 Estados límites de servicio

(1)P Se debe verificar que:

$$E_d \leq C_d \quad \text{o} \quad E_d \leq R_d \quad (2.8)$$

donde

C_d es un valor nominal o una función de ciertas propiedades de cálculo de los materiales relacionada con los efectos de cálculo de las acciones consideradas; y

E_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones, determinado a partir de alguna de las combinaciones que se definen más adelante.

La combinación requerida para cada comprobación de estado límite de servicio figura en el apartado correspondiente.

- (2)P Las combinaciones de acciones para los estados límites de servicio están definidas en la Norma Europea Experimental ENV 1991-1.
- (3) Los valores de γ_M se tomarán iguales a $\boxed{1,0}$ para todos los estados límites de servicio, excepto cuando se especifique otra cosa en algún apartado concreto.

2.4 Durabilidad

- (1)P Para asegurar la adecuada durabilidad de la estructura, deberán considerarse los siguientes factores interrelacionados:
- el uso de la estructura;
 - los requisitos de comportamiento;
 - las condiciones ambientales previstas;
 - la composición, las propiedades y el comportamiento de los materiales;
 - la forma de los distintos miembros y los detalles estructurales;
 - la calidad de puesta en obra y el nivel de control;
 - las medidas específicas de protección;
 - el mantenimiento probable durante su periodo de vida útil.
- (2) Las condiciones ambientales, tanto internas como externas, se estimarán durante la fase de proyecto para evaluar su importancia en relación con la durabilidad y poder adoptar las medidas adecuadas para la protección de los materiales (véase apartado 3.4).

2.5 Resistencia al fuego

- (1) Para la resistencia al fuego, se remite al proyectista al proyecto de Norma Europea Experimental prENV 1999-1-2.

3 MATERIALES

3.1 Generalidades

- (1) Las propiedades de los materiales que se indican en este capítulo son valores mínimos garantizados tomados como valores nominales para ser adoptados como valores característicos en los cálculos de proyecto (ver apartado 5.3.5).
- (2) Otras propiedades de los materiales se dan en las normas europeas EN listadas en los apartados 1.3.1.3 y 1.3.1.4 y en los proyectos de normas europeas prEN y normas internacionales ISO.

3.2 Aluminio estructural

3.2.1 Campo de aplicación de materiales

- (1) Esta norma europea experimental cubre el proyecto de estructuras ejecutadas con las aleaciones de aluminio listadas en la tabla 3.1a para aleaciones forjadas conformes a las normas europeas EN listadas en el apartado 1.3.1.1, y el de las estructuras que usan fundiciones de aleación de aluminio dadas en la tabla 3.1b conformes a las normas europeas EN listadas en el apartado 1.3.1.4.

Tabla 3.1a
Aleaciones forjadas de aluminio para estructuras

Designación de la aleación		Forma del producto	Durabilidad
Numérica	Simbólica		
EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	SH, ST, PL, ET	A
EN AW-5083	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7	SH, ST, PL, ET, SEP, ER/B, DT, FO	A
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	SH, ST, PL	A
EN AW-5454	EN AW-Al Mg3Mn	SH, ST, PL	A
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	SH, ST, PL, FO	A
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6061	EN AW-Al MgSiCu	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6005	EN AW-Al SiMg(A)	EP	B
EN AW-6082	EN AW-Al SiMgMn	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT, FO	B
EN AW-7020	EN AW-Al Zn4,5MgCu	SH, ST, PL, ET, SEP, ER/B, DT	C
Código de símbolos: SH - Chapa ST - Banda PL - Plancha ET - Tubo extruido EP - Perfiles extruidos SEP - Perfiles simples extruidos ER/B - Redondo y barra extruidos DT - Tubo estirado FO - Piezas forjadas			

Tabla 3.1b
Fundiciones de aleación de aluminio para estructuras

Designación de la aleación		Durabilidad
Númerica	Simbólica	
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	B
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	B
EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	C
EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)	B
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	A

- (2) Esta norma europea experimental también se podrá usar para otras aleaciones de aluminio estructurales recogidas en las normas europeas EN o normas internacionales ISO, siempre que se disponga de los datos adecuados para justificar la aplicación de las reglas de proyecto y ejecución correspondientes.
- (3)P Si estos datos adecuados se han obtenido mediante ensayos, los procedimientos de ensayo y los métodos de evaluación de los mismos deben ser conformes con los apartados 6.5.9.5 y 6.8.3 de esta norma europea experimental y los requisitos de ensayo se deberán corresponder con los de las normas europeas EN y proyectos de normas europeas prEN listadas en el apartado 1.3.1.
- (4) Para consultas sobre la selección de aleaciones de aluminio véase el anexo B.

3.2.2 Propiedades del material de aleaciones de aluminio forjadas

3.2.2.1 Valores mínimos garantizados

- (1) Los valores límite mínimos del límite elástico con el 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y de la resistencia última a tracción f_u , para aleaciones de aluminio forjadas para cada tipo de estado de entrega y rango de espesores, vienen dados en la tabla 3.2a para los productos tipo chapas, bandas y planchas; la tabla 3.2b da los correspondientes a redondos o barras extruidas, tubos extruidos, perfiles extruidos y perfiles estirados; la tabla 3.2c da los correspondientes a tubos soldados eléctricamente y la tabla 3.2d los de piezas forjadas.
- (2) Los valores límite mínimos de las tablas 3.2a hasta 3.2d pueden tomarse como valores característicos en cálculos de estructuras sometidas a temperaturas de servicio por debajo de 100 °C (véase apartado 5.3.5). Para estructuras sometidas a elevadas temperaturas asociadas con el fuego véase la Norma Europea Experimental ENV 1999-1-2:1997.

Tabla 3.2a

Valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y resistencia última a tracción f_u para aleaciones de aluminio forjadas – Chapas, bandas y planchas

Aleación	Estado de entrega	Espesor		$f_{0,2}$ Límite elástico con 0,2% de deformación N/mm ²	f_u Resistencia última N/mm ²	A_{50} Alargamiento mínimo %
		mm				
		mayor que	hasta			
EN AW-3103	H14	0,2	25	120	140	2
	H16	0,2	4	145	160	1
EN AW-5052	H12	0,2	4	160	210	4
	H14	0,2	2	180	230	3
EN AW-5454	O/H111	0,2	8	85	215	12
	H24/H34	0,2	25	200	270	4
EN AW-5754	O/H111	0,2	100	80	190	12
	H24/H34	0,2	25	160	240	6
EN AW-5083	O/H111	0,2	50	125	275	11
		50	80	115	270	14
	H24/H34	0,2	25	250	340	4
EN AW-6061	T4	0,4	12,5	110	205	12
	T6	0,4	12	240	290	6
EN AW-6082	T4	0,4	12	110	205	12
	T6	0,4	6	260	310	6
		6	12,5	255	300	9
	T651	12	100	240	295	8
EN AW-7020	T6	0,4	12,5	280	350	7
	T651	12,5	40			9 ¹⁾

1) Basado en A no en A₅₀.

NOTA – Los valores mínimos del alargamiento no se aplican al rango completo de espesores dado, sino generalmente a materiales delgados. Para materiales gruesos se aplican valores mayores del alargamiento. Para los valores mínimos reales ver las normas europeas EN y proyectos de normas europeas prEN listadas en el apartado 1.3.1.3.

Tabla 3.2b

Valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y resistencia última a tracción f_u para aleaciones de aluminio forjadas – Perfiles extruidos, tubos extruidos, redondos y barras extruidos y tubos estirados

Aleación	Forma del producto	Estado de entrega	Dimensión <i>t</i> espesor de pared o espesor mm	<i>f</i> _{0,2} Límite elástico con 0,2% de deformación N/mm ²	<i>f</i> _u Resistencia última N/mm ²	A Alargamiento mínimo %
EN AW-5083	ET, EP, ER/B	F, H112	<i>t</i> ≤ 200	110	270	12
	DT	H12 H22 H32	<i>t</i> ≤ 10	200	280	6
		H14 H24 H34	<i>t</i> ≤ 5	235	300	4
EN AW-6060	EP, ET, ER/B	T5	<i>t</i> ≤ 5	120	160	8
	EP		5 < <i>t</i> ≤ 25	100	140	8
	ET, EP, ER/B	T6	<i>t</i> ≤ 15	140	170	8
	DT		<i>t</i> ≤ 20	160	215	12
EN AW-6061	ET, EP, ER/B, DT	T6	<i>t</i> ≤ 20	240	260	8
EN AW-6063	EP, ET, ER/B	T5	<i>t</i> ≤ 3	130	175	8
	EP		3 < <i>t</i> ≤ 25	110	160	7
	ET, EP, ER/B	T6	<i>t</i> ≤ 10	170	215	8
	DT		<i>t</i> ≤ 20	190	220	10
EN W-6005A	EP/O	T6	<i>t</i> ≤ 5	225	270	8
			5 < <i>t</i> ≤ 10	215	260	8
			10 < <i>t</i> ≤ 25	200	250	8
	EP/H	T6	<i>t</i> ≤ 5	215	255	8
			5 < <i>t</i> ≤ 15	200	250	8
EN AW-6082	EP, ET, ER/B	T4	<i>t</i> ≤ 25	110	205	14
	EP/O, EP/H	T5	<i>t</i> ≤ 5	230	270	8
	EP/O, EP/H ET	T6	<i>t</i> ≤ 5	250	290	8
			5 < <i>t</i> ≤ 25	260	310	10
	ER/B	T6	<i>t</i> ≤ 20	250	295	8
			20 < <i>t</i> ≤ 150	260	310	8
	DT	T6	<i>t</i> ≤ 5	255	310	8
5 < <i>t</i> ≤ 20	240		310	10		
EN AW-7020	EP/ER/B, DT, ET	T6	<i>t</i> ≤ 15	280	350	10
Código de símbolos	EP - Perfiles extruidos EP/H - Perfiles huecos extruidos ER/B - Redondo y barra extruido			EP/O - Perfiles abiertos extruidos ET - Tubo extruido DT - Tubo estirado		
NOTA 1 –	Cuando los valores están en negritas se permiten, en ciertas formas, mayores espesores y/o superiores propiedades mecánicas. véanse las normas europeas EN y los proyectos de normas europeas prEN listadas en el apartado 1.3.1.3.					
NOTA 2 –	Cuando los valores del alargamiento mínimo están en negritas , en ciertas formas o espesores, se pueden dar valores mínimos superiores.					
NOTA 3 –	Cuando un producto extruido emplea espesores dentro del rango de espesores dado arriba, el mayor valor dado puede ser usado siempre que el fabricante pueda garantizar el valor mediante el apropiado certificado de calidad.					

Tabla 3.2c

Valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y resistencia última a tracción f_u para aleaciones de aluminio forjadas – Tubos soldados eléctricamente

Aleación	Estado de entrega	$f_{0,2}$ Límite elástico con 0,2% de deformación N/mm ²	f_u Resistencia última N/mm ²	A Alargamiento mínimo %
EN AW-3103	Hx65	150	170	3
	Hx85	170	190	2

Tabla 3.2d

Valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y resistencia última a tracción f_u para aleaciones de aluminio forjadas – Piezas forjadas (L: longitud)

Aleación	Estado de entrega	Espesor hasta de mm	Dirección	$f_{0,2}$ Límite elástico con 0,2% de deformación N/mm ²	f_u Resistencia última N/mm ²	A Alargamiento mínimo %
EN AW-5754	H112	150	Longitudinal (L)	80	180	15
EN AW-5083	H112	150	Longitudinal (L)	120	270	12
			Transversal (T)	110	260	10
EN AW-6082	T6	100	Longitudinal (L)	260	310	6
			Transversal (T)	250	290	5

- (3) Como una alternativa, los valores límite mínimos especificados en las normas europeas EN y proyectos de normas europeas prEN listadas en el apartado 1.3.1.3, que tienen más tipos de estados de entrega y rangos de espesores adicionales a los cubiertos en las tablas 3.2a hasta 3.2d, pueden ser usados como valores característicos.
- (4) Los valores mínimos del alargamiento, dados en las tablas 3.2a hasta 3.2d, se dan sólo a título informativo.

3.2.3 Propiedades del material para aleaciones de aluminio fundidas

3.2.3.1 Valores mínimos garantizados

- (1) Los valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y de la resistencia última a tracción f_u para probetas de ensayo de fundiciones de aleaciones de aluminio, tanto en arena como en coquilla, dentro de un rango de aleaciones y estados de entrega, vienen dados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3
Valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y resistencia última a tracción f_u para fundiciones de aleación de aluminio – Piezas fundidas

Aleación	Método de fundición	Estado de entrega	$f_{0,2}$ Límite elástico con 0,2% de deformación N/mm ²	f_u Resistencia última N/mm ²	A_{50} Alargamiento mínimo %
EN AC-42100	Fundición en arena	T6	190	230	2
	Fundición en coquilla	T6	210	290	4
EN AC-42200	Fundición en arena	T6	210	250	1
	Fundición en coquilla	T6	240	320	3
EN AC-43200	Fundición en arena	F	80	160	1
	Fundición en arena	T6	180	220	1
	Fundición en coquilla	F	90	180	1
	Fundición en coquilla	T6	200	240	1
EN AC-44100	Fundición en arena	F	70	150	4
	Fundición en coquilla		80	170	5
EN AC-51300	Fundición en arena	F	90	160	3
	Fundición en coquilla		100	180	4

NOTA – Las propiedades mecánicas mínimas están referidas a probetas de ensayo obtenidas por separación, y no a la pieza fundida.

- (2) Como una alternativa, pueden ser usados los valores especificados en las normas europeas EN y proyectos de normas europeas prEN listadas en el apartado 1.3.1.4 para el rango de procesos de fundición y de otros estados de carga.
- (3)P Las reglas de proyecto de esta norma europea experimental no se deberán aplicar a las piezas fundidas. Las aleaciones fundidas dadas en la tabla 3.3 sólo se deberán usar en estructuras portantes siempre que su idoneidad y resistencia puedan ser determinadas mediante ensayos, véase apartado 8.1 (2). Adicionalmente los procedimientos de control de calidad de la producción de las piezas fundidas deben dar satisfacción al proyectista.

3.2.4 Dimensiones, masas y tolerancias

- (1)P Las dimensiones y tolerancias de los productos estructurales extruidos, chapas, y productos planos, tubos estirados, tubos soldados eléctricamente, alambre y piezas forjadas, deben cumplir con las normas europeas EN y proyectos de normas europeas prEN listadas en el apartado 1.3.1.3.
- (2)P Las dimensiones y tolerancias de los productos estructurales fundidos deben cumplir con las normas europeas EN y proyectos de normas europeas prEN listadas en el apartado 1.3.1.4.

3.2.5 Valores de cálculo de las constantes de los materiales

- (1)P Para las constantes del material a adoptar en los cálculos con aleaciones de aluminio, cubiertas por ésta norma europea experimental, deberán tomarse las siguientes:
- módulo de elasticidad $E = 70\,000\text{ N/mm}^2$;
 - módulo de elasticidad transversal $G = 27\,000\text{ N/mm}^2$;
 - coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$;
 - coeficiente de dilatación térmica lineal $\alpha = 23 \times 10^{-6}\text{ por }^\circ\text{C}$;
 - densidad $\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$.

- (2) Para las propiedades de los materiales en estructuras sometidas a temperaturas elevadas asociadas con el fuego véase el proyecto de norma prEN 1999-1-2:1997.

3.3 Medios de unión

3.3.1 Generalidades

- (1)P Los medios de unión deben ser adecuados para su uso específico.
- (2) Entre los medios de unión adecuados se incluyen tornillos, sujeciones de amarre por fricción, roblones macizos y huecos, elementos de fijación especiales, soldaduras y adhesivos.

3.3.2 Tornillos, tuercas y arandelas

3.3.2.1 Generalidades

- (1)P Los tornillos, tuercas y arandelas deben cumplir las normas europeas EN, proyectos de normas europeas prEN y normas internacionales ISO existentes.
- (2) Los valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y de la resistencia última a tracción f_u , para ser adoptados como valores característicos en los cálculos, se dan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4
Valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y resistencia última a tracción f_u para tornillos y roblones macizos y huecos

Material	Tipo de elemento de fijación	Tipo de aleación	Estado de entrega	$f_{0,2}$ Límite elástico con 0,2% de deformación N/mm ²	f_u Resistencia última N/mm ²
Aleación de aluminio	Roblones macizos	5056A	O	145	270
		5086	O	100	240
		6082	T4 ¹⁾	-	200
			T6 ¹⁾	-	295
	Roblones huecos	5154A	O ó F	-	215
	Tornillos	6082	T6	260	310
		6061	T6	245	310
		2017A	T4	250	380
		7075	T6	440	510
Acero	Tornillos	4.6		240	400
		5.6		300	500
		6.8		480	600
		8.8		640	800
		10.9		900	1 000
Acero inoxidable	Tornillos	A4	A4-50	210	500
		A4	A4-70	450	700
		A4	A4-80	600	800

1) Colocado en frío.

3.3.2.2 Tornillos pretensados

- (1) Los tornillos de alta resistencia pueden ser utilizados como tornillos pretensados con apriete controlado, siempre que cumplan con los requisitos de los tornillos pretensados dados en las normas europeas EN, proyectos de normas europeas prEN y normas internacionales ISO existentes.
- (2) Podrán utilizarse otros tipos de tornillos adecuados como tornillos pretensados con apriete controlado, siempre que exista acuerdo entre el cliente, el proyectista y la autoridad competente.

3.3.3 Roblones

- (1)P Las propiedades de los materiales, dimensiones y tolerancias de los roblones macizos y huecos de aleación de aluminio deben cumplir con las normas EN, prEN o ISO (si y cuando estén disponibles).
- (2) Los valores mínimos garantizados del límite elástico con 0,2% de deformación $f_{0,2}$ y de la resistencia última f_u a adoptar como valores característicos en los cálculos, se dan en la tabla 3.4.

3.3.4 Material de aportación para soldadura

- (1)P Todos los materiales de aportación para soldadura deben cumplir con las normas europeas EN, proyectos de normas europeas prEN y normas internacionales ISO (si están disponibles) listadas en el apartado 1.3.3.

NOTA – prEN (WI 121 127 y WI 121 214) están en preparación.

- (2)P La selección del material metálico de aportación en la soldadura para las combinaciones de aleaciones que se unen deberá ser hecha en el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4 tablas B.5 y B.6, en conjunción con los requisitos de proyecto de la unión, véase apartado 6.6.3.1. Una guía sobre la selección del material metálico de aportación para el rango de metales base dado en éste documento se da en las tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5
Agrupaciones de aleaciones utilizadas en la tabla 3.6

Grupo de metales de aportación	Aleaciones
Tipo 3	3103
Tipo 4	4043A, 4047A ¹⁾
Tipo 5	5056A, 5356, 5556A, 5183
1) 4047A es específicamente usado para prevenir la rotura del metal de soldadura en uniones que tienen alta dilución y alta restricción. En la mayoría de otros casos es preferible 4043A.	
NOTA – Ver el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4 tabla B.5 para un campo de validez más amplio de los materiales metálicos de aportación y sus características.	

Tabla 3.6
Selección de materiales metálicos de aportación (véase tabla 3.5 para tipos de aleaciones)

Combinación de metales base¹⁾							
1ª Parte	2ª Parte						
	Fundiciones de Al-Si	Fundiciones de Al-Mg	Aleaciones serie 3000	Otras aleaciones serie 5000	5083	Aleaciones serie 6000	7020
7020	NR ²⁾	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 4	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	5556A Tipo 5 5556A	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 4	5556A Tipo 5 Tipo 4 ⁴⁾
Aleaciones serie 6000	Tipo 4 Tipo 4 Tipo 4	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 4 Tipo 4 Tipo 4	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 5 Tipo 4 Tipo 4	
5083	NR ²⁾	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	5556A Tipo 5 Tipo 5		
Otras aleaciones serie 5000	NR ²⁾	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 5 ³⁾ Tipo 5			
Aleaciones serie 3000	Tipo 4 Tipo 4 Tipo 4	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5	Tipo 3 Tipo 3 Tipo 3				
Fundiciones de Al-Mg	NR ²⁾	Tipo 5 Tipo 5 Tipo 5					
Fundiciones de Al-Si	Tipo 4 Tipo 4 Tipo 4						

1) Los materiales metálicos de aportación para las combinaciones de metales base a soldar se muestran en un recuadro, el cual se localiza en la intersección de los correspondientes metales base en fila y en columna. En cada recuadro, el metal de aportación que da la máxima resistencia de la soldadura se muestra en la línea superior; en el caso de aleaciones de la serie 6000 y aleaciones 7020, ésta estará por debajo de la resistencia que se obtiene con el completo tratamiento térmico del metal de base. El metal de aportación para la máxima resistencia a la corrosión se muestra en la línea intermedia. El metal de aportación para no tener aparición de grietas de soldadura se muestra en la línea inferior.

NR²⁾ = No recomendable. La soldadura de aleaciones conteniendo aproximadamente 2% o más de Mg con metal de aportación Al-Si, o viceversa, no es recomendable porque se forma suficiente precipitado de Mg₂Si en los límites de la zona fundida que fragiliza la soldadura. Donde sea inevitable véase el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4.

3) El comportamiento a corrosión del metal de soldadura es probable que sea mejor si su contenido de aleación es cercano a aquel del material base y no notablemente superior. En consecuencia para situaciones de servicio en potenciales ambientes corrosivos es preferible soldar 5454 con metal de aportación 5454. Sin embargo, en algunos casos esto sólo puede ser posible a expensas de la solidez de la soldadura, por tanto será necesario llegar a un compromiso.

4) Sólo en casos especiales, debido a la baja resistencia de la soldadura y a la elongación de la unión.

NOTA – Véase el proyecto de Normas Europea prEN 1011-4 tabla B.5 para un ámbito mayor de materiales base, metales de aportación y más detalles en la selección.

3.3.5 Adhesivos

- (1) Las familias recomendadas de adhesivos para ensamblar estructuras de aluminio son: epoxis modificadas simples y en dos partes, acrílicas modificadas, poliuretanos de una o dos partes; adhesivos anaeróbicos también pueden ser utilizados en el caso de enlaces de pasador y collar.

- (2) En la recepción del adhesivo, su frescura debe ser comprobada antes del curado por los siguientes métodos:
 - análisis químico;
 - análisis térmico;
 - medida de la viscosidad y del extracto seco en conformidad con las normas europeas EN, proyecto de norma europea prEN y normas internacionales ISO, relativas a adhesivos, existentes.
- (3) La resistencia de una unión adhesiva depende de los siguientes factores:
 - a) la resistencia específica del adhesivo en sí misma, la cual puede ser medida mediante ensayos normalizados (véase la Norma Internacional ISO 11003-2);
 - b) la aleación, y especialmente su límite elástico cuando la tensión de fluencia del metal es superada antes de que el adhesivo falle;
 - c) el tratamiento de preparación superficial: la conversión química y el anodizado dan generalmente mejor resultado a largo plazo que el desengrasado y la abrasión mecánica; el uso de imprimaciones es posible siempre que se pueda asegurar mediante ensayos de adherencia que la imprimación, la aleación y el adhesivo son compatibles;
 - d) el ambiente y el envejecimiento; la presencia de agua o atmósfera húmeda o ambiente agresivo pueden hacer bajar drásticamente la capacidad de comportamiento de la unión a largo plazo (especialmente en casos de pobre tratamiento de preparación superficial);
 - e) la configuración de la unión y la distribución de tensiones relacionada, es decir, la relación entre la máxima tensión de cortadura $\tau_{m\acute{a}x.}$ respecto a la media ($\tau_{m\acute{a}x.}/\tau_{mean}$) y la relación entre la máxima tensión de despegue $\sigma_{m\acute{a}x.}$ respecto a la tensión media de cortadura ($\sigma_{m\acute{a}x.}/\tau_{mean}$), ambos máximos ocurren en el extremo de la unión; las concentraciones de tensiones deberán ser reducidas tanto como sea posible; ellas dependen de la rigidez del ensamble (espesor, módulo de Young del adherente) y de la longitud de solape de la unión.
- (4)P El conocimiento de la resistencia específica del adhesivo no es suficiente para evaluar la resistencia de la unión, una mejor evaluación se obtiene mediante ensayos de laboratorio que tienen en cuenta la disposición del ensamble, es decir, la combinación de aleación/tratamiento de preparación/adhesivo, y el envejecimiento o el ambiente (véanse el apartado 6.8.3 y el capítulo 8).
- (5)P La resistencia obtenida en probetas en el laboratorio deberá ser usada como una línea de guía; se deben controlar las capacidades de comportamiento de la unión en condiciones reales: el uso de prototipos es recomendable (véase apartado 6.8.3).

3.4 Durabilidad y protección frente a la corrosión

3.4.1 Generalidades

- (1) En muchos casos los materiales normalizados listados en las tablas 3.1a y 3.1b pueden ser usados en acabados de fábrica, como extruidos o como soldados o como piezas fundidas sin necesidad de protección superficial.
- (2) La buena resistencia a la corrosión del aluminio y sus aleaciones es atribuible a la película de óxido protectora que se forma en la superficie del metal inmediatamente tras su exposición al aire. Esta película es normalmente invisible, relativamente inerte y se forma naturalmente con la exposición al aire o al oxígeno, y en muchos ambientes complejos que contengan oxígeno; la película protectora es asimismo autosellante.

- (3) En ambientes suaves una superficie de aluminio mantendrá su apariencia original durante años y no necesita protección para la mayoría de las aleaciones. En condiciones industriales moderadas existirá un oscurecimiento y será más rugosa la superficie. Cuando la atmósfera se convierte en más agresiva como en ciertos ambientes intensamente ácidos o alcalinos, la decoloración y la rugosidad superficial será peor, con óxidos pulverulentos blancos superficiales visibles e incluso la capa de óxidos puede ser soluble. El metal cesa de estar completamente protegido y una protección adicional es necesaria. Estas condiciones pueden darse también en hendiduras debido a las condiciones locales altamente ácidas o alcalinas, pero los agentes que tienen éste efecto extremo son relativamente pocos en número.
- (4) En las costas y entornos marinos la superficie será áspera y adquirirá una apariencia de tonalidad gris, similar a piedra, y será necesaria la protección de algunas aleaciones. Cuando el aluminio se sumerge en agua pueden ser necesarias precauciones especiales.
- (5) Cuando el ataque superficial tiene lugar sigue unas curvas de corrosión, para aluminio y aleaciones de aluminio, que adoptan habitualmente forma exponencial, con una pérdida inicial de reflectividad después de poco tiempo a la intemperie. Después de esto existen muy pequeños cambios posteriores en periodos muy largos de tiempo. En exposición a la atmósfera, el estado inicial se puede dar en pocos meses o en dos o tres años, seguido por pequeños, si existen, cambios posteriores en periodos de veinte, treinta o incluso ochenta años. Semejante comportamiento es consecuente con todas las condiciones de exposición libre en el exterior y para todas las internas o condiciones protegidas, excepto cuando se pueden desarrollar extremos de acidez o alcalinidad. Los ambientes tropicales no son en general más perjudiciales al aluminio que los ambientes cálidos, aunque ciertas aleaciones de la serie 5000 se vean afectadas por largas exposiciones a altas temperaturas ambientales, particularmente cuando se encuentran en ambiente marino.

3.4.2 Durabilidad

- (1) Las aleaciones de aluminio listadas en las tablas 3.1a y 3.1b están subdivididas en tres tasas de durabilidad; A (excelente), B y C en orden descendente de durabilidad. Estas tasas se usan para determinar la necesidad y el grado de protección requerido. En las construcciones que emplean más de una aleación, incluyendo metales de aportación en construcciones soldadas, la protección deberá estar de acuerdo con la que tenga menores tasas de durabilidad.
- (2)P Cuando se use otra aleación estructural de aluminio distinta a las de las normas listadas en el apartado 1.3.1, deberán solicitarse los datos adecuados para asignar a la aleación la categoría de durabilidad, así como para justificar su aplicación.
- (3) Para más consejos sobre la durabilidad de las aleaciones de aluminio véase anexo B.

3.4.3 Protección frente a la corrosión

3.4.3.1 Protección en su totalidad frente a la corrosión

- (1) La necesidad de suministrar una protección en su totalidad frente a la corrosión de las estructuras construidas con aleaciones o combinaciones de aleaciones listadas en las tablas 3.1a y 3.1b, cuando están expuestas a diferentes ambientes, se da en la tabla 3.7. Los métodos de suministrar la protección frente a la corrosión en estos ambientes se detallan en el apartado 7.7. Para la protección de chapas utilizadas en techumbres y paredes véase el proyecto de Norma Europea prEN 508-2:1996.

Tabla 3.7
Protección general frente a la corrosión de estructuras de aluminio

Tasa de durabilidad de la aleación	Espesor de material mm	Protección de acuerdo con el entorno							
		Atmosférico						Sumergido	
		Rural	Industrial/urbano		Marino			Agua fría	Agua de mar
			Moderado	Severo	No industrial	Moderado	Severo		
A	Todos	0	0	P	0	0	P	0	(P)
B	< 3	0	(P)	P	(P)	(P)	P	P	P
	≥ 3	0	0	P	0	(P)	P	(P)	P
C	Todos	0	(P) ²⁾	P	(P) ²⁾	(P) ²⁾	P	(P) ¹⁾	NR
0 Normalmente no se necesita protección. P Normalmente se precisa protección excepto en casos especiales, véase apartado 3.4.3.1, que deben ser decididos por el proyectista. (P) La necesidad de protección depende de las condiciones especiales de la estructura, véase apartado 3.4.3.1, que deben ser decididas por el proyectista. NR No se recomienda la inmersión en agua de mar. 1) Para 7020, sólo se requiere protección en la Zona Afectada térmicamente (HAZ) si no se aplica tratamiento térmico después de soldar. 2) Cuando a 7020 no se le aplica tratamiento térmico después de soldar, la necesidad de proteger la zona HAZ deberá ser comprobada con respecto a las condiciones, véase apartado 3.4.3.1. NOTA — Para la protección de chapas usadas en techumbres y paredes, véase el proyecto de Norma Europea prEN 508-2:1996.									

- (2) Al seleccionar la columna apropiada en la tabla 3.7 para un ambiente atmosférico se debe recordar que pueden existir localidades dentro de una región que tienen “microclimas” significativamente diferentes de las características ambientales de la región como conjunto. Una región denominada “rural” puede tener ambientes locales más fielmente parecidos a una atmósfera industrial en sitios cercanos a fábricas, si están viento abajo. Similarmente, un lugar cerca del mar pero con instalaciones compactas en las orillas puede, con los adecuados vientos predominantes, tener las características de una atmósfera industrial, más bien que ambiente marino. El ambiente no es necesariamente el mismo para una estructura interna que para una externa.
- (3) La aparición de la corrosión no depende sólo de la susceptibilidad del material y de las condiciones globales; en la práctica depende más del periodo de tiempo durante el cual la humedad puede estar presente en conjunción con suciedad atrapada y agentes corrosivos. Las zonas de los elementos, o los detalles estructurales, donde la suciedad se agarra o retiene son más críticos que aquellas zonas en las que la lluvia, y el viento que empuja la lluvia, limpian la superficie y el secado se produce rápidamente.
- (4) Para asignar la necesidad y el grado de protección requerido deberá ser considerada la historia de la vida útil de la estructura. Para estructuras de vida corta pueden resultar aceptables medidas menos severas o ausencia de protección. Cuando se planifica la inspección y el mantenimiento para que revele el ataque de la corrosión en un estado incipiente, lo cual permite tomar acciones de remedio, puede permitirse relajar el grado inicial de protección previsto. Sin embargo, cuando la inspección es impracticable y la evidencia del ataque de corrosión no será revelada, el grado de protección inicial deberá ser superior. No obstante la necesidad de protección en aquellos casos marcados (P) en la tabla 3.7 deberá ser establecida en conjunción por el ingeniero, el fabricante y, si es necesario, un especialista en corrosión.
- (5) Debido a estos factores, se pueden dar condiciones localizadas de incremento de la severidad. Por ello es aconsejable estudiar las condiciones precisas que prevalecen en el sitio real antes de decidir sobre la apropiada columna de ambiente en la tabla 3.7.
- (6)P Cuando se usan perfiles tubulares se deberá tener en cuenta la necesidad de proteger el hueco interno para prevenir la corrosión que surge debido al ingreso de agentes corrosivos. Debido a las dificultades de pintar tales perfiles, las capas de conversiones químicas pueden resultar beneficiosas. Cuando el hueco interno está sellado efectivamente, la protección interna no es necesaria.

3.4.3.2 Contactos metal con metal, incluyendo uniones

- (1)P También deberán hacerse consideraciones sobre el contacto de superficies en hendiduras y contactos con ciertos metales o polvillos de ciertos metales, los cuales pueden causar ataque electroquímico al aluminio. Tales condiciones pueden ocurrir en el interior de una estructura en las uniones. Las superficies de contacto y las uniones de aluminio a aluminio o a otros metales y las superficies de contacto en uniones atornilladas, roblonadas, soldadas y por fricción con tornillos de alta resistencia deberán tener protección adicional a la requerida por la tabla 3.7, así como a la definida en la tabla 3.8. Detalles del procedimiento de protección frente a la corrosión requerido se dan en el apartado 7.7.3. Para la protección de contactos metal con metal, incluyendo juntas para chapas usadas en techumbres y paredes, véase el proyecto de Normas Europea prEN 508-2:1996.

3.4.3.3 Contacto con otros materiales no metálicos

- (1) Contacto con hormigón, albañilería o yeso

El aluminio en contacto con hormigón denso compactado, albañilería o yeso en un ambiente seco sin polución o en un ambiente suave deberá ser recubierto en la superficie de contacto con una capa de pintura bituminosa, o un recubrimiento que suministre similar protección. En un ambiente industrial o marino la superficie de contacto del aluminio deberá ser recubierta con un mínimo de dos capas de pintura bituminosa de alta eficacia; la superficie de contacto del metal, preferiblemente, será pintada de forma similar. La inmersión del contacto del aluminio con tales materiales no es recomendable, pero si es inevitable, es recomendable la separación entre los materiales mediante el uso de una masilla adecuada o de una capa de alta eficacia que corte la trayectoria de la humedad.

El hormigón ligero y los productos similares requieren consideraciones adicionales cuando el agua o la humedad ascendente puede extraer un suministro estable de álcalis agresivos del cemento. El agua alcalina puede atacar entonces a otras superficies de aluminio diferentes a las que están en contacto directo.

- (2) Embebido en hormigón

Las superficies de aluminio antes del embebido deberán ser protegidas con un mínimo de dos capas de pinturas bituminosas o betún caliente, y las capas deben extenderse en un mínimo de 75 mm sobre la superficie del hormigón después del embebido.

Cuando el hormigón contenga cloruros (por ejemplo, como aditivos o debido al uso de áridos marinos), un mínimo de dos capas de proyección de pintura plástica de alquitrán de hulla deberá aplicarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante y el montaje final deberá ser sobrepintado localmente con el mismo material, después de que el hormigón haya completado el fraguado, para sellar la superficie. Se tendrá un cuidado especial cuando ocurran contactos metálicos entre las partes embebidas de aluminio y cualquier armadura de acero.

- (3) Contacto con madera

En un ambiente industrial, húmedo o marino la madera deberá ser imprimada y pintada de acuerdo con la buena práctica.

Algunos preservantes de la madera pueden ser perjudiciales para el aluminio. Los siguientes preservantes son generalmente aceptados como seguros para usar con aluminio sin especiales precauciones:

- Creosota de alquitrán de hulla; aceite de alquitrán de hulla; naftalenos clorados; naftanatos de zinc; pentaclorofenol; óxidos orgánicos-estaño; ortofenilfenol; fluoro-cromo-arsénico-dinitrofenol.

Los siguientes preservantes deberán ser sólo usados en situaciones de sequedad y donde la superficie de contacto del aluminio con la madera tratada tenga una aplicación sustancial de sellador.

- Naftanato de cobre; cobre-cromo; cobre-cromo-arsénico; bórax-ácido bórico.

Los siguientes preservantes no deberán ser usados en asociación con el aluminio:

- cloruro de zinc; sales de mercurio; sulfato de cobre.

El roble, el castaño y el cedro rojo del oeste, a menos que estén bien curados, es probable que sean perjudiciales al aluminio, particularmente cuando existen elementos de fijación pasantes.

(4) Contacto con suelos

La superficie del metal deberá estar protegida con al menos dos capas de pintura bituminosa, betún caliente, o proyección de pintura plástica de alquitrán de hulla. Envoltorios protectores adicionales pueden ser usados para prevenir daños mecánicos en el recubrimiento.

(5) Inmersión en agua

Cuando las piezas de aluminio están inmersas en agua dulce o de mar, incluyendo aguas contaminadas, el aluminio deberá ser preferentemente de tasa de durabilidad A, con elementos de fijación de aluminio o de acero resistente a la corrosión o conexiones soldadas. Las tablas 3.7 y 3.8 dan los requisitos de protección para inmersión en agua fresca y en agua de mar.

Adicionalmente el ingeniero deberá obtener informe competente sobre el contenido de oxígeno, número pH, contenido químico o metálico, particularmente cobre, y de la cantidad de movimiento del agua, así como de aquellos factores que puedan afectar al grado de protección requerido.

(6) Contacto con productos químicos usados en la industria de la edificación

Fungicidas y desencofrantes pueden contener componentes metálicos basados en cobre, mercurio, estaño y plomo los cuales, cuando están mojados o en condiciones de humedad pueden causar corrosión del aluminio. Los efectos perjudiciales pueden ser limitados mediante protección de las superficies de contacto, las cuales pueden tener hendiduras o filtración por la actuación de los productos químicos.

Algunos materiales de limpieza pueden afectar a la superficie de aluminio. Cuando tales materiales se usan para limpiar aluminio u otros materiales en la estructura, se tendrá especial cuidado de asegurar que los efectos no serán perjudiciales para el aluminio. Muchas veces el rápido y adecuado aclarado será suficiente, mientras que en otras situaciones pueden ser necesarias medidas temporales para proteger el aluminio del contacto con los limpiadores.

(7) Contacto con materiales de aislamiento usados en la industria de la edificación

Productos tales como fibras de vidrio, poliuretano y varios productos de aislamiento pueden contener agentes corrosivos, los cuales pueden ser extraídos bajo condiciones de humedad en detrimento del aluminio. Los materiales de aislamiento deberán ser ensayados sobre la compatibilidad con el aluminio bajo condiciones húmedas y salinas. Cuando exista duda se deberá aplicar un sellador a las superficies afectadas de aluminio.

3.5 Criterios de selección de aleaciones de aluminio

- (1) La elección de una aleación de aluminio o aleaciones para cada estructura se determina por una combinación de un número de factores: resistencia, durabilidad, propiedades físicas, soldabilidad, formabilidad y disponibilidad tanto en la particular forma como en la aleación requerida. Los materiales listados en las tablas 3.1a y 3.1b se describen en el anexo B en relación con los términos de los factores anteriores.

Tabla 3.8
Protección adicional en los contactos metal con metal para combatir los efectos de las hendiduras y los efectos galvánicos

Metal a ser unido con aluminio	Material del tornillo o roblón	Protección de acuerdo con el ambiente																			
		Atmosférico								Marino						Sumergido					
		Rural				Urbano industrial				No industrial		Industrial				Agua dulce		Agua de mar			
		Seco, sin polución		Suave		Moderado		Severo				Moderado		Severo							
		M	B/R	M	B/R	M	B/R	M	B/R	M	B/R	M	B/R	M	B/R	M	B/R	M	B/R		
Aluminio	Aluminio	O	0	O	0	O/X	1	X	1 3	O/X	1 (3)	O/X	1 (3)	X	1 3	X	2 3	X	2 3		
	Acero inoxidable		0		0		0		3		(3)		3		3		3 4				
	Acero recubierto de zinc		0		(4)		(3) (4)		a/g		3 (4)		(3) (4)		a		(3) (4)		a/z/g	3 (4)	3 4
Acero recubierto de zinc	Aluminio	O	0	O	0	O/X	1	X	1 3	O/X	1 (3)	O/X	1 (3)	X	1 3	X	2 3	Y (Z) z/(g)	2 3 4		
	Acero inoxidable		0		0		0		3		0		(3)		3		3 (4)		Y	3 4	
	Acero recubierto de zinc		0		(4)		a		(4)		a/z/g		3 (4)		a		(3) (4)		a	3 (4)	a/z/g
Acero inoxidable	Aluminio	O	0	O	0	O/X	1	X	1 3	O/X	1 (3)	O/X	1 (3)	X	1 3	Y (X) (Z)	2 3 4	Y (Z) (g)	2 3 4		
	Acero inoxidable		0		0		0		3		0		(3)		3		(X)		3	Y	3 4
	Acero recubierto de zinc		0		(4)		a		(4)		a/z/g		3 (4)		a		(3) (4)		a	(3) (4)	3 (4)

NOTA 1 – Detalles de procedimientos de protección frente a corrosión indicados por O, X, Y, Z, 0, 1, 2, 3, 4, y a, z, g anteriores, están dados en 7.7.3.

NOTA 2 – Cuando se da más de un procedimiento todos pueden ser adecuadamente aplicados.

NOTA 3 – Para la protección de chapas usadas en cubiertas y paredes véase el proyecto de Norma Europea prEN 508-2:1996.

NOTA 4 – Valores entre paréntesis () para ser decididos por el proyectista.

NOTA 5 – Para aceros inoxidables véase también el Eurocódigo 3 Parte 1.4.

4 ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO

4.1 Bases

- (1) Los estados límites de servicio para estructuras de aluminio son:
- deformaciones o flechas que afecten adversamente al uso de la estructura (incluyendo el mal funcionamiento de máquinas o servicios);
 - deformaciones o flechas que causen daños a los acabados de elementos no estructurales;
 - deformaciones o flechas que afecten adversamente a la apariencia de la estructura;
 - distorsiones de forma debidas a la construcción gradual o cambios dimensionales en estructuras que tienen que ser montadas y desmontadas frecuentemente;
 - vibraciones que causen daños a los acabados de elementos no estructurales;
 - vibraciones que causen incomodidad a los usuarios de la estructura o daño al equipamiento soportado por la estructura.

4.2 Flechas

4.2.1 Valores límites de las flechas

- (1) Los valores límites para las flechas serán acordados entre el proyectista, el cliente y la autoridad competente.
- (2) En ausencia de acuerdos especiales entre proyectista y cliente, una estructura puede ser juzgada aceptable en términos de deformación si los límites dados posteriormente son satisfechos.

4.2.2 Flechas irrecuperables

- (1) Debe ser tenido en cuenta que los elementos cuyas resistencias estáticas han sido calculadas de acuerdo con el capítulo 5 de ésta norma europea experimental no sufrirán deformaciones permanentes significativas bajo la acción de combinaciones raras de cargas. Esto se aplica a todos los grupos de aleaciones. Hay que tener cuidado con las vigas híbridas.

4.2.3 Flechas elásticas recuperables

- (1) Los valores límites para las flechas verticales dadas a continuación se refieren a vigas simplemente apoyadas, tal como la mostrada en la figura 4.1, en las cuales:

$$\delta_{m\acute{a}x.} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0 \quad (4.1)$$

donde

$\delta_{m\acute{a}x.}$ es la flecha en el estado final relativa a la línea recta que une los apoyos;

δ_0 es la contraflecha inicial (combadura) de la viga en estado de descarga (estado 0);

δ_1 es la variación de la flecha de la viga debida a las cargas permanentes inmediatamente después de cargada (estado 1);

δ_2 es la variación de la flecha de la viga debida a las cargas variables más cualquier deformación dependiente del tiempo debida a las cargas permanentes (estado 2).

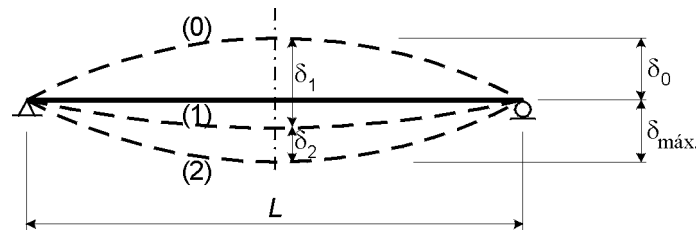


Fig. 4.1 – Flechas verticales a considerar

- (2) Para estructuras de edificios no se deben superar los siguientes valores. Las flechas elásticas deben ser determinadas para las combinaciones de cargas frecuentes.

- (3) Voladizos que soportan pisos: $\boxed{L/180}$

Vigas que soportan escayolas u otros acabados frágiles: $\boxed{L/360}$

Correas y largeros para el revestimiento:

a) sólo bajo carga permanente: $\boxed{L/200}$

b) bajo la peor combinación de carga permanente, impuesta, viento y nieve: $\boxed{L/100}$

Parteluces de muros cortina y travesaños: $\boxed{L/250}$ o $\boxed{15 \text{ mm}}$
cualquiera que sea el menor. En el proyecto se ignorará el incremento de rigidez por los productos de vidrio.

NOTA – En orden a prevenir que la durabilidad de los productos de vidrio y su comportamiento no se vean afectados negativamente, no se deberían tomar valores superiores en las flechas.

Cabezas de columnas: flecha horizontal $\boxed{L/300}$

(donde L es la longitud entre apoyos)

4.2.4 Cálculo de las flechas elásticas

- (1) Si la rigidez real no se tiene en cuenta interactivamente en el cálculo de flechas, se puede utilizar el siguiente procedimiento simplificado. El cálculo de flechas elásticas estará basado, generalmente, en las propiedades de la sección transversal bruta de la pieza. Sin embargo, para secciones esbeltas puede ser necesario adoptar las propiedades de la sección reducida para tener en cuenta el pandeo local (véase apartado 5.4.5). Debido a la restricción de los efectos de las particiones (tabiquillos) y otros efectos de rigidización, los efectos de segundo orden y los cambios en la geometría también deberían ser considerados.
- (2) Puede ser ventajoso, para niveles reducidos de tensiones en secciones clase 4, para calcular el espesor eficaz, utilizar el siguiente momento de inercia ficticio del área I_{fic} , constante a lo largo de la viga

$$I_{fic} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{f_o} (I_{gr} - I_{eff}) \quad (4.2)$$

donde

I_{gr} es el momento de inercia del área de la sección transversal bruta;

I_{eff} es el momento de inercia del área de la sección transversal eficaz en el estado límite último, el cual tiene en cuenta el pandeo local, véase apartado 5.4.5;

σ_{gr} es la máxima tensión de compresión debida a la flexión en el estado límite de servicio, basado en la sección transversal bruta (positiva en la fórmula);

f_o es la resistencia característica para flexión y en la totalidad de la fluencia (véase apartado 5.3.5).

- (3) Las flechas deberán calcularse teniendo también en cuenta la rigidez al giro de cualquier unión semirrígida, y la posible aparición de deformaciones plásticas locales en el estado límite de servicio.

4.3 Vibraciones

4.3.1 Resonancia

- (1)P Las frecuencias naturales de las estructuras o de los componentes estructurales deberán ser lo suficientemente diferentes de las fuentes de excitación para evitar la resonancia. En las comprobaciones sobre la incompatibilidad de las amplitudes de las vibraciones se deberán usar cargas nominales. Si se cree que la vibración puede ser un problema potencial, particularmente las vibraciones inducidas por las rachas y los vórtices debidas al viento, se deberá analizar la posibilidad de fallo por fatiga.

4.3.2 Amortiguamiento

- (1) Cuando los efectos de las vibraciones sean apreciables, las características de amortiguamiento de la forma de la estructura y de los materiales deberán ser tenidas en cuenta. La necesidad de suministrar un amortiguamiento artificial deberá ser examinada, y puede ser necesario hacer ensayos con prototipos de elementos.

4.3.3 Incomodidad de los usuarios.

- (1) La vibración de estructuras con bajas frecuencias naturales puede causar incomodidad a los usuarios y deberá ser considerada en el proyecto.
- (2) La más baja frecuencia natural de estructuras portantes sobre las cuales la gente anda (por ejemplo, suelos, pasarelas peatonales, pasadizos) no deberá ser menor que $\frac{3}{s}$ ciclos/segundo. Esta limitación puede ser relajada si la estructura está altamente amortiguada.
- (3) La más baja frecuencia natural de estructuras portantes sobre las cuales la gente baila o salta de forma rítmica no deberá ser menor que $\frac{5}{s}$ ciclos/segundo.

4.4 Efectos dinámicos

4.4.1 Cargas dinámicas

- (1) Los estados límites de deformación y flechas se aplican tanto para cargas dinámicas como para estáticas. Las fuerzas para efectos dinámicos son tratadas como fuerzas impuestas cuando se escogen coeficientes de carga. Si se usa un “coeficiente de amplificación dinámica” el proyectista deberá saber que éste procedimiento no es recomendable si no se tiene en cuenta la respuesta de la estructura.

5 ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (PIEZAS)

5.1 Bases

5.1.1 Generalidades

- (1)P Las estructuras de aluminio y los elementos que las constituyen se dimensionarán de tal modo que se satisfagan las condiciones básicas de cálculo para los estados límites últimos dados en el capítulo 2. Las condiciones básicas para el diseño a fatiga se dan en la Parte 2. Las recomendaciones de proyecto son para estructuras sometidas a condiciones atmosféricas normales.
- (2)P El coeficiente parcial de seguridad γ_M adoptará los siguientes valores para elementos soldados, roblonados, atornillados o adheridos:
- resistencia de secciones transversales de la Clase 1:¹⁾ $\gamma_{M1} = \boxed{1,10}$
 - resistencia de secciones transversales de las Clases 2 ó 3:¹⁾ $\gamma_{M1} = \boxed{1,10}$
 - resistencia de secciones transversales de la Clase 4:¹⁾ $\gamma_{M1} = \boxed{1,10}$
 - resistencia de una pieza solicitada a pandeo: $\gamma_{M1} = \boxed{1,10}$
 - resistencia de la sección neta con agujeros de tornillos: $\gamma_{M2} = \boxed{1,25}$

Los valores de γ_M para uniones roblonadas, atornilladas, soldadas o adheridas se dan en el capítulo 6 (uniones sometidas a cargas estáticas).

- (3) Las reglas dadas para el cálculo de elementos supone que los esfuerzos y los momentos en los elementos han sido previamente obtenidos de una manera apropiada del conjunto del análisis de la estructura completa. Una guía de los métodos de análisis se da en el apartado 5.2.

5.1.2 Piezas traccionadas

- (1)P En los elementos solicitados a tracción deberá comprobarse la resistencia de las secciones transversales (véase apartado 5.7).

5.1.3 Piezas comprimidas

- (1)P En los elementos solicitados a compresión deberá comprobarse la resistencia de las secciones transversales y la resistencia a pandeo (véase apartado 5.8).

5.1.4 Piezas flectadas

- (1)P En los elementos solicitados a flexión deberá comprobarse:
- la resistencia a la flexión (véase apartado 5.6.2);
 - la resistencia al cortante (véase apartado 5.6.3);
 - la resistencia a la combinación de flexión y cortante (véase apartado 5.6.4);
 - la resistencia del alma a las cargas localizadas (véase apartado 5.6.5);
 - la resistencia al pandeo lateral con torsión (véase apartado 5.6.6).

1) Para la clasificación de las secciones transversales véase el apartado 5.4.

5.1.5 Piezas solicitadas a flexión compuesta y cortante

- (1)P En los elementos solicitados por una combinación de esfuerzo axial, momento y cortante deberá comprobarse la resistencia de las secciones transversales frente a la combinación de esfuerzos y la resistencia a pandeo bajo combinación de esfuerzos (véase apartado 5.9).

5.1.6 Pórticos

- (1)P En los pórticos deberá comprobarse:
- la resistencia de los elementos;
 - la resistencia de las uniones entre elementos (véase capítulo 6);
 - la resistencia a la estabilidad global.

5.1.7 Planchas

- (1)P En las planchas rigidizadas y sin rigidizar, que no forman parte de vigas de alma llena, deberá comprobarse:
- la resistencia de la sección transversal sometida a compresión uniforme (véanse apartados 5.10.2 y 5.11.2);
 - la resistencia bajo momentos actuantes en el plano o gradiente longitudinal de tensiones (véanse apartados 5.10.3, 5.10.4, 5.11.3, 5.11.4);
 - la resistencia sometida a cortante (véanse apartados 5.10.5 y 5.11.5);
 - la resistencia de la sección transversal sometida a la combinación de esfuerzos y la resistencia al pandeo sometida a combinación de esfuerzos (véase apartado 5.10.6).
- (2)P En las vigas de alma llena deberá comprobarse:
- la resistencia de los rigidizadores longitudinales y/o transversales de la viga de alma llena sometida a flexión en el plano, cortante y combinación de efectos de flexión, cortante y esfuerzos axiales (véanse apartados 5.12.2, 5.12.3, 5.12.4 y 5.12.8);
 - la resistencia de los rigidizadores de las almas (véase apartado 5.12.5);
 - la resistencia de las almas a los esfuerzos transversales aplicados a través de las alas (véase apartado 5.12.6);
 - la resistencia de las almas con pliegues o con rigidizadores muy juntos (véase apartado 5.12.7);
 - la resistencia de las vigas con rigidizadores en los apoyos (véase apartado 5.12.3).

5.1.8 Uniones (véase capítulo 6)

- (1)P Las uniones entre elementos estructurales, o entre los componentes de un elemento ensamblado (prefabricado), o entre detalles locales y elementos estructurales, deberán ser diseñadas para alcanzar los estados límites últimos de resistencia estática y de fatiga. En las uniones deberá comprobarse:
- la resistencia de los elementos de fijación, roblones y tornillos (en diseños no soldados) bajo cortante, tracción axial, combinación de cortante y tracción, y aplastamiento;
 - la resistencia de los tornillos de alta resistencia trabajando a rozamiento (cuando se usa este efecto) en términos de capacidad de fricción, pretensado y coeficiente de rozamiento;
 - la resistencia de pasadores (en uniones articuladas) bajo cortante o flexión;
 - la resistencia de las soldaduras (en diseños soldados), a cortadura o bajo tensiones normales para las soldaduras a tope y para las soldaduras en ángulo;
 - la resistencia de las zonas afectadas térmicamente (HAZ) adyacentes a las soldaduras;
 - la resistencia de las uniones adherentes cuando la adherencia es utilizada como método de unión.

5.1.9 Fatiga (véase Parte 2)

- (1)P Cuando las estructuras estén sometidas a cargas variables repetidas son susceptibles de agotarse por fatiga, y se deberá comprobar su resistencia a fatiga. La capacidad de soportar fatiga está afectada particularmente por las siguientes condiciones:
- una proporción alta de cargas dinámicas respecto a las estáticas;
 - uniones soldadas entre elementos y entre dispositivos locales de unión y elementos;
 - la complejidad del detalle de unión;
 - las bajas frecuencias naturales de los elementos estructurales;
 - los ambientes térmicos y químicos de baja calidad.
- (2)P En la medida de lo posible, las estructuras de aluminio se deberán proyectar teniendo en cuenta que deben ser capaces de suministrar un aceptable grado de seguridad a lo largo de su vida. Los métodos de evaluación de la fatiga deberán ser planificados para asegurar que la probabilidad de que se produzca fallo por fatiga durante la vida de la estructura es comparable con la probabilidad de que se produzca fallo por cualquier otro estado límite último.
- (3) El cálculo a fatiga estará basado en tensiones nominales reales (medias), o en tensiones locales reales, calculadas mediante análisis global elástico y con una sección transversal eficaz en la cual se ha reducido el área para tener en cuenta los pandeos locales, pero sin tener en cuenta las zonas afectadas térmicamente. En un alma en cortante se deberá utilizar una tensión nominal de cortadura basada en un espesor efectivo $1,7 \rho_c t_w$ (pero no mayor de t_w) (véanse apartados 5.12.3 y 5.12.4).

5.1.10 Vibraciones

- (1)P La resistencia a la vibración deberá ser evaluada por medio de comprobaciones de fatiga y comprobando las características de amortiguamiento de la estructura y sus materiales. Esto se aplica particularmente en:
- estructuras que soporten maquinaria de elevación o cargas rodantes;
 - estructuras que soporten maquinaria que produzca vibraciones;
 - estructuras sujetas a oscilaciones inducidas por el viento;
 - estructuras sujetas a oscilaciones inducidas por las personas.

5.1.11 Secciones híbridas

- (1)P La capacidad de una sección híbrida, que contenga aleaciones de aluminio de diferentes resistencias, deberá establecerse por consideración de la resistencia de las diferentes partes, habiendo tenido en cuenta las clases de las partes.
- (2) Si se usa una sección híbrida de aluminio y acero, se deberá controlar el comportamiento en fluencia y considerar las deformaciones térmicas.

5.2 Cálculo de solicitaciones internas (esfuerzos y momentos internos)

5.2.1 Análisis global

- (1)P Las solicitaciones internas (esfuerzos y momentos internos) de una estructura estáticamente determinada se obtendrán utilizando las leyes de la Estática.
- (2)P Cuando se calculan las solicitaciones internas de una estructura estáticamente indeterminada se debe tener en cuenta que las deformaciones podrán ser el resultado de deformaciones elásticas y plásticas o pandeos locales. También debidas a efectos del arrastre por cortante cuando éste sea importante.

- (3) Las solicitaciones internas se deberán determinar utilizando cualquiera entre:

- a) análisis global elástico (lineal o no lineal);
- b) análisis global plástico (sin o con endurecimiento).

Los diferentes métodos de análisis se describen en el Anexo C (informativo)

- (4) Se podrá utilizar el análisis global elástico en todos los casos.
- (5)P Se utilizará el análisis global plástico únicamente cuando las secciones transversales de los elementos satisfagan los requisitos especificados para la Clase 1 en el apartado 5.4. Para las secciones transversales de las Clases 2, 3 y 4 no está permitido. Para las secciones Clase 1 siempre hay que pedir el control de la capacidad de deformación en relación con la demanda de ductilidad del esquema estructural (véase Anexo D (informativo)).
- (6) Para más detalles sobre los métodos de análisis global véase el Anexo D (informativo).
- (7) Las hipótesis de cálculo para las uniones deben estar de acuerdo con aquellas que se dan en el Anexo C (informativo).

5.3 Resistencia de las secciones transversales

5.3.1 Generalidades

- (1) Todos los elementos deberán satisfacer los requisitos en los estados límites últimos y en los estados límites de servicio. Los elementos están formados habitualmente por piezas extruidas, planchas, chapas, tubos, piezas forjadas, o una combinación de estas. Los proyectistas que deseen emplear piezas fundidas podrán también hacerlo en estrecha consulta con el fabricante de las mismas.
- (2) Cuando se hace referencia a información de cálculo en forma de expresiones matemáticas, se permite al proyectista usar en su lugar diagramas o tablas derivados de dichas expresiones. Los elementos pueden ser calculados de forma segura utilizando las recomendaciones del capítulo 5, pero se han suministrado apéndices para cubrir la totalidad de tratamiento de ciertos aspectos del comportamiento de los elementos. Su uso puede conducir a estructuras más económicas y ligeras.

5.3.2 Resistencia de cálculo

- (1) Las expresiones dadas para la resistencia de cálculo de un elemento (las cuales no pueden ser menores que los efectos de cálculo de las acciones en el elemento incrementados por un coeficiente de cargas) contienen resistencias características (f_o , f_a , f_v , f_s) relativas a las propiedades del material. Estas están definidas en el apartado 5.3.5. Las expresiones también contienen el coeficiente parcial de seguridad γ_M para la resistencia, véase apartado 5.1.1.
- (2) La resistencia de la sección transversal de un elemento puede estar limitada por:
- La resistencia plástica de la sección transversal.
 - La resistencia de la sección neta cuando hay agujeros para elementos de fijación.
 - Verificación de la estabilidad local de los elementos componentes de la sección transversal.
- (3) Cuando sea apropiado, también deberá ser verificada la estabilidad del conjunto de la estructura.
- (4) La resistencia de piezas con elementos esbeltos puede ser reducida como resultado de un prematuro pandeo local. La propuesta de cálculo de una pieza en compresión uniforme, o en compresión como resultado de flexión, es controlada mediante la clasificación de la sección en términos de susceptibilidad al pandeo local. La clasificación de las secciones se discute en el apartado 5.4.

5.3.3 Propiedades de la sección

- (1)P Las propiedades de la sección transversal bruta se establecerán mediante el uso de las dimensiones especificadas. Los agujeros para los elementos de fijación no necesitan ser deducidos, pero si habrá que hacerlo para aperturas mayores. Las materiales de junta y las presillas no se deberán incluir.
- (2) El área neta de un elemento (A_{net}) o de la sección transversal de un elemento deberá ser el área bruta menos las apropiadas deducciones por agujeros y otras aperturas. Cuando se calculan las propiedades de la sección neta, la deducción para un único agujero del elemento de fijación deberá ser el área bruta de la sección transversal del agujero en el plano de su eje. Para agujeros avellanados deberá ser descontada la adecuada porción avellanada. Siempre que se cumpla que los agujeros de los elementos de fijación no estén al tresbolillo, el área total a ser deducida para los agujeros de los elementos de fijación deberá ser como máximo la suma de las áreas de las secciones de los agujeros en cualquier sección perpendicular al eje del elemento.
- (3) Cuando los agujeros de los elementos de fijación (tornillos o roblones) están al tresbolillo, el área total a ser deducida para los agujeros de los elementos de fijación deberá ser la mayor de:
- a) la deducción para agujeros no dispuestos al tresbolillo dada en (2);
 - b) la suma de las áreas de las secciones de todos los agujeros en cualquier diagonal o línea en zigzag progresivamente extendidas a través del elemento o parte del elemento, menos

$$s^2t / (4p) \text{ y } 0,65 st \quad (5.1)$$

para cada distancia entre líneas de agujeros, donde

s es el paso del tresbolillo (separación longitudinal);

p es la distancia entre centros de dos agujeros similares medidos en perpendicular al eje del elemento (separación transversal);

t es el espesor (o espesor eficaz en un elemento conteniendo material afectado térmicamente HAZ).

En un angular o en otro elemento con agujeros en más de un plano, la distancia p deberá ser medida a lo largo del centro del espesor del material.

- (4) En el cálculo de uniones en elementos comprimidos o partes comprimidas de elementos, normalmente, no se precisa deducir los agujeros de los elementos de fijación (tornillos o roblones), excepto para los agujeros alargados (ranurados). Si en la unión de elementos comprimidos o partes comprimidas de elementos se acepta la no deformación plástica de la sección neta, la deducción de los agujeros deberá ser tenida en cuenta.
- (5) En el cálculo de uniones en otros tipos de elementos se aplican para tracción las previsiones dadas en el apartado 5.7.3.
- (6) Los agujeros de los elementos de fijación (tornillos o roblones) en el ala traccionada no necesitan ser tenidos en cuenta siempre que la tensión en el ala traccionada cumpla:

$$0,9 \frac{A_{net}}{A_g} \geq \frac{f_o / \gamma_{M1}}{f_a / \gamma_{M2}} \quad (5.2)$$

Cuando A_{net}/A_g es menor que este límite, se debe adoptar un área reducida del ala.

- (7) Los agujeros de los elementos de fijación (tornillos o roblones) en la zona traccionada del alma no necesitan ser tenidos en cuenta, siempre que el límite dado en la expresión anterior se satisfaga en la zona de tracción completa, la cual comprende el ala traccionada más la zona traccionada del alma.

- (8) Los agujeros de los elementos de fijación (tornillos o roblones) no necesitan ser tenidos en cuenta para la verificación de cortante siempre que se verifique:

$$\frac{A_{v,net}}{A_v} \geq \frac{f_o/\gamma_{M1}}{f_a/\gamma_{M2}} \quad (5.3)$$

Cuando $A_{v,net}/A_v$ es menor que este límite, se debe adoptar un área efectiva a cortadura de valor $(f_a/\gamma_{M2})/(f_o/\gamma_{M1})A_{v,net}$. El criterio de desgarro del alma dado en el capítulo 6 deberá ser verificado en los extremos del elemento.

5.3.4 Zonas afectadas térmicamente (HAZs)

- (1)P El material estructural de aluminio de muchas aleaciones y condiciones queda debilitado en las zonas afectadas térmicamente (HAZs) adyacentes a las soldaduras, y esto deberá ser tenido en cuenta en los cálculos de proyecto. Excepciones a esta regla, donde no hay debilitamiento adyacente a la soldadura, se dan en aleaciones en las condiciones O ó T4; o cuando el material está en la condición F y la resistencia de cálculo se basa en las propiedades de la condición O.
- (2) En el apartado 5.5 se dan reglas para estimar la severidad y la extensión de la zona afectada térmicamente (HAZ) reblandecida.
- (3) Es por ello importante para los proyectistas darse cuenta que una pequeña soldadura para conectar un pequeño accesorio a un elemento principal puede reducir considerablemente la resistencia del elemento debido a la presencia de una HAZ. En el cálculo de vigas es a menudo beneficioso localizar las soldaduras y accesorios en las zonas de bajas tensiones, por ejemplo cerca del eje neutro o fuera de las zonas de alto momento flector.

5.3.5 Resistencias características

- (1) Las resistencias de cálculo para elementos se obtienen usando resistencias características como las siguientes:

f_o es la resistencia característica para flexión y la de fluencia en tracción y compresión;

f_a es la resistencia característica para la capacidad local de una sección neta en tracción o compresión;

f_v es la resistencia característica en cortante;

f_s es la resistencia característica para el conjunto de la estabilidad al pandeo.

- (2) Los valores de f_o , f_a y f_v dependen de las propiedades del material y se definen como sigue:

a) $f_o = f_{0,2}$ véase apartado 3.2 (5.4)

b) $f_a = f_u$ véase apartado 3.2 (5.5)

c) $f_v = \frac{f_o}{\sqrt{3}}$ (5.6)

5.4 Clasificación de las secciones transversales

5.4.1 Generalidades

- (1)P La clasificación de las secciones es necesaria cuando se está considerando la resistencia de los elementos a momentos flectores, y a combinaciones de flexión, esfuerzos cortantes y axiales. Es también necesaria cuando se considere la posibilidad de que un elemento en flexión o en compresión axial pueda tener una resistencia reducida debida al pandeo local o a la esbeltez de los elementos.

5.4.2 Clasificación

- (1) Se definen cuatro clases de secciones transversales como sigue:
 - Las secciones transversales Clase 1 son aquellas en las que se puede formar una rótula plástica con la capacidad de giro requerida para un análisis plástico. Se da información complementaria sobre las secciones transversales de la clase 1 en el Anexo G (informativo).
 - Las secciones transversales Clase 2 son aquellas en las que se puede alcanzar el momento plástico resistente, pero tienen una capacidad de giro limitada.
 - Las secciones transversales Clase 3 son aquellas en las que la tensión calculada en la fibra extrema comprimida de la pieza puede alcanzar el límite elástico práctico, pero los pandeos locales son responsables de impedir alcanzar la totalidad del momento plástico resistente.
 - Las secciones transversales Clase 4 son aquellas en las que, para determinar su resistencia a momento flector o a compresión, es necesario tener en cuenta explícitamente los efectos de los pandeos locales.
- (2) La clasificación de una sección depende de las dimensiones de cada uno de sus elementos comprimidos.
- (3) Los elementos comprimidos a considerar en una sección transversal incluyen todos aquellos elementos de ella que se encuentran total o parcialmente comprimidos, debido al esfuerzo axial o al momento flector a que está sometida la sección para la combinación de cargas considerada.
- (4) Los distintos elementos comprimidos de una sección transversal (tales como el alma o el ala) pueden, en general, pertenecer a clases diferentes.
- (5) Las secciones transversales deberán ser clasificadas teniendo en cuenta los parámetros de esbeltez de los elementos que componen la sección (véase Anexo G). En ausencia de un método de clasificación más preciso, una sección transversal puede clasificarse por la que corresponda a la clase superior (menos favorable) de sus elementos comprimidos.
- (6) Los siguientes tipos básicos de elementos de pared delgada se identifican en el proceso de clasificación:
 - a) elemento plano externo;
 - b) elemento plano interno;
 - c) elemento curvo interno.

Estos elementos pueden estar sin reforzar, o reforzados por nervios rigidizadores longitudinales o rebordes de extremo o bulbos (véase figura 5.1).

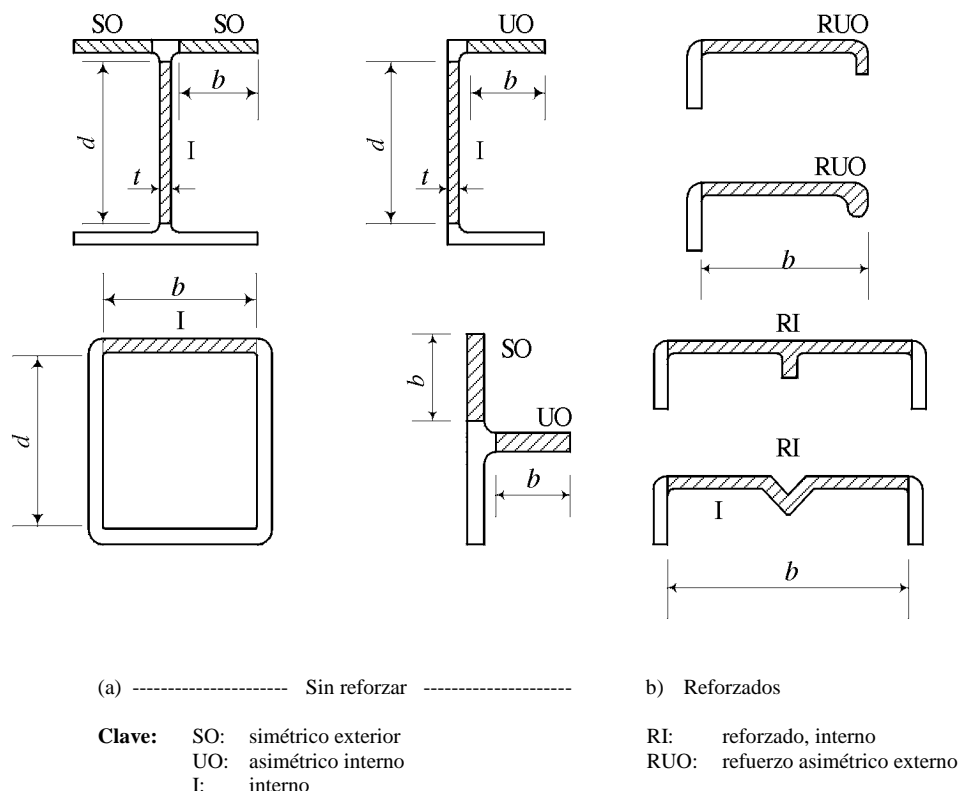


Fig. 5.1 – Tipos de elementos

5.4.3 Parámetros de esbeltez

- (1) La susceptibilidad de un elemento plano sin reforzar al pandeo local está definida por el parámetro β , el cual tiene los siguientes valores:

- a) plano sobresaliente o elemento interno sin gradiente de tensiones $\beta = b/t$
- b) elemento interno con gradiente de tensiones que da un eje neutro en el centro $\beta = 0,40 b/t$ ó $\beta = 0,40 d/t$
- c) para cualquier otro gradiente de tensiones $\beta = g b/t$ ó $\beta = g d/t$

donde

b es el ancho de un elemento;

t es el espesor del elemento;

d es el canto del elemento alma en una viga;

g es el coeficiente del gradiente de tensiones.

g viene dada por las expresiones:

$$g = 0,70 + 0,30 \psi \quad (1 > \psi > -1) \quad (5.7)$$

$$g = 0,80/(1 - \psi) \quad (\psi \leq -1), \text{ véase figura 5.4} \quad (5.8)$$

donde

ψ es la relación entre las tensiones en los bordes de la placa que se considera con respecto a la máxima tensión de compresión. En general el eje neutro deberá ser el eje neutro elástico, pero en la comprobación de si una sección es de la clase 2 se permite usar el eje neutro plástico.

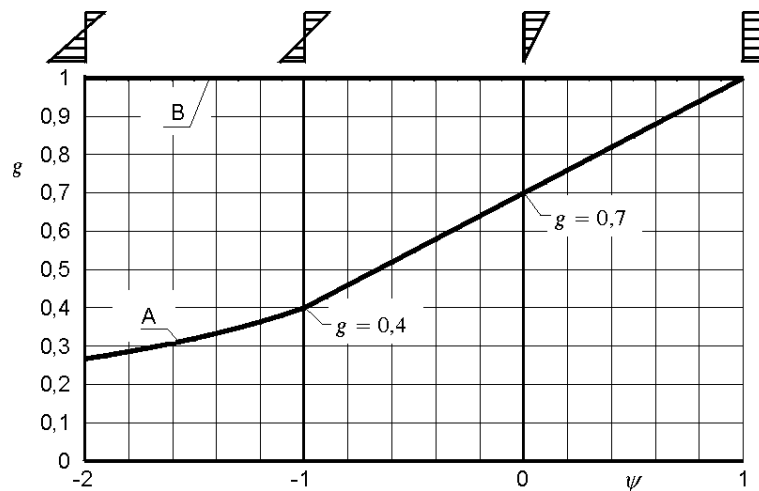


Fig. 5.2 – Elementos internos planos bajo gradiente de tensiones, valores de g .
Para elementos internos o sobresalientes (picos de compresión en la raíz) usar la curva A.
Para elementos sobresalientes (picos de compresión en el pie) usar línea B

- (2) Cuando se está considerando la susceptibilidad de un elemento plano reforzado frente a pandeo local, deben ser tenidos en cuenta tres posibles modos de pandeo, tal como muestra la figura 5.3. Para cada modo se deben adoptar valores distintos de β . Los modos son:
- Modo 1: el elemento reforzado pandea como una unidad, por lo tanto el refuerzo pandea con la misma curvatura que el elemento.
 - Modo 2: los subelementos y el refuerzo pandean como elementos individuales permaneciendo derecha la unión entre ellos.
 - Modo 3: esta es una combinación de los Modos 1 y 2 en los cuales el pandeo de los subelementos está superpuesto al pandeo del elemento entero. Esto se indica en la figura 5.3(c).

Los valores de β se toman como sigue:

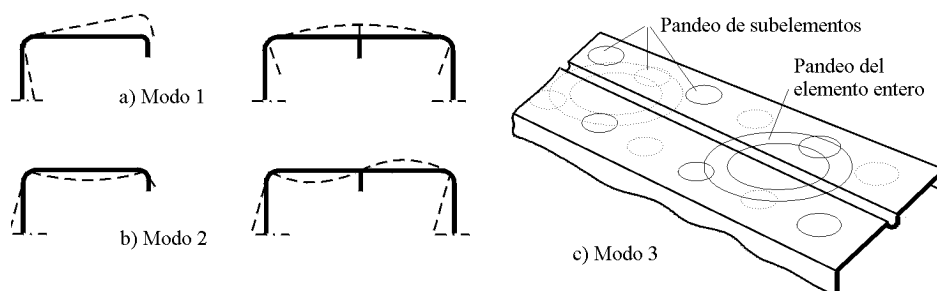


Fig. 5.3 – Modos de pandeo para elementos planos reforzados

- 1) Modo 1, compresión uniforme, refuerzo estándar:

Cuando el refuerzo es un nervio por una sola cara o reborde de espesor igual al espesor del elemento t ,

$$\beta = \eta \frac{b}{t} \quad (5.9)$$

donde η viene dada en las expresiones 5.9a, b o c, o se obtiene a partir de la figura 5.4(a), (b) o (c). En esta figura el canto c del nervio o reborde se mide desde la superficie interior del elemento de chapa.

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 (c/t - 1)^2}} \quad \text{(Figura 5.4a)} \quad (5.9 \text{ a})$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 2,5 \frac{(c/t - 1)^2}{b/t}}} \quad (\text{Figura 5.4b}) \quad (5.9 \text{ b})$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 4,5 \frac{(c/t - 1)^2}{b/t}}} \quad (\text{Figura 5.4c}) \quad (5.9 \text{ c})$$

2) Modo 1, compresión uniforme, refuerzo no estándar:

Con cualquier otra forma simple de refuerzo, el refuerzo se reemplaza por un nervio equivalente o reborde de espesor igual al del elemento (t). El valor de c para el nervio equivalente o reborde es escogido de tal forma que el momento de inercia del área del refuerzo alrededor del plano medio del elemento de chapa es igual al del refuerzo no estándar alrededor del mismo plano.

3) Modo 1, compresión uniforme, refuerzo complejo:

Las formas inusuales de refuerzo no se pueden tratar con el análisis descrito antes,

$$\beta = \frac{b}{t} \left(\frac{\sigma_{cr0}}{\sigma_{cr}} \right)^{0,4} \quad (5.10)$$

σ_{cr} es la tensión crítica elástica para el elemento reforzado suponiendo bordes simplemente apoyados;

σ_{cr0} es la tensión crítica elástica para el elemento sin reforzar suponiendo bordes simplemente apoyados.

4) Modo 1, gradiente de tensiones:

El valor de β se obtiene de la expresión dada en 3) anterior, donde σ_{cr} y σ_{cr0} están ahora referidos a la tensión del borde más altamente comprimido del elemento.

5) Modo 2:

El valor de β se obtiene separadamente para cada subelemento de acuerdo con el apartado 5.4.3(1)a).

- (3) La susceptibilidad de un elemento interno poco curvado, sin reforzar, uniformemente comprimido al pandeo local está definida por β , donde:

$$\beta = \frac{b}{t} \frac{1}{\sqrt{1 + 0,006 \frac{b^4}{R^2 t^2}}} \quad (5.11)$$

R = radio de curvatura del eje medio del material;

b = tamaño del desarrollo del elemento en el eje medio del material;

t = espesor.

El anterior tratamiento es válido si $R/b > 0,1 \ b/t$. Los perfiles, que contengan elementos mucho más intensamente curvados, requieren estudios especiales o la aceptación mediante ensayos.

- (4) La susceptibilidad de un tubo redondo de pared delgada al pandeo local, si está en compresión uniforme o en flexión, se define mediante β , donde:

$$\beta = 3 \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (5.12)$$

D = diámetro del eje medio del material.

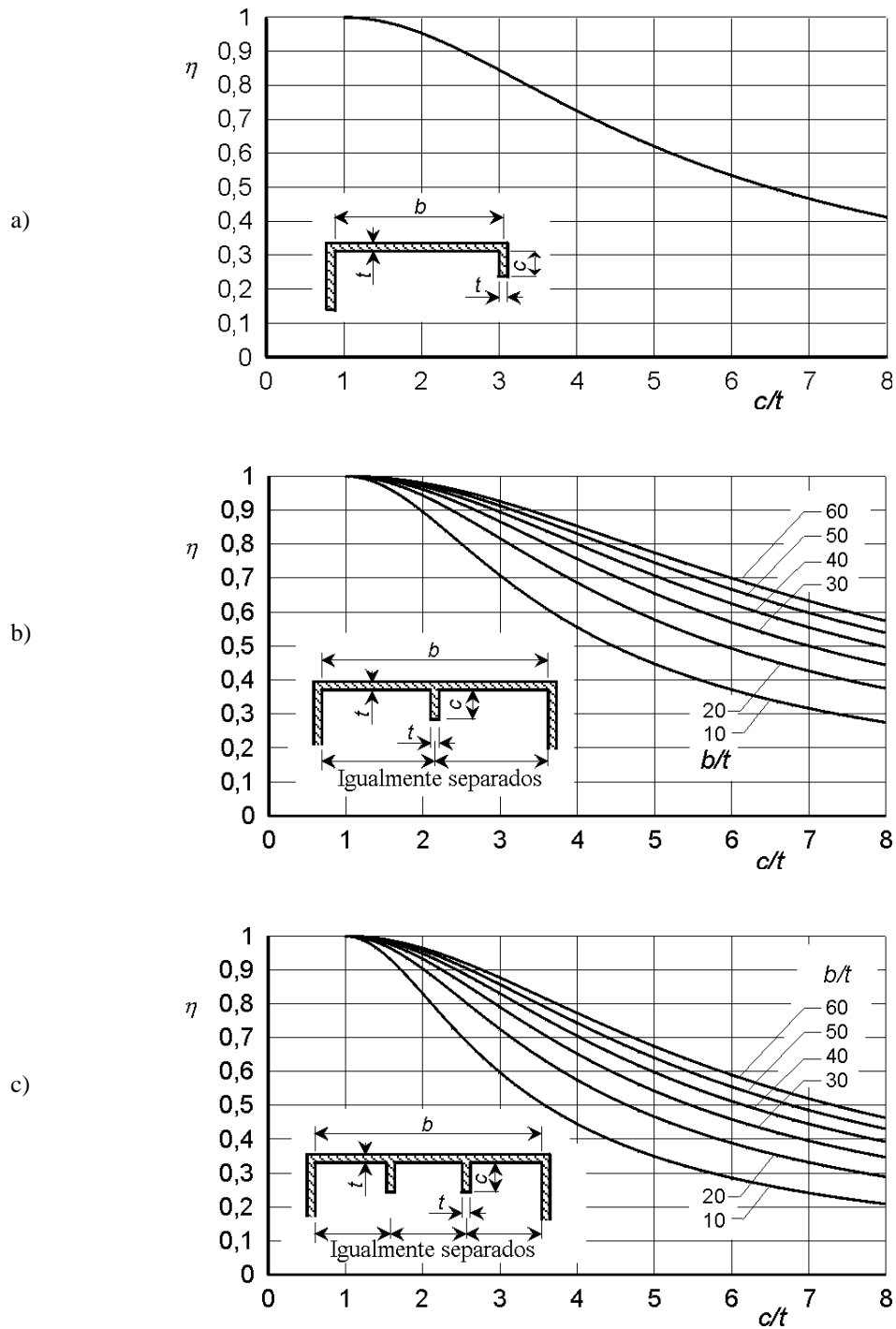


Fig. 5.4 – Valores de η para elementos reforzados

5.4.4 Clasificación de elementos

- (1) La clasificación de elementos en las secciones transversales está ligada a los siguientes valores del parámetro de esbeltez β :

Elementos en vigas	Elementos en puntales
$\beta \leq \beta_1$: clase 1	$\beta \leq \beta_2$: clase 1 ó 2
$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$: clase 2	$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: clase 3
$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: clase 3	$\beta_3 < \beta$: clase 4
$\beta_3 < \beta$: clase 4	

- (2) Los valores de β_1 , β_2 y β_3 se dan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1
Parámetros de esbeltez β_1 , β_2 y β_3

Elementos	β_1			β_2			β_3		
	Tratado térmicamente, sin soldar	Tratado térmicamente, soldado o sin tratamiento térmico, sin soldar	Sin tratamiento térmico, soldado	Tratado térmicamente, sin soldar	Tratado térmicamente, soldado o sin tratamiento térmico, sin soldar	Sin tratamiento térmico, soldado	Tratado térmicamente, sin soldar	Tratado térmicamente, soldado o sin tratamiento térmico, sin soldar	Sin tratamiento térmico, soldado
Sobresaliente	3 ε	2,5 ε	2 ε	4,5 ε	4 ε	3 ε	6 ε	5 ε	4 ε
Interno	11 ε	9 ε	7 ε	16 ε	13 ε	11 ε	22 ε	18 ε	15 ε

$\varepsilon = \sqrt{250 / f_o}$ donde f_o está en N/mm².

- (3) En la tabla, un elemento se considera soldado si contiene soldaduras en un borde o en cualquier punto dentro de su anchura. Sin embargo, las secciones transversales de un elemento que no contengan soldadura pueden ser consideradas como no soldadas, incluso si el elemento está soldado en otra parte a lo largo de su longitud.
- (4) Hay que tener en cuenta que, en un elemento soldado, la clasificación es independiente de la extensión de la zona HAZ.
- (5) Se permite usar una expresión modificada, $\varepsilon = \sqrt{\frac{250z_1}{f_o z_2}}$, cuando clasificando los elementos de las alas en elementos sometidos a flexión, si los elementos están menos altamente tensionados que las fibras más severamente tensionadas de la sección. En esta expresión, z_1 es la distancia desde el eje neutro elástico de la sección eficaz hasta las fibras más severamente tensionadas, y z_2 es la distancia desde el eje neutro elástico de la sección eficaz hasta el elemento en consideración. z_1 y z_2 deberán ser evaluadas en la sección eficaz por medio de un proceso de iteración (mínimo dos pasos).

5.4.5 Pandeo local

- (1) El pandeo local en elementos de la clase 4 se tiene generalmente en cuenta reemplazando la sección verdadera por una sección eficaz. La sección eficaz se obtiene empleando un coeficiente de pandeo local ρ_c como factor reductor del espesor. ρ_c se aplica a cualquier elemento de la clase 4 de espesor uniforme, que esté completamente o parcialmente comprimido. Los elementos que no tienen un espesor uniforme precisan de estudio especial por parte del proyectista.
- (2) El coeficiente ρ_c se obtiene separadamente para los diferentes elementos de la sección, en términos de la relación β/ε , donde β se obtiene como en el apartado 5.4.3 y ε está definido en el apartado 5.4.4.

(3) Los valores de ρ_c son como sigue:

a) Elementos externos planos en secciones transversales simétricas (figura 5.1):

– tratado térmicamente, no soldado:

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon \leq 6,$$

$$\rho_c = 10/(\beta/\epsilon) - 24/(\beta/\epsilon)^2 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon > 6.$$

– tratado térmicamente, soldado y sin tratamiento térmico, no soldado:

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon \leq 5,$$

$$\rho_c = 9/(\beta/\epsilon) - 20/(\beta/\epsilon)^2 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon > 5.$$

– sin tratamiento térmico, soldado:

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon \leq 4,$$

$$\rho_c = 8/(\beta/\epsilon) - 16/(\beta/\epsilon)^2 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon > 4.$$

b) Elementos externos planos en secciones transversales asimétricas (figura 5.1), ρ_c viene dado por las expresiones anteriores para planos sobresalientes en secciones simétricas, pero no puede ser mayor que $120/(\beta/\epsilon)^2$.

c) Elementos internos planos o tubos redondos:

– tratado térmicamente, no soldado:

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon \leq 22,$$

$$\rho_c = 32/(\beta/\epsilon) - 220/(\beta/\epsilon)^2 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon > 22.$$

– tratado térmicamente, soldado y sin tratamiento térmico, no soldado:

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon \leq 18,$$

$$\rho_c = 29/(\beta/\epsilon) - 198/(\beta/\epsilon)^2 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon > 18.$$

– sin tratamiento térmico, soldado:

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon \leq 15,$$

$$\rho_c = 25/(\beta/\epsilon) - 150/(\beta/\epsilon)^2 \quad \text{cuando } \beta/\epsilon > 15.$$

d) Elementos reforzados: Considerar todos los posibles modos de pandeo, y tomar el valor inferior de ρ_c . En el caso del modo 1 de pandeo el coeficiente ρ_c deberá aplicarse al área del refuerzo así como al espesor básico de la chapa.

(4) La relación entre ρ_c y (β/ϵ) está resumida en la figura 5.5.

- (5) Para la determinación de ρ_c en perfiles que deben soportar flexión biaxial o combinación de pandeo y carga axial, véase el apartado 5.9.

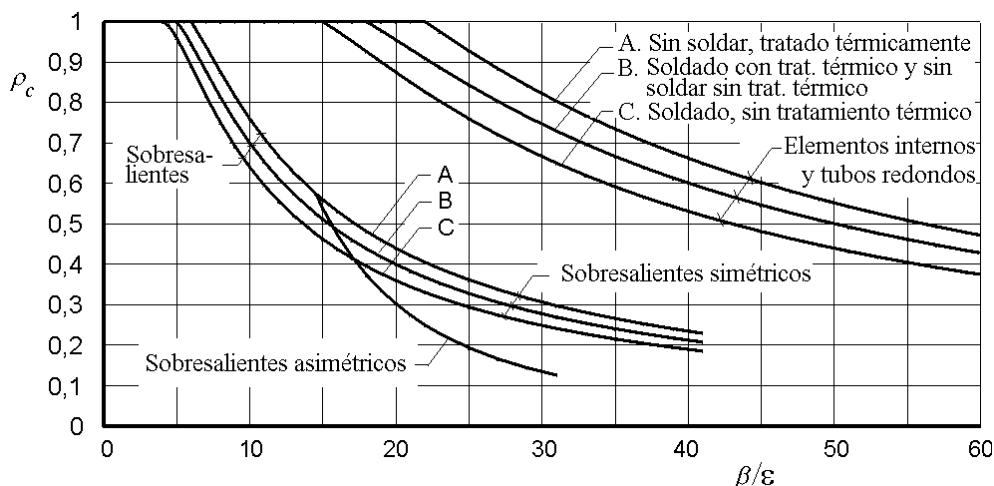


Fig. 5.5 – Relaciones entre ρ_c y β/ϵ para elementos internos, elementos sobresalientes y tubos redondos

5.5 Reblandecimiento HAZ adyacente a la soldadura

5.5.1 Generalidades

- (1)P En el cálculo de estructuras soldadas utilizando aleaciones estructurales de alta resistencia es necesario tener en cuenta la reducción de las propiedades resistentes que ocurre en la vecindad de las soldaduras. La reducción afecta al límite elástico del material, con el 0,2% de deformación, más severamente que a la resistencia última a tracción. La región afectada se extiende inmediatamente alrededor de la soldadura, más allá de la cual las propiedades resistentes rápidamente recobran sus valores completos sin soldadura.
- (2) Para propósitos de cálculo se supone que a través de la zona afectada térmicamente (HAZ) las propiedades resistentes se reducen por un coeficiente constante ρ_{haz} . La severidad del reblandecimiento, definida mediante ρ_{haz} , se discute en el apartado 5.5.2.

La extensión de la zona HAZ, definida por una distancia b_{haz} desde el borde de la soldadura, se considera en el apartado 5.5.3.

- (3) Algunas veces es posible mitigar los efectos del reblandecimiento HAZ por medio de envejecimiento artificial aplicado tras la soldadura.

5.5.2 Severidad del reblandecimiento

- (1) Las resistencias características f_o , f_a y f_v en la zona HAZ se calculan de forma similar a la dada en el apartado 5.3.5, pero estando multiplicadas por el apropiado valor de ρ_{haz} , tomado de la tabla 5.2. Estos valores están referidos al rango de las aleaciones estructurales habituales.

En materiales 7xxx, los valores de ρ_{haz} están influidos por la naturaleza de las tensiones en la zona HAZ. En la tabla 5.2 se dan dos valores:

- aplicable cuando una tensión de tracción actúa transversalmente al eje en una soldadura a tope o en ángulo;
- aplicable para todas las demás condiciones, por ejemplo una tensión longitudinal, una tensión transversal de compresión o una tensión de cortadura.

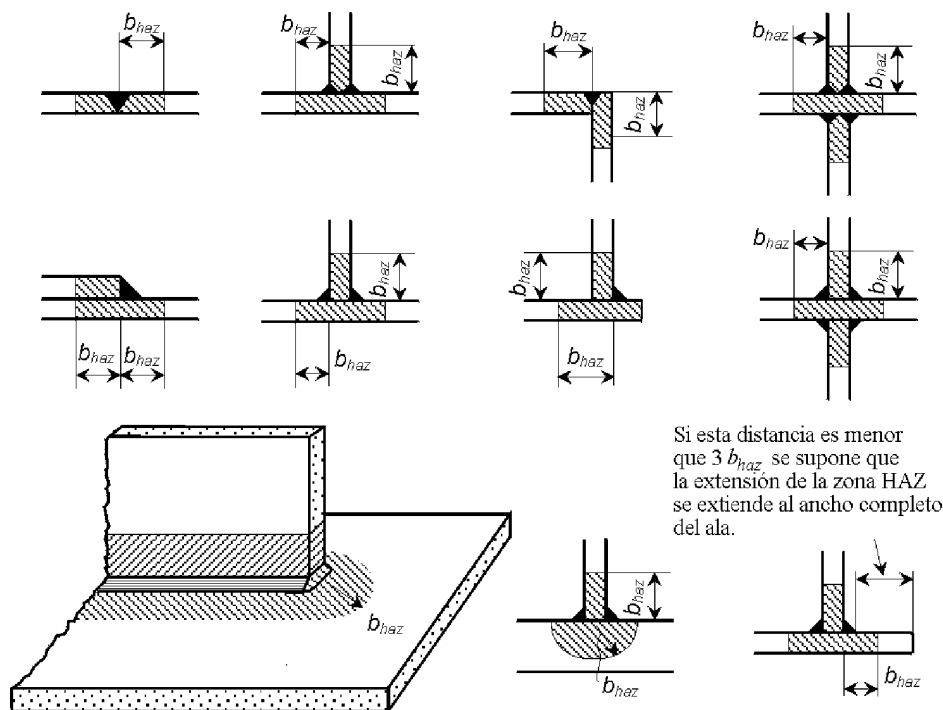


Fig. 5.6 – Extensión de las zonas afectadas térmicamente (HAZ)

- (2) Los valores de la tabla 5.2 son válidos para los siguientes tiempos después de soldar, siempre que el material haya sido conservado a una temperatura no menor de 10 °C:

Aleaciones de la serie 6xxx	3 días
Aleaciones de la serie 7xxx	30 días.

Si el material es conservado a una temperatura por debajo de 10 °C después de soldar, el tiempo de recuperación deberá ser prolongado. Se deberá solicitar consejo de los fabricantes.

- (3) La severidad del reblandecimiento puede ser tenida en cuenta mediante la resistencia característica en la zona HAZ en lo que atañe al material de base, o reduciendo el área sobre la cual actúan las tensiones. De este modo la resistencia característica de una sección rectangular simple afectada por reblandecimiento HAZ puede ser expresada como $(f_a \rho_{haz})A$ o $f_a(A \rho_{haz})$.

5.5.3 Extensión de la zona afectada térmicamente HAZ

- (1) La zona HAZ se supone que se extiende una distancia b_{haz} en cualquier dirección desde una soldadura, medida como sigue (véase figura 5.6):
 - a) transversalmente desde la línea central de una soldadura a tope alineada;
 - b) transversalmente desde el punto de intersección de las superficies soldadas en soldaduras en ángulo;
 - c) transversalmente desde el punto de intersección de las superficies soldadas en soldaduras a tope usadas en esquinas, tes o uniones cruciformes;
 - d) en cualquier dirección radial desde el extremo de una soldadura.
- (2) Los límites de la zona HAZ deberán tomarse, generalmente, como líneas rectas perpendiculares a la superficie del metal, particularmente cuando se suelda material delgado. Sin embargo, cuando la superficie de soldadura se aplica a materiales gruesos se permite suponer límites curvos de radio b_{haz} , como se muestra en la figura 5.6.

Tabla 5.2
Coefficiente de reblandecimiento HAZ (ρ_{haz})

Para todas las aleaciones suministradas como piezas extruidas, chapas, planchas, tubos estirados y piezas forjadas en las condiciones O y F, $\rho_{haz} = 1,0$.			
Las piezas extruidas, chapas, planchas, tubos estirados y piezas forjadas de las aleaciones 6xxx y 7xxx en condiciones T4, T5 y T6:			
Series de aleaciones	Condición	ρ_{haz} (soldadura MIG)	ρ_{haz} (soldadura TIG)
6xxx	T4	1,0	—
	T5	0,65	0,60
	T6	0,65	0,50
7xxx	T6	0,80 ^{a)}	0,60 ^{a)}
		1,0 ^{b)}	0,80 ^{b)}
Chapas, planchas y piezas forjadas de las aleaciones 5xxx, 3xxx y 1xxx [en la condición de endurecimiento por deformación (H)]:			
Series de aleaciones	Condición	ρ_{haz} (soldadura MIG)	ρ_{haz} (soldadura TIG)
5xxx	H22	0,86	0,86
	H24	0,80	0,80
3xxx	H14, 16, 18	0,60	0,60
1xxx	H14	0,60	0,60

a), b) Para la definición de a) y b) véase apartado 5.5.2. (1).

- (3) Para una disposición de soldadura MIG en material no calentado, y con enfriamiento entre pasadas a 60 °C o menos cuando se disponen las soldaduras en varias pasadas, los valores de b_{haz} son los siguientes:
 - $0 < t \leq 6 \text{ mm}$: $b_{haz} = 20 \text{ mm}$
 - $6 < t \leq 12 \text{ mm}$: $b_{haz} = 30 \text{ mm}$
 - $12 < t \leq 25 \text{ mm}$: $b_{haz} = 35 \text{ mm}$
 - $t > 25 \text{ mm}$: $b_{haz} = 40 \text{ mm}$

- (4) Para espesores > 12 mm puede haber un efecto de temperatura, puesto que el enfriamiento entre pasadas puede exceder de 60 °C a menos que exista un estricto control de calidad. Esto incrementará la anchura de la zona afectada térmicamente (HAZ).
- (5) Las figuras anteriores se aplican a soldaduras a tope alineadas (dos trayectorias válidas del calor) o a soldaduras en ángulo en uniones en T (tres trayectorias válidas del calor) en las series de aleaciones 6xxx o 7xxx, o aleaciones de la serie 5xxx en condiciones de endurecimiento por deformación.
- (6) Para una soldadura TIG la extensión de la zona HAZ es mayor porque la entrada de calor es mayor que en una soldadura MIG. Las soldaduras TIG a tope alineadas o en ángulo para las aleaciones de las series 6xxx, 7xxx o 5xxx endurecidas por deformación, tienen un valor de b_{haz} dado por [véase apartado 6.6.1(2)]:

$$0 < t \leq 6 \text{ mm:} \quad b_{haz} = 30 \text{ mm}$$

- (7) Cuando dos o más soldaduras están cerca una de otra, sus límites de zona HAZ se superponen. Existe entonces una única zona HAZ para el grupo completo de soldaduras. Cuando una soldadura se localiza demasiado cerca de un borde libre de un saliente la dispersión del calor es menos eficaz. Esto se aplica cuando la distancia desde el borde de la soldadura hasta el borde libre es menor que $3b_{haz}$. En estas circunstancias se supone que la anchura completa del saliente está sometida al factor ρ_{haz} .
- (8) Otros factores que afectan el valor de b_{haz} son los siguientes:

a) Influencia de las temperaturas por encima de 60 °C

Cuando se depositan varias pasadas de soldadura, existirá un aumento de temperatura entre las pasadas. Esto da como resultado un incremento de la extensión de la zona HAZ. Si la temperatura entre pasadas $= T_1$ (°C), la cual debería estar más o menos entre 60 °C y 120 °C, es conservador suponer, para las series de aleaciones 6xxx, 7xxx o 5xxx endurecida por deformación, que b_{haz} será multiplicada por un coeficiente α_2 obtenido como sigue:

$$\text{Aleaciones 6xxx:} \quad \alpha_2 = 1 + (T_1 - 60)/120,$$

$$\text{Aleaciones 7xxx:} \quad \alpha_2 = 1 + 1,5 (T_1 - 60)/120.$$

Si se desea un valor menos conservador de α_2 , los ensayos de dureza en probetas de ensayo indicarán la extensión real de la zona HAZ. Una temperatura de 120 °C es la máxima recomendada para soldar aleaciones de aluminio.

b) Variaciones en el espesor del elemento

Si los elementos a unir con soldadura no tienen el mismo espesor t , es conservador suponer en todas las expresiones anteriores que t es el espesor medio de todos los elementos. Esto se aplica mientras el espesor medio no exceda de 1,5 veces el espesor más pequeño. Para mayores variaciones de espesor, la extensión de la zona HAZ deberá ser determinada mediante ensayos de dureza sobre probetas.

c) Variaciones en el número de trayectorias de calor

Si las uniones entre elementos son con soldaduras en ángulo, pero tienen diferente número de trayectorias de calor (N) a las tres definidas en el punto (5) anterior, se multiplica el valor de b_{haz} por $3/N$.

5.6 Resistencia de vigas

5.6.1 Generalidades

- (1)P Deberán ser comprobadas, normalmente, las siguientes resistencias:
- a) Flexión (véase apartado 5.6.2), incluyendo, cuando sea apropiado, la posibilidad de coincidencia con cortante (véase apartado 5.6.4).
 - b) Cortante (véase apartado 5.6.3).
 - c) Capacidad portante del alma (véase apartado 5.6.5).
 - d) Pandeo lateral con torsión (véase apartado 5.6.6).

- (2)P Se tendrá en cuenta la clase de la sección transversal (véase apartado 5.4), la presencia de cualquier zona afectada térmicamente (véase apartado 5.5) y la necesidad de descontar la presencia de agujeros (véase apartado 5.3).
- (3)P Para elementos que deben resistir flexión combinada con esfuerzos axiales referirse al apartado 5.9.
- (4) La flexión biaxial está cubierta en el apartado 5.6.7 o si está combinada con esfuerzo axial en el apartado 5.9.

5.6.2 Resistencia a la flexión uniaxial

5.6.2.1 Bases

- (1) En ausencia de esfuerzo cortante, el valor de cálculo del momento flector resistente M_{Rd} será el menor de $M_{a,Rd}$ y $M_{c,Rd}$, donde

$$M_{a,Rd} = f_a W_{net} / \gamma_{M2} \quad (5.13)$$

en una sección neta y

$$M_{c,Rd} = f_o \alpha W_{el} / \gamma_{M1} \quad (5.14)$$

en cada sección transversal donde

α es el factor de forma, véase tabla 5.3;

W_{el} es el módulo elástico de la sección bruta (véase apartado 5.6.2.2);

W_{net} es el módulo elástico de la sección neta descontados los agujeros y las zonas HAZ reblandecidas, si está soldada.

Tabla 5.3
Valores del factor de forma α

Clase	Sin soldar	Soldada
1	W_{pl} / W_{el} pero véase Anexo G	W_{ple} / W_{el} pero véase Anexo G
2	W_{pl} / W_{el}	W_{ple} / W_{el}
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	W_{effe} / W_{el}

En la tabla 5.3 los diferentes módulos de sección W y $\alpha_{3,u}$, $\alpha_{3,w}$ se definen como:

W_{pl} módulo plástico de la sección bruta

W_{eff} módulo elástico eficaz de la sección, obtenido usando un espesor reducido t_{eff} para los elementos de la clase 4 (véase apartado 5.6.2.2)

W_{ele} módulo elástico eficaz de la sección bruta, obtenido usando un espesor reducido $\rho_{haz}t$ para la zona de material HAZ (véase apartado 5.6.2.2)

W_{ple} módulo plástico eficaz de la sección bruta, obtenido usando un espesor reducido $\rho_{haz}t$ para la zona de material HAZ (véase apartado 5.6.2.2)

W_{effe} módulo elástico eficaz de la sección, obtenido usando un espesor reducido t_{eff} para los elementos de la clase 4 o un espesor reducido $\rho_{haz}t$ para la zona de material HAZ, cualquiera que sea el menor (véase apartado 5.6.2.2);

$\alpha_{3,u}$ = 1 o alternativamente se puede tomar como:

$$\alpha_{3,u} = \left[1 + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl}}{W_{el}} - 1 \right) \right] \quad (5.15)$$

$\alpha_{3,w}$ = W_{ele} / W_{el} o alternativamente se puede tomar como:

$$\alpha_{3,w} = \left[\frac{W_{ele}}{W_{el}} + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{ple} - W_{ele}}{W_{el}} \right) \right] \quad (5.16)$$

donde

β es el parámetro de esbeltez para el elemento más crítico de la sección;

β_2 y β_3 son los valores límites para ese mismo elemento de acuerdo con la tabla 5.1.

- (2) Referirse al apartado 5.6.4 para combinación de momento flector y esfuerzo cortante.
- (3)P Adicionalmente, la resistencia de un elemento al pandeo lateral con torsión también deberá ser verificada, véase apartado 5.6.6.

5.6.2.2 Sección supuesta

- (1) La terminología usada en el apartado 5.6.2.1 es como sigue:
 - a) sección neta incluidas las deducciones por agujeros e incluidos los descuentos por la reducción de la resistencia del material tomado en la vecindad de las soldaduras para tener en cuenta el reblandecimiento HAZ, si está soldada;
 - b) sección eficaz incluyendo el descuento por reblandecimiento HAZ y pandeo local, pero sin reducción por agujeros.
- (2) En los puntos a) y b) anteriores el descuento para reducciones en la resistencia del material se deberá tomar, en general, como sigue para los diferentes elementos de la sección.
 - a) Elemento clase 4 libre de efectos HAZ. Un valor $t_{eff} = \rho_c t$ se toma para las partes comprimidas del elemento, donde ρ_c se da en el apartado 5.4.5.
 - b) Elementos clases 1, 2 o 3 sujetos a efectos HAZ. Un valor $\rho_{haz} t$ se toma para las partes reblandecidas del elemento, donde ρ_{haz} y la extensión del reblandecimiento se da en los apartados 5.5.2 y 5.5.3.
 - c) Elemento clase 4 con efectos HAZ. El descuento se toma como el menor de los que correspondan al espesor reducido t_{eff} y los que correspondan al espesor reducido de la parte reblandecida, $\rho_{haz} t$ y como t_{eff} en el resto del elemento.
 - d) En el caso de elementos reforzados ρ_c se deberá aplicar al área del refuerzo así como al espesor base de la placa.

e) Para un elemento soldado en secciones Clases 3 ó 4 una hipótesis más favorable para el espesor puede ser tomada como sigue:

- 1) La zona reblandecida HAZ se ignora en cualquier material situado a una distancia menor que $\rho_{haz} y_1$ tomada desde el eje neutro elástico de la sección bruta, donde y_1 es la distancia desde aquí hasta las fibras extremas más alejadas de la sección.
- 2) Para el material de la zona HAZ, en una distancia y ($> \rho_{haz} y_1$) desde el eje neutro, ρ_{haz} puede ser reemplazado por un valor k_{zy} determinado como sigue:

$$k_{zy} = \rho_{haz} + 1 - y/y_1$$

5.6.3 Resistencia al esfuerzo cortante

- (1) El valor de cálculo del esfuerzo cortante V_{Ed} en cada sección transversal deberá cumplir:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} \quad (5.17)$$

donde

$V_{c,Rd}$ es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal que depende de la clasificación de la sección para cortante (véase apartado 5.10.5) y se toma como:

- (2) Secciones de las clases 1, 2 ó 3:

$$V_{c,Rd} = A_v f_v / \gamma_{M1}$$

donde A_v es el área de cortante, tomada como:

- a) Para secciones que contienen almas de cortante

$$A_v = \sum_1^N \left[0,8 D(t_w)_i - (1 - \rho_{haz}) d_z(t_w)_i \right] \quad (5.18)$$

donde

d_z es el tamaño total del material HAZ existente en el ancho libre entre las almas situadas entre las alas.
Para secciones no soldadas, $\rho_{haz} = 1$;

D es el mayor tamaño externo de la sección medido entre las caras externas de las alas;

t_w es el espesor del alma;

N es el número de almas.

- b) Para una barra maciza y un tubo redondo

$$A_v = \eta_v A_e \quad (5.19)$$

donde

$\eta_v = 0,8$ para una barra maciza;

$\eta_v = 0,6$ para un tubo redondo;

A_e es el área de la sección de una sección no soldada, y el área eficaz de la sección obtenida tomando un espesor reducido $\rho_{haz} t$ para el material HAZ de una sección soldada.

(3) Secciones clase 4

Las secciones clase 4 están cubiertas en los apartados 5.12.4 - 5.12.6.

5.6.4 Combinación de flexión y cortante

- (1)P El momento teórico resistente de una sección transversal se reduce por la presencia del cortante. Para pequeños valores del esfuerzo cortante esta reducción es tan pequeña que se puede despreciar. Sin embargo, cuando el esfuerzo cortante excede de la mitad de la resistencia a cortante, se deberá descontar, debido a este efecto, el momento resistente.
- (2) Siempre que el valor de cálculo del esfuerzo cortante V_{Ed} no exceda del 50% de la resistencia de cálculo $V_{pl,Rd}$ no se necesita hacer reducción en el momento resistente dado en el apartado 5.6.2.1.
- (3) Cuando V_{Ed} excede del 50% de $V_{pl,Rd}$ el momento resistente de cálculo de la sección transversal deberá ser reducido a $M_{v,Rd}$, momento plástico resistente reducido de cálculo teniendo en cuenta el esfuerzo cortante, el cual se obtiene como sigue:

- a) Para el área de cortante la contribución a la capacidad de momento de la sección transversal se basa en un valor reducido de la resistencia del material f_{ow} , dado por:

$$f_{ow} = f_0 \sqrt{1 - (V_{Ed}/V_{pl,Rd})^2} \quad (5.20)$$

- b) En el caso de un perfil I de alas iguales clasificado como clases 1, 2 ó 3 en flexión, el valor resultante de $M_{v,Rd}$ es:

$$M_{v,Rd} = t_f b_f (h_s - t_f) \frac{f_0}{\gamma_{M1}} + \frac{t_w h_w^2}{4} \frac{f_{ow}}{\gamma_{M1}} \quad (5.21)$$

- (4) Para perfiles clasificados como clase 4 en flexión o afectados por reblandecimiento HAZ, α se deberá basar en la sección supuesta utilizada para la determinación de $M_{c,Rd}$ (véase apartado 5.6.2.2).

5.6.5 Capacidad portante del alma

- (1) Esta regla concierne al cálculo de almas sometidas a fuerzas localizadas causadas por cargas concentradas o reacciones aplicadas a las vigas. Para almas sin rigidizar este aspecto está cubierto en el apartado 5.12.
- (2) Un rigidizador portante para almas rigidizadas transversalmente, si está ajustado, deberá ser de sección de clase 2 o menor. Se puede, de forma conservadora, calcularlo bajo la hipótesis de que resiste la totalidad de la fuerza portante, sin ayuda del alma, siendo comprobado el rigidizador como un puntal (véase apartado 5.8) para el pandeo como columna fuera del plano y aplastamiento local, con los correspondientes efectos de flexión tenidos en cuenta si es necesario (véase apartado 5.9). Alternativamente, un rigidizador más económico puede ser calculado tomando como referencia las reglas correspondientes a rigidizadores de vigas de alma llena (véase apartado 5.12).

5.6.6 Pandeo lateral con torsión**5.6.6.1 Generalidades**

- (1)P Todas las vigas, aparte de aquellas que cumplan las excepciones del apartado 5.6.6.2, deberán ser comprobadas frente a un posible fallo por pandeo lateral con torsión.

- (2) Todas las longitudes sin arriostrar, entre puntos de soporte lateral adecuado, deberán cumplir la condición:

$$M_{ed} \leq M_{b,Rd} \quad (5.22)$$

donde el momento resistente de cálculo a pandeo $M_{b,Rd} = f_s \alpha W_{el,y} / \gamma_{M1}$

$W_{el,y}$ es el módulo elástico de la sección transversal bruta, sin reducción por reblandecimiento HAZ, pandeo local o agujeros. α se toma de la tabla 5.3 aunque sujeta a la limitación $\alpha \leq W_{pl}/W_{e,y}$. f_s es la resistencia al pandeo lateral con torsión (véase apartado 5.6.6.3).

5.6.6.2 Excepciones

- (1) El pandeo lateral con torsión no necesita ser comprobado en cualquiera de las siguientes circunstancias:
- La flexión tiene lugar alrededor del eje principal menor (débil).
 - La viga tiene completamente restringidos los movimientos laterales en toda su longitud.
 - La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_{LT}$ (véase apartado 5.6.6.3) entre puntos de coacción lateral efectiva es menor que 0,4.

5.6.6.3 Tensiones de pandeo

- (1) La tensión de pandeo lateral con torsión f_s para la correspondiente esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_{LT}$ puede ser obtenida mediante:

$$f_s = \chi_{LT} f_o \quad (5.23)$$

en la cual χ_{LT} se toma de la figura 5.7 o de:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (5.24)$$

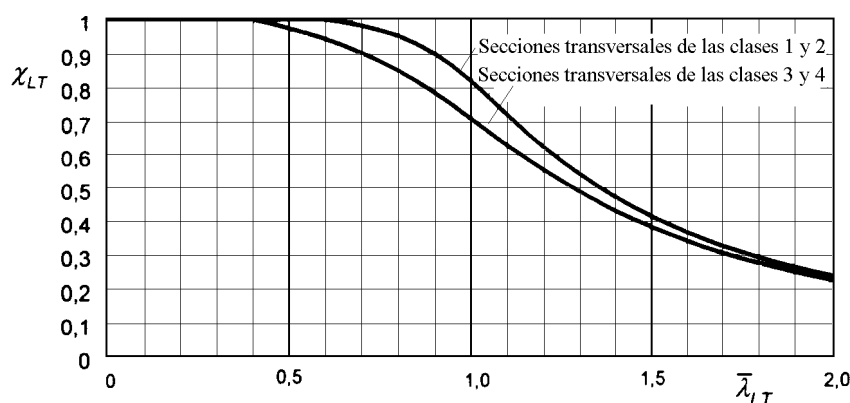


Fig. 5.7 – Coeficiente de reducción χ_{LT} para pandeo lateral con torsión

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (5.25)$$

- (2) El valor de α_{LT} y $\bar{\lambda}_{0,LT}$ se deberá tomar como:

$\alpha_{LT} = 0,10$ y $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0,6$ para secciones transversales de las clases 1 y 2. $\alpha_{LT} = 0,20$ y $\bar{\lambda}_{0,LT} = 0,4$ para secciones transversales de las clases 3 y 4.

- (3) El valor de $\bar{\lambda}_{LT}$ se puede determinar mediante $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,y} f_o}{M_{cr}}}$

donde

α se toma de la tabla 5.3 aunque sujeto a la limitación $\alpha \leq W_{pl}/W_{el,y}$;

M_{cr} es el momento crítico elástico para el pandeo lateral con torsión (véase Anexo H).

- (4) De forma conservadora el valor de $\bar{\lambda}_{LT}$ puede ser obtenido mediante:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \lambda_{LT} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_o}{E}} \quad (5.26)$$

donde

$$\lambda_{LT} = l/i_z$$

l es la longitud eficaz para el pandeo lateral con torsión;

i_z es el menor radio de giro de la sección bruta.

- (5) Para los perfiles I y en U cubiertos por la tabla 5.4, el valor de λ_{LT} puede ser obtenido mediante:

$$\lambda_{LT} = \frac{X L / i_z}{\left[1 + Y \left(\frac{L / i_z}{D / t_2} \right) \right]^{\frac{1}{4}}} \quad (5.27)$$

donde

D es la altura total de la sección;

t_2 es el espesor del ala;

X e Y son coeficientes obtenidos de la tabla 5.4. Es conservador adoptar $X = 1,0$ e $Y = 0,05$.

Cuando el refuerzo de ala en un perfil en I o en U no es de la forma precisa mostrada en la tabla 5.4 (labios simples), todavía es permisible obtener λ_{LT} usando la expresión anterior, siempre que X e Y se tomen como para un labio simple equivalente que tenga la misma profundidad interna C , mientras que i_z se calcula para la sección con el refuerzo real.

- (6) Para los siguientes casos se debe tomar como referencia lo indicado en el Anexo H para encontrar el apropiado valor de λ_{LT} o M_{cr} .

a) Vigas en voladizo.

b) Vigas con secciones transversales que sólo sean simétricas respecto al eje menor (débil).

c) Vigas sometidas a cargas verticales.

d) Vigas sometidas a momentos desiguales en los extremos.

Para todos los otros casos l puede tomarse como la distancia entre puntos de coacción lateral efectiva.

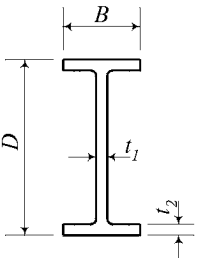
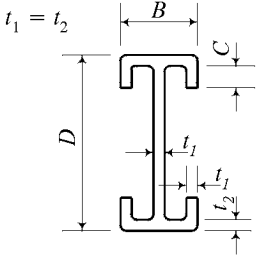
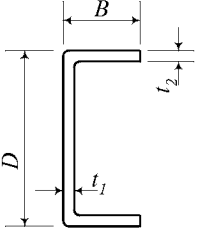
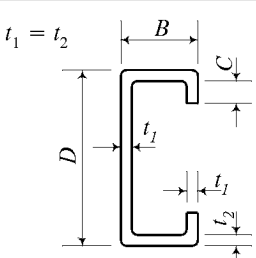
5.6.6.4 Coacciones laterales efectivas

- (1) Los sistemas de arriostramiento que suministren coacciones laterales deberán ser calculados bajo la hipótesis de que el total de la fuerza lateral ejercida por un ala comprimida, bajo cargas de cálculo (mayoradas), repartida entre los puntos de coacción en cualquier vano, es el 3% de la compresión en esa ala.
- (2) Cuando una serie de dos o más vigas paralelas requieran coacción lateral, no es adecuado conectar meramente las alas comprimidas dado que ellas resultan mutuamente dependientes. La adecuada coacción se suministrará sólo mediante anclaje de los cordones a un robusto soporte independiente, o mediante la colocación de un sistema de arriostramiento por triangulación. Si el número de vigas paralelas excede de tres, es suficiente que el sistema de coacción a calcular resista la suma de las fuerzas laterales derivadas de sólo las tres mayores fuerzas de compresión.

5.6.7 Flexión biaxial

- (1) Los elementos sometidos a flexión respecto a ambos ejes principales pueden ser calculados utilizando lo indicado en el apartado 5.9.4, pero teniendo en cuenta que el término en N_{Ed} deberá ser eliminado.

Tabla 5.4
Pandeo lateral con torsión de vigas, coeficientes X e Y ¹⁾

	$X = 0,90 - 0,03 D/B + 0,04 t_2/t_1$ $Y = 0,05 - 0,010 \sqrt{D/B(t_2/t_1 - 1)}$
	$X = 0,94 - D/B(0,03 - 0,07 C/B) - 0,3 C/B$ $Y = 0,05 - 0,06 C/D$
	$X = 0,95 - 0,03 D/B + 0,06 t_2/t_1$ $Y = 0,07 - 0,014 \sqrt{D/B(t_2/t_1 - 1)}$
	$X = 1,01 - D/B(0,03 - 0,06 C/B) - 0,3 C/B$ $Y = 0,07 - 0,10 C/D$

1) Las expresiones para X e Y son válidas para $1,5 \leq D/B \leq 4,5$, $1 \leq t_2/t_1 \leq 2$ y $0 \leq C/B \leq 0,5$.

5.7 Resistencia de elementos traccionados

5.7.1 Generalidades

- (1)P Para los elementos en tracción axial, el valor de cálculo de la fuerza de tracción N_{sd} en cada sección transversal deberá cumplir que:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} \quad (5.28)$$

donde $N_{t,Rd}$ es la resistencia a tracción de cálculo de la sección transversal, tomada como el menor valor de los dos correspondientes respectivamente a:

- a) fluencia general a lo largo del elemento (véase apartado 5.7.2);
 - b) fallo local en la sección crítica (véase apartado 5.7.3).
- (2) Para angulares conectados a través de una sola ala véase el capítulo 6: Uniones. Una consideración similar se deberá dar también para otros tipos de perfiles conectados por medio de elementos sobresalientes tales como perfiles T y U.
- (3) Para agujeros al tresbolillo véase apartado 5.3.3(3).

5.7.2 Fluencia general

- (1) El valor $N_{t,Rd}$ se basa en la sección transversal general del elemento a lo largo de su longitud, ignorando el efecto de las conexiones de extremo, de los agujeros ocasionales o de las regiones HAZ localizadas, como sigue:

$$N_{t,Rd} = A_g f_o / \gamma_{M1} \quad (5.29)$$

donde

A_g es cualquiera de las dos siguientes: la sección bruta o una sección transversal reducida que tiene en cuenta el reblandecimiento HAZ. En el último caso A_g se obtiene tomando un área reducida igual a ρ_{haz} veces el área total de la zona HAZ, véase apartado 5.5.2;

f_o es la resistencia característica [véase apartado 5.3.5(2)];

γ_{M1} es el coeficiente parcial de seguridad para el material [véase apartado 5.1.1(2)].

5.7.3 Fallo local

- (1) El valor de $N_{t,Rd}$ se basa en la sección más crítica tal como sigue:

$$N_{t,Rd} = A_{net} f_a / \gamma_{M2} \quad (5.30)$$

donde

f_a es la resistencia característica [véase apartado 5.3.5(2)];

A_{net} es el área neta de la sección, con deducción de agujeros; y una deducción cuando se precise tener en cuenta el efecto de la zona HAZ reblandecida. La última deducción se basa en el espesor reducido de $\rho_{haz} t$;

γ_{M2} es el coeficiente parcial de seguridad para el material [véase apartado 5.1.1(2)].

5.8 Resistencia de elementos comprimidos

5.8.1 Generalidades

(1)P Los elementos sometidos a compresión axial pueden fallar por una de tres vías:

- a) Flexión (véase apartado 5.8.4)
- b) Torsión (véase apartado 5.8.5)
- c) Aplastamiento local (véase apartado 5.8.6)

La comprobación a) siempre debe ser hecha. La comprobación b) es generalmente necesaria pero puede ser suprimida en algunos casos.

La comprobación c) sólo es necesaria para puntales de baja esbeltez que estén significativamente debilitados localmente por agujeros o soldadura.

(2) Para elementos sometidos a combinación de compresión y flexión referirse al apartado 5.9.

5.8.2 Clasificación de la sección para compresión axial

(1) Antes de llevar a cabo cualquiera de las comprobaciones dadas en el apartado 5.8.1, es primero necesario clasificar la sección transversal como de clase 1, 2, 3 ó 4. La clasificación se basa en aquel de sus elementos componentes que sea más desfavorable, de acuerdo con el apartado 5.4.4.

5.8.3 Resistencia al pandeo en conjunto

(1) Ambas comprobaciones dadas en el apartado 5.8.1(1) a) y b) deberán cumplir la condición

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (5.31)$$

donde

$N_{b,Rd}$ es la resistencia de cálculo a pandeo y es igual a $f_s A / \gamma_{M1}$;

A es el área bruta, sin reducción por reblandecimiento HAZ, pandeo local o agujeros;

f_s es la tensión de pandeo para pandeo con flexión (véase apartado 5.8.4) o pandeo con torsión (véase apartado 5.8.5).

(2) Cuando se esté determinando f_s para pandeo con flexión, el fallo respecto a ambos ejes principales deberá ser considerado y tomar el menor valor de los dos.

5.8.4 Resistencia al pandeo con flexión

5.8.4.1 Tensión de pandeo

(1) El valor de f_s para la apropiada esbeltez adimensional se puede determinar mediante

$$f_s = \chi \eta k_1 k_2 f_o \quad (5.32)$$

donde χ se toma de la figura 5.8 o de:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (5.33)$$

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

α es un coeficiente de imperfección, véase tabla 5.6

$\bar{\lambda}_o$ es el límite de la meseta horizontal, véase tabla 5.6

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \eta f_o}{N_{cr}}} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$$

λ = es la esbeltez para el eje correspondiente (véase apartado 5.8.4.2)

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{\eta f_o}}$$

N_{cr} es la carga crítica elástica para el eje correspondiente

η es el coeficiente para tener en cuenta cualquier pérdida de efectividad debido a la presencia de elementos clase 4, viene dado por:

$\eta = 1$ para secciones transversales de las clases 1, 2 ó 3

$\eta = A_e/A$ para secciones transversales de clase 4 con $A_e = A - A_c (1 - \rho_c)$, A_c = área del elemento clase 4

$\rho_c = t_{ef}/t$ para cada elemento clase 4

k_1 = es un coeficiente para tener en cuenta la asimetría de la sección transversal, dado en la tabla 5.5

k_2 = es un coeficiente para tener en cuenta los efectos de debilitamiento por la soldadura, dado en la tabla 5.5

NOTA – Para secciones transversales clase 4 que contengan material HAZ A_c se deberá tomar como el valor inferior de los valores dados previamente o en la tabla 5.5. Para secciones transversales que contengan más de un elemento clase 4 o más de un elemento afectado por HAZ la reducción puede necesitar tener en cuenta diferentes valores de ρ_{haz} o ρ_c para los diferentes elementos planos.

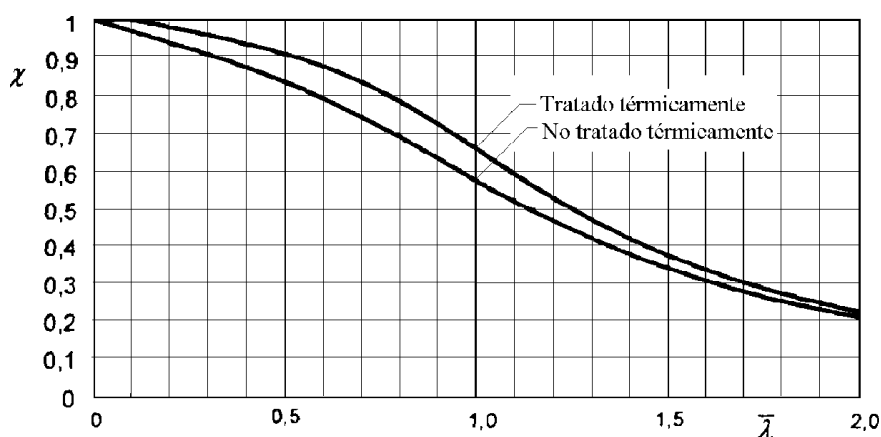


Fig. 5.8 – Coeficiente de reducción χ para pandeo con flexión

(2) Los valores de α y $\bar{\lambda}_o$ se tomarán de acuerdo con la tabla 5.6.

Tabla 5.5
Valores de los coeficientes k_1 y k_2

		Aleaciones tratadas térmicamente	Aleaciones no tratadas térmicamente
k_1	Sección transversal simétrica	$k_1 = 1$	$k_1 = 1$
	Sección transversal asimétrica	$k_1 = 1 - 2,4 \psi^2 \frac{\bar{\lambda}^2}{(1 + \bar{\lambda}^2)(1 + \bar{\lambda})^2}$	$k_1 = 1 - 3,2 \psi^2 \frac{\bar{\lambda}^2}{(1 + \bar{\lambda}^2)(1 + \bar{\lambda})^2}$
		$\psi = \frac{\gamma_{m\acute{a}x.} - \gamma_{m\acute{i}n.}}{h}$ donde $\gamma_{m\acute{a}x.}$ y $\gamma_{m\acute{i}n.}$ son las distancias entre los bordes de la sección y el centroide en el plano de pandeo y h es el canto de la sección transversal	
k_2	Soldaduras longitudinales	$k_2 = 1 - \left(1 - \frac{A_1}{A}\right) 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0,05 + 0,1 \frac{A_1}{A}\right) \bar{\lambda}^{1,3 (1 - \bar{\lambda})}$ con $A_1 = A - A_{haz} (1 - \rho_{haz})$ en la que A_{haz} = área de la zona HAZ	$k_2 = 1 + 0,04 (4 \bar{\lambda})^{(0,5 - \bar{\lambda})} - 0,22 \bar{\lambda}^{1,4 (1 - \bar{\lambda})}$
	Soldaduras transversales	$k_2 = \rho_{haz}$ ó ω_x de acuerdo con 5.9.4.5	$k_2 = \rho_{haz}$ ó ω_x de acuerdo con 5.9.4.5

Tabla 5.6
Valores del coeficiente de imperfección α y $\bar{\lambda}_o$

Aleación	α	$\bar{\lambda}_o$
Tratada térmicamente	0,20	0,10
No tratada térmicamente	0,32	0,00

5.8.4.2 Parámetro de esbeltez

- (1) El parámetro de esbeltez del pandeo de la columna λ se define como sigue:

$$\lambda = l/i \quad (5.34)$$

donde

l es la longitud eficaz

i es el radio de giro

ambos en la correspondiente dirección de pandeo considerada.

La longitud eficaz l deberá ser tomada como KL , donde L es la longitud entre puntos de soporte lateral; para un puntal en voladizo, L es su longitud. El valor de K , el coeficiente de longitud eficaz para puntales, estará condicionado por el conocimiento de las condiciones de extremo; la tabla 5.7 proporciona alguna guía.

El valor de i se tomará en base a la sección bruta para todos los elementos.

NOTA – Cuando la sección transversal está completamente o sustancialmente afectada por el reblandecimiento HAZ en un extremo direccionalmente coartado de un elemento, tal coacción debe ser ignorada cuando se llega a un conveniente valor para K . Entonces para el caso 1 de la tabla 5.7 K debe ser tomado como 1,0 si el perfil está completamente reblandecido en cada extremo.

Tabla 5.7
Coeficiente de longitud eficaz para puntales

Condiciones de extremos	K
1. Mantenido en posición y coartado en dirección en ambos extremos	0,7
2. Mantenido en posición en ambos extremos y coartado en dirección en un extremo	0,85
3. Mantenido en posición en ambos extremos, pero sin coartar en dirección	1,0
4. Mantenido en posición en un extremo, y coartado en dirección en ambos extremos	1,25
5. Mantenido en posición y coartado en dirección en un extremo, y parcialmente coartado en dirección pero no mantenido en posición en el otro extremo	1,5
6. Mantenido en posición y coartado en dirección en un extremo, pero no mantenido en posición o coartado en dirección en el otro extremo	2,0

5.8.5 Pandeo con torsión

5.8.5.1 Excepciones

- (1) La posibilidad de pandeo con torsión puede ser ignorada para los siguientes casos:
- perfiles tubulares cerrados;
 - perfiles I doblemente simétricos;
 - perfiles compuestos enteramente de radios salientes, por ejemplo, angulares, tes, cruciformes, que estén clasificados como clase 1 de acuerdo con el apartado 5.5.4.

5.8.5.2 Parámetro de esbeltez

- (1) El parámetro de esbeltez de pandeo con torsión λ se puede obtener utilizando cualquiera de los apartados a) ó b) siguientes, o también refiriéndose al Anexo J. Siempre se basará en el área bruta de la sección como a continuación.

a) Expresión general

$$\lambda = \pi \sqrt{\frac{E A}{N_{cr}}} \quad (5.35)$$

donde

A es el área bruta de la sección transversal, sin reducciones por pandeo local, zonas reblandecidas HAZ o agujeros;

E es el módulo de elasticidad;

N_{cr} es la carga crítica elástica para pandeo con torsión, teniendo en cuenta las interacciones con el pandeo de columna cuando sea necesario.

b) Perfiles como los dados en la tabla 5.9

$$\lambda = k \lambda_t \quad (5.36)$$

donde k se obtiene de la figura 5.9 o mediante la expresión:

$$k = \sqrt{\frac{2 X s^2}{1 + s^2 - \sqrt{(1 + s^2)^2 - 4 X s^2}}} \quad (5.36 a)$$

en la cual X y s se obtienen en la tabla 5.9.

λ_t se obtiene como sigue:

$$1) \text{ para angulares, tes, cruciformes} \quad \lambda_t = \lambda_o \quad (5.36 b)$$

$$2) \text{ para perfiles en U, "sombrosos de copa"} \quad \lambda_t = \frac{\lambda_o}{\sqrt{1 + Y \lambda_o^2 / \lambda_y^2}} \quad (5.36 c)$$

La tabla 5.9 contiene expresiones para λ_o e Y y también para s y X (necesarios en la expresión 5.36 a y para la figura 5.9).

En 2) la cantidad λ_y se debe tomar como la esbeltez eficaz para el pandeo de columna respecto al eje y-y (como lo definido en la tabla 5.9).

5.8.5.3 Tensiones de pandeo

- (1) El valor de f_s para el pandeo con torsión debe ser obtenido a partir de la expresión dada en el apartado 5.8.4.1 (1) con ϕ determinado mediante

$$\phi = 0,5 [1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_1) + \bar{\lambda}^2] \quad (5.37)$$

y usando un valor para α y $\bar{\lambda}_1$ elegido de acuerdo con la tabla 5.8.

Tabla 5.8
Valores de α y $\bar{\lambda}_1$ para pandeo con torsión

Sección transversal	Valores de α	Valores de $\bar{\lambda}_1$
General	0,35	0,4
Compuesta completamente de radios salientes (véase 5.8.5.4)	0,20	0,6

5.8.5.4 Secciones compuestas de radios salientes

- (1) Para perfiles tales como angulares, tes y cruciformes, compuestos enteramente de radios salientes, el pandeo local y el pandeo con torsión están completamente relacionados.
- (2) Cuando se considera el pandeo con torsión de un perfil conteniendo sólo salientes sin reforzar, hay que tener en cuenta, cuando sea apropiado, la presencia de material HAZ cuando se determine A_e , pero no se debe hacer reducción para pandeo local, es decir, $\rho_c = 1$.
- (3) Para perfiles que contengan salientes reforzados, tales que el modo 1 se convierta en crítico en términos de pandeo local (véase apartado 5.4.3), el elemento deberá ser contemplado como "general" en la tabla 5.8 y A_e determinado teniendo en cuenta tanto el pandeo local como el material HAZ.

5.8.6 Aplastamiento local

- (1) El empuje axial N_{Ed} no deberá superar a $N_{a,Rd}$ para la sección más desfavorable a lo largo de la longitud del puntal, determinado como sigue:

Los perfiles de las clases 1, 2 ó 3, libres de efectos de zona HAZ

$$N_{a,Rd} = f_o A_n / \gamma_{M1}$$

Otros perfiles, generalmente

$$N_{a,Rd} = f_o A_{ne} / \gamma_{M1}$$

en las que

A_n es el área neta de la sección, con deducciones por agujeros no rellenos;

A_{ne} es el área neta eficaz de la sección.

El área A_{ne} deberá tomarse como A_e menos la deducción por agujeros no rellenos, donde A_e es el área eficaz utilizada en la consideración del pandeo completo (flexión o torsión). Para agujeros localizados en zonas de espesores reducidos la deducción se puede basar en el espesor reducido, en lugar de en el espesor completo.

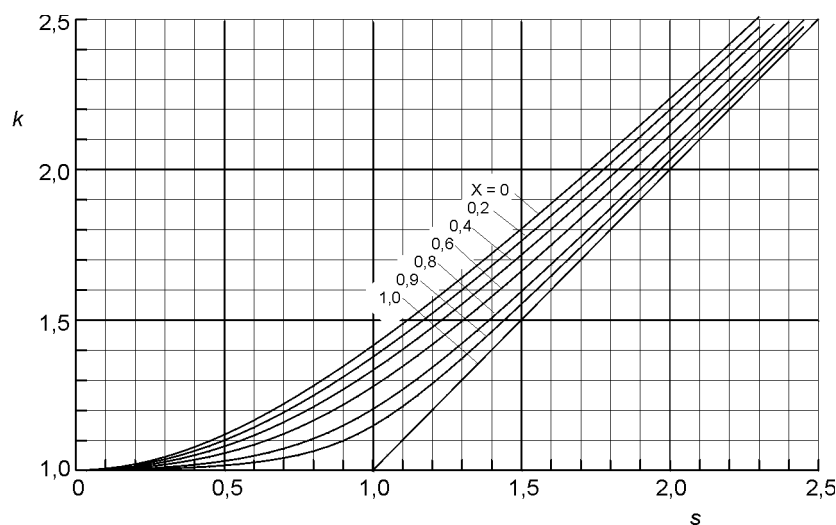


Fig. 5.9 – Pandeo con torsión de puntales, coeficiente k de interacción
Para la definición de s , véase la tabla 5.9

Tabla 5.9
Parámetros de pandeo con torsión de puntales

1		$\rho \leq 5$	$\lambda_o = \lambda_1 = 5B/t - 0,6\rho^{1,5}(B/t)^{0,5}$ $s = \lambda_u/\lambda_o$ $X = 0,6$
2		$\rho \leq 5$ $1 \leq w \leq 2,5$	$\lambda_o = \lambda_1 - (w-1)[2(w-1)^2 - 1,5\rho]$ $s = \lambda_u/\lambda_o$ $X = 0,6$
3	(Véase nota 1) 		$\lambda_o = 66$ $s = \lambda_u/\lambda_o$ $X = 0,61$
4		$\rho \leq 5$ $0,5 \leq B/D \leq 1$	$\lambda_o = (D/t)[4,2 + 0,8(B/D)^2] - 0,6\rho^{1,5}(D/t)^{0,5}$ $s = s_4 = \{1 + 6(1 - B/D)^2\}(\lambda_u/\lambda_o)$ $X = X_4 = 0,6 - 0,4(1 - B/D)^2$
5		$\rho \leq 5$ $0,5 \leq B/D \leq 1$ $1 \leq w \leq 2,5$	$\lambda_o = \lambda_4 + 1,5\rho(w-1) - 2(w-1)^3$ $s = s_4$ $X = X_4$
6	(Véase nota 1) 		$\lambda_o = 57$ $s = 1,4\lambda_u/\lambda_o$ $X = 0,6$
7		$\rho \leq 3,5$	$\lambda_o = 5,1B/t - \rho^{1,5}(B/t)^{0,5}$ $X = 1$

Tabla 5.9 (Continúa)
Parámetros de pandeo con torsión de puntales

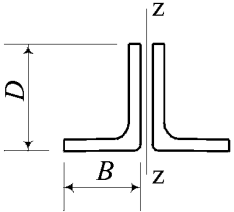
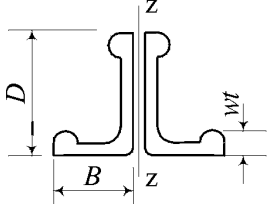
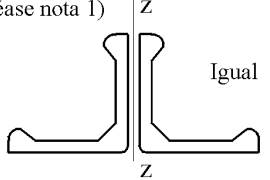
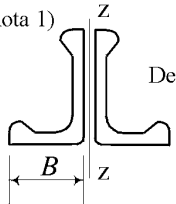
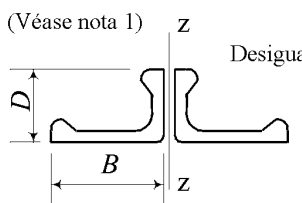
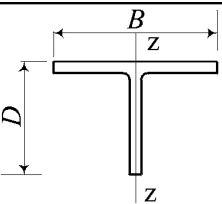
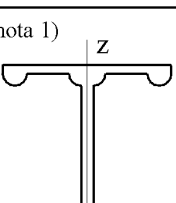
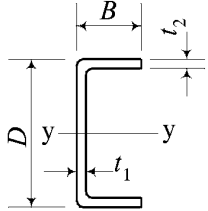
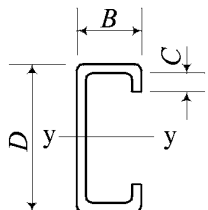
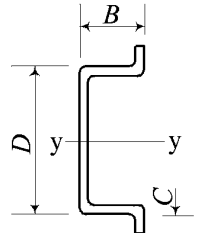
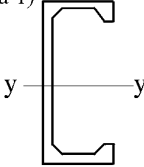
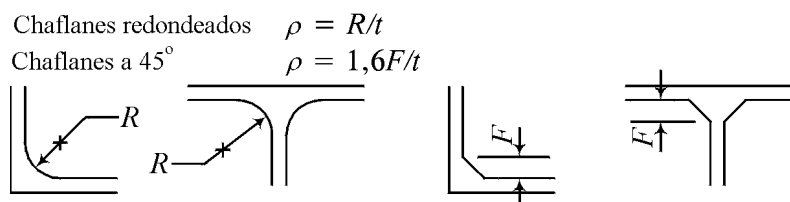
8		$\rho \leq 5$ $0,5 \leq D/B \leq 2$	$\lambda_o = \lambda_8 = (B/t)[4,4 + 1,1(B/D)^2] - 0,7\rho^{1,5}(B/t)^{0,5}$ $s = \lambda_z/\lambda_o$ $X = X_8 = 1,1 - 0,3D/B$
9		$\rho \leq 5$ $0,5 \leq D/B \leq 2$ $1 \leq w \leq 2,5$	$\lambda_o = \lambda_8 + 1,5\rho(w-1) - 2(w-1)^3$ $s = \lambda_z/\lambda_o$ $X = X_8$
10	(Véase nota 1)  Igual		$\lambda_o = 70$ $s = \lambda_z/\lambda_o$ $X = 0,83$
11	(Véase nota 1)  Desigual		$\lambda_o = 60$ $s = \lambda_z/\lambda_o$ $X = 0,76$
12	(Véase nota 1)  Desigual		$\lambda_o = 63$ $s = \lambda_z/\lambda_o$ $X = 0,89$
13		$\rho \leq 3,5$ $0,5 \leq D/B \leq 2$	$\lambda_o = (D/t)[1,4 + 1,5B/D + 1,1D/B] - \rho^{1,5}(D/t)^{0,5}$ $s = \lambda_z/\lambda_o$ $X = 1,3 - 0,8D/B + 0,2(D/B)^2$
14	(Véase nota 1) 		$\lambda_o = 65$ $s = \lambda_z/\lambda_o$ $X = 0,78$

Tabla 5.9
Parámetros de pandeo con torsión de puntales (*Fin*)

15		$1 \leq D/B \leq 3$ $1 \leq t_2/t_1 \leq 2$	$\lambda_o = (B/t_2)[7 + 1,5(D/B)(t_2/t_1)]$ $s = \lambda_y / \lambda_t$ $X = 0,38D/B - 0,04(D/B)^2$ $Y = 0,14 - 0,02D/B - 0,02t_2/t_1$
16		$1 \leq D/B \leq 3$ $C/B \leq 0,4$	$\lambda_o = (B/t)(7 + 1,5D/B + 5C/B)$ $s = \lambda_y / \lambda_t$ $X = 0,38D/B - 0,04(D/B)^2 - 0,25C/B$ $Y = 0,12 - 0,02D/B + \frac{0,6(C/B)^2}{D/B - 0,5}$
17		$1 \leq D/B \leq 3$ $C/B \leq 0,4$	$\lambda_o = (B/t)(7 + 1,5D/B + 5C/B)$ $s = \lambda_y / \lambda_t$ $X = 0,38D/B - 0,04(D/B)^2$ $Y = 0,12 - 0,2D/B - \frac{0,05C/B}{D/B - 0,5}$
18	(Véase nota 1) 		$\lambda_o = 126$ $s = \lambda_y / \lambda_t$ $X = 0,59$ $Y = 0,104$

- 1) Los perfiles tienen generalmente espesor uniforme t , excepto en los casos 14 y 15.
- 2) λ_u , λ_y o λ_z son los parámetros de esbeltez (l/r) para el pandeo por flexión respecto a los ejes u , y ó z .
- 3) ρ es un coeficiente dependiente del incremento de material en la raíz de la sección tal como sigue:



- 4) Los valores dados para λ_o , X e Y son sólo válidos dentro de los límites mostrados. En el caso de angulares adosados (casos 8 a 12) las expresiones dejan de ser aplicables si la separación entre los angulares supera el valor $2t$.

5.8.7 Puntales unidos excéntricamente

5.8.7.1 Puntales simples

- (1) Siempre que el enlace de extremo impida las rotaciones en el plano del elemento conectado y no se aplica intencionadamente flexión, los siguientes tipos de puntales unidos excéntricamente pueden ser calculados siguiendo un método aproximado. Este representa una alternativa al método general para combinación de flexión y compresión del apartado 5.9.
 - a) angular simple conectado a través de una sola pata;
 - b) angulares dispuestos espalda contra espalda en la unión de cada uno por una cara a una cartela plana;
 - c) perfil en U unido sólo por su alma;
 - d) simple te conectada sólo por sus alas.
- (2) Cuando se comprueba el pandeo con flexión utilizando el apartado 5.8.4 fuera del plano del elemento(s) conectado la excentricidad de la carga se podrá despreciar y el valor de f_s se deberá tomar como 40% del valor de la carga centrada.
- (3) El valor para a) deberá tomarse respecto al eje paralelo al (a los) elemento(s) conectado(s). Para pandeo con torsión no es necesario modificar el método del apartado 5.8.5.

5.8.7.2 Puntales compuestos de dos componentes espalda contra espalda

- (1) Los puntales que comprenden parejas de angulares, de Ues o Tes, unidos por cualquier cara a cartelas planas de extremo pueden ser calculados como un único elemento compuesto siempre que:
 - a) los dos componentes están seguramente fijados en sus extremos;
 - b) los dos componentes están también interconectados en sus tercios, utilizando espaciadores igual al espesor de las cartelas.

5.8.8 Puntales empresillados

- (1) Los puntales empresillados se calcularán generalmente por determinación previa de los esfuerzos a los que van a estar sometidos cada componente y proporcionando cada componente para que resista esos esfuerzos. Sin embargo, siempre que la disposición satisfaga las siguientes siete condiciones se podrá calcular como si fuese un elemento compuesto simple:
 - a) Deberá estar cargado axialmente.
 - b) Deberá estar compuesto por dos componentes principales unidos por presillas igualmente espaciadas, siendo la sección transversal simétrica respecto a un eje perpendicular a las presillas.
 - c) Las presillas deberán estar generalmente dispuestas por parejas. Sin embargo, si los componentes principales son tes unidas pie a pie o angulares, se permite el uso de presillas únicas.
 - d) $\lambda_2 \leq 0,8 \lambda_1$

donde

λ_1 y λ_2 son los parámetros de esbeltez para el pandeo de columna del elemento completo respecto a los ejes paralelo y normal a las presillas, respectivamente.

e) $\lambda_3 \leq 0,7 \lambda_2$

donde

λ_3 es el parámetro de esbeltez para pandeo de un componente principal entre presillas, basado en pandeo de columna o en pandeo con torsión tomando aquel que sea más crítico.

f) El sistema de empresillado se deberá calcular para resistir un esfuerzo cortante total V en el plano de la presilla, el cual se toma como el 2,5% del esfuerzo axial en el elemento completo bajo cargas mayoradas (de cálculo).

g) La unión de cada presilla a cada componente principal deberá ser calculada para transmitir las siguientes acciones simultáneas bajo cargas mayoradas (de cálculo):

1) esfuerzo cortante longitudinal de V_{Ed}/N

2) momento de $V_{Ed}/2N$ actuando en el plano de la presilla

donde

d es la distancia longitudinal entre centros de presillas;

a es la distancia entre elementos principales medida entre los centroides de las uniones de cada presilla;

N es el número de presillas en cada posición (1 ó 2).

En el diseño de presillas es importante considerar los posibles efectos de debilitamiento por pandeo local y reblandecimiento HAZ (si hay soldadura).

5.9 Resistencia de elementos bajo esfuerzo axial y flexión biaxial

5.9.1 Generalidades

- (1) Esta cláusula proporciona expresiones de interacción para comprobación de elementos sometidos a la combinación de esfuerzo axial y de flexión alrededor del eje mayor y/o menor.
- (2) En general se necesita hacer dos comprobaciones:
 - pandeo con flexión;
 - pandeo lateral con torsión.
- (3) La comprobación del perfil está incluida en la comprobación del pandeo con flexión y el pandeo lateral con torsión si se usa el método de los apartados 5.9.3 y 5.9.4.
- (4) Cuando se calcule la resistencia N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ y $M_{z,Rd}$ hay que tener en cuenta la presencia de reblandecimiento HAZ para las soldaduras longitudinales (véase apartados 5.6.2 y 5.8.7). La presencia de reblandecimiento HAZ localizado debido a soldaduras transversales y la presencia de agujeros se deberá tener en cuenta en la forma indicada en los apartados 5.9.4(5) y (6), respectivamente.

5.9.2 Clasificación de perfiles y pandeo local bajo la actuación de combinaciones de acciones

- (I)P La clasificación de las secciones transversales para elementos sometidos a combinación de flexión con esfuerzo axial se hace para cada componente de carga separadamente de acuerdo con el apartado 5.4. No se hace clasificación alguna para el estado de combinación de tensiones.
- (2) Una sección transversal puede pertenecer a diferentes clases para el esfuerzo axial, la flexión según el eje fuerte y la flexión según el eje débil. El estado de combinación de tensiones se tiene en cuenta por medio de las expresiones de interacción dadas en los apartados 5.9.3 y 5.9.4. Estas expresiones de interacción se pueden utilizar para todas las clases de secciones transversales. La influencia del pandeo local o de la fluencia en la resistencia para cargas combinadas se tiene en cuenta mediante los factores en los denominadores y en los exponentes, los cuales son función de la esbeltez de la sección transversal.

5.9.3 Flexión y esfuerzo axial. Comprobación del perfil

5.9.3.1 Flexión y esfuerzo axial de tracción

- (1)P Los elementos sometidos a combinación de flexión y esfuerzo axial de tracción deberán comprobarse a resistencia frente al pandeo lateral con torsión, tratando el esfuerzo axial y el momento flector como un efecto vectorial.
- (2) Cuando el esfuerzo axial y el momento flector pueden variar independientemente, el valor calculado de la tracción axial deberá ser multiplicado por un coeficiente de reducción para los efectos vectoriales:

$$\psi_{vec} = \boxed{0,8}$$

- (3) La tensión neta calculada $\sigma_{com,Ed}$ (la cual puede exceder a f_o/γ_{M1}) en la fibra extrema comprimida debida a los efectos vectoriales se deberá determinar mediante:

$$\sigma_{com,Ed} = M_{Sd}/W_{com} - \psi_{vec} N_{t,Sd}/A \quad (5.38)$$

donde W_{com} es el módulo elástico de la sección para la fibra extrema comprimida y $N_{t,Ed}$ es el valor de cálculo para el esfuerzo axial de tracción.

- (4) La verificación se efectuará utilizando un momento interno efectivo de cálculo $M_{eff,Ed}$ obtenido mediante:

$$M_{eff,Ed} = W_{com} \sigma_{com,Ed} \quad (5.39)$$

- (5) El momento resistente de cálculo a pandeo $M_{b,Rd}$ deberá ser obtenido usando el apartado 5.6.6.
- (6) Los elementos sometidos a combinación de flexión y tracción axial y los elementos sometidos a combinación de flexión y compresión axial, en los que no hay riesgo de pandeo por flexión o pandeo lateral con torsión, deberán cumplir con las expresiones 5.40 y 5.41 ó 5.43. Esto también se aplica a otros elementos sometidos a flexión y compresión axial, bajo la condición de que $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$ se determinan siguiendo la teoría de segundo orden y considerando el incremento de flechas que ocurre debido a las tensiones residuales y la curva real entre tensiones y deformaciones unitarias.

5.9.3.2 Vigas I

- (1) Las siguientes dos expresiones deberán ser comprobadas:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^{\xi_0} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1,00 \quad (5.40)$$

y

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^{\eta_0} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \right)^{\gamma_0} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_0} \leq 1,00 \quad (5.41)$$

donde los exponentes η_0 , γ_0 y ξ_0 son:

$$\eta_0 = 1,0 \text{ o alternativamente puede tomarse como } \alpha_z^2 \alpha_y^2 \text{ pero } \eta_0 \geq 1 \text{ y } \eta_0 \leq 2 \quad (5.42a)$$

$$\gamma_0 = 1,0 \text{ o alternativamente puede tomarse como } \alpha_z^2 \text{ pero } \gamma_0 \geq 1 \text{ y } \gamma_0 \leq 1,56 \quad (5.42b)$$

$$\xi_0 = 1,0 \text{ o alternativamente puede tomarse como } \alpha_y^2 \text{ pero } \xi_0 \geq 1 \quad (5.42c)$$

- (2) Las notaciones en los apartados 5.9.3.2 - 5.9.3.5 son:

N_{Ed} = esfuerzo axial de compresión o tracción;
 $M_{y,Ed}$ = momento flector respecto al eje y;
 $M_{z,Ed}$ = momento flector respecto al eje z;
 N_{Rd} = $A f_o / \gamma_{M1}$ o $A_e f_o / \gamma_{M1}$ para secciones transversales de la clase 4;
 $M_{y,Rd}$ = $\alpha_y W_y f_o / \gamma_{M1}$;
 $M_{z,Rd}$ = $\alpha_z W_z f_o / \gamma_{M1}$;
 ω_0 = 1 para vigas-columnas sin soldaduras localizadas o agujeros. En otros casos, véanse apartados 5.9.4(5) ó (6);
 α_y, α_z = factor de forma para flexión alrededor del eje y y z, basado en la sección bruta teniendo en cuenta el pandeo local y el reblandecimiento HAZ para soldaduras longitudinales, véase apartado 5.6.2. α_z no se deberá tomar mayor de 1,25.

5.9.3.3 Secciones transversales macizas y perfiles tubulares

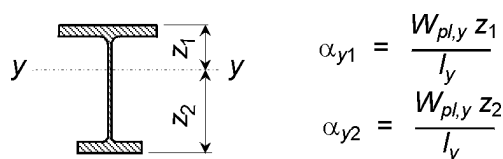
- (1) Se deberá comprobar la siguiente expresión:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^\psi + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1,00 \quad (5.43)$$

donde $\psi = 2$ para secciones transversales macizas y 1,3 para perfiles tubulares. Alternativamente ψ se puede tomar como α_y, α_z pero $\psi \leq 2$.

5.9.3.4 Otras secciones transversales

- (1) La expresión 5.41 puede ser usada con $\eta_0 = \alpha_0^2$ (pero $\eta_0 \leq 2,0$ y $\eta_0 > 1$) y $\gamma_0 = \xi_0 = 1$, donde α_0 es el mayor de α_{y1} y α_{y2} para las dos fibras extremas. Véase figura 5.10. Para secciones transversales de pared delgada, véase apartado 5.9.4.4.



$$\alpha_{y1} = \frac{W_{pl,y} z_1}{I_y}$$

$$\alpha_{y2} = \frac{W_{pl,y} z_2}{I_y}$$

Fig. 5.10 – Factores de forma para secciones transversales asimétricas de las clases 1 y 2

5.9.3.5 Elementos que contienen soldaduras localizadas

- (1) En un perfil afectado por el reblandecimiento HAZ el valor de f_o se deberá tomar como la resistencia característica para la *completa fluencia* del material con resistencia reducida. Esto incluye los efectos HAZ debidos a la soldadura de ensambles temporales.
- (2) Sin embargo, cuando el reblandecimiento HAZ tiene una determinada localización a lo largo de la longitud y si el reblandecimiento no se extiende longitudinalmente una distancia mayor que el menor tamaño del elemento, entonces la resistencia de cálculo f_o / γ_{M1} se deberá tomar como la resistencia última de cálculo f_a / γ_{M2} del material con resistencia reducida.

5.9.4 Flexión y compresión axial

5.9.4.1 Generalidades

(1)P Para elementos sometidos a compresión axial y flexión la adecuada expresión de interacción para:

- a) pandeo con flexión y
- b) pandeo lateral con torsión

deberá ser satisfecha en cada uno de los tramos de longitud sin soporte en los que se pueda producir el pandeo.

(2) Todas las cantidades en las expresiones de interacción se tomarán como positivas.

5.9.4.2 Pandeo con flexión

Se deberán comprobar las siguientes expresiones:

(1) flexión en el eje y de una viga I

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \omega_x N_{Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1,00 \quad (5.44)$$

(2) flexión en el eje z de una viga I

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1,00 \quad (5.45)$$

En las expresiones 5.44 y 5.45 todos los exponentes pueden tomarse como 0,8 o alternativamente

$$\eta_c = \eta_0 \chi_z \quad \text{pero} \quad \eta_c \geq 0,8$$

$$\xi_{yc} = \xi_0 \chi_y \quad \text{pero} \quad \xi_{yc} \geq 0,8$$

$$\xi_{zc} = \xi_0 \chi_z \quad \text{pero} \quad \xi_{zc} \geq 0,8$$

donde

η_0 y ξ_0 están de acuerdo con el apartado 5.9.3.2(1)

$\omega_x = \omega_0 = 1$ para vigas-columnas sin soldaduras localizadas. En otros casos véase apartado 5.9.4.5.

(3) Secciones transversales macizas

La expresión 5.45 puede ser utilizada con los exponentes tomados como 0,8 o

$$\eta_c = 2 \chi \quad \text{pero} \quad \eta_c \geq 0,8$$

$$\xi_c = 1,56 \chi \quad \text{pero} \quad \xi_c \geq 0,8$$

(4) Secciones transversales huecas y perfiles tubulares

Se puede usar la expresión 5.46 con $\psi_c = 0,8$ o alternatively tomar como $\chi_y \psi$ o $\chi_z \psi$ dependiendo de la dirección de pandeo, pero $\psi_c \geq 0,8$. ψ debe estar de acuerdo con lo indicado en la expresión 5.43.

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{\min} \omega_x N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1,00 \quad (5.46)$$

(5) Otras secciones transversales

Se puede usar la expresión 5.44 para secciones transversales simétricas y bisimétricas flectando respecto a cualquier eje, para la flexión respecto al eje z reemplazando ξ_{yc} , $M_{y,Ed}$, $M_{y,Rd}$ y χ_y por ξ_{zc} , $M_{z,Ed}$, $M_{z,Rd}$ y χ_z .

(6) Las notaciones en las expresiones 5.44, 5.45 y la expresión 5.46 son:

N_{Ed}	=	esfuerzo axial de compresión;
N_{Rd}	=	$A f_o / \gamma_{M1}$ o $A_{ef} f_o / \gamma_{M1}$ para secciones transversales de la clase 4;
χ_y	=	coeficiente de reducción para pandeo en el plano z-x;
χ_z	=	coeficiente de reducción para pandeo en el plano y-x;
$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$	=	momento flector respecto al eje y y al z. Los momentos se calculan de acuerdo a la teoría de primer orden;
$M_{y,Rd}$	=	$\alpha_y W_y f_o / \gamma_{M1}$ capacidad de momento flector respecto al eje y;
$M_{z,Rd}$	=	$\alpha_z W_z f_o / \gamma_{M1}$ capacidad de momento flector respecto al eje z;
α_y , α_z	=	factor de forma, pero α_z no se deberá tomar mayor de 1,25;
ω_x , ω_0	=	coeficientes de reblandecimiento HAZ de acuerdo con el apartado 5.9.4.5. Si no hay soldaduras, $\omega_x = \omega_0 = 1$.

5.9.4.3 Pandeo lateral con torsión

(1) La siguiente expresión deberá ser comprobada para vigas-columnas con forma de I y secciones transversales similares.

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \omega_{xLT} M_{y,Rd}} \right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1,00 \quad (5.47)$$

donde

N_{Ed}	=	esfuerzo axial;
$M_{y,Ed}$	=	momento flector respecto al eje y. En el caso de vigas-columnas con extremos articulados y en el caso de elementos en pórticos intraslacionales, $M_{y,Ed}$ es el momento de <i>primer orden</i> . Para elementos en pórticos con traslacionalidad libre $M_{y,Ed}$ es el momento flector de acuerdo con la teoría de <i>segundo orden</i> ;
$M_{z,Ed}$	=	momento flector respecto al eje z. $M_{z,Ed}$ es el momento flector de acuerdo a la teoría de <i>primer orden</i> ;
N_{Rd}	=	$A f_o / \gamma_{M1}$ o $A_{ef} f_o / \gamma_{M1}$ para secciones transversales de la clase 4;
χ_z	=	coeficiente de reducción para pandeo cuando una o ambas alas flectan lateralmente (pandeo en el plano y-z o pandeo lateral con torsión);

- $M_{y,Rd} = \alpha_y W_y f_o / \gamma_{M1}$ = capacidad de momento flector respecto al eje y;
 χ_{LT} = coeficiente de reducción para pandeo lateral con torsión;
 $M_{z,Rd} = \alpha_z W_z f_o / \gamma_{M1}$ = capacidad de momento flector respecto al eje z;
 $\eta_c = 0,8$ o alternativamente $\eta_0 \chi_z$ pero $\eta_c \geq 0,8$;
 $\gamma_c = \gamma_0$;
 $\xi_{zc} = 0,8$ o alternativamente $\xi_0 \chi_z$ pero $\xi_{zc} \geq 0,8$;
 ω_x , ω_0 y ω_{xLT} = coeficientes de reblandecimiento HAZ, véase el apartado 5.9.4.5;
 η_0 , γ_0 y ξ_0 se definen de acuerdo con las expresiones dadas en el apartado 5.9.3.2.

La expresión para el pandeo con flexión, véase apartado 5.9.4(2), también debe ser comprobada.

5.9.4.4 Perfiles de pared delgada

- (1) Se deben usar expresiones de interacción que estén de acuerdo con los apartados 5.40 y 5.41. El pandeo local se tiene en cuenta mediante los factores de forma α_y y α_z . Los coeficientes η_0 , γ_0 y ξ_0 no deben ser menores de 1.

5.9.4.5 Elementos que contienen soldaduras localizadas

- (1) Los valores de ω_0 , ω_x y ω_{xLT} para una viga-columna, sometida a un reblandecimiento HAZ, generalmente deberán estar basados en la resistencia última del material reblandecido HAZ. Del lado de la seguridad podría tomarse como referencia la más desfavorable sección en el tramo considerado, incluso cuando tal reblandecimiento ocurre sólo localmente a lo largo de la longitud. Entonces ω_0 , ω_x y ω_{xLT} en las expresiones 5.44, 5.45 y 5.46 son

$$\omega_0 = \omega_x = \omega_{xLT} = \frac{\rho_{haz} f_a / \gamma_{M2}}{f_o / \gamma_{M1}} \text{ pero } \leq 1,00 \quad (5.48)$$

donde

ρ_{haz} es el coeficiente de reducción para el material afectado por el calor, de acuerdo con el apartado 5.4.2.

- (2) Sin embargo, cuando el reblandecimiento HAZ ocurre cerca de los extremos del tramo, o sólo cerca de los puntos de inflexión, ω_x y ω_{xLT} se pueden incrementar considerando el pandeo por flexión y el pandeo lateral con torsión, siempre que tal reblandecimiento no se extienda en una distancia a lo largo del elemento mayor que la menor dimensión del perfil.

$$\omega_x = \frac{\omega_o}{\chi + (1 - \chi) \operatorname{sen} \frac{\pi x_s}{l_c}} \quad (5.49)$$

$$\omega_{xLT} = \frac{\omega_o}{\chi_{LT} + (1 - \chi_{LT}) \operatorname{sen} \frac{\pi x_s}{l_c}} \quad (5.50)$$

$$\omega_o = \frac{\rho_{haz} f_a / \gamma_{M2}}{f_o / \gamma_{M1}} \text{ pero } \omega_o \leq 1,00 \quad (5.51)$$

donde

- $\chi = \chi_y$ o χ_z dependen de la dirección de pandeo;
 χ_{LT} = coeficiente de reducción para pandeo lateral con torsión de la viga-columna sólo en flexión;
 x_s = distancia desde la soldadura localizada hasta un apoyo o punto de inflexión para la curva de la deformada para pandeo elástico sólo bajo esfuerzo axial, comparar con la figura 5.11;
 l_c = longitud de pandeo.

- (3) El cálculo de χ y χ_{LT} deberá hacerse basándose en la resistencia de fluencia del material de base.
- (4) Cuando la longitud de la zona reblandecida es mayor que la menor dimensión del perfil, entonces la resistencia de cálculo f_a/γ_{M2} para fallo local en las expresiones para ω_0 , ω_x y ω_{xLT} se debe sustituir por la resistencia de cálculo f_o/γ_{M1} para la fluencia completa.
- (5) Cuando la zona localizada de reblandecimiento cubre una parte de la sección transversal (por ejemplo un ala) entonces el conjunto de la sección transversal se supone que está reblandecido.

5.9.4.6 Elementos que contienen reducciones

- (1) Los elementos que contienen reducciones localizadas de la sección transversal, por ejemplo agujeros de tornillos o rebordes recortados, pueden ser comprobados de acuerdo con el apartado 5.9.4(5) sustituyendo ρ_{haz} en ω_0 , ω_x y ω_{xLT} con A_{net}/A_g , donde:

A_{net} = área neta de la sección, con reducción de agujeros;

A_g = área bruta de la sección.

5.9.4.7 Momentos de extremidad desiguales y/o cargas transversales

- (1) Para elementos sometidos a combinación de esfuerzo axial con momentos de extremidad desiguales y/o cargas transversales, las diferentes secciones a lo largo de la viga-columna deben ser comprobadas. El momento flector real en la sección estudiada es utilizado en las expresiones de interacción. ω_x y ω_{xLT} son [comparar con el apartado 5.9.4(5)]:

$$\omega_x = \frac{1}{\chi + (1 - \chi) \sin \frac{\pi x_s}{l_c}} \quad (5.52)$$

$$\omega_{xLT} = \frac{1}{\chi_{LT} + (1 - \chi_{LT}) \sin \frac{\pi x_s}{l_c}} \quad (5.53)$$

- (2) x_s es la distancia desde la sección estudiada hasta un apoyo simple o punto de inflexión de la curva de la deformada para pandeo elástico sólo bajo la actuación de esfuerzo axial, véase figura 5.11.

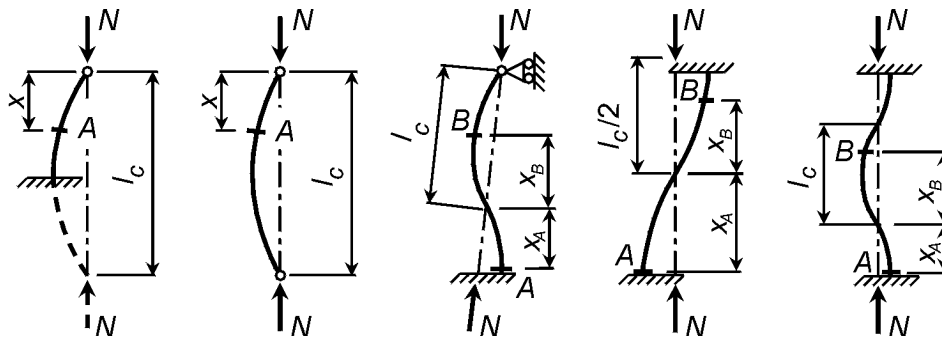


Fig. 5.11 – Longitudes de pandeo l_c y definición de x

A y B en la figura 5.11 son ejemplos de secciones estudiadas marcadas por líneas transversales.

Véase la tabla 5.7 para valores de la longitud de pandeo $l_c = KL$.

5.10 Resistencia de placas sin rigidizar bajo cargas en el plano

5.10.1 Generalidades

- (1) En ciertos tipos de estructuras planas sin rigidizar pueden actuar, como componentes independientes, tensiones normales, tensiones de cortadura, o una combinación de las dos. Las placas están unidas a la estructura portante mediante soldadura, roblonado, atornillado o adhesivos, y la forma del enlace puede afectar a las condiciones de contorno. Las placas delgadas deben ser comprobadas para los estados límites últimos de flexión bajo carga lateral, pandeo bajo tensiones en los bordes en el plano de la placa, y para combinaciones de flexión y pandeo. Las reglas de cálculo dadas en esta sección se refieren sólo a placas rectangulares.

5.10.2 Resistencia bajo compresión uniforme

- (1) Una placa rectangular sometida a compresión uniforme en el extremo se muestra en la figura 5.12. La longitud de la placa en la dirección de la compresión = a , y la anchura transversal de la placa = b . El espesor se supone que es uniforme, y igual a t . La placa puede estar apoyada en toda la longitud de los cuatro bordes, donde las condiciones de apoyo son articulación, restricción elástica o empotramiento, o pueden ser libres a lo largo de un borde longitudinal.

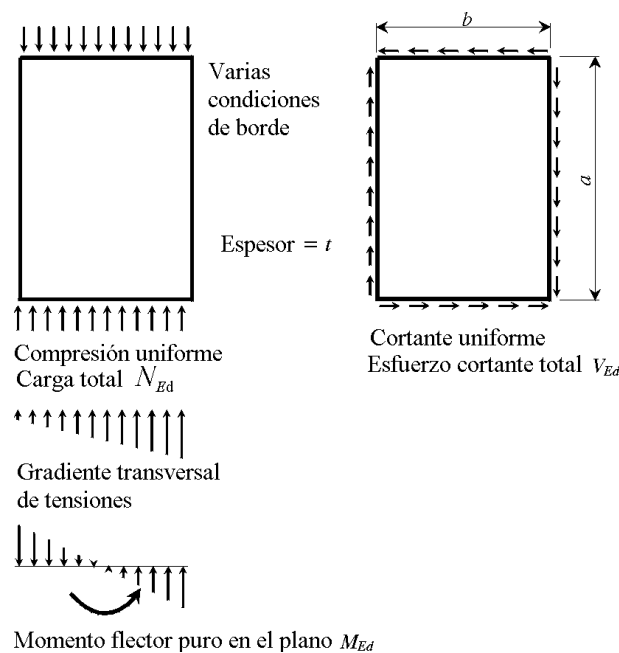


Fig. 5.12 – Placas sin rigidizar

- (2) La susceptibilidad de una placa no rigidizada a pandear se define por el parámetro β , donde $\beta = b/t$. La clasificación de la sección transversal se lleva a cabo de forma similar a la descrita en el apartado 5.4.4, en donde las placas con bordes longitudinales simplemente apoyados, elásticamente restringidos, o perfectamente empotrados se hace que correspondan a “elementos internos”, y las placas con un borde longitudinal libre corresponden a “sobresalientes”. Entonces

$$\begin{aligned}\beta &\leq \beta_2 && \text{clase 1 ó 2} \\ \beta_2 &< \beta \leq \beta_3 && \text{clase 3} \\ \beta_3 &< \beta && \text{clase 4}\end{aligned}$$

donde los valores de β_2 y β_3 se dan en la tabla 5.1.

- (3)P El valor de cálculo de la fuerza de compresión N_{Ed} deberá cumplir

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (5.54)$$

donde N_{Rd} es el menor de

$$N_{o, Rd} = A_{ef} f_o / \gamma_{M1} \quad (\text{fluencia completa y pandeo local}) \quad (5.55)$$

y

$$N_{a, Rd} = A_{net} f_a / \gamma_{M2} \quad (\text{fallo local}) \quad (5.56)$$

donde

A_{ef} es el área eficaz de la sección transversal teniendo en cuenta el pandeo local para secciones transversales clase 4 y el reblandecimiento HAZ de las soldaduras longitudinales;

A_{net} es el área de la sección transversal menos favorable teniendo en cuenta los agujeros no rellenos y el reblandecimiento HAZ de las soldaduras transversales o longitudinales si es necesario;

f_o es la resistencia característica para fluencia completa (véase apartado 5.3.5);

f_a es la resistencia característica para fallo local (véase apartado 5.3.5).

- (4) A_{ef} para secciones transversales de clase 4 se obtiene tomando un espesor reducido como consecuencia del pandeo así como del reblandecimiento HAZ, pero ignorando la presencia de agujeros. A_{ef} se basa generalmente en la sección transversal menos favorable, tomando un espesor igual al menor de ρ_{ct} y $\rho_{haz}t$ en las zonas HAZ, y ρ_{ct} en el resto. En esta comprobación el reblandecimiento HAZ debido a las soldaduras en los bordes cargados se puede despreciar.

El factor ρ_c se obtiene del más favorable de los siguientes tratamientos:

- Calculado ρ_c según el apartado 5.4.5 (3) o leído a partir de la figura 5.5, utilizando las expresiones de elementos internos para placas que estén simplemente apoyadas, elásticamente restringidas, o empotradas a lo largo de los bordes longitudinales, y las expresiones para elementos sobresalientes para placas con un borde longitudinal libre.
- Tomar $\rho_c = \chi$, donde χ es el coeficiente de reducción para el pandeo de columnas dado en el apartado 5.8.3. Calculado χ tomar un parámetro de esbeltez λ igual a 3,5 a/t , el cual corresponde a simple apoyo en los bordes cargados. Para bordes cargados restringidos un valor inferior de λ se puede usar, el cual es tomado a discreción del proyectista.

5.10.3 Resistencia bajo sollicitación de momento en el plano

- (1) Si actúa un momento flector puro en el plano en los extremos (anchura = b) de una placa rectangular sin rigidizar (véase figura 5.12) la susceptibilidad a pandear se define mediante el parámetro β , donde $\beta = 0,40 \ b/t$. La clasificación de las secciones transversales se lleva a cabo de manera similar a la descrita en el apartado 5.10.2.
- (2) El valor de cálculo del momento flector M_{Ed} deberá cumplir:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (5.57)$$

donde el momento resistente de cálculo M_{Rd} es el menor de $M_{o,Rd}$ y $M_{a,Rd}$ de acuerdo con los apartados 5.10.3 (3) y (4).

- (3) El momento resistente de cálculo $M_{o,Rd}$ para la completa fluencia y pandeo local se toma como sigue:

Sección transversal de las clases 1 y 2

$$M_{o,Rd} = W_{pl} f_o / \gamma_{M1} \quad (5.58)$$

Sección transversal clase 3

$$M_{o,Rd} = \left[W_{el} + \frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} (W_{pl} - W_{el}) \right] f_o / \gamma_{M1} \quad (5.59)$$

Sección transversal clase 4

$$M_{o,Rd} = W_{ef} f_o / \gamma_{M1} \quad (5.60)$$

donde

W_{pl} y W_{el} son el módulo plástico resistente y el módulo elástico resistente para la sección transversal o una sección transversal reducida para tener en cuenta el reblandecimiento HAZ debido a las soldaduras longitudinales, pero despreciando la presencia de agujeros;

W_{ef} es el módulo elástico resistente para la sección transversal eficaz obtenido tomando un espesor reducido para tener en cuenta tanto el pandeo como el reblandecimiento HAZ debido a las soldaduras longitudinales cuando sea preciso, pero despreciando la presencia de agujeros;

β es el coeficiente de esbeltez para el elemento más crítico de la sección;

β_2 y β_3 son los valores límites de β en las clases 2 y 3 para ese elemento;

f_o es la resistencia característica para la fluencia completa.

- (4) El momento resistente de cálculo $M_{a,Rd}$ para fallo local en perfiles con agujeros o soldaduras transversales es:

$$M_{a,Rd} = W_{net} f_a / \gamma_{M2} \quad (5.61)$$

donde

W_{net} es el módulo plástico resistente teniendo en cuenta los agujeros y tomando un espesor reducido $\rho_{haz} t$ en cualquier zona afectada por reblandecimiento HAZ.

5.10.4 Resistencia bajo gradientes de tensiones transversales o longitudinales

- (1) Cuando las acciones aplicadas en el extremo de una placa rectangular dan como resultado un gradiente de tensiones transversales, la susceptibilidad al pandeo se define mediante $\beta = gt$, donde g se obtiene en el apartado 5.4.3. Una vez calculado β se procede como en el apartado 5.10.2 anterior.
- (2) Cuando la compresión aplicada o el momento aplicado en el plano varían longitudinalmente a lo largo de la placa (es decir en la dirección de la dimensión a), el momento resistente de cálculo para las secciones transversales de las clases 1, 2 ó 3 en cualquier sección transversal no deberá ser menor que la acción que se produce en dicha sección bajo cargas mayoradas (de cálculo). Para secciones transversales de la clase 4 la comprobación de fluencia debe ser cumplida en cada sección transversal, pero para la comprobación de pandeo se permite comparar la resistencia de cálculo a compresión o el momento resistente con la acción que se produce a una distancia desde el extremo más fuertemente cargado de la placa igual a 0,4 veces media longitud de onda del pandeo elástico.

5.10.5 Resistencia bajo cortadura

- (1) Una placa rectangular sometida a esfuerzos cortantes uniformes se muestra en la figura 5.12. El espesor se supone que es uniforme y las condiciones de apoyo a lo largo de la totalidad de los cuatro bordes pueden ser tanto simple apoyo, con restricción elástica o empotramiento.
- (2) La susceptibilidad al pandeo por cortante se define por el parámetro β , donde $\beta = b/t$ y b es la más pequeña de las dimensiones de la cara. Para todas las condiciones de borde la clasificación de la sección transversal es como sigue:

$$\beta \leq 49 \varepsilon \quad \text{clases 1, 2 y 3}$$

$$\beta > 49 \varepsilon \quad \text{clase 4}$$

donde

$$\varepsilon = \sqrt{150/f_v}$$

f_v = es la resistencia característica a cortante en N/mm².

- (3) El valor de cálculo del esfuerzo cortante V_{Ed} en cada sección transversal debe cumplir:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (5.62)$$

donde

V_{Rd} es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal basada en la menos favorable de las secciones transversales tal como se indica a continuación.

- a) Secciones transversales de las clases 1, 2 ó 3: (5.63)

donde f_v es la resistencia característica en cortadura (véase apartado 5.3.5), y A_{net} es el área eficaz neta descontando los agujeros, y tomando un espesor reducido $\rho_{haz}t$ en cualquier área afectada por el reblandecimiento HAZ. Si la zona HAZ se extiende alrededor del perímetro completo de la placa el espesor reducido se supone que se extiende sobre la sección transversal completa. Cuando haya que tener en cuenta los agujeros, la presencia de agujeros pequeños se puede despreciar si su área transversal total es menor del 20% del área total de la sección transversal bt .

b) Secciones transversales clase 4:

los valores de V_{Rd} tanto para fluencia como pandeo deben ser comprobados. Para la fluencia se usa la comprobación a) anterior para secciones transversales clase 1, 2 o 3. Para la comprobación de pandeo:

$$V_{Rd} = v_1 b t f_v / \gamma_{M1} \quad (5.64)$$

donde

$$v_1 = \left[5,35 + 4 (b/a)^2 \right] \frac{430 t^2 \epsilon^2}{b^2} \quad \text{con } 0,40 \leq b/a < 1,0$$

$$v_1 = \left[5,35 (b/a)^2 + 4 \right] \frac{430 t^2 \epsilon^2}{b^2} \quad \text{con } 1,0 \leq b/a$$

Estas expresiones no tienen en cuenta la ventaja de la acción de la concurrencia de la tracción, pero si se conoce que los apoyos de borde son capaces de sustentar la concurrencia de la tracción, el tratamiento dado en el apartado 5.12.3 se puede emplear.

5.10.6 Resistencia bajo combinación de acciones

- (1) Una placa sometida a combinación de esfuerzo axial y momento actuante en el plano bajo cargas mayoradas (de cálculo) deberá dar una clasificación independiente para cada acción de acuerdo con el apartado 5.10.2. Haciendo esto, el valor de β se basará en el modelo de tensiones de borde producido cuando la fuerza (N_{Ed}) y el momento (M_{Ed}) actúan separadamente.
- (2) Cuando la placa es de clase 4, cada resistencia individual, $N_{o,Rd}$ y $M_{o,Rd}$ se basará en el tipo específico de acción considerado (véase apartado 5.9).
- (3) Si la acción combinada es esfuerzo axial y momento actuante en el plano, se deberá cumplir la siguiente condición:

$$(N_{Ed} / N_{c,Rd}) + (M_{Ed} / M_{c,Rd}) \leq 1,0 \quad (5.65)$$

- (4) Si la combinación de acciones incluye el efecto de un esfuerzo cortante coincidente, V_{Ed} , entonces V_{Ed} puede ser despreciado si no supera a $0,5 V_{Rd}$ (véase apartado 5.9.5).

Si $V_{Ed} > 0,5 V_{Rd}$, los valores de $N_{c,Rd}$ y $M_{c,Rd}$, cada uno, puede ser reducido por el siguiente coeficiente:

Coeficiente de reducción por cortante = $1,6 - 1,2 V_{Ed}/V_{Rd}$

5.11 Resistencia de placas rigidizadas sometidas a cargas en su plano

5.11.1 Generalidades

- (1) Las siguientes reglas conciernen a placas, apoyadas en la totalidad de sus cuatro bordes y reforzadas con uno o dos, rigidizadores longitudinales centrales o excéntricos, o tres o más rigidizadores longitudinales igualmente separados o corrugaciones (véase figura 5.13). También se dan las reglas generales para placas ortótropas (figura 5.13(c), (d) y apartado 5.11.6). Las reglas para perfiles extruidos con uno o dos rigidizadores abiertos se dan en el apartado 5.3.5.
- (2) Los rigidizadores puede ser que no estén apoyados en la totalidad de su longitud o alternativamente ser continuos sobre rigidizadores transversales intermedios. La dimensión L se tomará como la distancia entre apoyos cuando estén empotrados. Un aspecto esencial en el diseño es que el refuerzo longitudinal, pero no el rigidizador transversal, sea “subcrítico”, es decir, se pueda deformar con la placa en la totalidad del modo de pandeo.

- (3) La resistencia de tales placas a tensiones longitudinales normales en la dirección del refuerzo se da en los apartados 5.11.2 a 5.11.4, y la resistencia a cortante se da en el apartado 5.11.5. La interacción entre los diferentes efectos puede ser tenida en cuenta de forma similar al caso de placas sin rigidizar (véase apartado 5.10.6). Los tratamientos son válidos también en secciones transversales que contengan elementos que estén clasificados como esbeltos.

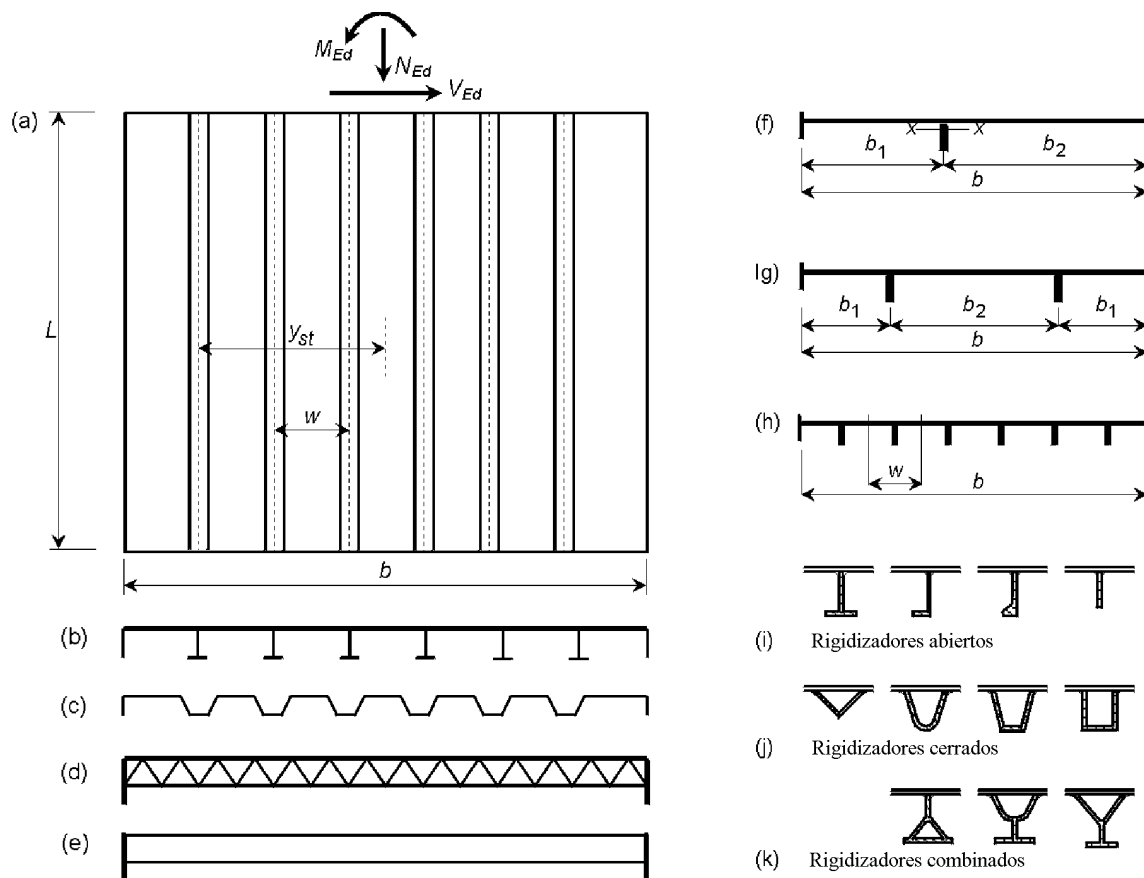


Fig. 5.13 – Placas rigidizadas y tipos de rigidizadores

- (4) Cuando la construcción consiste en placas planas con rigidizadores aplicados, la resistencia a tensiones transversales directas se puede tomar de forma similar a la de una placa sin rigidizar. Con construcciones corrugadas es despreciable. Las placas ortótropas y los paneles sandwichs pueden tener considerable resistencia a las cargas transversales.

5.11.2 Placas rigidizadas sometidas a compresión uniforme

(1)P General

La sección transversal debe ser clasificada como compacta o esbelta de acuerdo con el apartado 5.4, considerando todos los elementos componentes antes de llevar a cabo su comprobación.

El valor de cálculo de la fuerza de compresión N_{Ed} debe cumplir:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (5.66)$$

donde N_{Rd} es el menor de $N_{a,Rd}$ y $N_{o,Rd}$ de acuerdo con los apartados 5.11.2(2) y (3).

(2) Comprobación de fluencia

La sección completa debe ser comprobada a aplastamiento local de forma similar a como se hace para un puntal (véase apartado 5.8). La resistencia de cálculo $N_{a,Rd}$ se basa en el área neta de la sección A_{net} para la menos favorable entre las secciones transversales, teniendo en cuenta el pandeo local y el reblandecimiento HAZ si es necesario, y también cualquier agujero no relleno.

$$N_{a,Rd} = A_{net} f_a / \gamma_{M2} \quad (5.67)$$

donde f_a es la resistencia característica para fallo local.

(3) Comprobación como columna

La placa se contempla como un ensamblaje de subunidades de columnas idénticas, cada una conteniendo un rigidizador localizado centralmente o corrugación y con un ancho igual al paso w . La resistencia axial de cálculo $N_{c,Rd}$ se toma como:

$$N_{c,Rd} = A_{ef} \chi_c f_o / \gamma_{M1} \quad (5.68)$$

donde

χ_c es el coeficiente de reducción para el pandeo de columna;

A_{ef} es el área eficaz de la sección transversal de la placa. El reblandecimiento HAZ debido a las soldaduras en los bordes cargados o en los rigidizadores transversales puede ser ignorado al hallar A_{ef} . También los agujeros no rellenos se pueden despreciar;

f_o resistencia característica para el conjunto de la fluencia del material de la placa.

El coeficiente de reducción χ_c se obtendrá de la curva de pandeo apropiada correspondiente al pandeo de columna de las subunidades como un puntal simple pandeando fuera del plano del aplacado.

(4) El parámetro de esbeltez λ_c , cuando se calcula χ_c , es:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{A_{ef} f_o}{N_{cr}}} \quad (5.69)$$

donde

N_{cr} = la carga de pandeo elástico ortótropo basada en la sección transversal bruta excepto para elementos sobresalientes esbeltos donde se debe usar el espesor eficaz.

(5) Para una placa con *rigidizadores abiertos*:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_x}{L^2} + \frac{L^2 c}{\pi^2} \quad \text{en la que } L < \pi \sqrt[4]{\frac{EI_x}{c}} \quad (5.70)$$

$$N_{cr} = 2 \sqrt{cEI_x} \quad \text{en la que } L \geq \pi \sqrt[4]{\frac{EI_x}{c}} \quad (5.71)$$

donde c es el apoyo elástico para la placa de acuerdo con las expresiones (5.72), (5.73) o (5.74) y I_x es el momento de inercia del área de todos los rigidizadores dentro del ancho b de la placa.

- (6) Para un elemento con *un rigidizador central o excéntrico* [figura 5.13(f)]:

$$c = \frac{0,27 Et^3 b}{b_1^2 b_2^2} \quad (5.72)$$

donde t es el espesor de la placa, b es el ancho completo de la placa y b_1 y b_2 son las anchuras de los elementos de la placa a ambos lados del rigidizador.

- (7) Para un elemento con *dos rigidizadores simétricos* localizados a una distancia b_1 desde los apoyos longitudinales [figura 5.13(g)]:

$$c = \frac{1,1 Et^3}{b_1^2 (3b - 4b_1)} \quad (5.73)$$

- (8) Para una *placa multirrigidizada con rigidizadores abiertos* [figura 5.13 (h) e (i)] con pequeña rigidez a la torsión

$$c = \frac{8,9 Et^3}{b^3} \quad (5.74)$$

- (9) Para una *placa multirrigidizada con rigidizadores cerrados o parcialmente cerrados* [figura 5.13(j)]

N_{cr} es la carga de pandeo elástico ortótropa. Véase apartado 5.11.6.

- (10) La mitad de la longitud de onda en pandeo elástico es

$$l_w = \pi \sqrt[4]{\frac{EI_x}{c}} \quad (5.75)$$

Esta media longitud de onda se usa cuando la acción aplicada varía en la dirección del rigidizador o de las corrugas. Véase apartado 5.11.4(3).

5.11.3 Placas rigidizadas sometidas a momento actuante en su plano

- (1)P General

Hay que hacer dos comprobaciones, una comprobación de fluencia [véase apartado 5.11.3(3)] y una comprobación como columna [véase apartado 5.11.3(4)].

- (2) Clasificación de las secciones y pandeo local

La sección transversal debe ser clasificada como compacta, semicompacta o esbelta (véase apartado 5.3) cuando se lleva cabo cualquier comprobación. Para el propósito de la clasificación de elementos individuales, y también cuando se determina el espesor eficaz para elementos esbeltos, generalmente se puede suponer que cada elemento está sometido a compresión uniforme tomando $g = 1$ en el apartado 5.3.3. Sin embargo, sólo en el caso de la comprobación de fluencia, se permite basar el valor de g en la distribución real de tensiones en los elementos abarcando la zona más exterior del aplacado, y repetir este valor para los correspondientes elementos más interiores. Esto puede ser favorable cuando el número de rigidizadores o de corrugaciones es pequeño.

- (3) Comprobación de fluencia

La sección transversal completa del aplacado deberá ser tratada como una viga sometida a flexión en el plano (véase apartado 5.5). El momento resistente de cálculo M_{rd} se basará en la sección transversal menos favorable, teniendo en cuenta el pandeo local y el reblandecimiento HAZ si es necesario, y también cualquier agujero.

(4) Comprobación como columna

El aplacado se considera como un ensamblaje de subunidades de columnas de forma general similar a la usada para compresión axial [véase apartado 5.11.2(3)], el momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ se toma como sigue:

$$M_{c,Rd} = \frac{\chi_c I_{ef} f_o}{y_{st} \gamma_{M1}} \quad (5.76)$$

donde

χ_c es el coeficiente de reducción para el pandeo de columna de la subunidad;

I_{ef} es el momento de inercia del área de la sección transversal eficaz del aplacado para flexión en el plano;

y_{st} es la distancia desde el centro del aplacado al centro del rigidizador más exterior;

f_o es la resistencia característica para la fluencia completa del material de la placa.

El coeficiente de reducción χ_c se debe determinar de forma similar a como se hace para una compresión uniforme [véase apartado 5.11.2(3)].

5.11.4 Gradiente de tensiones longitudinales en placas multirrigidizadas

(1) General

Los casos en los que la acción aplicada N_{Ed} o M_{Ed} en una placa multirrigidizada varía en la dirección de los rigidizadores o de las corrugaciones se describen en los apartados 5.11.4(2) y 5.11.4(3).

(2) Comprobación de fluencia

La resistencia de cálculo de cualquier sección transversal no deberá ser menor que el efecto que la acción de cálculo produce en esa sección.

(3) Comprobación como columna

Para la comprobación como columna es suficiente con comparar la resistencia de cálculo con el efecto de la acción de cálculo actuante a una distancia x desde el extremo más fuertemente cargado de un panel, donde x es 0,4 veces la mitad de la longitud de onda l_w en el pandeo elástico de acuerdo con el apartado 5.11.2(10).

5.11.5 Placas multirrigidizadas en cortadura

(1)P General

Se deben llevar a cabo una comprobación de fluencia [véase apartado 5.11.5(2)] y una comprobación de pandeo [véase apartado 5.11.5(3)]. Los métodos dados en los apartados 5.11.5(2) y (3) son válidos siempre que los rigidizadores o corrugaciones, así como el aplacado real, sean como sigue:

- a) efectivamente conectados al bastidor transversal en cualquier extremo;
- b) continuos en cualquier posición de rigidizador transversal.

(2) Comprobación de fluencia

El esfuerzo cortante de cálculo V_{Rd} se toma de la misma forma que para una placa plana sin rigidizar con similar aspecto completo ($L \times b$) y el mismo espesor general t , adoptado de acuerdo con el apartado 5.10.5(2).

(3) Comprobación de pandeo

La resistencia de cálculo al esfuerzo cortante se determina según el apartado 5.12.10.

En orden a calcular la resistencia se deben usar los siguientes valores:

$I_z = t^3/10,9$ para una placa plana con rigidizadores, en otro caso de acuerdo con el apartado 5.12.7(3) con $t_w = t$;

I_x es el momento de inercia del área por unidad de ancho del aplacado y rigidizador respecto a un eje centroidal paralelo al plano del aplacado;

h_w es la longitud efectiva l que puede ser tomada del lado de la seguridad como la longitud libre entre apoyos L (véase figura 5.13). Cuando L excede mucho de b , se puede obtener un resultado más favorable poniendo $V_{o,cr}$ igual al esfuerzo cortante de pandeo elástico ortótropo. No se necesita tener en cuenta el reblandecimiento HAZ al efectuar la comprobación de pandeo.

5.11.6 Placas ortótropas

- (1) Para una placa ortótropa sometida a *compresión uniforme* se deberá usar el proceso dado en el apartado 5.11.2. La carga de pandeo elástico ortótropo N_{cr} para una placa ortótropa simplemente apoyada viene dada por:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{b} \left[\frac{B_x}{(L/b)^2} + 2H + B_y(L/b)^2 \right] \quad \text{cuando} \quad \frac{L}{b} < 4\sqrt{\frac{B_x}{B_y}} \quad (5.77)$$

$$N_{cr} = \frac{2\pi^2}{b} \left[\sqrt{B_x B_y} + H \right] \quad \text{cuando} \quad \frac{L}{b} \geq 4\sqrt{\frac{B_x}{B_y}} \quad (5.78)$$

Las expresiones para B_x , B_y y H para diferentes secciones transversales se dan en la tabla 5.10, donde Ec.1, Ec.2, Ec.3 y Ec.4 se dan a continuación.

Ec.1:

$$B_y = \frac{2Ba}{2a_4 + \frac{2a_1a_3t_1^3(4a_2t_3^3 - a_3t_2^3)}{a_3t_1^3(4a_2t_3^3 - a_3t_2^3) + a_1t_3^3(12a_2t_3^3 - 4a_3t_2^3)}} \quad (5.79 a)$$

donde $B = \frac{Et_1^3}{12(1-\nu^2)}$

Ec.2:

$$H = 2B + \frac{\frac{GI_T}{2a}}{1 + \frac{1,6GI_Ta_4^2}{L^2aB} \left[1 + \frac{1}{10C_1/L^4 + C_2} \right]} \quad (5.79 b)$$

donde

$$C_1 = 4(1-\nu^2)(a_2 + a_3)a_1^2a_4^2h^2t_2 / (3at_1^3) \quad (5.79 c)$$

$$B = \frac{E t_1^3}{12 (1 - \nu^2)} \quad (5.79 \text{ d})$$

$$C_2 = \frac{4(a_1 + a_2)^2 a_1 a_4 [1 + a_1/a_2 + a_2/a_1 + a^2/(a_1 a_3)]}{a_2^3 (3a_3 + 4a_2)} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 \quad (5.79 \text{ e})$$

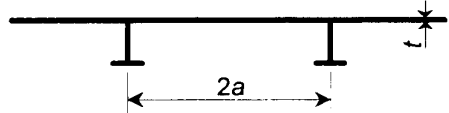
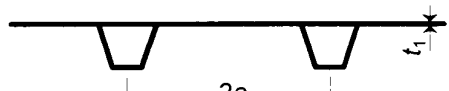
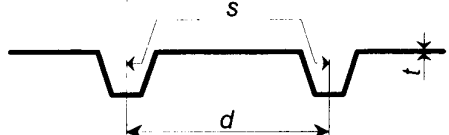
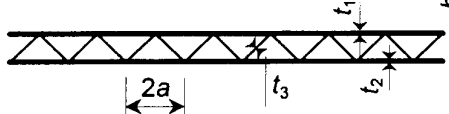
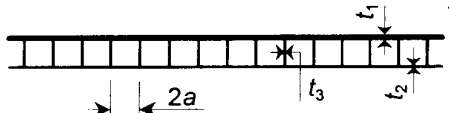
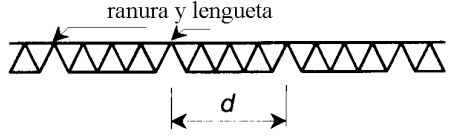
Ec.3:

$$B_y = \frac{E t_1^3}{12 (1 - \nu^2)} \frac{10 b^2}{32 a^2} \frac{a t_3^3 + a t_2^3 t_3^2 / t_1^3 + 6 h t_2^3}{a t_3^3 + 2 h (t_1^3 + t_2^3) + 3 h^2 t_1^3 t_2^3 / (a t_3^3)} \quad (5.80 \text{ a})$$

Ec.4:

$$H = \frac{2 E}{3 \left(1 - \frac{t_3}{2a} \right)^3} \left[\frac{t_1^3}{1 + \frac{6 t_1}{2a - t_3}} + \frac{t_2^3}{1 + \frac{6 t_2}{2a - t_3}} \right] \quad (5.80 \text{ b})$$

Tabla 5.10
Rigidez a la flexión y a la torsión de placas ortótropas

Sección transversal	B_x	B_y	H
	$\frac{E I_L}{2a}$	$\frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)}$	$\frac{G t^3}{6}$
	$\frac{E I_L}{2a}$	Ec.1	Ec.2
	$\frac{E I_L}{d}$	$\frac{d}{s} \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)}$	$\frac{d}{s} \frac{G t^3}{6}$
	$\frac{E I_L}{2a}$	$\frac{E t_1 t_2 h^2}{t_1 + t_2}$	$\frac{G I_T}{2a}$
	$\frac{E I_L}{2a}$	Ec.3	Ec.4
	$\frac{E I_L}{d}$	0	$\frac{G I_T}{d}$

I_L es el momento de inercia del área de un rigidizador y su placa adyacente (entre $2a$ o d) en dirección longitudinal.

I_T es la rigidez a la torsión de la misma sección transversal.

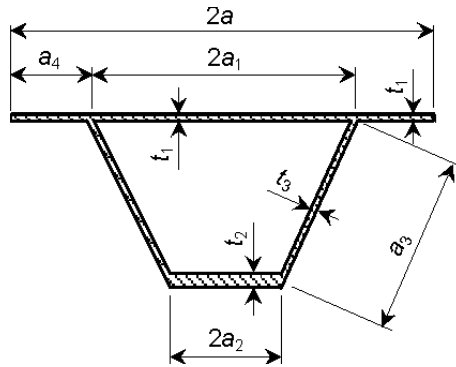


Fig. 5.14 – Simbología para rigidizadores de la sección transversal

- (2) La resistencia al *esfuerzo cortante* de una placa ortótropa con respecto al pandeo global se puede calcular de acuerdo con el apartado 5.12.7, donde

$$V_{o,cr} = \frac{k_{\tau} \pi^2}{b} \sqrt[4]{B_x B_y^3} \quad (5.81)$$

$$k_{\tau} = 3,25 - 0,567\phi + 1,92\phi^2 + (1,95 + 0,1\phi + 2,75\phi^2) \eta \quad (5.82)$$

$$\phi = \frac{L}{b} \sqrt[4]{\frac{B_y}{B_x}} \quad (\text{válido para } 0 < \phi < 1,2) \quad (5.83)$$

$$\eta = \frac{H}{\sqrt{B_x B_y}} \quad (\text{válido para } 0 < \eta < 1,5) \quad (5.84)$$

B_x , B_y y H vienen dados en la tabla 5.10.

- (3) Para una placa ortótropa con un borde libre formando una parte de una estructura en canal como la de la figura 5.15, el pandeo del conjunto se debe basar en las propiedades de la sección transversal dadas en la tabla 5.10.

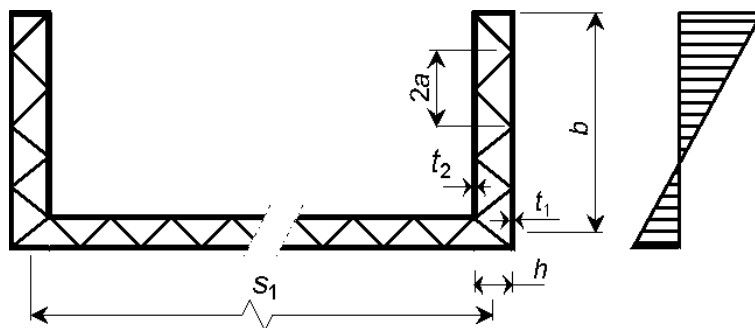


Fig. 5.15 – Placa ortótropa con un borde libre

5.12 Resistencia de vigas de alma llena

5.12.1 Generalidades

- (1) Una viga de alma llena es una viga de canto fabricada con un ala de tracción, un ala de compresión y un alma plana. El alma es habitualmente de proporciones esbeltas y puede ser reforzada transversalmente con rigidizadores portantes e intermedios. Se puede reforzar todavía más mediante rigidizadores longitudinales tal como se indica en la figura 5.16.

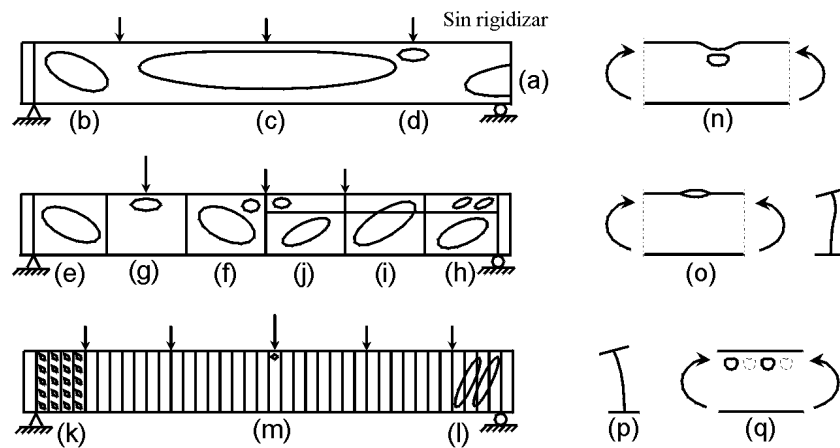


Fig. 5.16 (a) – (n) y (q): Modos de pandeo del alma y (o) – (p) modos de pandeo del ala

- (2) El alma pandea en cortante con cargas aplicadas relativamente bajas, pero un considerable incremento de resistencia posterior al pandeo puede ser movilizada debido a la presencia de la acción de tracción. Las vigas de alma llena están a veces construidas con refuerzos transversales del alma en forma de corrugaciones o rigidizadores transversales dispuestos muy cerca unos de otros.
- (3) Las vigas de alma llena pueden estar sometidas a combinaciones de momento, cortante y esfuerzo axial, y a esfuerzos locales en las alas. Debido a sus proporciones esbeltas pueden estar sometidas a pandeo lateral con torsión, figura 5.16(p), si no están adecuadamente apoyadas a lo largo de su longitud.
- (4) El tratamiento de las vigas de alma llena dado aquí generalmente es también aplicable a los elementos de las caras de las vigas en cajón.
- (5) La resistencia de las almas de las vigas de alma llena dependen de la relación canto a espesor b_w/t_w y de la disposición de rigidizadores de alma.

Los modos de fallo así como referencia a las cláusulas con las expresiones de resistencia se dan en la tabla 5.11.

Tabla 5.11
Modos de pandeo (figura 5.16) y su correspondiente cláusula con la expresión de resistencia

Modo de pandeo	Figura 5.16	Apartado
Pandeo del alma por tensiones de compresión	q	5.12.2 y 5.12.3
Pandeo por cortante	b, d, e, h, k, l	5.12.4, 5.12.5 y 5.12.10
Interacción entre esfuerzo cortante y momento flector	f, j	5.12.7
Pandeo del alma debido a cargas locales en las alas	d, g, m	5.12.8
Curvatura inducida en el pandeo del alma	c, n	5.12.9
Pandeo con torsión del ala	o	5.4.5
Pandeo lateral con torsión	p	5.6.6

5.12.2 Resistencia de vigas sometidas a flexión en un plano

- (1) Se debe hacer una comprobación de fluencia y una comprobación de pandeo, y para almas con soldaduras longitudinales continuas se debe investigar el efecto de la zona HAZ. El efecto HAZ causado por la soldadura de rigidizadores transversales puede ser despreciado y pequeños agujeros en el alma pueden ser ignorados siempre que no ocupen más del 20% del área de la sección transversal del alma. El canto del alma entre alas es b_w .
- (2)P Para la comprobación de fluencia, el valor del momento de cálculo, M_{Ed} en cada sección transversal debe de cumplir

$$M_{Ed} \leq M_{o,Rd} \quad (5.85)$$

donde $M_{o,Rd}$ es el momento resistente de cálculo de la sección transversal, que se aplicaría si la sección estaba designada como Clase 3. Entonces,

$$M_{o,Rd} = W_{el} f_o / \gamma_{M1} \quad (5.86)$$

donde W_{el} es el módulo elástico resistente teniendo en cuenta los agujeros y tomando un espesor reducido $\rho_{haz} t$ en las regiones adyacentes a las alas, que puedan estar afectadas por un reblandecimiento HAZ (véase apartado 5.5.2).

- (3) Cuando se aplica la comprobación del pandeo se supone que los rigidizadores transversales cumplen con los requisitos de rigidizador efectivo de la sección dados en el apartado 5.12.6. Se supone también que la distancia entre rigidizadores transversales adyacentes es mayor que la mitad del vano libre del alma entre las placas de ala. Si no es éste el caso, referirse al apartado 5.12.10 para almas corrugadas o con rigidizadores muy próximos.
- (4) Para cada tramo de viga de longitud a entre rigidizadores transversales, el momento actuante bajo la carga de diseño a una distancia $0,4 a$ desde el extremo más altamente tensionado no debe exceder el momento resistente de cálculo, $M_{o,Rd}$ para cada tramo, donde

$$M_{o,Rd} = W_{ef} f_o / \gamma_{M1}$$

W_{ef} es el módulo elástico resistente eficaz obtenido tomando un espesor reducido para tener en cuenta el pandeo así como el reblandecimiento HAZ, pero despreciando la presencia de agujeros. El espesor reducido es igual al menor de $\rho_{haz} t$ y $\rho_c t$ en las regiones HAZ, y $\rho_c t$ en el resto.

- (5) El espesor se reduce sólo en la parte comprimida b_c del alma.

La relación de tensiones ψ utilizada en el apartado 5.4.3 y el correspondiente ancho b_c se pueden obtener usando el área eficaz del ala comprimida y el área bruta del alma, véase figura 5.17.

- (6) Si el borde comprimido del alma está más cercano al eje neutro de la viga que el ala traccionada, véase figura 5.17(c), la esbeltez de placa λ_p de un elemento se puede reemplazar por

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \sqrt{\sigma_{com,Ed} / f_{yd}} \quad (5.87)$$

donde

$\sigma_{com,Ed}$ es la máxima tensión de compresión en el elemento utilizando áreas eficaces para todos los elementos comprimidos.

Este procedimiento requiere generalmente un cálculo interactivo en el cual ψ se determina de nuevo en cada paso a partir de las tensiones calculadas en la sección transversal eficaz definida en el final del paso previo.

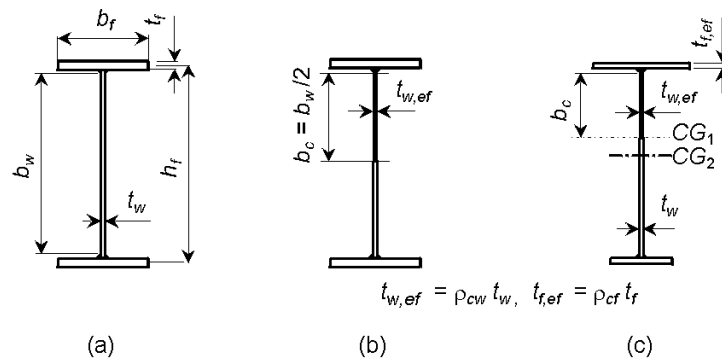


Fig. 5.17 – (a) Notaciones de la sección transversal. (b) Sección transversal eficaz para una viga de alma llena simétrica con alas de las clases 1, 2 ó 3. (c) Sección transversal eficaz para una viga de alma llena con ala traccionada pequeña y ala comprimida de la clase 4

5.12.3 Resistencia de vigas con rigidizadores longitudinales de alma

- (1) El pandeo de placa debido a tensiones de compresión longitudinales puede ser tenido en cuenta mediante el uso de una sección transversal eficaz aplicable a las secciones transversales de la clase 4.
- (2) Las propiedades de la sección transversal eficaz se basarán en las áreas eficaces de los elementos comprimidos y sus localizaciones dentro de la sección transversal eficaz.
- (3) En un primer paso las áreas eficaces de los subpaneles planos comprimidos situados entre rigidizadores se obtendrán usando espesores eficaces de acuerdo con el apartado 5.4.5. Véase figura 5.18.
- (4) El pandeo completo de la placa, incluido el pandeo de los rigidizadores, se considera como un pandeo de columna de una columna ficticia consistente en los rigidizadores y la mitad de la parte adyacente del alma. Si las tensiones cambian de compresión a tracción dentro del subpanel, un tercio de la parte comprimida se toma como una parte de la columna ficticia. Véase figura 5.18(c).
- (5) Los espesores eficaces de las diferentes partes de la sección de la columna ficticia están adicionalmente reducidos en un segundo paso con un coeficiente de reducción χ_c , obtenido a partir de la adecuada curva correspondiente al pandeo de columna de la columna ficticia como un puntal simple fuera del plano del alma.

- (6) El parámetro de esbeltez adimensional λ_c cuando se calcula χ_c es

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{A_{st,ef} f_o}{N_{cr}}} \quad (5.88)$$

donde

$A_{st,ef}$ es el área eficaz de la columna ficticia para el primer paso. N_{cr} es la carga de pandeo elástico dada por la siguiente expresión:

$$N_{cr} = 1,05 E \frac{\sqrt{I_{st} t_w^3 b_w}}{b_1 b_2} \quad \text{si} \quad a > a_c \quad (5.89)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{st}}{a^2} + \frac{E t_w^3 b_w a^2}{4 \pi^2 (1 - \nu^2) b_1^2 b_2^2} \quad \text{si} \quad a \leq a_c \quad (5.90)$$

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{st} b_1^2 b_2^2}{t_w^3 b_w}} \quad (5.91)$$

donde

I_{st} es el momento de inercia del área de la sección transversal bruta de la columna ficticia (véase apartado 5.12.3(7)) respecto a un eje a través de su centroide y paralelo al plano del alma;

b_1 y b_2 son las distancias desde los bordes longitudinales al rigidizador ($b_1 + b_2 = b_w$).

- (7) Cuando se calcula I_{st} la columna consiste en el rigidizador real junto con un ancho eficaz de $15 t_w$ de la placa del alma en ambas caras del rigidizador. Véase figura 5.18(d1) y (d2).
- (8) En el caso de dos rigidizadores longitudinales, ambos comprimidos, los dos rigidizadores se consideran como un conjunto único, con un área eficaz y un momento de inercia del área iguales a la suma de los correspondientes a los rigidizadores individuales. La localización del rigidizador agrupado es la correspondiente a la posición de la resultante de los esfuerzos axiales en los rigidizadores. Si uno de los rigidizadores está traccionado el procedimiento será conservador.

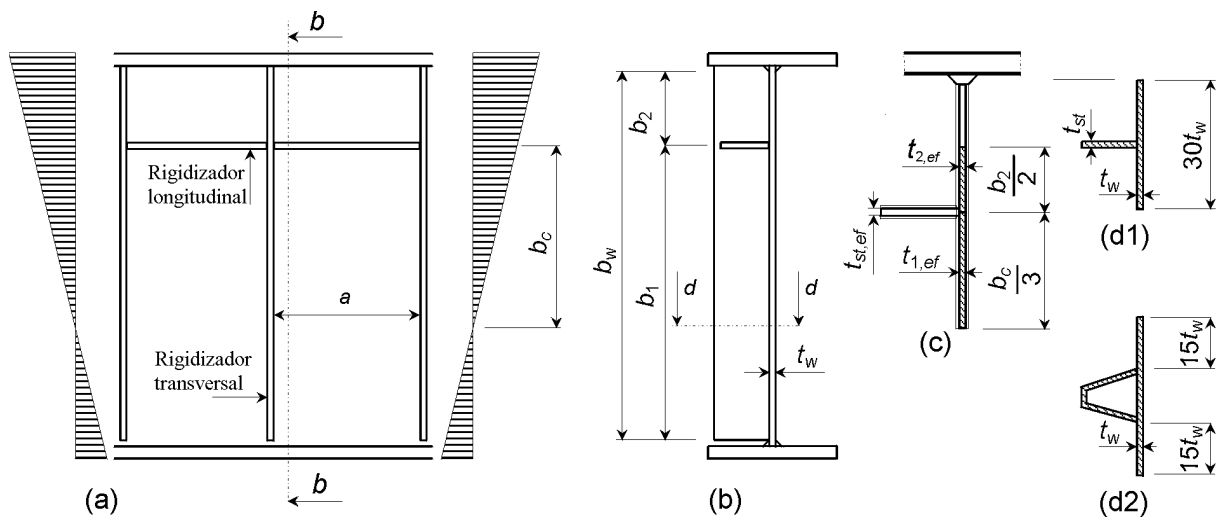


Fig. 5.18 – (a) Alma rigidizada (b) sección transversal (c) área eficaz de columna ficticia (d) sección transversal de la columna ficticia para cálculos de I_{st} (d1) rigidizador abierto (d2) rigidizador cerrado

5.12.4 Resistencia a cortante de vigas de alma llena con sólo rigidizadores en los apoyos

- (1) Para almas con rigidizadores transversales sólo en los apoyos, la resistencia de cálculo a abolladura por cortante V_{Rd} se obtiene mediante

$$V_{Rd} = \rho_v t_w b_w f_{ow} / \gamma_{M1} \quad (5.92)$$

donde ρ_v es el coeficiente de reducción para abolladura por cortante de acuerdo a la tabla 5.12 y la figura 5.20.

Tabla 5.12
Coeficiente de reducción ρ_v para abolladura por cortante

λ_w	Puntal de extremo rígido	Puntal de extremo no rígido
$\lambda_w \leq 0,48/\eta$	η	η
$0,48/\eta < \lambda_w < 0,949$	$0,48/\lambda_w$	$0,48/\lambda_w$
$0,949 \leq \lambda_w$	$1,32/(1,66 + \lambda_w)$	$0,48/\lambda_w$

$\eta = 0,4 + 0,2 f_{uw}/f_{ow}$ pero no mayor que 0,7 donde

f_{ow} es la resistencia para la fluencia completa y f_{uw} es la resistencia última del material del alma.

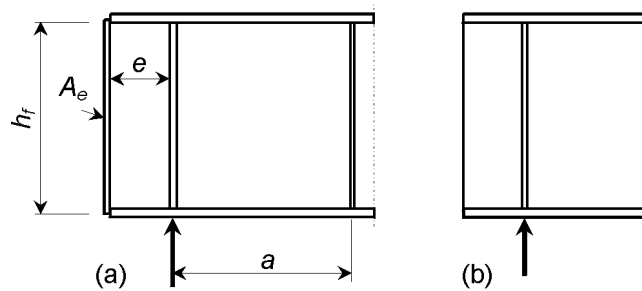


Fig. 5.19 – Puntal de extremo (a) rígido y (b) no rígido

- (2) Se debe distinguir entre:
- Puntales de extremo rígidos de acuerdo con el apartado 5.12.5(6). Este caso es también aplicable a paneles no colocados en el extremo de la viga y en un apoyo intermedio de una viga continua.
 - Puntales de extremo no rígidos de acuerdo con el apartado 5.12.5(7).

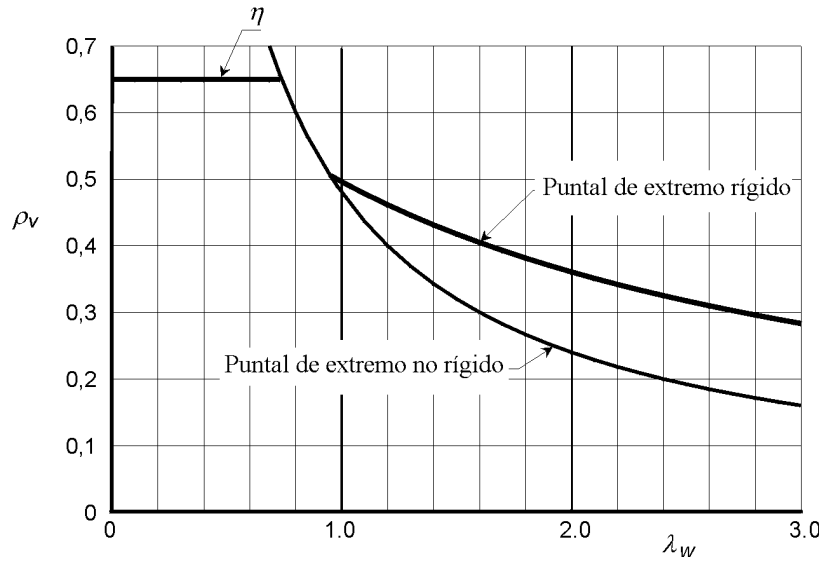


Fig. 5.20 – Coeficiente de reducción ρ_v para abolladura por cortante

- (3) El parámetro de esbeltez λ_w de la tabla 5.12 y de la figura 5.20 es

$$\lambda_w = 0,35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} \quad (5.93)$$

5.12.5 Resistencia a cortante de almas con rigidizadores intermedios

- (1) Para vigas con rigidizadores longitudinales y transversales la resistencia de cálculo a abolladura por cortante V_{Rd} es la suma de las contribuciones del alma $V_{w,Rd}$ y de las alas $V_{f,Rd}$.

$$V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd} \quad (5.94)$$

- (2) $V_{w,Rd}$ incluye la acción del campo parcial de tracciones en el alma de acuerdo con el apartado 5.12.5(3). $V_{f,Rd}$ es un incremento del campo de las tracciones causado por la resistencia local a la flexión de las alas. Véase apartado 5.12.5(8).

- (3) La resistencia de cálculo a cortante del alma es

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w b_w f_{ow} / \gamma_{M1} \quad (5.95)$$

donde ρ_v es el coeficiente del espesor eficaz para abolladura por cortante de acuerdo a la tabla 5.12 y la figura 5.20.

- (4) El parámetro de esbeltez λ_w es:

$$\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} \quad (5.96)$$

- (5) El coeficiente de abolladura por cortante k_τ en (4) es:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 (b_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{cuando} \quad a/b_w \geq 1 \quad (5.97)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 (b_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{cuando} \quad a/b_w < 1 \quad (5.98)$$

donde

$$k_{\tau st} = 9 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 \left(\frac{I_{st}}{t_w^3 b_w} \right)^{\frac{3}{4}} \quad \text{pero no menor que} \quad \frac{2,1}{t_w} \left(\frac{I_{st}}{b_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.99)$$

a es la distancia entre rigidizadores transversales. Véase figura 5.21;

I_{st} es el momento de inercia del área del rigidizador longitudinal con respecto al eje z . Véase figura 5.21(b). Para almas con dos o más rigidizadores iguales, no necesariamente igual espaciados, I_{st} es la suma de las rigideces de los rigidizadores individuales.

- (6) Para almas con rigidizadores longitudinales el parámetro de esbeltez λ_w se tomará no menor que

$$\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k_{\tau 1}}} \frac{b_{w1}}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} \quad (5.100)$$

donde el coeficiente de abolladura por cortante $k_{\tau 1}$ se refiere al mayor subpanel con canto b_{w1} y longitud a , véase figura 5.21. La expresión dada en el apartado 5.12.5(5) se puede usar con $k_{\tau st} = 0$.

- (7) Si las alas no están completamente utilizadas por el momento flector ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$) hay una contribución a la resistencia a cortante $V_{f,Rd}$ por parte de las alas obtenida mediante

$$V_{f,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{of}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (5.101)$$

donde

$$c = \left(0,08 + \frac{4,4 b_f t_f^2 f_{of}}{t_w b_w^2 f_{ow}} \right) a$$

b_f t_f se toman las del ala menor.

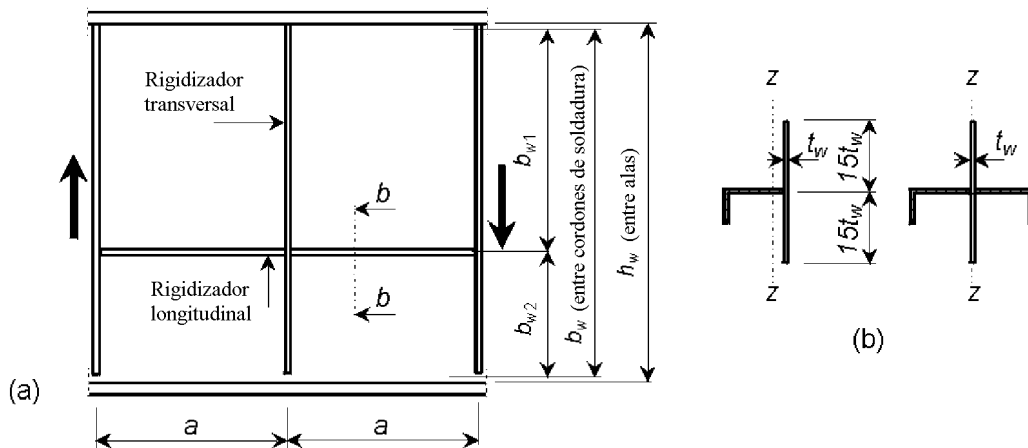


Fig. 5.21 – Alma con rigidizadores longitudinales y transversales

- (8) Cuando se aplica también una fuerza axial N_{Sd} , el valor de $M_{f,Rd}$ se reducirá por el coeficiente

$$\left(1 - \frac{N_{Sd}}{(A_{f1} + A_{f2}) f_{of} / \gamma_{M1}} \right) \quad (5.102)$$

f_{of} es la resistencia característica para la fluencia completa del material del ala y A_{f1} y A_{f2} son las áreas de las alas.

- (9) Cuando $M_{Sd} \geq M_{f,Rd}$ entonces $V_{f,Rd} = 0$.

5.12.6 Rigidizadores de alma

5.12.6.1 Puntal de extremo rígido

- (1) El puntal de extremo rígido actuará como un rigidizador portante resistiendo la reacción en el apoyo de la viga, y como una corta viga resistiendo las tensiones longitudinales de membrana en el plano del alma.
- (2) Un puntal de extremo rígido puede estar formado por dos rigidizadores en las dos caras transversales que conforman las alas de una viga corta de longitud h_f , véase figura 5.19(a). La banda de la placa del alma entre los rigidizadores forma el alma de una viga corta. Alternativamente, un puntal de extremo puede estar en la forma de un perfil insertado, conectado al extremo de la placa del alma.
- (3) Cada rigidizador deberá tener un área de la sección transversal de al menos $4 h_f t_w^2 / e$ donde e es la distancia entre rigidizadores, $e > 0,1 h_f$, véase figura 5.19(a).
- (4) Si un puntal de extremo es el único medio de suministrar resistencia frente al alabeo del extremo de la viga, el momento de inercia del área de la sección del puntal de extremo respecto a la línea central del alma (I_{ep}) deberá cumplir:

$$I_{ep} \geq b_w^3 t_f R_{Ed} / 250 W_{Ed} \quad (5.103)$$

donde

t_f es el valor máximo del espesor del ala a lo largo de la viga;

R_{Ed} es la reacción en el extremo de la viga bajo cargas de cálculo;

W_{Ed} es la carga total de cálculo en el vano adyacente.

5.12.6.2 Puntal de extremo no rígido

- (1) Un puntal de extremo no rígido puede ser un simple rigidizador como se muestra en la figura 5.19(b). Se puede suponer que actúa como un rigidizador portante resistiendo la reacción en el apoyo de la viga.

5.12.6.3 Rigidizadores transversales intermedios

- (1) Los rigidizadores intermedios que actúan como apoyos rígidos de los paneles interiores del alma deben ser comprobados a resistencia y a rigidez.
- (2) Los otros rigidizadores transversales intermedios se pueden considerar como flexibles, siendo considerada su rigidez en el cálculo de k_τ en el apartado 5.12.5(4).

- (3) Los rigidizadores transversales intermedios actuando como apoyos rígidos para el panel del alma deberán tener un momento de inercia del área que deberá verificar lo siguiente:

$$I_{st} \geq 1,5 \frac{h_w^3 t_w^3}{a^2} \quad \text{if} \quad a/h_w < \sqrt{2}: \quad (5.104)$$

$$I_{st} \geq 0,75 \frac{h_w^3 t_w^3}{a^2} \quad \text{if} \quad a/h_w \geq \sqrt{2}: \quad (5.105)$$

La resistencia del rigidizador intermedio rígido se debe comprobar frente a una fuerza axial igual a V_{Ed} menos $\rho_v b_w t_w f_o$ del alma con el rigidizador considerado quitado.

5.12.6.4 Rigidizadores longitudinales

- (1) Los rigidizadores longitudinales pueden ser tanto rígidos como flexibles. En ambos casos su rigidez debe ser tomada en cuenta al determinar la esbeltez λ_w en el apartado 5.12.5.
- (2) Si el valor de λ_w está gobernado por el subpanel entonces el rigidizador se puede considerar como rígido.
- (3) Se debe comprobar la resistencia a tensiones directas si el rigidizador se ha tenido en cuenta para resistir las tensiones directas.

5.12.7 Interacción entre esfuerzo cortante, momento flector y esfuerzo axial

- (1) Siempre que las alas puedan resistir íntegramente el valor de cálculo del momento flector y el esfuerzo axial en la pieza, la resistencia a cortante de cálculo del alma no necesita ser reducida para tener en cuenta el momento y el esfuerzo axial sobre la pieza, excepto que se dé lo indicado en el apartado 5.12.5(8).
- (2) Cuando $M_{Ed} > M_{f,Rd}$ se deben cumplir las dos expresiones siguientes:

$$\frac{\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} + 2 \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right)}{2 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}} \leq 1,00 \quad (5.106)$$

$$M_{Ed} \leq M_{ef,Rd}$$

donde

$M_{ef,Rd}$ es el momento flector resistente de cálculo de acuerdo con el apartado 5.12.3;

$M_{f,Rd}$ es el momento flector resistente de cálculo de sólo las alas, véase apartado 5.12.5(7). El espesor eficaz se utiliza para alas comprimidas de la clase 4.

- (3) Si también se aplica un esfuerzo axial N_{Ed} , entonces $M_{pl,Rd}$ debe ser reemplazado por el momento resistente plástico reducido $M_{N,Rd}$ dado por

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - \left(\frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) f_o / \gamma_{M1}} \right)^2 \right) \quad (5.107)$$

donde

A_{f1}, A_{f2} son las áreas de las alas.

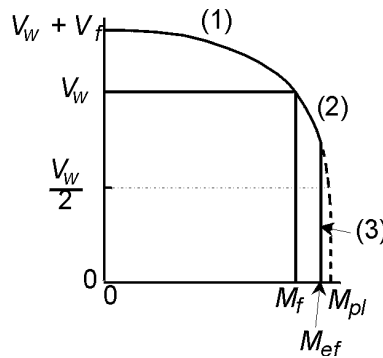


Fig. 5.22 – Interacción entre resistencia a cortante y resistencia a momento flector

5.12.8 Resistencia de las almas a fuerzas transversales

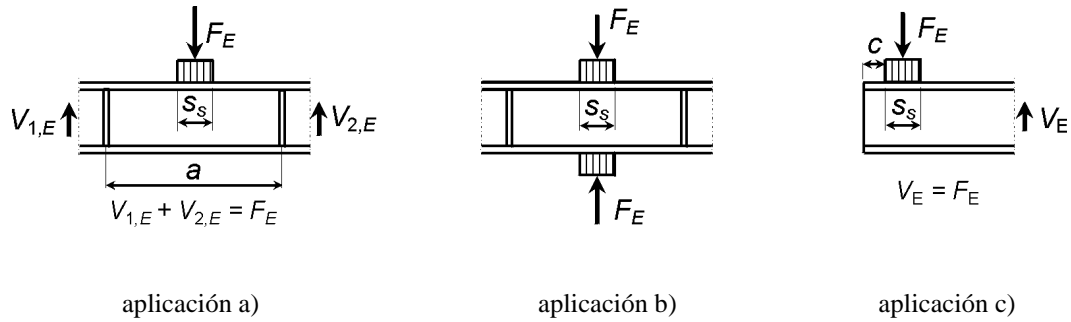
- (1) La resistencia de un alma no rigidizada a las fuerzas transversales aplicadas a través del ala está gobernada por uno de los siguientes modos de fallo
 - aplastamiento del alma cercana al ala, acompañado de deformación plástica del ala;
 - inutilidad del alma en forma de pandeo localizado y aplastamiento del alma cercana al ala, acompañado de deformación plástica del ala;
 - pandeo del alma en la mayor parte de su altura;
 - pandeo completo del alma sobre gran parte de la longitud del elemento. Este modo de fallo es más probable que tenga lugar cuando hay varias fuerzas transversales o una carga distribuida a lo largo de la longitud del elemento.
- (2) Se debe hacer una distinción entre tres tipos de aplicación de cargas, tal como sigue:
 - a) Fuerzas aplicadas a través de un ala y resistida mediante esfuerzos cortantes en el alma. Véase figura 5.23(a).
 - b) Fuerzas aplicadas en un ala y transferidas directamente a través del alma a la otra ala, véase figura 5.23(b).
 - c) Fuerzas aplicadas a través de un ala cerca de un extremo no rigidizado, véase figura 5.23(c).
- (3) Para vigas en cajón con almas inclinadas la resistencia debe ser comprobada para alma y ala. Los efectos de las cargas son las componentes de las cargas externas en el plano del alma y ala respectivamente.
- (4) Adicionalmente el efecto de la fuerza transversal en el momento resistente del elemento debe ser considerado.
- (5) La resistencia de un alma rigidizada longitudinalmente se incrementa debido a la presencia de los rigidizadores pero aquí no se dan reglas respecto a esto.
- (6) La resistencia de cálculo F_{Rd} para una fuerza transversal (figura 5.23(a), (b) y (c)) se obtiene de

$$F_{Rd} = 0,57 t_w^2 \sqrt{\frac{k_F l_y f_{ow} E}{b_w}} \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad \text{pero no mayor que} \quad t_w l_y \frac{f_{ow}}{\gamma_{M1}} \quad (5.108)$$

donde f_{ow} es la resistencia característica del material del alma y

donde k_F viene dado en la figura 5.23.

La longitud eficaz de la carga l_y es dependiente de la longitud del elemento portante rígido s_s y de las dimensiones de la sección transversal.



$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2$$

$$k_F = 3,5 + 2 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2$$

$$k_F = 2 + 6 \frac{s_s + c}{b_w} \leq 6$$

Fig. 5.23 – Aplicaciones de cargas incluyendo coeficientes de abolladura

- (7) La longitud de apoyo rígido, s_s , en un ala es la distancia sobre la cual la fuerza aplicada está efectivamente distribuida y que se puede determinar mediante la dispersión de la carga a través del material sólido con una pendiente de 1:1, véase figura 5.24. s_s no debe tomarse mayor que b_w .
- (8) Si varias cargas concentradas están muy próximas entre sí, la resistencia debe ser comprobada para cada carga individual así como para el total de la carga. En el último caso s_s se debe tomar como la distancia entre centros de las cargas externas.
- (9) La longitud eficaz de carga l_y se calcula usando los parámetros adimensionales

$$m_1 = \frac{f_{of} b_f}{f_{ow} t_w} \quad (5.109)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{b_w}{t_f} \right)^2 \text{ si } \frac{(s_s + 4t_f) b_w f_{ow}}{k_F E t_w^2} > 0,2; \text{ en otro caso } m_2 = 0 \quad (5.110)$$

Para vigas en cajón, b_f en la expresión (5.109) está limitada a $25 t_f$ en cada cara del alma.

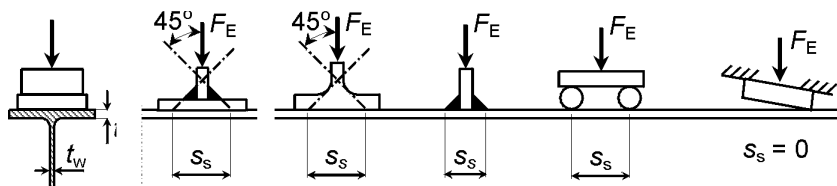


Fig. 5.24 – Longitud de apoyo rígido

- (10) Para la aplicación de carga a) y b) de la figura 5.23 l_y viene dada por

$$l_y = s_s + 2 t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) \quad (5.111)$$

- (11) Para las aplicaciones de carga c) de la figura 5.23, l_y viene dada por la menor de las siguientes expresiones (5.111), (5.113) y (5.114). Hay que tomar nota que $s_s = 0$ si la disposición de cargas no sigue el cambio en la inclinación del extremo de la viga.

$$l_{ef} = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{ow} b_w} \leq s_s + c \quad (5.112)$$

$$l_y = l_{ef} + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_{ef}}{t_f} \right)^2 + m_2} \quad (5.113)$$

$$l_y = l_{ef} + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (5.114)$$

5.12.9 Pandeo inducido del ala

- (1) Para prevenir la posibilidad de pandeo del ala comprimida en el plano del alma, la relación b_w/t_w del alma debe cumplir la siguiente expresión

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{k E}{f_{of}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (5.115)$$

donde

A_w es el área del alma;

A_{fc} es el área del ala comprimida.

El valor del coeficiente k se debe tomar como sigue:

Usando rotación plástica 0,3

Usando momento plástico resistente 0,4

Usando momento elástico resistente 0,55

- (2) Cuando la viga esté curvada en elevación, con el ala comprimida en la cara cóncava, se debe comprobar la siguiente expresión además de la (5.115)

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{k E}{f_{of}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{b_w E}{3 r f_{of}}}} \quad (5.116)$$

donde

r es el radio de curvatura del ala comprimida.

Cuando la viga tiene rigidizadores transversales de alma, el valor límite de b_w/t_w se puede incrementar por el coeficiente $1 + (b_w/a)^2$.

5.12.10 Almas corrugadas o con rigidizadores muy próximos

- (1) En vigas planas con refuerzos transversales en forma de corrugas o de rigidizadores transversales colocados próximos entre sí ($a/b_w < 0,3$) las partes planas entre rigidizadores pueden pandear localmente, véase figura 5.16(k), y los refuerzos transversales se pueden deformar con el alma en un modo de pandeo completo, véase figura 5.16(l).
 - a) Si el alma es una placa plana con rigidizadores múltiples, el momento resistente y la resistencia a esfuerzo cortante se deben obtener de acuerdo con el apartado 5.11.
 - b) Si el alma es una placa corrugada se puede suponer que el momento resistente de la viga es suministrado exclusivamente por las alas, y que la contribución del alma es nula.

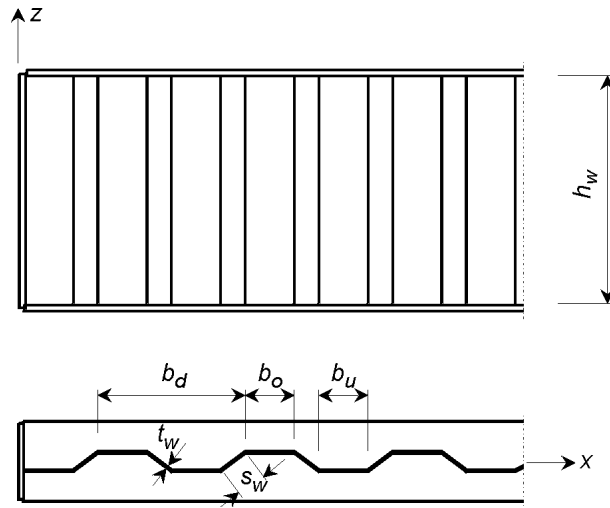


Fig. 5.25 – Alma corrugada

- (2) La resistencia a esfuerzo cortante con respecto a la resistencia a la abolladura local por cortante de las partes planas es

$$V_{w,Rd} = 0,7 \rho_v t_w h_w f_{ow} / \gamma_{M1} \quad (5.117)$$

donde

$$\rho_v \text{ se obtiene de la tabla 5.12 con } \lambda_w = 0,35 \frac{b_m}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}}$$

b_m es igual al mayor de los anchos de los paneles del alma plana corrugada, b_o , b_u o s_w .

- (3) La resistencia a esfuerzo cortante con respecto a la abolladura global por cortante se determina de acuerdo con

$$V_{o,Rd} = \chi_o h_w t_w \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (5.118)$$

donde

$$\chi_o = \frac{0,60}{0,8 + \lambda_{ow}^2} \text{ pero no mayor que } 1,0 \quad (5.119)$$

$$\lambda_{ow} = \sqrt{\frac{h_w t_w f_o}{V_{o,cr}}} \quad (5.120)$$

$$V_{o,cr} = \frac{60 E}{h_w} \sqrt[4]{I_z \cdot I_x^3} \quad (5.121)$$

$$I_z = \frac{b_d}{b_u + b_o + 2 s_w} \frac{t_w^3}{10,9} \quad (5.122)$$

I_x es el momento de inercia del área del alma corrugada por unidad de ancho, véase figura 5.25.

5.12.11 Placas con lengüeta

- (1) Una placa con lengüeta comprende material extendido hacia dentro de un ala para formar un sobreespesor en la sección externa del alma de la viga. Para que sean eficaces estas secciones transversales las dimensiones deben ser tales que sean de la Clase 1 o de la Clase 2 considerando la lengüeta como un sencillo saliente en compresión axial (véase apartado 5.4.4).
- (2) Cuando una lengüeta esté construida con dos o tres pliegues, comprendida el alma plana conectada a los elementos integrantes con el ala, el espesor t requerido para la comprobación de su clasificación se puede tomar como el espesor total. Sin embargo, en construcciones roblonadas o atornilladas es necesario comprobar que sea Clase 1 o Clase 2 en cualquier zona relevante más allá de la última línea de elementos de fijación.

6 UNIONES SOMETIDAS A CARGA ESTÁTICA

6.1 Bases para uniones atornilladas, roblonadas y soldadas

6.1.1 Introducción

- (1)P Todas las uniones tendrán una resistencia de cálculo tal que la estructura permanezca eficaz y sea capaz de satisfacer todos los requisitos básicos para el cálculo dados en el capítulo 2.
- (2)P El coeficiente parcial de seguridad γ_M se tomará como sigue:
- resistencia de uniones atornilladas: $\gamma_{Mb} = 1,25$
 - resistencia de uniones roblonadas: $\gamma_{Mr} = 1,25$
 - resistencia de uniones con bulones: $\gamma_{Mp} = 1,25$
 - resistencia de uniones soldadas: $\gamma_{Mw} = 1,25$
 - resistencia de uniones por rozamiento: γ_{Ms} véase apartado 6.5.9.3
 - resistencia de uniones adhesivas: $\gamma_{Ma} \geq 3,0$
 - resistencia de elementos y secciones transversales: γ_{M1} y γ_{M2} véase apartado 5.1.1
- (3)P Las uniones sometidas a esfuerzos de fatiga cumplirán también con los requisitos dados en la Norma ENV 1999-2.

6.1.2 Esfuerzos y momentos aplicados

- (1)P Los esfuerzos y momentos aplicados en las uniones en el estado límite último se determinarán mediante un análisis global, de acuerdo con el capítulo 5.
- (2)P Estos esfuerzos y momentos aplicados incluirán:
- los efectos de segundo orden;
 - los efectos de las imperfecciones (véase Anexo C.4);
 - los efectos de la flexibilidad de la unión (véase apartado 6.4).

6.1.3 Resistencia de uniones

- (1)P La resistencia de una unión se determinará a partir de las resistencias individuales de los elementos de fijación o de los cordones de soldadura.
- (2)P Para el cálculo de una unión generalmente se utilizará el análisis elástico lineal. Se puede emplear alternativamente el análisis no lineal siempre que se tengan en cuenta las características de carga-deformación de todos los componentes de la unión.
- (3)P Si el modelo de cálculo se basa en la teoría de las líneas de rotura (líneas de fluencia), tal como en el bloque de cortantes por ejemplo, se demostrará la validez de este modelo a partir de ensayos físicos.

6.1.4 Hipótesis de cálculo

- (1) Las uniones se pueden calcular distribuyendo los esfuerzos y los momentos internos de la forma racional que sea mejor, siempre que:
 - a) los esfuerzos y momentos internos supuestos estén en equilibrio con las fuerzas y momentos aplicados;
 - b) cada elemento de la unión sea capaz de resistir las fuerzas o tensiones supuestas en el análisis;
 - c) las deformaciones que se deriven de esta distribución se mantengan dentro de la capacidad de deformación de los elementos de fijación (tornillos o roblones) o cordones de soldadura y de las partes unidas; y
 - d) las deformaciones supuestas en cualquier modelo de cálculo basado en la teoría de las líneas de rotura estén basadas en giros de cuerpo rígido (y de deformaciones en el plano) que sean físicamente posibles.
- (2)P Además, la distribución de esfuerzos internos supuesta debe ser realista respecto a la rigidez relativa interna de la unión. Los esfuerzos internos deberán seguir el camino de rigidez máxima. Este camino estará claramente identificado y se tendrá en cuenta a lo largo del cálculo de la unión.
- (3) No es necesario normalmente considerar en el cálculo las tensiones residuales y las tensiones debidas al apriete de los elementos de fijación y los debidos al montaje con las tolerancias habituales.

6.1.5 Fabricación y montaje

- (1)P En el proyecto de todas las uniones y empalmes se procurará facilitar la fabricación y el montaje.
- (2) Se deberá prestar atención a:
 - los espacios libres necesarios para un montaje seguro;
 - los espacios libres necesarios para apretar los elementos de fijación (tornillos o roblones);
 - la necesidad de acceso para soldar;
 - los requisitos del proceso de soldadura; y
 - los efectos de las tolerancias angulares y longitudinales en el ajuste entre piezas.
- (3) Se deberá prestar también atención a las necesidades de:
 - inspecciones futuras;
 - tratamiento superficial; y
 - mantenimiento.

Para reglas más detalladas sobre la fabricación y montaje, véase el capítulo 7.

6.2 Intersecciones para uniones atornilladas, roblonadas y soldadas

- (1)P Las piezas que concurran en una unión se colocarán normalmente de forma que sus ejes centroidales se corten en un punto.
- (2)P Cuando exista excentricidad en una unión, deberá tenerse en cuenta, excepto en el caso de los tipos particulares de estructuras en las que se haya demostrado que no es necesaria dicha consideración.

6.3 Uniones cargadas a cortadura sometidas a vibración y/o cambio de sentido de las cargas

- (1)P Cuando una unión cargada a cortadura esté sometida a impacto o a una vibración significativa, se usarán cordones de soldadura, tornillos con sistemas de bloqueo de las tuercas, tornillos pretensados, tornillos de inyección u otros tipos de tornillos que prevengan eficazmente la posibilidad de movimiento.
- (2)P Cuando no se pueda aceptar el deslizamiento en una unión porque esté sometida a cortadura con sentido alternativo (o por cualquier otra razón), se usarán tornillos pretensados trabajando a rozamiento (categoría B ó C según convenga, véase apartado 6.5.3), tornillos calibrados (ajustados) o soldadura.
- (3) Para arriostramientos contraviento y/o de estabilidad, se utilizarán normalmente tornillos trabajando a cortadura y aplastamiento (categoría A en el apartado 6.5.3).

6.4 Clasificación de uniones

6.4.1 Generalidades

- (1) La unión se define como el sistema con el cual se fija mecánicamente una pieza dada al resto de partes de la estructura. Se debería distinguir del término “nudo”, el cual usualmente abarca el sistema compuesto por la unión en sí misma más la correspondiente zona de interacción entre los elementos unidos (véase figura 6.1).

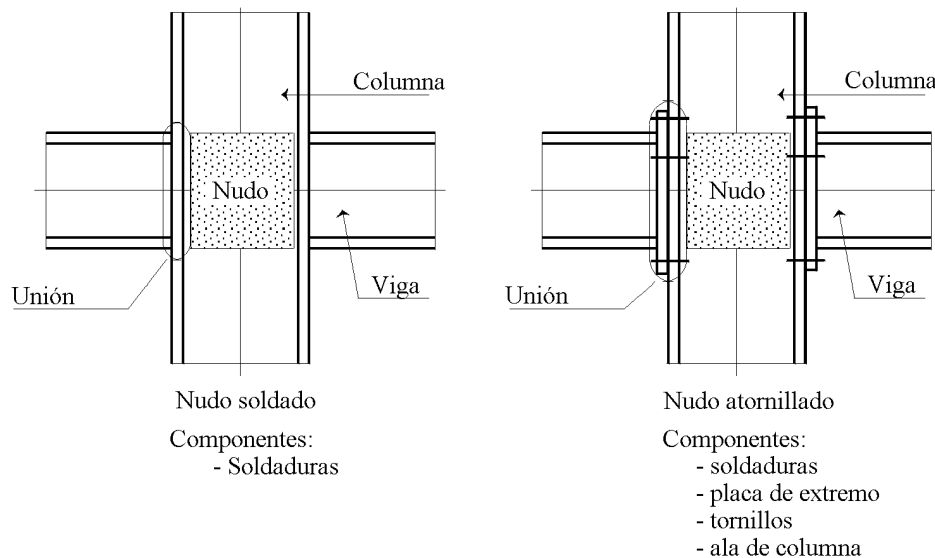


Fig. 6.1 – Definición de unión y nudo

- (2)P Las propiedades estructurales de todas las uniones serán tales que cumplan las hipótesis hechas en el análisis estructural y en el cálculo de los elementos.
- (3) En lo que sigue los símbolos “F” y “D” se refieren a fuerzas generalizadas (esfuerzo axial, esfuerzo cortante o momento flector) y a su correspondiente deformación generalizada (elongación, distorsión o rotación) respectivamente. Los subíndices “e” y “u” se refieren al estado límite elástico y último, respectivamente.
- (4) Las uniones se pueden clasificar de acuerdo con su capacidad de restablecer las propiedades de comportamiento (rigidez, resistencia y ductilidad) de los elementos conectados. Con respecto al comportamiento global de los elementos unidos, se definen dos clases principales (figura 6.2):
 - uniones con capacidad completa de restablecimiento;
 - uniones con capacidad parcial de restablecimiento.

- (5) En lo que respecta a la simple propiedad del comportamiento del elemento conectado, las uniones se pueden clasificar de acuerdo a [véanse figuras 6.2 b)-d)]:
- Rígida.
 - Resistente.
 - Dúctil.
- (6) Los tipos de uniones deberán estar de acuerdo con las hipótesis de cálculo de los elementos y el método de análisis del conjunto.

6.4.2 Uniones con capacidad completa de restablecimiento

- (1) Deben de estar diseñadas de tal forma que siempre tengan propiedades de comportamiento iguales o mayores que las de los elementos unidos, en términos de rigidez elástica, resistencia última y ductilidad. La curva fuerza generalizada – desplazamiento de la unión siempre se coloca por encima de una de las de los elementos unidos.
- (2) La existencia de la unión puede ser ignorada en el análisis estructural.

6.4.3 Uniones con capacidad parcial de restablecimiento

- (1) Las propiedades de comportamiento de la unión no alcanzan a las de los elementos unidos, debido a su carencia de capacidad de restablecer su rigidez elástica, resistencia última o ductilidad del elemento unido. La curva fuerza generalizada – desplazamiento puede estar en alguna parte caída por debajo de la del elemento unido.
- (2)P La existencia de este tipo de uniones debe tenerse en cuenta en el análisis estructural.

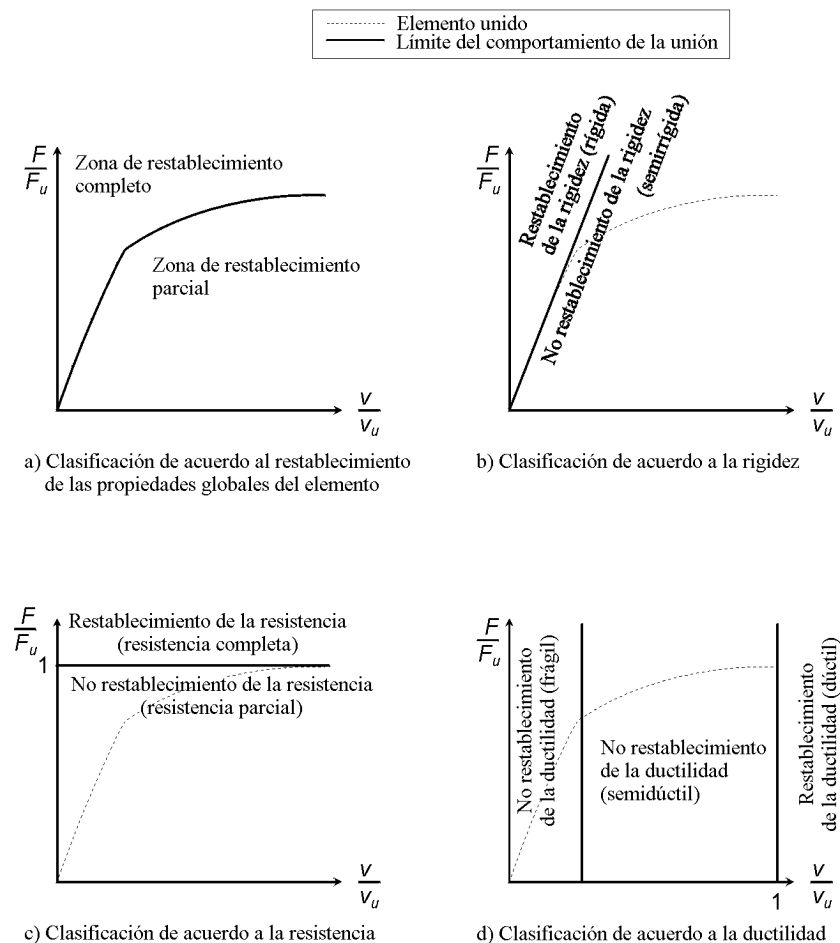


Fig. 6.2a) – d): Clasificación de uniones

6.4.4 Clasificación en función de la rigidez

(1) En lo que respecta a la rigidez, las uniones se pueden clasificar como (véase figura 6.2b):

- Uniones que restablecen la rigidez (rígida) (R1).
- Uniones que no restablecen la rigidez (semirrígida) (R2),

dependiendo de si se restablece o no la rigidez inicial de los elementos unidos, sin prestar atención a la resistencia y ductilidad.

6.4.5 Clasificación en función de la resistencia

(1) En lo que respecta a la resistencia, las uniones se pueden clasificar como (véase figura 6.2c):

- Uniones que restablecen la resistencia (resistencia total).
- Uniones que no restablecen la resistencia (resistencia parcial),

dependiendo de si se restablece o no la resistencia última de los elementos unidos, sin prestar atención a la rigidez y ductilidad.

6.4.6 Clasificación en función de la ductilidad

(1) En lo que respecta a la ductilidad, las uniones se pueden clasificar como (véase figura 6.2d):

- Uniones que restablecen la ductilidad (dúctil).
- Uniones que no restablecen la ductilidad (semidúctiles o frágiles),

dependiendo de si la ductilidad de la unión es mayor o menor que la de los elementos unidos, sin prestar atención a la resistencia y rigidez.

(2) Las uniones dúctiles tienen una ductilidad igual o mayor que la de los elementos unidos; las limitaciones sobre elongación o rotación pueden ser ignoradas en el análisis estructural.

(3)P Las uniones semidúctiles tienen una ductilidad menor que la de uno de los elementos unidos, pero mayor que su deformación en el límite elástico; las limitaciones sobre elongación o rotación deben ser tenidas en cuenta en el análisis no elástico.

(4)P Las uniones frágiles tienen una ductilidad menor que la de la deformación en el límite elástico de los elementos unidos; las limitaciones sobre elongación o rotación deben ser consideradas tanto en el análisis elástico como en el no elástico.

6.4.7 Requisitos generales de cálculo para uniones

(1) Las combinaciones pertinentes de las principales propiedades del comportamiento (rigidez, resistencia y ductilidad) de las uniones dan lugar a diversos casos (figura 6.3).

En la tabla 6.1 se muestran con referencia a los requisitos correspondientes de los métodos de análisis global (véase apartado 5.2.1).

6.4.8 Requisitos para uniones de pórticos

6.4.8.1 Generalidades

(1) En lo que respecta a la relación momento-curvatura, los tipos de uniones adoptados en las estructuras de pórtico pueden ser divididas en:

- Uniones articuladas.
- Uniones empotradas.

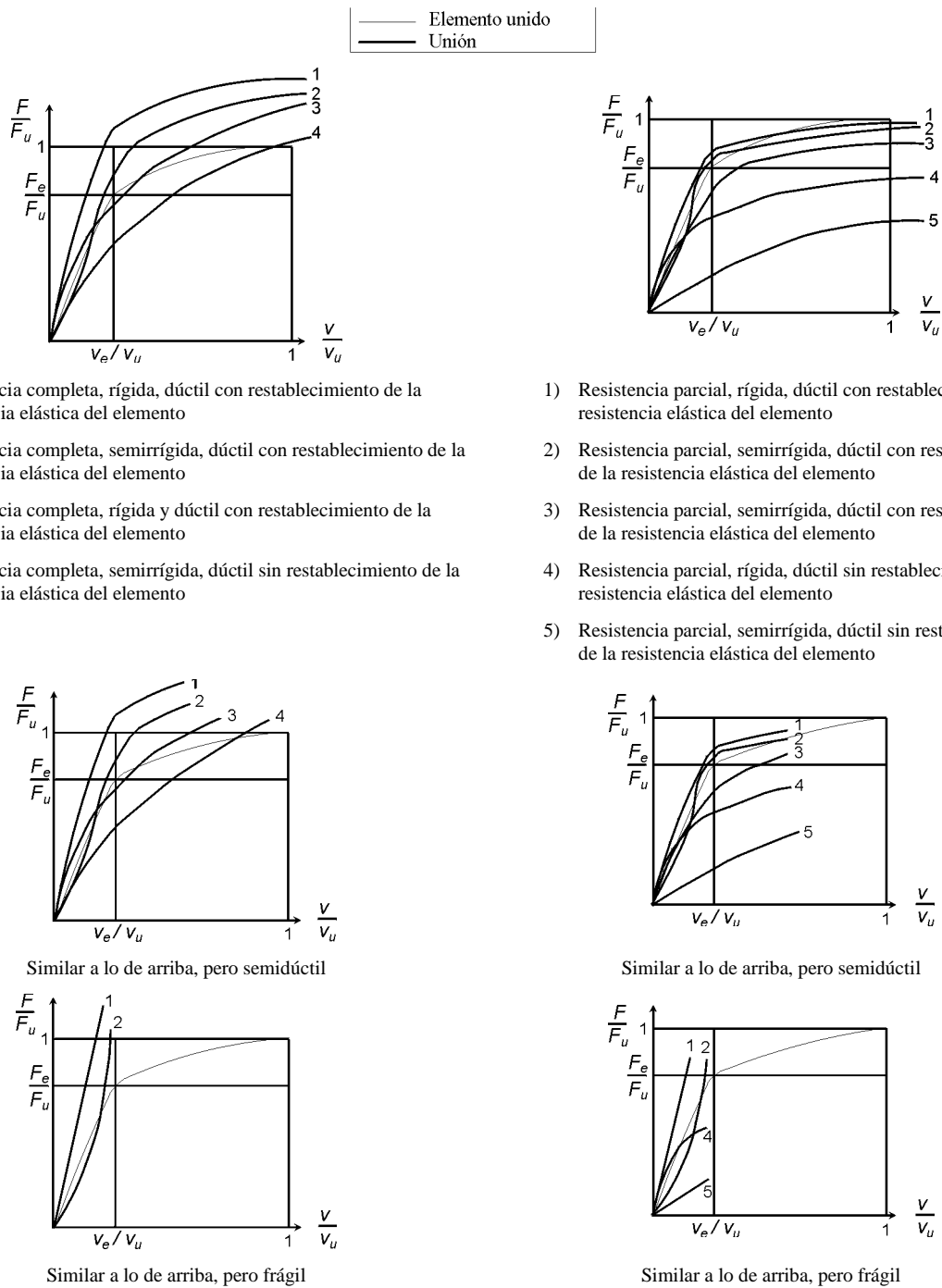


Fig. 6.3 – Tipos principales de uniones

- (2) Los tipos de uniones deberán ser conformes con la tabla 6.1 de acuerdo con el método de análisis global (véase apartado 5.2.1) y las hipótesis de cálculo del elemento (Anexo C).

6.4.8.2 Articulaciones

- (1)P Una articulación se proyectará de forma que sea capaz de transmitir los esfuerzos axiales y cortantes de proyecto y que no pueda desarrollar momentos apreciables que puedan afectar de forma adversa a los elementos de la estructura.
- (2) Las articulaciones deberán ser capaces de transmitir los esfuerzos determinados en el cálculo y de aceptar los giros resultantes.
- (3) La capacidad de rotación de una articulación deberá ser suficiente como para poder desarrollar todas las articulaciones plásticas bajo las cargas de cálculo.

Tabla 6.1
Requisitos generales de cálculo

Método de análisis global (véase apartado 5.2.1)	Tipo de unión que debe ser tenida en cuenta	Tipo de unión que puede ser ignorada
ELÁSTICO	Uniones semirrígidas (resistencia total o parcial, dúctil o no dúctil con o sin restablecimiento de la resistencia elástica del elemento) Uniones parcialmente resistentes (rígida o semirrígida, dúctil o no dúctil) sin restablecimiento de la resistencia elástica del elemento	Uniones con restablecimiento completo Uniones rígidas (resistencia total o parcial, dúctil o no dúctil) con restablecimiento de la resistencia elástica del elemento Uniones parcialmente resistentes (rígida o semirrígida, dúctil o no dúctil) con restablecimiento de la resistencia elástica del elemento
PLÁSTICO (rígido-plástico elástico-plástico inelástico-plástico)	Uniones parcialmente resistentes (rígida o semirrígida, dúctil o no dúctil) sin restablecimiento de la resistencia elástica del elemento	Uniones con restablecimiento completo Uniones parcialmente resistentes y dúctiles (rígida o semirrígida) con restablecimiento de la resistencia elástica del elemento Uniones completamente resistentes
ENDURECIMIENTO (rígido-endurecimiento elástico-endurecimiento generalmente inelástico)	Uniones con restablecimiento parcial	Uniones con restablecimiento completo

6.4.8.3 Uniones empotradas

- (l) Las uniones empotradas permiten la transmisión de momentos flectores entre los elementos unidos, conjuntamente con los esfuerzos axiales y cortantes. Se pueden clasificar de acuerdo a su rigidez y resistencia como sigue (véanse apartados 6.4.4 y 6.4.5):
 - Uniones rígidas.
 - Uniones semirrígidas.
 - Uniones de resistencia completa.
 - Uniones de resistencia parcial.

- (2)P Una unión rígida se proyectará de forma que su deformación no tenga una influencia apreciable en la distribución de los esfuerzos y momentos internos en la estructura, ni en la deformación del conjunto.
- (3) Las deformaciones de las uniones rígidas deberán ser tales que no reduzcan la resistencia de la estructura en más del 5%.
- (4) Las uniones semirrígidas deberán proveer un grado predecible de interacción entre las piezas conectadas, basado en los diagramas momento - rotación de cálculo característicos de las mismas.
- (5) Las uniones rígidas y semirrígidas deberán ser capaces de transmitir los esfuerzos y los momentos determinados en el cálculo.
- (6) La rigidez de una unión de resistencia total y de resistencia parcial deberá ser tal que, bajo las cargas de cálculo, los giros en las rótulas plásticas necesarias no excedan su capacidad de rotación.
- (7)P La capacidad de rotación de una unión de resistencia parcial situada en una rótula plástica no deberá ser menor que la necesaria para posibilitar la formación de todas las rótulas plásticas necesarias que se hayan de desarrollar bajo las cargas de cálculo.
- (8) La capacidad de rotación de una unión se puede demostrar experimentalmente. No se requiere demostración experimental cuando se utilicen detalles en los que la experiencia haya probado que tienen propiedades adecuadas en relación con el esquema estructural.

6.5 Uniones con tornillos, roblones o bulones

6.5.1 Situación de agujeros para tornillos y roblones

6.5.1.1 Bases

- (1)P La situación de los agujeros para tornillos y roblones deberá ser tal que prevenga la corrosión y el pandeo local y que facilite la colocación de los tornillos o roblones.
- (2)P La situación de los agujeros estará también de acuerdo con los límites de validez de las reglas empleadas para determinar las resistencias de cálculo de los tornillos y roblones.

6.5.1.2 Distancia al extremo frontal

- (1) La distancia e_1 , medida desde el centro del agujero de un elemento de fijación (tornillo o roblón) al extremo frontal más próximo de cualquiera de las piezas a unir, en la dirección de la transmisión de la carga (véase figura 6.4), deberá ser normalmente $2,0 d_o$. En situaciones extremas no deberá ser menor que $1,2 d_o$, siempre que la tensión de aplastamiento se reduzca adecuadamente, véanse apartados 6.5.5 y 6.5.6, donde d_o es el diámetro del agujero, véase apartado 7.3.6.
- (2) La distancia al extremo frontal se deberá aumentar si es necesario para obtener una adecuada resistencia a aplastamiento, véanse apartados 6.5.5 y 6.5.6. Una distancia al mismo frontal superior a $3,0 d_o$ no tiene efecto sobre el aplastamiento.

6.5.1.3 Distancia mínima al borde lateral

- (1) La distancia e_2 , desde el centro del agujero de un elemento de fijación (tornillo o roblón) al borde lateral adyacente de cualquiera de las piezas a unir, medida perpendicularmente a la dirección de la transmisión de carga (véase figura 6.4), normalmente no deberá ser menor de $1,5 d_o$.
- (2) En situaciones extremas la distancia al borde lateral se puede reducir a no menos de $1,2 d_o$ siempre que la resistencia de cálculo a aplastamiento se reduzca adecuadamente, véanse los apartados 6.5.5 y 6.5.6.

6.5.1.4 Distancias máximas al extremo y al borde lateral

- (1) Cuando las piezas a unir están expuestas al ambiente u otras influencias corrosivas, la máxima distancia al extremo o al borde lateral no deberá ser mayor de $40 \text{ mm} + 4 t$, donde t es el espesor de la parte exterior unida mas delgada.
- (2) En cualquier otro caso, la distancia al extremo o al borde lateral no deberá superar el mayor de $12t$ ó 150 mm .
- (3) La distancia al borde lateral no deberá tampoco superar la máxima necesaria para poder cumplir los requisitos de pandeo local de un elemento exterior. Este requisito no se aplica a elementos de fijación que unan los componentes de elementos traccionados. La distancia al extremo frontal no se ve afectada por este requisito.

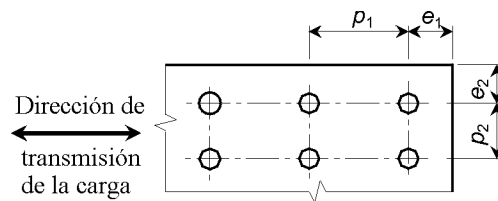


Fig. 6.4 – Símbolos de distancias entre elementos de fijación (tornillos o roblones)

6.5.1.5 Separación mínima

- (1) La separación p_1 entre centros de elementos de fijación (tornillos o roblones) en la dirección de la transmisión de carga (véase figura 6.4) deberá ser normalmente de $2,5 d_o$, en situaciones extremas no deberá ser menor de $2,2 d_o$, siempre que la tensión de aplastamiento se reduzca adecuadamente, véanse apartados 6.5.5 y 6.5.6. Esta separación se incrementará si es necesario para proveer una adecuada resistencia a aplastamiento, véanse apartados 6.5.5 y 6.5.6.
- (2) La separación p_2 entre filas de elementos de fijación (tornillos o roblones), medida perpendicularmente a la dirección de la transmisión de carga (véase figura 6.4), será normalmente de $3,0 d_o$. Esta separación se puede reducir a $2,4 d_o$ siempre que la resistencia de cálculo a aplastamiento se reduzca adecuadamente, véanse apartados 6.5.5 y 6.5.6.

6.5.1.6 Separación máxima en elementos comprimidos

- (1) La separación p_1 de los elementos de fijación (tornillos o roblones) en cada fila y la separación p_2 entre filas de elementos de fijación (tornillos o roblones) no deberán superar el menor de $14t$ ó 200 mm . Los elementos de fijación de filas adyacentes pueden colocarse al tresbolillo, véase figura 6.5.
- (2) La separación entre centros de elementos de fijación (tornillos o roblones) no deberá tampoco superar el máximo necesario para cumplir los requisitos de pandeo local para un elemento interior, véase apartado 5.4.5.

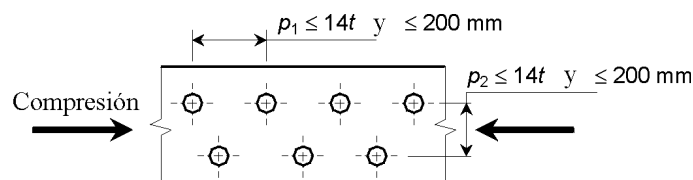


Fig. 6.5 – Separación al tresbolillo – compresión

6.5.1.7 Separación máxima en elementos traccionados

- (1) En elementos traccionados, la separación $p_{1,i}$ entre centros de elementos de fijación (tornillos o roblones) en filas interiores puede ser dos veces la dada en el apartado 6.5.1.6 (1) para elementos comprimidos, siempre que la separación $p_{1,o}$ en la fila exterior correspondiente a cada borde lateral no supere la dada en 6.5.1.6(1), véase figura 6.6.
- (2) Los dos valores anteriores pueden multiplicarse por 1,5 en elementos no expuestos a influencias corrosivas.

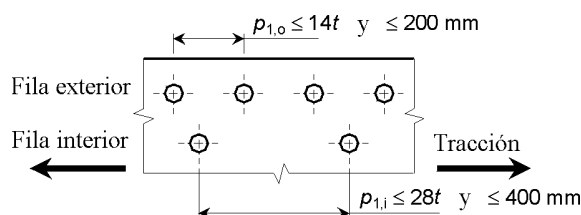


Fig. 6.6 – Separación en elemento traccionado

6.5.1.8 Agujeros alargados (ranurados)

- (1) Los agujeros alargados no son recomendables.

6.5.2 Deducciones por agujeros de elementos de fijación

6.5.2.1 Generalidades

Para reglas detalladas sobre el cálculo de piezas con agujeros véase el apartado 5.6.2.2.

6.5.2.2 Resistencia de cálculo a desgarro del alma

- (1)P Se debe evitar la rotura por desgarro del alma cuando existe un grupo de agujeros de elementos de fijación en el alma de una viga, cercano a su extremo o una cartela o uniones con similares características, véase figura 6.7, adoptando una apropiada separación de agujeros. Este modo de rotura consiste generalmente en una rotura por tracción a lo largo de la línea horizontal de los agujeros de elementos de fijación que limita el bloque en la zona traccionada, acompañada de una plastificación por cortante a lo largo de la fila vertical de agujeros de elementos de fijación que limita el bloque en la zona de cortante, véase figura 6.7.

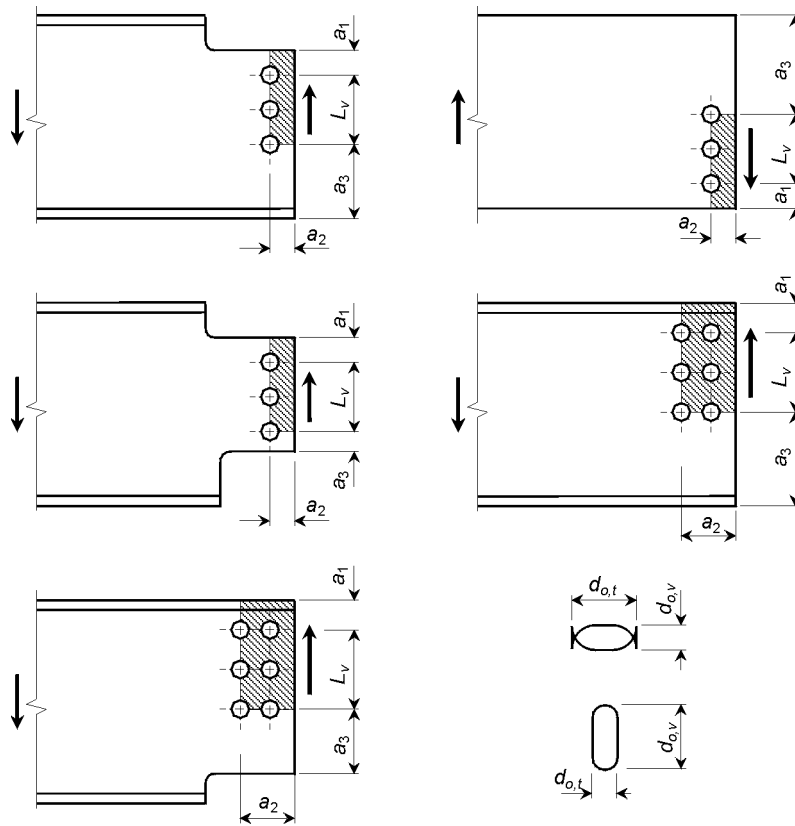


Figura 6.7 – Desgarro del alma – área eficaz de cortante

- (2) El valor de cálculo de la resistencia eficaz al desgarro del alma $V_{eff,Rd}$ o $N_{eff,Rd}$ se determinará mediante:

$$V_{eff,Rd} = (f_o / \sqrt{3}) A_{v,eff} / \gamma_{M1} \quad (6.1)$$

donde $A_{v,eff}$ es el área eficaz sometida a desgarro.

- (3) El área eficaz $A_{v,eff}$ sometida a desgarro se determinará de la manera siguiente:

$$A_{v,eff} = t L_{v,eff} \quad (6.2)$$

donde

$$L_{v,eff} = L_v + L_1 + L_2 \text{ pero } L_{v,eff} \leq L_3 \quad (6.3)$$

con

$$L_1 = a_1 \text{ pero } L_1 \leq 5 d \quad (6.4)$$

$$L_2 = (a_2 - k d_{0,t}) (f_u / f_o) \quad (6.5)$$

y

$$L_3 = L_v + a_1 + a_3 \text{ pero } L_3 \leq (L_v + a_1 + a_3 - nd_{0,v}) (f_u/f_0) \quad (6.6)$$

donde

a_1, a_2, a_3 y L_v están definidas en la figura 6.7;

d es el diámetro nominal de los elementos de fijación (tornillos o roblones);

$d_{0,t}$ es el tamaño de los agujeros a lo largo de la línea que limita la parte traccionada del bloque, generalmente el diámetro de los agujeros;

$d_{0,v}$ es el tamaño de los agujeros a lo largo de la línea que limita la parte del bloque sometida a cortante, generalmente el diámetro de los agujeros;

n es el número de agujeros de elementos de fijación (tornillos o roblones) a lo largo de la línea sometida a cortadura;

t es el espesor del alma o del casquillo de unión, y;

k es un coeficiente que toma los valores siguientes:

- para una sola fila de tornillos: $k = 0,5$,
- para dos filas de tornillos: $k = 2,5$.

6.5.2.3 Angulares y angulares con bulbos

- (1)P En el caso de piezas asimétricas o asimétricamente unidas tales como angulares o angulares con bulbos, se tendrá en cuenta la excentricidad de los elementos de fijación (tornillos o roblones) en las uniones de extremo y los efectos de la separación entre tornillos y de sus distancias a los bordes laterales al determinar las resistencias de cálculo.
- (2) Los angulares y los angulares con bulbos unidos por una sola fila de tornillos en un ala, véase figura 6.8, pueden tratarse como cargados concéntricamente y la resistencia última de cálculo de la sección neta se puede determinar como sigue:

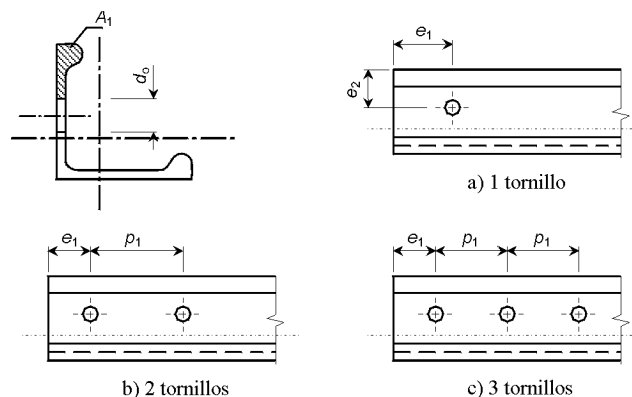


Fig. 6.8 – Uniones de angulares con bulbos (cubre también a angulares sin bulbos)

con 1 tornillo:

$$N_{u,Rd} = \frac{2 A_1 f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

con 2 tornillos:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{Net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.8)$$

con 3 tornillos:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{Net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.9)$$

donde

β_2 y β_3 son coeficientes de reducción dependientes de la separación p_1 según se dan en la tabla 6.2. Para valores intermedios de p_1 los valores de β se pueden determinar por interpolación lineal.

A_{net} es el área neta del angular. Para un angular de alas desiguales unido por su ala menor, se tomará A_{net} como igual al área neta de un angular de alas iguales equivalente con tamaño de ala igual al del ala menor.

- (3) La resistencia de cálculo a pandeo de una pieza comprimida, véase apartado 5.8, deberá basarse en el área de la sección transversal bruta, pero no deberá tomarse mayor de la resistencia de cálculo de la sección transversal dada en (2).

Tabla 6.2
Coeficientes de reducción β_2 y β_3

Separación p_1	$\leq 2,5 d_0$	$\geq 5,0 d_0$
β_2 para 2 tornillos	0,4	0,7
β_3 para 3 o más tornillos	0,5	0,7

6.5.3 Categorías de uniones atornilladas

6.5.3.1 Uniones a cortante

- (1)P El proyecto de una unión atornillada solicitada a esfuerzo cortante estará de acuerdo con una de las siguientes categorías, véase tabla 6.3.

Tabla 6.3
Categorías de uniones atornilladas

Uniones a cortante		
Categoría	Criterio	Notas
A Cortante y aplastamiento	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	No se requiere pretensado. Todos los grados desde 4.6 a 10.9
B Resistente a deslizamiento en estado límite de servicio	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Tornillos pretensados de alta resistencia. No se produce deslizamiento en estado límite de servicio
C Resistente a deslizamiento en estado límite de último	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Tornillos pretensados de alta resistencia. No se produce deslizamiento en estado límite último
Uniones en tracción		
Categoría	Criterio	Notas
D No pretensada	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	No se requiere pretensado. Todos los grados desde 4.6 a 10.9
E Pretensada	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	Tornillos pretensados de alta resistencia
Clave: $F_{v,Ed}$ Esfuerzo cortante de cálculo por tornillo en estado límite último $F_{v,Rd}$ Resistencia a cortante de cálculo por tornillo $F_{s,Rd}$ Resistencia a deslizamiento de cálculo por tornillo en estado límite último $F_{v,Ed,ser}$ Esfuerzo cortante de cálculo por tornillo en estado límite de servicio $F_{s,Rd,ser}$ Resistencia a deslizamiento de cálculo por tornillo en estado límite de servicio $F_{b,Rd}$ Resistencia a aplastamiento de cálculo por tornillo $F_{t,Ed}$ Esfuerzo axil de tracción de cálculo por tornillo en estado límite último $F_{t,Rd}$ Resistencia a tracción de cálculo por tornillo		

(2)P En esta categoría se utilizarán tornillos de acero recubiertos (ordinarios o de alta resistencia) o tornillos de acero inoxidable o tornillos de aluminio o roblones de aluminio. No se requiere pretensado ni condiciones especiales para las superficies de contacto. La carga última de cálculo a cortante no superará la resistencia a cortante de cálculo ni la resistencia a aplastamiento de cálculo, obtenidas del apartado 6.5.5.

(3)P Categoría B: Resistentes al deslizamiento en estado límite de servicio

En esta categoría se utilizarán tornillos de alta resistencia pretensados con apriete controlado de acuerdo con la Norma de Referencia 8 de la Norma Europea Experimental ENV 1993-1-1:1992. No se producirá deslizamiento en el estado límite de servicio. La combinación de acciones a considerar se seleccionará del apartado 2.3.4 dependiendo de los casos de carga en los que se requiera resistencia al deslizamiento. La carga de cálculo a cortante en servicio no deberá superar la resistencia a deslizamiento de cálculo, obtenida del apartado 6.5.9. La carga última a cortante de cálculo no superará la resistencia a cortante de cálculo ni la resistencia a aplastamiento de cálculo, obtenidas del apartado 6.5.5.

(4)P Categoría C: Resistentes al deslizamiento en estado límite último

En esta categoría se utilizarán tornillos de alta resistencia pretensados con apriete controlado de acuerdo con la Norma de Referencia 8 de Norma Europea Experimental ENV 1993-1-1:1992. No se producirá deslizamiento en el estado límite último. La carga última a cortante de cálculo no deberá superar la resistencia a deslizamiento de cálculo, obtenida del apartado 6.5.9 ni la resistencia a aplastamiento de cálculo, obtenida del apartado 6.5.5.

Además, la resistencia plástica de cálculo de la sección neta en los agujeros de los tornillos $N_{net,Rd}$ (véase apartado 5.7.3) en estado límite último se tomará:

$$N_{net,Rd} = A_{net} f_o / \gamma_{M1} \quad (6.10)$$

6.5.3.2 Uniones traccionadas

- (1)P El proyecto de una unión atornillada solicitada a tracción se hará de acuerdo a una de las siguientes categorías, véase tabla 6.3.

- (2)P Categoría D: Uniones con tornillos sin pretensar.

En esta categoría se utilizarán tornillos ordinarios de grado 4.6 y 5.6 (hechos de acero con bajo contenido en carbono) o tornillos de alta resistencia, de grado 8.8 y 10.9 o tornillos de aluminio o tornillos de acero inoxidable. No se requiere pretensado. Esta categoría no se utilizará cuando las uniones estén frecuentemente sometidas a variaciones en el esfuerzo de tracción. Sin embargo, se pueden utilizar en uniones calculadas para resistir cargas ordinarias de viento.

- (3)P Categoría E: Uniones con tornillos pretensados de alta resistencia.

En esta categoría se utilizarán tornillos de alta resistencia pretensados con apriete controlado de acuerdo con la Norma de Referencia 8 de la Norma Europea Experimental ENV 1993-1-1:1992. El pretensado mejora la resistencia a fatiga. Sin embargo, el alcance de la mejora depende de los detalles y las tolerancias.

- (4) Para uniones sometidas a tracción de ambas categorías D y E, no es necesario ningún tratamiento especial de las superficies de contacto, excepto cuando las uniones de la categoría E están sometidas a tracción y a cortante al mismo tiempo (combinación E-B o E-C).

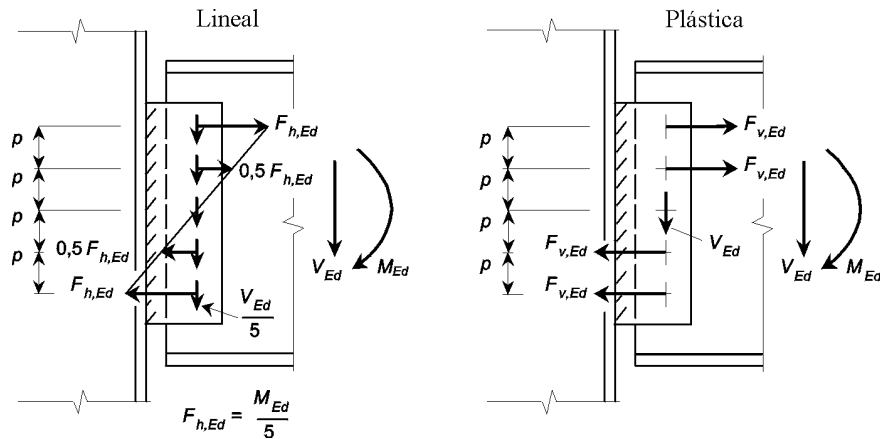
6.5.4 Distribución de esfuerzos entre elementos de fijación (tornillos o roblones)

- (1)P La distribución de esfuerzos internos entre los elementos de fijación (tornillos o roblones) debidos al momento flector en el estado límite último será proporcional a la distancia desde el centro de rotación y la distribución del esfuerzo cortante será equitativa, véase figura 6.9(a), en los casos siguientes:

- Uniones resistentes a deslizamiento de la categoría C.
- Otras uniones solicitadas a cortante en las que la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$ de un elemento de fijación (tornillo o roblón) sea menor que la resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$.

- (2) En los demás casos, la distribución de esfuerzos internos entre los elementos de fijación (tornillos o roblones) debidos al momento flector en el estado límite último se puede suponer como plástica y la distribución de cortantes equitativa, véase figura 6.9(b).

- (3) En una unión con solape, se debe suponer la misma resistencia a aplastamiento de cálculo en cualquier dirección particular para cada elemento de fijación (tornillo o roblón) hasta una longitud máxima de $\max L = 15 d$, donde d es el diámetro nominal del tornillo o roblón. Para $L > 15 d$ véase apartado 6.5.10.



a) Distribución proporcional a la distancia al centro de rotación

b) Posible distribución plástica con un elemento de fijación (tornillo o roblón) resistiendo V_{Ed} y 4 resistiendo M_E

$$F_{v,Ed} = \sqrt{\left(\frac{M_{Ed}}{5p}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{5}\right)^2} \quad (6.11)$$

$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{6p} \quad (6.12)$$

Figura 6.9 – Distribución de esfuerzos entre elementos de fijación (tornillos o roblones)

a) Distribución elástica de esfuerzos

b) Distribución plástica de esfuerzos

6.5.5 Resistencias de cálculo de tornillos

(1)P Las resistencias de cálculo dadas en este apartado se aplican a tornillos hechos de forma normalizada de grados de resistencia 4.6, 5.6, 8.8 y 10.9 o tornillos de aluminio o tornillos de acero inoxidable, los cuales son conformes con los correspondientes proyectos de normas europeas prEN o normas europeas EN, véase Anexo B de la Norma Europea Experimental ENV 1993-1-1:1992. Las tuercas y arandelas serán también conformes a los correspondientes proyectos de normas europeas prEN o normas europeas EN y tendrán las resistencias especificadas correspondientes.

(2)P En el estado límite último, el esfuerzo cortante de cálculo $F_{v,Ed}$ de un tornillo no superará el menor de:

- la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$;
- la resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$,

ambos obtenidos según la tabla 6.4.

(3)P En el estado límite último el esfuerzo axil de tracción de cálculo $F_{t,Ed}$ incluyendo cualquier esfuerzo debido a efecto de palanca, no superará la resistencia a tracción de cálculo $B_{t,Rd}$ de la unión tornillo-placa.

- (4)P La resistencia a tracción de cálculo de la unión tornillo-placa $B_{t,Rd}$ se tomará como la menor de la resistencia a tracción de cálculo $F_{t,Rd}$ del tornillo dada en la tabla 6.4 y la resistencia a punzonamiento de cálculo entre la cabeza del tornillo y la tuerca $B_{p,Rd}$, obtenida mediante:

$$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_o / \gamma_{Mb} \quad (6.19)$$

donde

- p es la distancia entre centros de ejes de agujeros de tornillos;
 t_p es el espesor de la placa bajo la cabeza del tornillo o bajo la tuerca;
 d_m es la media de la dimensión entre caras y entre vértices de la cabeza del tornillo o la tuerca, tomándose la menor de ambas;
 f_o es la resistencia característica del material de la pieza.

Tabla 6.4
Resistencias de cálculo de tornillos

Resistencia a cortante por cada plano de corte:	
– para grados de resistencia menores que 10.9	
$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}}$	(6.13)
– para grados de resistencia 10.9, tornillos de acero inoxidable y tornillos de aluminio	
$F_{v,Rd} = \frac{0,5 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}}$	(6.14)
$A = A_s$, si el plano de cortadura pasa a través de la zona roscada del tornillo $A = A$, si el plano de cortadura pasa a través de la zona no roscada del tornillo f_{ub} = resistencia característica última a tracción del material del tornillo	
Resistencia a aplastamiento	
$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}}$	(6.15)
donde α es el menor de	
$\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ o } 1,0.$	(6.16)
f_u es la resistencia característica última del material de las partes unidas	
Resistencia a tracción:	
$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} \quad \text{para tornillos de acero}$	(6.17)
$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} \quad \text{para tornillos de aluminio}$	(6.18)
A es el área de la sección transversal de la caña del tornillo; A_s es el área resistente a tracción del tornillo; d es el diámetro del tornillo; d_0 es el diámetro del agujero. e_1, p_1 véase figura 6.4	

- (5)P Los tornillos solicitados a cortante y axil de tracción al mismo tiempo deberán cumplir además:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.20)$$

- (6)P Las resistencias de cálculo para tracción y para cortante de la parte roscada dadas en la tabla 6.4 son válidas únicamente para tornillos hechos de acuerdo con los correspondientes proyectos de normas prEN o normas europeas EN, véase normativa en Anexo B de la Norma Europea Experimental ENV 1993-1-1:1992. Para otros tipos con rosca torneada, como pernos de anclaje o tirantes hechos de redondos roscados de acero en los que la rosca es mecanizada por el fabricante de la estructura metálica, y no por un fabricante especializado en tornillos, los valores correspondientes de la tabla 6.4 tales como el área resistente A_s se reducirán multiplicándolos por un coeficiente de valor 0,85.
- (7) Los valores de la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$ dados en la tabla 6.4 se aplican sólo cuando los tornillos se utilizan en agujeros con holguras nominales que no superan las especificadas para agujeros estándar en el apartado 7.5.2 (1).
- (8) Los tornillos M12 y M14 se pueden usar también en agujeros con holguras de 2 mm siempre que:
- para tornillos de grado de resistencia 10.9 la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$ se tome como 0,85 veces el valor dado en la tabla 6.4;
 - la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$ (reducida si es el caso según lo expuesto más arriba) no es menor que la resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$.
- (9)P Los valores para la resistencia a aplastamiento de cálculo dados en la tabla 6.4 se aplican sólo cuando la distancia al borde lateral e_2 no es menor que $1,5 d_0$ y la separación p_2 medida de forma transversal a la dirección de la carga es al menos $3,0 d_0$.
- (10)P Si e_2 se reduce a $1,2 d_0$ y/o p_2 se reduce a $2,4 d_0$, entonces la resistencia a aplastamiento $F_{b,Rd}$ deberá reducirse a $2/3$ del valor dado en la tabla 6.4. Para valores intermedios $1,2 d_0 \leq e_2 < 1,5 d_0$ y/o $2,4 d_0 \leq p_2 \leq 3 d_0$ el valor de $F_{b,Rd}$ puede determinarse mediante interpolación lineal.
- (11) Para tornillos con agujeros de holgura estándar (véase apartado 7.3.6) pueden obtenerse valores conservadores de la resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$, basados en el diámetro del tornillo d , en la tabla 6.4.

6.5.6 Resistencias de cálculo de roblones

- (1)P En el estado límite último, el esfuerzo cortante de cálculo $F_{v,Ed}$ en un roblón no superará el menor de:

- la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$;
- la resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$;

ambas obtenidas según la tabla 6.5.

- (2)P Las uniones roblonadas se calcularán para transmitir los esfuerzos de cortadura y aplastamiento. La tracción en los roblones de aluminio no es recomendable.
- (3)P Los roblones sometidos a esfuerzos cortante y axil de tracción al mismo tiempo cumplirán además:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.21)$$

- (4)P Los valores de la resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$, de la tabla 6.5, se aplican sólo cuando la distancia al borde lateral e_2 no es menor que $1,5 d_0$ y la separación p_2 medida de forma transversal a la dirección de la carga es al menos $3,0 d_0$.
- (5)P Para valores más pequeños de e_2 y/o p_2 debe aplicarse la misma reducción de $F_{b,Rd}$ que la dada en el apartado 6.5.5 (10) para tornillos.
- (6) Como regla general, la longitud de apretadura de un roblón no deberá superar $4,5d$ para remachado con martillo y $6,5d$ para remachado a presión.

Tabla 6.5
Resistencias de cálculo para roblones de aluminio

Resistencia a cortante por cada plano de corte:	
$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A}{\gamma_{Mr}}$	(6.22)
Resistencia a aplastamiento:	
$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha f_u d_0 t}{\gamma_{Mr}}$	(6.23)
donde α es el menor de:	
$\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ur}}{f_u} \text{ o } 1,0$	(6.24)
f_u es la resistencia característica última del material de las partes unidas	
Resistencia a tracción: No recomendable	
<p>A es el área del agujero del roblón</p> <p>d_0 es el diámetro del agujero del roblón</p> <p>f_{ur} es la resistencia última a tracción especificada del roblón</p> <p>e_1, p_1 véase figura 6.4</p>	

6.5.7 Tornillos y roblones de cabeza avellanada

- (1)P La resistencia a tracción de cálculo $F_{t,Rd}$ de un tornillo de cabeza avellanada se tomará como 0,7 veces la resistencia de cálculo a tracción dada en la tabla 6.4 o en la tabla 6.5, respectivamente.
- (2)P El ángulo y la profundidad de avellanado estarán de acuerdo con la cabeza de los tornillos avellanados reales, en otro caso la resistencia a tracción se ajustará adecuadamente.
- (3)P La resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$ de un tornillo o roblón de cabeza avellanada se calculará según se especifica en los apartados 6.5.5 ó 6.5.6, respectivamente, con la mitad de la profundidad de avellanado deducida del espesor t de la correspondiente parte unida.

6.5.8 Roblones huecos y roblones con mandriles

- (1)P La resistencia de cálculo de los roblones huecos y de los roblones con mandriles deberá ser determinada mediante ensayos.

6.5.9 Tornillos de alta resistencia en uniones resistentes a deslizamiento

6.5.9.1 Generalidades

- (1) El diseño se debe basar en cálculos para uniones en las que el límite elástico práctico del material de las partes a unir es mayor que 200 N/mm^2 . En otro caso la resistencia de las uniones utilizando tornillos de alta resistencia de grado general deberá ser probada mediante ensayos. En estructuras de aluminio no puede ser ignorada la relajación de los tornillos pretensados debida a la tracción en los materiales unidos.
- (2) No se puede ignorar el efecto de cambios de temperatura extremos y/o largas longitudes de amarre, los cuales pueden causar una reducción o incremento de la capacidad de fricción debido a la expansión térmica diferencial entre el aluminio y los tornillos de acero.

6.5.9.2 Estados límites últimos

- (1)P Es posible tomar la resistencia al deslizamiento como estado límite último o como estado límite de servicio, véase apartado 6.5.3.1, pero, además, en el estado límite último el esfuerzo cortante de cálculo $F_{v,Ed}$ en un tornillo de alta resistencia no superará al menor de:
- la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$;
 - la resistencia a aplastamiento de cálculo $F_{b,Rd}$;
 - la resistencia a tracción o a compresión o a flexión de la pieza en la sección neta y en la sección transversal bruta.

6.5.9.3 Resistencia a deslizamiento/Resistencia a cortante

- (1)P La resistencia a deslizamiento de cálculo de un tornillo pretensado de alta resistencia se tomará como:

$$F_{s,Rd} = \frac{n\mu}{\gamma_{Ms}} F_{p,Cd} \quad (6.25)$$

donde

$F_{p,Cd}$ es el esfuerzo de pretensado de cálculo, dado en el apartado 6.5.9.4;

μ es el coeficiente de rozamiento, véase apartado 6.5.9.5; y

n es el número de caras de fricción.

- (2)P Para tornillos en agujeros con holguras nominales estándar el coeficiente parcial de seguridad para resistencia a deslizamiento γ_{Ms} se tomará como:

$$\gamma_{Ms,ult} = \boxed{1,25} \quad \text{para el estado límite último}$$

$$\gamma_{Ms,ser} = \boxed{1,10} \quad \text{para el estado límite de servicio}$$

Si el coeficiente de rozamiento μ se determina mediante ensayos de acuerdo con el Anexo A, el coeficiente parcial de seguridad para el estado límite último se puede reducir en 0,1.

- (3) Las uniones con tornillos en agujeros a sobremedida o con agujeros alargados no son habituales en estructuras de aluminio y no están cubiertas por estas reglas.

6.5.9.4 Pretensado

- (1)P Para tornillos de alta resistencia acordes con los correspondientes proyectos de normas europeas prEN o normas europeas EN, con apriete controlado de acuerdo con el capítulo 7, el esfuerzo de pretensado de cálculo $F_{p,Cd}$ a utilizar en los cálculos de proyecto, se tomará como:

$$F_{p,Cd} = 0,65 f_{ub} A_S \quad \text{para tornillos 8.8} \quad (6.26 \text{ a})$$

$$F_{p,Cd} = 0,7 f_{ub} A_S \quad \text{para tornillos 10.9} \quad (6.26 \text{ b})$$

- (2)P Cuando se utilicen otros tipos de tornillos pretensados o de elementos de fijación pretensados, se acordará el esfuerzo de pretensado de cálculo $F_{p,Cd}$ entre el cliente, el proyectista y la autoridad competente.

6.5.9.5 Coeficiente de rozamiento

- (1) El valor de cálculo del coeficiente de rozamiento μ depende de la clase específica de tratamiento superficial. El valor de μ para un tratamiento estándar de granallado ligero, N10a, véase la Norma Internacional ISO 468/1302, sin tratamiento de protección superficial, deberá tomarse de la tabla 6.6.

Tabla 6.6
Coeficiente de rozamiento para superficies tratadas a fricción

Espesor total de la unión (mm)	Coeficiente de rozamiento μ
$12 \leq \Sigma t < 18$	0,27
$18 \leq \Sigma t < 24$	0,33
$24 \leq \Sigma t < 30$	0,37
$30 \leq \Sigma t$	0,40

La experiencia demuestra que los tratamientos superficiales de protección aplicados antes del granallado conducen a coeficientes de rozamientos menores.

- (2)P Los cálculos para cualquier otro tratamiento superficial, o el uso de mayores coeficientes de rozamiento, deberá estar basado en probetas representativas de las superficies utilizadas en la estructura, usando el procedimiento descrito en el anexo A.

6.5.9.6 Combinación de tracción y cortante

- (1)P Si una unión resistente a deslizamiento se ve sometida a un esfuerzo axial de tracción F_t y, al mismo tiempo, a un esfuerzo cortante F_v que tienda a producir deslizamiento, la resistencia a deslizamiento por cada tornillo se tomará como sigue:

- Categoría B: Resistente a deslizamiento en estado límite de servicio

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{n \mu (F_{p,Cd} - 0,8 F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{Ms,ser}} \quad (6.27)$$

- Categoría C: Resistente a deslizamiento en estado límite último

$$F_{s,Rd} = \frac{n \mu (F_{p,Cd} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{Ms,ult}} \quad (6.28)$$

6.5.10 Fuerzas de palanca

- (1)P Cuando se precise que los elementos de fijación (tornillos o roblones) transmitan un esfuerzo axial de tracción, se proporcionarán para resistir también el esfuerzo adicional debido a efecto de palanca, cuando esto pueda ocurrir, véase figura 6.10.

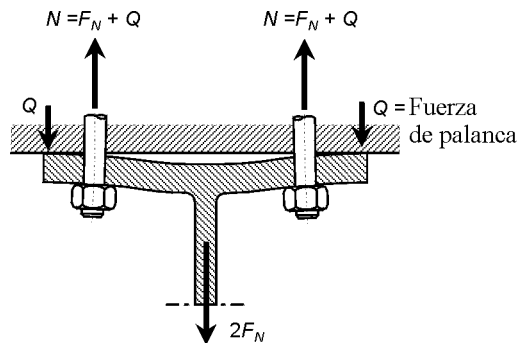


Figura 6.10 – Fuerzas de palanca

- (2) Las fuerzas de palanca dependen de la rigidez relativa y de las proporciones geométricas de los componentes de la unión, véase figura 6.11.

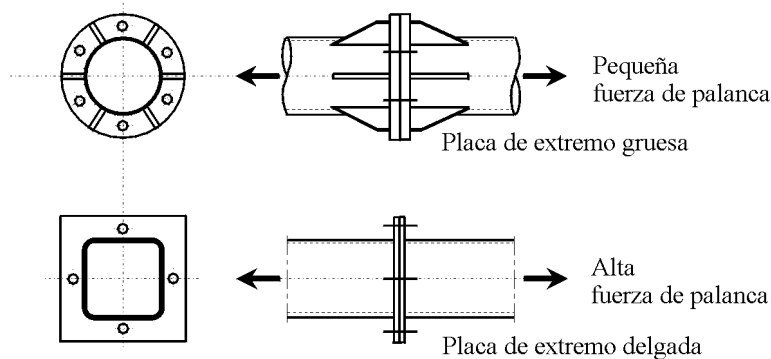


Figura 6.11 – Efecto de los detalles en las fuerzas de palanca

- (3) Si se consiguen ventajas con los efectos de las fuerzas de palanca en el cálculo de los componentes, entonces la fuerza de palanca deberá determinarse a partir de un análisis adecuado.

6.5.11 Uniones largas

- (1)P Cuando la distancia L_j entre los centros de los elementos de fijación (tornillos o roblones) extremos de una unión, medida en la dirección de la transmisión del esfuerzo (véase figura 6.12), es mayor que $15 d$, donde d es el diámetro nominal de los tornillos o roblones, la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$ de todos los elementos de fijación calculados según se especifica en los apartados 6.5.5 ó 6.5.6, según proceda, se reducirá multiplicándola por un coeficiente de reducción β_{Lf} dado por:

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15 d}{200 d} \quad (6.29)$$

pero $0,75 \leq \beta_{Lf} \leq 1,0$.

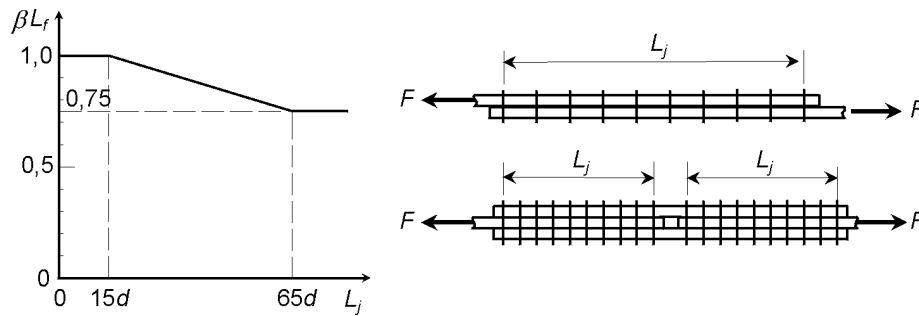


Fig. 6.12 – Uniones largas

- (2) Esta disposición no se aplica cuando hay una distribución uniforme de transmisión del esfuerzo sobre toda la longitud de la unión, como en la transmisión del esfuerzo cortante entre alma y ala de un perfil.

6.5.12 Uniones a solape simple con un solo elemento de fijación

- (1)P En uniones a solape simple de elementos planos con un solo elemento de fijación (tornillo o roblón), véase figura 6.13, el tornillo estará provisto de arandelas bajo su cabeza y bajo la tuerca para evitar el fallo por arrancamiento. Un único roblón no debe ser usado en unión a solape simple.
- (2)P La resistencia a aplastamiento $F_{b,Rd}$ determinada de acuerdo con el apartado 6.5.5 se limitará a:

$$F_{b,Rd} \leq 1,5 f_u d t / \gamma_{Mb} \quad (6.30)$$

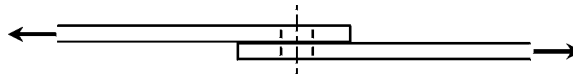


Fig. 6.13 – Unión a solape simple con un tornillo

- (3) En el caso de tornillos de alta resistencia de grados 8.8 ó 10.9, deberán usarse arandelas apropiadas para uniones a solape simple de elementos planos con un solo tornillo, incluso si los tornillos no están pretensados.

6.5.13 Elementos de fijación que atraviesan forros

- (1)P Cuando los tornillos o roblones que transmiten la carga a cortante y aplastamiento pasan a través de forros de espesor total t_p mayor que un tercio del diámetro nominal d , la resistencia a cortante de cálculo $F_{v,Rd}$ determinada como se especifica en los apartados 6.5.5 ó 6.5.6, según proceda, se reducirá multiplicándola por un coeficiente de reducción β_p dado por:

$$\beta_p = \frac{9d}{8d + 3 t_p} \text{ pero } \beta_p \leq 1,0 \quad (6.31)$$

- (2) Para uniones a doble cortadura con forros a ambos lados del empalme, t_p deberá tomarse como el espesor del forro más grueso.
- (3) Los elementos de fijación adicionales necesarios debido a la aplicación del coeficiente reductor β_p pueden opcionalmente colocarse en una prolongación del forro.

6.5.14 Uniones con bulones

6.5.14.1 Campo de aplicación

- (1) Este apartado se aplica a uniones con bulones en las que se requiera libertad de giro. Las uniones con bulones en las que no se requiera libertad de giro pueden calcularse como uniones atornilladas simples, véanse apartados 6.5.5 y 6.5.9.

Los bulones no deben estar cargados en simple cortadura, de este modo una de las piezas a unir tendrá un extremo bifurcado, o de horquilla. El pasador retenedor del sistema, por ejemplo, grapa elástica, deberá ser calculado para resistir una carga lateral igual al 10% del total del esfuerzo cortante en el bulón.

6.5.14.2 Agujeros y placas para bulones

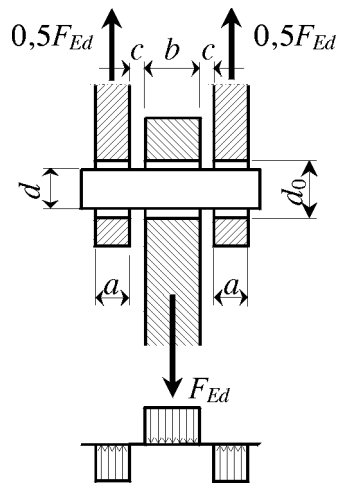
- (1)P La geometría de las placas en uniones con bulones estará de acuerdo con los requisitos dimensionales.
- (2)P En el estado límite último, el esfuerzo de cálculo N_{Rd} en la placa no superará la resistencia a aplastamiento de cálculo dada en la tabla 6.7.
- (3)P Las placas para bulones cuya función sea la de aumentar el área neta de una pieza o aumentar la resistencia a aplastamiento de un bulón serán de tamaño suficiente para transmitir el esfuerzo de cálculo desde el bulón a la pieza y se colocarán de forma que se eviten excentricidades.

6.5.14.3 Cálculo de bulones

- (1) Los momentos flectores en un bulón deberán calcularse como se indica en la figura 6.14.
- (2)P En estado límite último, los esfuerzos y momentos de cálculo en un bulón no superarán las correspondientes resistencias de cálculo dadas en la tabla 6.7.

Tabla 6.7
Resistencias de cálculo para uniones con bulones (en rótula)

Criterio	Resistencia
Cortante en el bulón	$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} / \gamma_{Mp}$
Flexión del bulón	$M_{Rd} = 0,8 W_{el} f_{up} / \gamma_{Mp}$
Combinación de cortante y flexión en el bulón	$[M_{Ed} / M_{Rd}]^2 + [F_{v,Ed} / F_{v,Rd}]^2 \leq 1,0$
Aplastamiento entre la placa y el bulón	$F_{b,Rd} = 1,5 t d f_0 / \gamma_{Mp}$



$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8} (2a + 4c + b) \quad (6.32)$$

Fig. 6.14 – Momento flector en un pasador

6.6 Uniones soldadas

6.6.1 Generalidades

- (1) En el proyecto de uniones soldadas hay que tener en cuenta tanto la resistencia de las soldaduras como la resistencia de las zonas afectadas térmicamente (HAZ).
- (2)P Las guías de diseño dadas aquí se aplicarán a:
 - el proceso de soldadura MIG para todos los espesores y el TIG sólo para espesores de material hasta $t = 6$ mm y para reparación;
 - el soldador y el proceso de soldadura sean aprobados de acuerdo con los requisitos de cualificación así como las especificaciones, es decir nivel de calidad normal, véase apartado 7.5;
 - combinaciones de metal base y de aportación como las dadas en el apartado 3.3.4;
 - estructuras cargadas con cargas predominantemente estáticas.
- (3)P Si, en el caso de piezas resistentes, las condiciones anteriores no son verificadas se deben hacer probetas de ensayo especiales soldadas y luego ensayos, véase apartado 7.5.
- (4)P Si se ha especificado un nivel de calidad inferior por parte del proyectista para piezas parcialmente o no resistentes, se deben usar valores resistentes de cálculo menores, $\gamma_M = \boxed{1,65}$ en lugar de $\gamma_M = \boxed{1,25}$, véase también apartado 6.1.1.
- (5)P En orden a asegurar la cualificación de la calidad de soldadura las probetas deben ser soldadas de acuerdo a las especificaciones escritas del proceso de soldadura. Esto permite aprobar al soldador y al método de soldadura, así como determinar los parámetros de soldadura y otros datos relevantes, los cuales pueden ser añadidos a las especificaciones del proceso de soldadura. Y, si es necesario, se pueden someter a ensayos mecánicos para probar el cálculo y el procedimiento.

- (1)P Para las siguientes clases de aleaciones debe tenerse en cuenta una zona afectada térmicamente (véase también apartado 5.3.4):
 - Aleaciones tratables térmicamente en cualquier condición de tratamiento térmico por encima de T4 (series 6xxx y 7xxx)
 - Aleaciones no tratables térmicamente en cualquier condición de endurecimiento por deformación (series 3xxx y 5xxx)
- (2)P La severidad y extensión (dimensiones) del reblandecimiento de la zona afectada térmicamente (HAZ) dada en el apartado 5.5 deberá ser tenida en cuenta. Tanto la severidad como la extensión son diferentes para las soldaduras TIG y MIG. Para la soldadura TIG deberá ser aplicada una mayor extensión (mayor área de la zona afectada térmicamente HAZ) y más severidad del reblandecimiento debidas a una mayor entrada de calor.
- (3)P Las resistencias características $f_{a,haz}$ y $f_{v,haz}$ para el material en la zona HAZ están dadas en el apartado 5.5.2. Los coeficientes de reblandecimiento HAZ deberán ser tomados de la tabla 5.2.

- (1)P Para el cálculo de uniones soldadas se debe verificar lo siguiente:
 - el cálculo de la soldadura, véanse apartados 6.6.3.2 y 6.6.3.3;
 - la resistencia de cálculo de la zona HAZ adyacente a la soldadura, véase apartado 6.6.3.4;
 - el cálculo de las uniones con soldaduras combinadas, véase apartado 6.6.3.5.
- (2) La capacidad de deformación de una unión soldada puede ser mejorada cuando la resistencia de cálculo de las soldaduras es mayor que la del material en la zona HAZ.

- (1) Para la resistencia característica del metal de soldadura (f_w) se deben usar los valores de la tabla 6.8, siempre que se apliquen combinaciones de metal de base y metal de aportación como las dadas en el apartado 3.3.4.
- (2) En el cálculo de la unión soldada en estructuras de aleaciones de aluminio se debe hacer notar que – aparte de la reducción de la resistencia en la zona HAZ – también la resistencia del metal de aportación de soldadura habitualmente se muestra inferior a la resistencia del metal de base.

Resistencia característica	Metal de aportación	Aleación								
		3103	5052	5083	5454	6060	6005A	6061	6082	7020
f_w (N/mm ²)	5356	—	170	240	220	160	180	190	210	260
	4043A	95	—	—	—	150	160	170	190	210 ¹⁾

NOTA 1 – Para perfiles extruidos y espesores de material $5 < t \leq 25$ mm en aleación 6060-T5 los valores anteriores se deben reducir a 140 N/mm² (véase tabla 3.2b).

NOTA 2 – Se pueden utilizar los valores de la aleación 5454 para la aleación 5754, y los de la 6060 para la 6063.

NOTA 3 – Si se usa como metal de aportación 5056A, 5556A o 5183 entonces se deben aplicar los valores de la 5356.

NOTA 4 – Si se usa como metal de aportación 4047A, o 3103 entonces se deben aplicar los valores de la 4043A.

NOTA 5 – Para diferentes combinaciones de aleaciones se deben usar las menores resistencias características del metal de soldadura.

1) Sólo en casos especiales debido a la baja resistencia y elongación de la unión.

- (3)P Las resistencias características del metal de soldadura deberán distinguirse de acuerdo al metal de aportación utilizado. La elección del metal de aportación tiene una influencia significativa en la resistencia del metal de soldadura.

6.6.3.2 Diseño de uniones a tope

6.6.3.2.1 Soldaduras a tope con penetración completa

- (1)P Las soldaduras a tope con penetración completa deberán aplicarse a piezas resistentes.
- (2) El espesor eficaz de una soldadura a tope de penetración completa se debe tomar como el espesor de las piezas conectadas siempre que esté bien ejecutada la soldadura. Con piezas de diferentes espesores la pieza de menor espesor se deberá tener en cuenta como espesor de soldadura.
- (3) El recarge o las muescas de la soldadura dentro de los límites especificados son despreciables para el cálculo.
- (4)P La longitud eficaz se debe tomar como igual a la longitud total de soldadura cuando se usan placas de entrada y salida. En otros casos la longitud total se debe reducir en dos veces el espesor t .

6.6.3.2.2 Soldaduras a tope con penetración parcial

- (1)P Las soldaduras a tope con penetración parcial sólo se usarán para piezas resistentes cuando se verifique mediante ensayos que no se manifiestan serios defectos de soldadura.

En otros casos las soldaduras a tope con penetración parcial sólo se aplicarán con un mayor valor de γ_{Mw} debido a la alta susceptibilidad a los defectos de soldadura de las soldaduras a tope con penetración parcial. Para soldaduras a tope con penetración parcial se tiene que aplicar un espesor de garganta eficaz (véase figura 6.22).

6.6.3.2.3 Fórmulas de cálculo para uniones a tope

- (1)P Para las tensiones de cálculo se deberá aplicar lo siguiente:

- tensiones normales, tracción o compresión, perpendiculares al eje de soldadura, véase figura 6.15:

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (6.33)$$

- tensiones de cortadura, véase figura 6.16:

$$\tau \leq 0,6 \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (6.34)$$

- combinación de tensiones normales y de cortadura:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau^2} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (6.35)$$

donde

f_w resistencia característica del metal de soldadura de acuerdo con la tabla 6.8;

σ_{\perp} tensión normal, perpendicular al eje de soldadura;

τ tensión de cortadura, paralela al eje de soldadura;

γ_{Mw} coeficiente parcial de seguridad para uniones soldadas, véase apartado 6.1.1.

NOTA – Las tensiones normales paralelas al eje de soldadura no se tienen que tener en cuenta, véase figura 6.15.

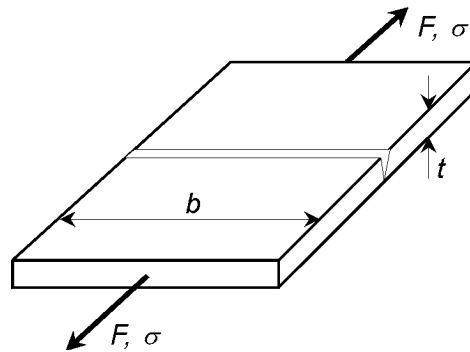


Fig. 6.15 – Soldadura a tope, tensiones normales

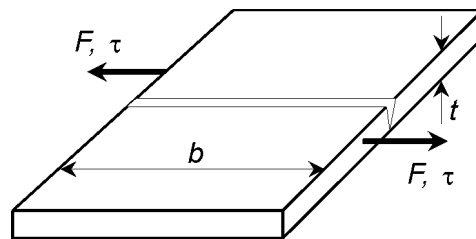


Fig. 6.16 – Soldadura a tope, tensiones de cortadura

6.6.3.3 Cálculo de las soldaduras en ángulo

- (1)P Para el cálculo de soldaduras en ángulo la sección de la garganta deberá ser tomada como la sección gobernante, dado que la resistencia real de una soldadura en ángulo queda bien aproximada considerando la sección de la garganta y las fuerzas actuantes en dicha sección.
- (2)P La sección de la garganta deberá determinarse mediante la longitud eficaz y el espesor eficaz de la garganta de una soldadura en ángulo.
- (3)P La longitud eficaz se tomará como la longitud total de la soldadura en ángulo cuando:
 - la longitud de la soldadura en ángulo es al menos 8 veces el espesor de garganta, y
 - la longitud de la soldadura en ángulo no excede de 100 veces el espesor de garganta con tensiones no uniformes
 - la distribución de tensiones a lo largo de la longitud de la soldadura es constante, como por ejemplo en el caso de juntas de solape como la mostrada en la figura 6.17.

NOTA 1 – Con distribuciones de tensión uniformes no es necesario restringir la longitud de la soldadura en ángulo, véase figura 6.17.

- (4)P Si las especificaciones listadas anteriormente no son satisfechas la longitud eficaz del cordón de soldadura se deberá tomar como se da posteriormente.
- (5)P Si la rigidez de las piezas conectadas difiere considerablemente entre sí, se debe tener en cuenta otra reducción de la longitud eficaz de la soldadura.

- (6)P Si la longitud del cordón longitudinal de la soldadura en ángulo tiene que ser reducido, se debe aplicar lo siguiente:

$$L_{w,eff} = (1,2 - 0,2 L_w/100 a) L_w \text{ con } L_w \leq 100 a \quad (6.36)$$

donde

$L_{w,eff}$ = longitud eficaz del cordón longitudinal de la soldadura en ángulo;

L_w = longitud total del cordón longitudinal de la soldadura en ángulo;

a = espesor eficaz de la garganta, véase figura 6.18.

- (7) Con distribuciones de tensión no uniformes y soldaduras delgadas y largas, la capacidad de deformación en los extremos puede ser agotada antes que ceda la parte media de la soldadura; entonces la unión falla por medio de una especie de efecto de cremallera.

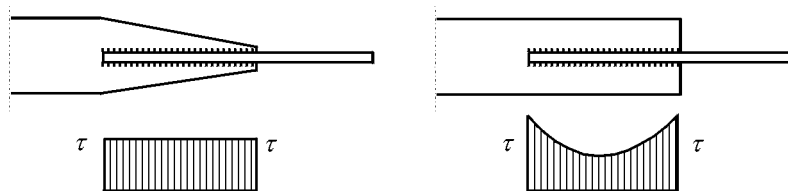


Fig. 6.17 – Distribuciones de tensión en juntas de solape con cordones en ángulo

a) Ejemplo de distribución uniforme de tensión

b) Ejemplo de distribución no uniforme de tensión

- (8)P El espesor eficaz de garganta a tiene que ser determinado como se indica en la figura 6.18 (a es la altura del mayor triángulo dentro del cual se puede inscribir la soldadura).
- (9) Cuando las probetas de cualificación presentan una penetración de la raíz positiva de forma consistente, se puede suponer lo siguiente para propósitos de cálculo:
- El espesor de garganta se puede incrementar en el 20% o 2 mm cualquiera que sea el menor, bajo la condición de que se haya confeccionado un procedimiento de cualificación. Entonces: $a = 1,2 a$ o $a = a + 2$ mm.
 - Con soldaduras en ángulo con penetración profunda el espesor de garganta adicional se puede tener en cuenta siempre que se haya probado mediante ensayos la consistencia de la penetración. Entonces: $a = a + a_{pen}$, véase figura 6.18.

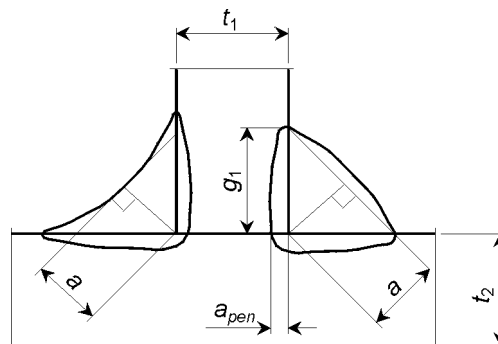


Fig. 6.18 – Espesor de garganta eficaz a ; penetración positiva de la raíz a_{pen}

(10) Las fuerzas actuantes en una soldadura en ángulo pueden descomponerse en las componentes de tensiones con respecto a la sección de la garganta, véase figura 6.19. Estas componentes son:

- una tensión normal σ_{\perp} perpendicular a la sección de la garganta
- una tensión de cortadura τ_{\perp} actuando en la sección de la garganta perpendicular al eje de soldadura
- una tensión de cortadura τ_{\parallel} actuando en la sección de la garganta paralela al eje de soldadura

NOTA – La tensión normal σ_{\parallel} actuante a lo largo del eje de soldadura no se tiene que considerar, véase figura 6.19.

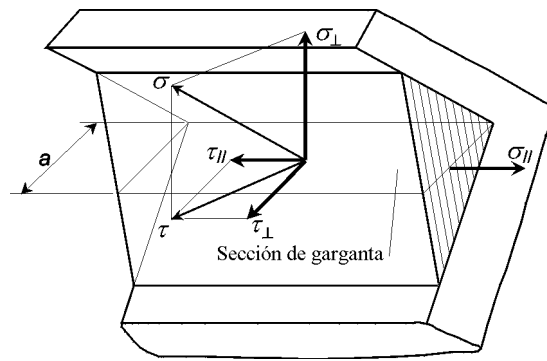


Fig. 6.19 – Tensiones σ_{\perp} , τ_{\perp} y τ_{\parallel} actuantes en la sección de garganta de un cordón de soldadura en ángulo

(11)P Estas componentes de tensiones deberán combinarse para obtener una tensión de comparación σ_c como la siguiente:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (6.37)$$

donde

Para las tensiones de cálculo se aplicará la siguiente:

$$\sigma_c \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (6.38)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (6.39)$$

donde

f_w es la resistencia característica del metal de soldadura de acuerdo con la tabla 6.8;

γ_{Mw} es el coeficiente parcial de seguridad de uniones soldadas, véase apartado 6.1.1.

(12)P Para dos casos que ocurren frecuentemente se deben de aplicar las siguientes fórmulas de cálculo derivadas a partir de la fórmula β :

- Unión con doble cordón de soldadura, cargada perpendicularmente al eje de soldadura (véase figura 6.20). Para el espesor de garganta debe cumplirse:

$$a > 0,7 \frac{\sigma t}{f_w / \gamma_{Mw}} \quad (6.40)$$

donde

$$\sigma = \frac{F}{t b} \text{ es la tensión normal en el elemento unido;} \quad (6.41)$$

F es el esfuerzo de cálculo en el elemento unido;

f_w es la resistencia característica del metal de soldadura de acuerdo con la tabla 6.8;

t espesor del elemento unido, véase figura 6.20;

b anchura del elemento unido.

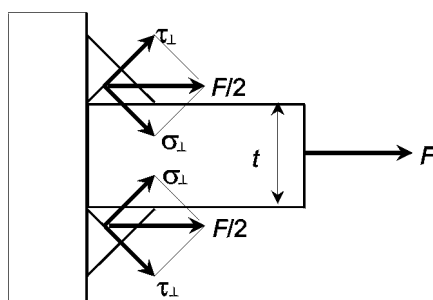


Fig. 6.20 – Unión con doble soldadura en ángulo cargada perpendicularmente al eje de soldadura

- Unión con doble cordón de soldadura, cargada paralelamente al eje de soldadura (véase figura 6.21). Para el espesor de garganta a se debe aplicar:

$$a > 0,85 \frac{\tau t}{f_w / \gamma_{Mw}} \quad (6.42)$$

donde

$$\tau = \frac{F}{t h} \text{ es la tensión de cortadura en el elemento unido;} \quad (6.43)$$

F es el esfuerzo de cálculo en el elemento unido;

f_w es la resistencia característica del metal de soldadura de acuerdo con la tabla 6.8;

t espesor del elemento unido, véase figura 6.21;

h altura del elemento unido, véase figura 6.21.

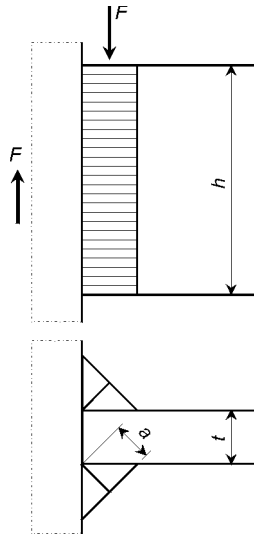


Fig. 6.21 – Unión con doble soldadura en ángulo cargada paralelamente al eje de soldadura

6.6.3.4 Resistencia de cálculo de la zona afectada térmicamente HAZ

(1)P La resistencia de cálculo de la zona HAZ adyacente a la soldadura debe tomarse como sigue:

a) Fuerza de tracción perpendicular al plano de fallo (véase figura 6.22):

HAZ soldadura a tope:

$$\sigma_{haz} \leq \frac{f_{a,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el pie de la soldadura (sección transversal completa);} \quad (6.44)$$

HAZ soldadura a tope de penetración parcial:

$$\sigma_{haz} \leq \frac{t_e f_{a,haz}}{t \gamma_{Mw}} \quad \text{en el borde de la zona de fusión [penetración parcial ($t_e < t$)];} \quad (6.45)$$

HAZ cordones de soldadura en ángulo:

$$\sigma_{haz} \leq \frac{f_{a,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el pie de la soldadura (sección transversal completa);} \quad (6.46)$$

$$\sigma_{haz} \leq \frac{g_1 f_{a,haz}}{t \gamma_{Mw}} \quad \text{en el borde de la zona de fusión (véanse las figuras 6.18 y 6.22)} \quad (6.47)$$

donde

- σ_{haz} tensión normal de cálculo perpendicular al eje de soldadura;
- t espesor del elemento unido;
- t_e espesor eficaz de garganta de la soldadura a tope de penetración parcial;
- g_1 longitud de apoyo del cordón de soldadura en ángulo (véase figura 6.18);
- $f_{a,haz}$ resistencia característica de la zona HAZ, véase apartado 6.6.2;
- γ_{Mw} es el coeficiente de seguridad del material para uniones soldadas, véase apartado 6.1.1.

b) Esfuerzo cortante en el plano de fallo:

HAZ soldadura a tope:

$$\tau_{haz} \leq \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el pie de la soldadura;} \quad (6.48)$$

$$\tau_{haz} \leq \frac{t_e}{t} \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el borde de la zona de fusión.} \quad (6.49)$$

HAZ cordones de soldadura en ángulo:

$$\tau_{haz} \leq \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el pie de la soldadura;} \quad (6.50)$$

$$\tau_{haz} \leq \frac{g_1}{t} \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el borde de la zona de fusión.} \quad (6.51)$$

donde

τ_{haz} tensión tangencial de cálculo paralela al eje de soldadura;

$f_{v,haz}$ resistencia característica a cortante de la zona HAZ, véase apartado 6.6.2;

γ_{Mw} es el coeficiente de seguridad del material para uniones soldadas, véase apartado 6.1.1;

Otros símbolos: véase apartado 6.6.3.4a).

c) Combinación de cortante y tracción.

HAZ soldadura a tope:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el pie de la soldadura;} \quad (6.52)$$

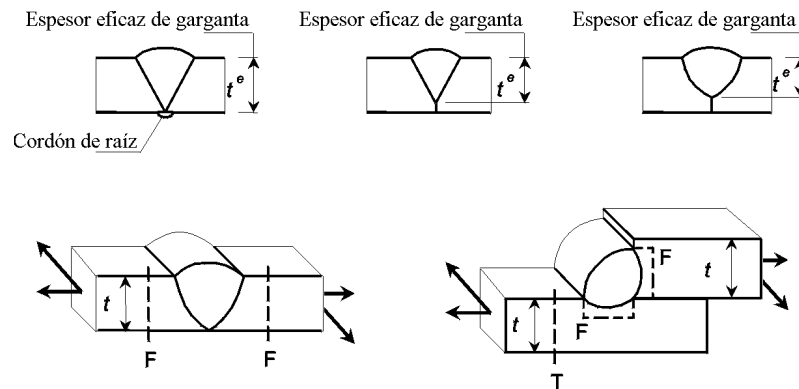
$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \frac{t_e}{t} \frac{f_{v,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el borde de la zona de fusión.} \quad (6.53)$$

HAZ cordones de soldadura en ángulo:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \frac{f_{a,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el pie de la soldadura;} \quad (6.54)$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \frac{g_1}{t} \frac{f_{a,haz}}{\gamma_{Mw}} \quad \text{en el borde de la zona de fusión.} \quad (6.55)$$

Para los símbolos véanse apartados 6.6.3.4a) y 6.6.3.4b).



**Fig. 6.22 – Planos de fallo HAZ adyacentes a la soldadura; F = HAZ, borde zona de fusión;
T = HAZ, pie de la soldadura, sección transversal completa**

- (2) La guía de cálculo anterior respecto a la zona HAZ es un compromiso con el correspondiente al de las uniones soldadas. En los apartados 5.3 y 5.5 se dan guías de cálculo para el efecto de la zona HAZ en el comportamiento de elementos estructurales.

6.6.3.5 Cálculo de uniones con soldaduras combinadas

- (1)P Para el cálculo de uniones con combinaciones de soldaduras se debe de aplicar uno de los dos métodos siguientes:

Método 1: Las cargas actuantes en la unión se distribuyen en las respectivas soldaduras que estén más adaptadas a soportarlas.

Método 2: Las soldaduras se calculan para las tensiones que se producen en el metal de base de las diferentes partes de la unión.

- (2) Aplicando uno de los métodos anteriores el cálculo de uniones con combinación de soldaduras se reduce al cálculo de las soldaduras que la constituyen.

NOTA 1 – Con el método 1 se tiene que comprobar si la soldadura posee suficiente capacidad de deformación para que permita soportar cualquier distribución simplificada de esfuerzos. Además, los esfuerzos supuestos en las soldaduras no deben dar un sobreesfuerzo en los elementos unidos.

NOTA 2 – Con el método 2 el problema anterior no existe, pero en algunos casos puede ser difícil determinar las tensiones en el material de base de las diferentes partes de la unión.

NOTA 3 – Suponer una distribución simplificada de esfuerzos, tal como la descrita en el método 1, es el método más comúnmente aplicado. Dado que la distribución real de esfuerzos entre las soldaduras es altamente indeterminada, cualquier suposición tiene que estar basada en una práctica aceptable y satisfactoria. Sin embargo, estas suposiciones cuentan con una demostrada capacidad de las soldaduras de redistribuir los esfuerzos mediante la fluencia.

- (3) Las tensiones residuales y otras tensiones no participantes en la transferencia de cargas no necesitan ser consideradas para el cálculo. En consecuencia, las tensiones debidas a excentricidades menores en la junta no necesitan ser consideradas.

6.7 Uniones híbridas

- (1)P Cuando se usan diferentes formas de elementos de fijación para soportar un esfuerzo cortante o cuando se usan combinaciones de soldaduras y elementos de fijación, el proyectista deberá verificar que ellos actúan conjuntamente.

- (2) En general el grado de colaboración puede ser evaluado mediante consideración de las curvas carga-desplazamiento de la conexión particular para cada especie individual de forma de unión, o también mediante ensayos adecuados de la unión híbrida completa.
- (3)P En particular los tornillos normales con holgura de agujero no colaborarán con la soldadura.
- (4) Los tornillos de alta resistencia pretensados en uniones calculadas como resistentes al deslizamiento en el estado límite último (Categoría C en el apartado 6.5.3.1) puede suponerse que participan en soportar el esfuerzo con la soldadura, siempre que el apriete final de los tornillos se lleve a cabo después de que se haya completado la soldadura. El esfuerzo total de cálculo viene dado mediante el correspondiente esfuerzo de cálculo de cada elemento de fijación con su correspondiente valor γ_M .

6.8 Uniones mediante adhesivos

6.8.1 Generalidades

- (1) Las uniones estructurales en aluminio pueden ser hechas por adherencia mediante adhesivos. El enlace por adherencia necesita de una técnica experta que debe ser seguida con gran cuidado.
- (2)P Las guías de cálculo dadas aquí sólo se deben de aplicar bajo estas condiciones:
 - el diseño de la unión es tal que sólo se tienen que transmitir esfuerzos cortantes (véase apartado 6.8.2.1);
 - se aplican los adhesivos adecuados (véase apartado 6.8.2.2);
 - los procesos de preparación superficial antes de adherir siguen las especificaciones que se requieren para la aplicación [véase apartado 6.8.2.2.(3)].
- (3)P El uso de adhesivo para uniones de elementos principales no debe ser contemplado sin considerables ensayos que establezcan su validez, incluyendo ensayos en ambientes diversos y los ensayos de fatiga si son relevantes.
- (4) Las uniones adhesivas se pueden utilizar adecuadamente, por ejemplo, para combinaciones de placas/rigidizadores y otras condiciones de tensiones secundarias.
- (5) Los esfuerzos se deben de transmitir sobre un área lo mayor posible. Incrementando el ancho de las juntas habitualmente se incrementa la resistencia en la misma proporción. Incrementar la longitud sólo es beneficioso para uniones con solape muy corto. Los solapes largos dan como resultado unas concentraciones de tensiones más severas, en particular en los extremos del solape.

6.8.2 Cálculo de uniones mediante adhesivos

6.8.2.1 Diseño del nudo

- (1) En el cálculo de las juntas adhesivas los esfuerzos cortantes deben ser vigilados; las fuerzas de tracción, en particular las de despegue, u otras fuerzas tendentes a abrir la junta, deben ser tenidas en cuenta o deben ser transmitidas mediante elementos estructurales complementarios. Adicionalmente se tratará de lograr una distribución uniforme de tensiones y la suficiente capacidad de deformación para lograr un fallo de tipo dúctil del componente.

Por ejemplo las fuerzas de tracción en un nudo se pueden transmitir mediante partes extruidas en el nudo, mientras que los esfuerzos cortantes se transmiten mediante esfuerzos de adherencia, véase figura 6.23.

Se alcanza la suficiente capacidad de deformación en el caso de que la resistencia de cálculo del nudo sea mayor que la resistencia a la fluencia de las piezas unidas.

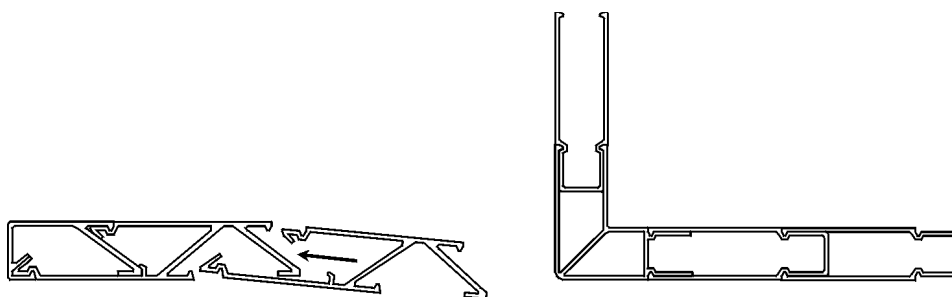


Fig. 6.23 – Piezas extruidas; fuerzas de tracción en el plano transmitidas mediante encaje de piezas; esfuerzo cortante transmitido por adhesión

6.8.2.2 Resistencia característica de los adhesivos

- (1) En aquellos sitios en que se precisen propiedades mecánicas se deben usar adhesivos de alta resistencia en las aplicaciones estructurales (véase tabla 6.9). Sin embargo, también la tenacidad debe ser suficiente para superar las concentraciones de tensiones/deformaciones unitarias y permitir un fallo del tipo dúctil. La influencia del módulo de elasticidad (E) del adhesivo en la resistencia y rigidez del nudo no es significativa. Pero, adhesivos con bajo módulo de elasticidad (E) son más sensibles al fenómeno de creep. En lo que respecta a otras propiedades de los adhesivos se debe anotar que en el rango de temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ las propiedades del adhesivo no varían demasiado hasta que no se sobrepase la temperatura de transición vítrea.
- (2)P Los tratamientos previos de las superficies a adherir deben ser elegidos de tal forma que la junta adhesiva haga frente a los requisitos de cálculo durante la vida de servicio de la estructura. Algunas veces, un simple desengrasado bastará, pero a menudo se deben considerar tratamientos mecánicos adicionales (por ejemplo, cepillado) o tratamiento químico previo (por ejemplo aguafuerte, anodizado, conversión crómica de la superficie) en uniones con elementos altamente solicitados.
- (3) Para la resistencia característica a cortante de adhesivos $f_{v,adh}$, en aplicaciones estructurales se deben usar los valores de la tabla 6.9.

Tabla 6.9
Valores de la resistencia característica a cortante de adhesivos

Tipos de adhesivos	$f_{v,adh}$ N/mm²
1 componente, curado en caliente, epoxi modificado	35
2 componentes, curado en frío, epoxi modificado	25
2 componentes, curado en frío, acrílico modificado	20

- (4) Los tipos de adhesivos mencionados en la tabla 6.9 se pueden usar en aplicaciones estructurales bajo condiciones como las dadas previamente en los apartados 6.8.2.1 y 6.8.2.2. Los valores dados en la tabla 6.9 están basados en los resultados de intensas investigaciones. Sin embargo, se permite usar valores superiores de la resistencia a cortante a los dados en la tabla 6.9 siempre que se lleven a cabo ensayos adecuados, véase apartado 6.8.3.

6.8.2.3 Tensiones de cálculo a cortante

(1)P La tensión de cálculo a cortante se toma como:

$$\tau \leq \frac{f_{v,adh}}{\gamma_{Ma}} \quad (6.56)$$

donde

τ tensión de cortadura en la capa de adhesivo;

$f_{v,adh}$ valor de la resistencia característica a cortante del adhesivo, véase 6.8.2.2;

$\gamma_{Ma} = 3,0$ Coeficiente de seguridad del material para uniones adherentes, véase apartado 6.1.1.

El anterior valor alto de γ_{Ma} tiene que ser utilizado dado que:

- el cálculo de la junta está basado en la resistencia última a cortante del adhesivo;
- la dispersión en la resistencia del adhesivo puede ser considerable;
- la experiencia en juntas adhesivas es pequeña.

6.8.3 Ensayos

- (1) Se pueden usar valores, de la resistencia característica a cortante de adhesivos, superiores a los dados en la tabla 6.9 cuando se lleven a cabo ensayos de cortadura con adherendo grueso véase la figura 6.24. Los resultados de estos ensayos tienen que ser evaluados de acuerdo con el apartado 8.4 para llegar a un valor veraz de la resistencia a cortante a aplicar para el adhesivo.

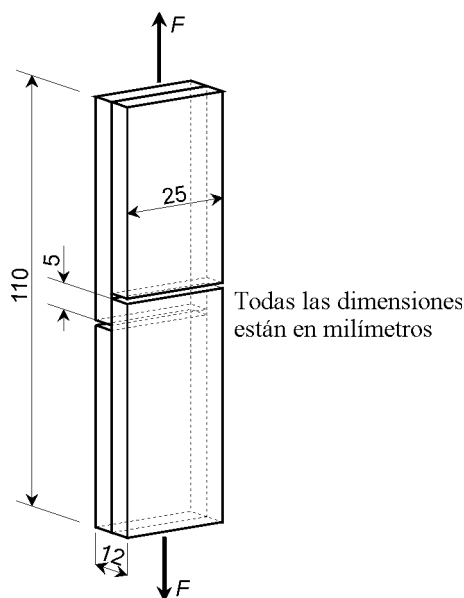


Fig. 6.24 – Probeta para el ensayo de cortante de adherendo grueso

- (2) La resistencia de uniones o elementos adheridos se puede también determinar mediante ensayos de acuerdo con el capítulo 8. Las juntas simples se deben de hacer a escala natural, utilizando el mismo proceso de fabricación que en la producción de las juntas. Estas juntas de muestra deben ser ensayadas junto con similares juntas constructivas y cargadas de forma similar a lo que ocurre en la estructura real.

7 FABRICACIÓN Y MONTAJE

7.1 Generalidades

7.1.1 Campo de aplicación

- (1) En este capítulo se identifican aquellos aspectos de la ejecución material que necesitan ser especificados para la fabricación y montaje, de tal forma que se asegure que las hipótesis de cálculo de este Eurocódigo se satisfacen y, por tanto, que se consigue el nivel previsto de seguridad estructural.
- (2)P Cualquier requisito suplementario específico de cada estructura particular se establecerá en el Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto.

7.1.2 Requisitos

- (1)P Todos los materiales de aleaciones de aluminio estructural, elementos de fijación y consumibles de soldadura deberán verificar los requisitos especificados en el capítulo 3.
- (2)P Si se utiliza cualquier material alternativo o adicional, los requisitos especificados en (1) serán complementados en lo necesario para asegurar niveles de seguridad y de servicio (durabilidad) análogos.

7.2 Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto

- (1)P El proyectista/especificador proporcionará, o adoptará, un Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto que detalle todos los requisitos de materiales, fabricación, protección y montaje necesarios para asegurar el cumplimiento de las hipótesis de cálculo de la estructura considerada.
- (2)P Las Condiciones Técnicas del Proyecto deben referirse a los requisitos del apartado 7.1.2, pero puede ser complementado por cualquier requisito especial sobre:
 - fabricación;
 - montaje;
 - protección;
 - control;
 - recepción.
- (3)P Las Condiciones Técnicas del Proyecto pueden complementar los requisitos de las Normas de Referencia pero no reducirán las exigencias tecnológicas y no reemplazarán los requisitos mínimos especificados en este capítulo.
- (4)P El Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto especificará cual de las opciones listadas en la documentación en el apartado 7.1.2 deberán aplicarse al proyecto.
- (5) El Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto puede incluir dibujos adicionales al texto.
- (6)P Una vez aprobado el Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto no se alterará sin el acuerdo del proyectista/especificador.
- (7) En la medida de lo posible, los requisitos del Pliego de Condiciones Técnicas del Proyecto no deberán alterar los del apartado 7.1.2.

7.3 Preparación del material

7.3.1 Generalidades

- (1)P La fabricación y las operaciones de montaje del aluminio tendrán en cuenta el bajo peso de las estructuras y de los ensambles, la gran flexibilidad de las piezas, los cambios dimensionales debidos a la temperatura y la facilidad con la que el aluminio se puede mecanizar.
- (2)P Durante el montaje la estructura deberá estar atornillada o sujeta de forma segura. Se deberán usar arriostramientos provisionales, si son necesarios, para asegurar la estabilidad bajo todas las cargas de construcción y condiciones, incluidas aquellas debidas a la maquinaria de montaje y sus operaciones.

7.3.2 Almacenaje y transporte

- (1)P El aluminio deberá ser almacenado en lugares secos, sobre terreno limpio. Deberá ser evitado el contacto con otros metales y con materiales tales como el cemento y la madera húmeda.

NOTA – Esto es para evitar la posibilidad de corrosión superficial, la cual puede causar desagradables manchas o marcas. Las chapas y planchas son particularmente susceptibles a este efecto.

- (2)P Hay que prestar especial cuidado con el material para uso arquitectónico, particularmente si está anodizado; las superficies deberán ser protegidas con cintas desmontables, ceras o lacas mientras exista el riesgo de deterioro.
- (3)P Las chapas y planchas deberán ser apiladas, en la medida de lo posible, en estanterías, para evitar la distorsión.
- (4)P Los componentes de las construcciones de aluminio deberán estar empaquetados de forma que se eviten los daños mecánicos, abrasiones y contactos con agentes susceptibles de causar corrosión superficial y manchas durante el transporte.

7.3.3 Tolerancias de fabricación, montaje y ensamble

- (1)P Todas las tolerancias de fabricación, montaje en obra y ensamble de las estructuras y componentes deberán ser especificadas por el proyectista.

7.3.4 Marcado

- (1)P No se deben usar finas líneas de trazado en las zonas críticamente tensionadas de material delgado, y cuando haya soldadura posterior no se debe usar pintura, tiza, grafito u otros materiales de marcado que sean susceptibles de contaminar.
- (2)P Se deberá prestar atención a los efectos del relativamente alto coeficiente de dilatación del aluminio en las mediciones, marcado y montaje, particularmente cuando las variaciones de temperatura sean altas.

7.3.5 Corte

- (1)P El corte se puede hacer por mecanizado, cizallado o arco de corte. Las sierras de banda y las circulares deben tener una forma de diente y un paso acorde con el espesor del material a cortar. Los bordes del corte deben ser lisos y libres de rebabas, distorsiones y otras irregularidades. Se debe prestar atención a evitar usar herramientas contaminadas con otros metales, particularmente cobre o latón. El cizallado normalmente se limita a materiales de espesor 6 mm o inferior. El corte por arco se puede aplicar mediante un proceso sacado de ensayos, a satisfacción del proyectista, para no tener efectos de deterioro en el material. El corte por soplete no se debe usar, pero es posible utilizar el corte con chorro de agua.
- (2)P Los bordes cizallados o cortados por arco deben posteriormente ser mecanizados o alisados mediante limas si se usan para preparar los bordes a soldar en elementos resistentes. Para las aleaciones de la serie 7xxx, los bordes cizallados deben ser mecanizados hasta eliminar las zonas de tensiones residuales.

7.3.6 Taladrado, punzonado y escariado

- (1)P Los agujeros deberán hacerse por medio de taladrado, o taladrado seguido de escariado. El punzonado se puede usar para espesores de hasta alrededor de 20 mm, excepto para las aleaciones de la serie 7xxx. En el caso de aleaciones de la serie 7xxx, el punzonado de tamaño inferior se puede llevar a cabo siempre que todas las rebabas, defectos de bordes, distorsiones locales y zonas de tensiones residuales sean eliminadas por el posterior escariado.
- (2)P Los agujeros para tornillos y roblones, a menos que sean de otra forma especificados por el proyectista, deberán ser de los tamaños especificados en la tabla 7.1 Cuando los agujeros para tornillos y roblones en algunas piezas sean requeridos por el proyectista para ser taladrados con las piezas ensambladas y estrechamente unidas entre ellas, dichas piezas deberán ser posteriormente separadas para eliminar las rebabas.

Tabla 7.1
Holgura de agujeros para tornillos, roblones y elementos especiales de fijación

Tipo	Material	Diámetro mm	Holgura en diámetro mm	
Tornillos con ajuste estrecho	–	Cualquiera	≤ 0,15 ¹⁾	
Tornillos sin ajuste estrecho	–	< 13 ≥ 13	Holgura reducida ≤ 0,5 ¹⁾ ≤ 1 ¹⁾	Holgura normal 1 2
Roblones macizos	Aluminio	< 13 ≥ 13	≤ 0,4 ≤ 0,8	
	Acero o aceros resistentes a la corrosión	< 13 ≥ 13	≤ 0,8 ≤ 1,6	
Tornillos de alta resistencia (todas las capas hasta tres, o las dos capas exteriores para más de tres capas)	Acero o aceros resistentes a la corrosión	≤ 24 > 24	≤ 2 ≤ 3	
Tornillos de alta resistencia (por encima de tres capas, capas interiores)	Acero o aceros resistentes a la corrosión	Cualquiera	≤ 3	
Roblones y fijadores especiales	Según recomendaciones del fabricante			

1) Para medidas del diámetro real del agujero y del tornillo.

NOTA 1 – La holgura no debe ser incrementada para tener en cuenta las irregularidades o el exceso de recubrimiento de zinc en los tornillos.

NOTA 2 – Para las piezas con metal proyectado la holgura antes del rociado puede ser, a discreción del proyectista, incrementada en 0,15 mm excepto donde el agujero es profundo y el rociado no es uniforme.

- (3)P La profundidad del avellanado no deberá exceder el espesor de la parte avellanada menos 4 mm a menos que lo especifique el proyectista. En ningún caso la profundidad deberá exceder el espesor de la parte avellanada menos 1 mm.

7.3.7 Curvado y conformado

- (1)P Cuando se requiere el curvado o conformado el fabricante deberá consultar las recomendaciones del productor en lo que respecta a los radios de curvado, aleación y estado de entrega apropiado para la operación y cualquier subsiguiente tratamiento térmico preciso. Cuando existan dudas sobre la conformabilidad de una pieza, se efectuarán ensayos para la aprobación del proyectista antes de empezar la fabricación.
- (2)P Los tratamientos térmicos y el conformado en caliente se deberán efectuar sólo bajo la dirección y supervisión de metalúrgicos competentes. Sin el acuerdo del productor, las aleaciones de la serie 7xxx no deben ser curvadas o conformadas en frío en condición de tratamiento térmico completo debido al riesgo de fisuración por corrosión bajo tensión. Sin embargo, se pueden llevar a cabo correcciones menores en la forma de los perfiles o en las distorsiones de soldadura.
- (3)P Cualquier pieza o componente que presente grietas o fracturas debido al conformado deberá ser rechazada.

7.4 Uniones atornilladas

7.4.1 Atornillado

- (1)P Cuando tanto la sección completa de la espiga del tornillo, o el área de contacto total de la espiga del tornillo, deban ser aprovechadas, la zona roscada del tornillo no se podrá extender dentro del espesor de las piezas unidas. Además, la longitud del tornillo deberá ser tal que al menos un hilo de rosca sobresalga de la tuerca después del apriete, y al menos una vuelta de rosca más la zona de salida de rosca quede libre entre la tuerca y la espiga no roscada del tornillo.
- (2)P Se colocarán las arandelas bajo todas las cabezas de tornillos y tuercas. Las arandelas de acero galvanizado se deberán utilizar con tornillos de acero. Las arandelas de aluminio puro, o de similar material que el tornillo o la pieza, deberán ser utilizadas con tornillos de acero resistentes a la corrosión.
- (3)P Las tuercas deberán ser completamente, pero no excesivamente, apretadas. Cuando sea preciso se usarán dispositivos de enclavamiento.
- (4)P Las roscas de tornillos de aluminio y de acero inoxidable deberán ser lubricadas antes del ensamble, si la unión será posteriormente desmontada.

NOTA – El sellado con lanolina es recomendable para las roscas de los tornillos anodizados.

7.4.2 Tornillos trabajando a rozamiento

7.4.2.1 Superficies de contacto

- (1)P Para uniones entre piezas de aluminio, en el momento de ensamblarlas, las superficies de contacto deberán estar limpias, libres de rebabas y defectos que impidan el asiento de las piezas, y libres de sustancias que puedan interferir en el desarrollo de la fricción entre las mismas.
- (2)P Cuando las superficies de aluminio son tratadas con chorro de arena (para los coeficientes de rozamiento referirse al apartado 6.5.9.5), el tratamiento con chorro deberá ser el suficiente para lograr una cubrición visualmente uniforme de las superficies.

NOTA – Cuando se requiere lograr unas propiedades consistentes del coeficiente de fricción conformes con los resultados de ensayo, se precisará un cuidadoso control de calidad del proceso mediante métodos tales como los usados en las probetas de ensayo.

- (3)P La calidad de la arena debe ser controlada, particularmente cuando la arena es reutilizada.

7.4.2.2 Agujeros en piezas

- (1)P Los agujeros en las piezas deben cumplir con el apartado 7.3.6.

7.4.2.3 Montaje

- (1)P Cuando se emplean tornillos diferentes a los comprendidos en las normas EN, prEN o ISO relativas a tornillos, el proceso para alcanzar la tracción especificada en la espiga deberá ser acordado con el proyectista.
- (2)P Si un nudo debe ser desmontado no deberá ser reensamblado hasta que el tratamiento superficial de la interfaz se haya reaplicado.

7.4.3 Roblonado

- (1)P Las uniones roblonadas deben ser mantenidas fuertemente en contacto antes y después del roblonado. Los roblones deben ser empujados hasta que rellenen completamente los agujeros, incluyendo cualquier agujero avellanado. Las cabezas deben ser concéntricas con sus espigas y en contacto ajustado con las superficies roblonadas.
- (2)P Los roblones tubulares y otros tipos especiales deben ser conformados en frío usando las herramientas y el proceso recomendado por el proveedor.
- (3)P Los roblones sueltos o defectuosos deben ser eliminados, preferiblemente mediante taladrado o mecanizado para eliminar la cabeza y punzonando a través de la espiga. Entonces los nuevos roblones deben ser colocados.

7.5 Soldadura

7.5.1 Generalidades

- (1)P La soldadura a pie de obra debe ser evitada en lo posible. Sólo se deberá dar en aquellos casos en que exista una completa protección que simule las condiciones de trabajo en taller.
- (2)P Las soldaduras diferentes de las especificadas en los planos no se deberán ejecutar sin la previa aceptación por escrito del proyectista. Las soldaduras temporales de atado no estarán sujetas al acuerdo específico con el proyectista.
- (3)P Las dimensiones deberán estar de acuerdo con los efectos de la retracción de la soldadura. Las secuencias de soldadura y el aporte de calor deben compensarse para evitar alabeo y distorsión. En el caso de estructuras complejas, el ingeniero proyectista deberá consultar con un ingeniero soldador en un primer estado del diseño.
- (4)P Cuando se usan casquillos de apoyo permanentes éstos deben ser de material compatible con las piezas unidas.

7.5.2 Material de aportación

- (1)P El alambre del material de aportación se seleccionará de acuerdo con el apartado 3.3.4 o con el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4:1995 teniendo en cuenta los requisitos específicos de la unión, o deberá ser especificada por el proyectista en cualquier otro caso.

7.5.3 Proceso de soldadura

- (1)P Las piezas resistentes deben ser soldadas por medio de procesos de soldadura con electrodo de tungsteno con gas inerte (TIG) o soldadura metálica con gas inerte (MIG) de acuerdo con las Normas Europeas EN 288-1:1992 y EN 288-4:1992, teniendo en cuenta los requisitos especiales del procedimiento, véase apartado 7.5.6.
- (2) Los nuevos y altamente eficaces métodos (láser, MIG de alta energía, soldadura por fricción) pueden ser ventajosamente utilizados después de los ensayos de aprobación.

7.5.4 Aprobación del proceso de soldadura

- (1)P A menos que se especifique otra cosa por el proyectista, el camino preciso de actuación a seguir para cada tipo de unión deberá estar documentado como un proceso de soldadura y aprobado por el proyectista de acuerdo con las Normas Europeas EN 288-1:1992, EN 288-4:1992 y el proyecto de Norma Europea prEN 288-13.
- (2)P Cuando el diseño o aplicación de la unión de producción es tal que no se pueden tomar ninguna de las piezas de ensayo como representativas, por ejemplo enganches soldados a tubos delgados, entonces se debe hacer una pieza especial de ensayo que simule la unión de producción en todos sus aspectos esenciales, por ejemplo dimensiones, coacciones, accesos, efectos de acumulación de calor. El tipo de pieza especial de ensayo a soldar y los ensayos a llevar a cabo deben ser acordes a lo pactado por las partes contratantes en el momento de efectuar la petición de suministro.

NOTA – El proceso no necesita ser reaprobado si el fabricante demuestra al proyectista que procesos similares han sido previamente aprobados.

- (3) Si se siguen los procesos de soldadura de este apartado, se puede usar un valor de $\gamma_M = 1,25$. Si no se deberá usar $\gamma_M = 1,6$ (véase apartado 6.6.1).

7.5.5 Aprobación de soldadores

- (1)P A menos que se especifique otra cosa por el proyectista, todos los soldadores deberán estar aprobados para cada tipo de unión según la Norma Europea EN 287-2 (véase también el proyecto de Norma Europea prEN 1418 para soldaduras automáticas completamente mecanizadas).

7.5.6 Calidad e inspección de soldaduras

7.5.6.1 Generalidades

- (1) Los principales requisitos de control de calidad de soldaduras son:
- a) aprobación del proceso (véase apartado 7.5.4);
 - b) aprobación del soldador (véase apartado 7.5.5);
 - c) inspección no destructiva de soldaduras de producción inmediatamente antes y tras soldar; y ensayos de probetas de control de producción tras soldar (véase apartado 7.5.6.2).

7.5.6.2 Métodos de inspección y ensayos de soldaduras de producción

- (1)P Todas las soldaduras de producción, deberán estar sometidas a aprobación de acuerdo con las especificaciones del proyecto, tanto inmediatamente anterior como posteriormente al soldeo.
- (2)P La inspección visual la deberá llevar a cabo personal con experiencia.

NOTA – Una guía sobre la inspección visual, incluyendo las galgas de tamaño de soldadura y las lentes de aumento, se encuentra el proyecto de Norma Europea prEN 970. Véase también el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4.

7.5.6.3 Niveles de calidad

- (1)P La extensión de la inspección y los métodos de inspección (véase apartado 7.5.6.4) y la magnitud y el nivel de imperfecciones aceptable (véase apartado 7.5.6.5) son ambas dependientes del nivel de calidad exigido para la soldadura. El nivel de calidad especificado para cada soldadura depende de los requisitos de tensiones y deberá ser uno de los siguientes:

- a) Nivel de calidad mínimo (Nivel D. EN 30042) que sólo se puede utilizar cuando el proyectista ha indicado en los planos cuales son las piezas que deberán ser consideradas que requieren una calidad mínima.

NOTA 1 – El nivel de calidad mínimo se aplicará normalmente cuando las acciones bajo cargas mayoradas no excedan de un tercio de las resistencias minoradas de la pieza o de la unión, por ejemplo, la rigidez puede dictar el cálculo. Esto se aplicará tanto a resistencia estática como a fatiga.

- b) Nivel de calidad normal (Nivel C. EN 30042) que se deberá aplicar cuando los planos no especifiquen la necesidad de cualquier otro nivel de calidad. La ausencia de indicaciones de nivel de calidad deberá ser tomada como nivel de calidad normal.

NOTA 2 – El nivel de calidad normal se aplicará normalmente cuando las acciones bajo cargas mayoradas exceden de un tercio de las resistencias minoradas de la pieza o de la unión, y cuando la clase de fatiga requerida no exceda de la 20.

- c) Calidad de fatiga (Nivel B. EN 30042) que se aplicará cuando el proyectista indique en los planos el detalle o detalles requeridos para un apropiado nivel de calidad de fatiga por medio de cifras de nivel “Fat” y flechas indicando la dirección del flujo de tensiones (véase el proyecto de Norma Europea Experimental prENV 1999-2, 6.2).

NOTA 3 – El nivel de calidad de fatiga se aplicará normalmente cuando el nivel requerido de fatiga exceda del 20 (véase el proyecto de Norma Europea Experimental prENV 1999-2, 6.2). Hay cinco posibles calidades de fatiga, dependiendo del tipo de unión y el grado de fluctuación de las tensiones (nivel requerido). Ellos están referidos al Fat 25, 31, 39, 49, 62. El tipo de unión y la dirección de las tensiones a los cuales se pueden aplicar están limitados (véanse las tablas 5.2a, 5.2b y 5.3 del proyecto de Norma Europea Experimental prENV 1999-2. Para uniones no soldadas el acabado superficial del material se define en la tabla 5.1 del proyecto de Norma Europea Experimental prENV 1999-2.

- (2)P Cuando a pesar de lo anterior existan dudas sobre cual es el nivel de calidad de una unión soldada particular o del detalle, se deberá consultar al ingeniero proyectista.

7.5.6.4 Extensión de la inspección

- (1)P La extensión de la inspección visual y dimensional inmediatamente antes de soldar, y la inspección visual, con líquidos penetrantes y ultrasonidos y/o radiografías requerida tras soldar, para cada nivel de calidad de soldadura y tipo de unión se especificarán por el proyectista.

- (2)P Para soldaduras de calidad de fatiga de la clase Fat 39 y superiores y para soldaduras en condiciones difíciles o donde se especifique por el proyectista, las probetas de ensayo de control de la producción o probetas de prolongación extraídas, que simulan la fabricación de la unión en todos los aspectos esenciales, por ejemplo, dimensiones, coacciones, acceso, efectos de acumulación de calor, deberán ser colocadas en línea con el nudo y soldadas usando el procedimiento de soldadura de producción. Estas serán inspeccionadas y aprobadas con los mismos niveles de inspección que las soldaduras equivalentes de producción.

NOTA 1 – Se pueden necesitar ensayos mecánicos en los ensayos de probetas de control de la producción incluyendo probetas de prolongación extraídas cuando lo especifique el proyectista.

NOTA 2 – El examen de tales piezas de ensayo de control de la producción o probetas de prolongación extraídas se puede usar adicionalmente como una ayuda a la interpretación de ensayos de producción no destructivos. Los procedimientos especiales de inspección, tales como otros ensayos no destructivos, deben ser empleados si se especifican.

- (3)P Cuando una estructura soldada o componente sea tratada térmicamente tras soldar, la inspección después de soldar se deberá llevar a cabo tras el tratamiento térmico.

7.5.6.5 Niveles de aceptación de la inspección

- (1)P El nivel de aceptación de las imperfecciones en uniones soldadas, tanto inmediatamente antes como después de soldar, deberá ser especificado por el proyectista.
- (2)P Cuando cualquier inadecuación en la preparación de la unión, detectada por inspección inmediatamente antes de soldar, exceda de las especificaciones, el trabajo será reparado, reposicionado o soldado por puntos como sea más apropiado y reinspeccionado.

- (3)P Cuando cualquier imperfección detectada después de soldar exceda de lo especificado, o cuando otras imperfecciones inaceptables se revelen por cualquier proceso especial de inspección, la soldadura deberá ser rechazada y reparada de acuerdo con el apartado 7.5.7.

7.5.7 Reparación o sustitución

- (1)P Todos los procesos de reparación o sustitución de cualquier soldadura deben ser aprobados por el proyectista.
- (2)P La extensión de cualquier defecto de soldadura debe ser determinada mediante el adecuado proceso de inspección y marcada claramente en el nudo.
- (3)P Las soldaduras reparadas serán reinspeccionadas de acuerdo con el apartado 7.5.6.2. No se debe rehacer ninguna soldadura, ni remplazada ninguna parte de la soldadura, sin consultar en ambos casos con el Ingeniero.

7.6 Adhesivos estructurales

- (1)P El método de ejecución de uniones adherentes debe estar documentado de tal forma que el proceso sea repetible después de que haya sido adecuadamente establecido. El proceso de unión debe ser probado mediante adecuados ensayos y debe recibir la aprobación del proyectista antes de usarlo en la fabricación real. Los ensayos de aprobación deben ser especificados por el proyectista, simulando adecuadamente las condiciones de servicio de la estructura, y las probetas deben ser representativas del tamaño y tipo de unión a ser fabricada.

NOTA 1 – Los procesos no necesitan ser reaprobados si el fabricante demuestra al proyectista que procesos similares han sido previamente aprobados.

- (2)P El uso de adhesivos para uniones de elementos principales no debe ser contemplado a menos que se haya establecido su validez mediante considerables ensayos, incluyendo ensayos medioambientales y ensayos de fatiga si es preciso.

NOTA 2 – Sin embargo, la unión adhesiva puede ser considerada para combinaciones de placas/rigidizadores y otras condiciones de tensiones secundarias.

7.7 Protección

7.7.1 Generalidades

- (1)P Cuando el aluminio requiera protección adicional, el sistema de protección aplicado a las piezas o a toda la estructura debe ser especificado por el proyectista.

NOTA – Cuando el trabajo estructural tenga un contenido directamente estético, la superficie de aluminio puede ser convertida en decorativa mediante acabados tales como pinturas, anodizado o ciertos procesos químicos de conversión. Estos procesos también provocan grados variables de protección del aluminio.

7.7.2 Pintura

7.7.2.1 Generalidades

- (1)P Cuando la pintura es especificada por el proyectista se debe seguir el siguiente procedimiento.
- (2)P El pintado debe ir precedido del apropiado tratamiento previo con las operaciones de los apartados 7.7.7.2 y 7.7.7.3 llevadas a cabo en secuencia sin lapsos de tiempo intermedios. La superficie debe estar completamente seca, y las capas aplicadas cuando la temperatura ambiente está por encima de 4 °C a menos que se indique otra cosa por el proyectista. Las superficies de contacto deben ser pintadas como lo especifique el proyectista.

7.7.2.2 Limpieza

- (1)P La superficie debe ser limpiada, secada y completamente desengrasada mediante un disolvente orgánico apropiado. La limpieza mediante llama no se debe llevar a cabo.

7.7.2.3 Pretratamiento

- (1)P Las superficies limpias desengrasadas deben ser tratadas para asegurar la adhesión de la pintura.

NOTA 1 – El tratamiento se puede llevar a cabo produciendo una rugosidad mecánica con papel abrasivo o con almohadillas de nylon impregnado de adhesivo o mediante granallado abrasivo, siempre que, en cada caso, el abrasivo sea o bien de alúmina u otras partículas no metálicas y libres de cobre. La rugosidad mecánica puede llevarse a cabo también mediante cepillos de alambre de acero resistente a la corrosión.

- (2)P No se deben utilizar para dar rugosidad mecánica lana de cobre-plata-acero o cepillos de alambre.

NOTA 2 – Alternativamente, la adhesión de la pintura se puede obtener mediante el uso de una apropiada capa de conversión o un etch-primer o un wash primer, siempre que la superficie del metal esté limpia y libre de capas de óxido espesas o irregulares.

7.7.2.4 Sistemas no bituminosos

- (1)P El pretratamiento (véase apartado 7.7.2.3) o el pulverizado de metal (véase apartado 7.7.3.1) en superficies debe recibir una capa de imprimación con un pigmento inhibidor adecuado compatible con el sustrato de aluminio y cualquier recubrimiento posterior.
- (2)P La capa de imprimación no debe contener componentes de cobre, mercurio, estaño o plomo, grafito o materiales carbonosos.
- (3)P La superficie imprimada debe ser pintada con una o más capas de pintura de un tipo recomendado por el fabricante de pinturas, que sea compatible con la capa de imprimación, y cualquier capa posterior, y elegido de acuerdo al ambiente y siempre que proporcione la durabilidad requerida. Las capas posteriores no deben contener cobre, mercurio o componentes de estaño, grafito o materiales carbonosos y preferiblemente no debe contener componentes de plomo. Un sistema de pintado de aluminio debe consistir en una primera capa no peliculante y una capa peliculante de acabado.

7.7.2.5 Sistemas de pinturas bituminosas

- (1)P Se debe usar pintura bituminosa o un baño bituminoso aplicado en caliente.

NOTA – Es preferible el sistema de pintura bituminosa.

- (2)P Los materiales deberán aplicarse directamente sobre las superficies limpiadas de acuerdo con el apartado 7.7.2.2 y hechas rugosas por medios mecánicos si es necesario (véase apartado 7.7.2.3); no se aplicarán pinturas posteriores o capas de imprimación.

7.7.2.6 Material prepintado y acabados aplicados en fábrica

- (1)P El fabricante deberá asegurar a satisfacción del proyectista que el uso de material prepintado o el acabado aplicado en fábrica proporciona la protección adecuada al montaje y al ambiente.

NOTA 1 – Los materiales de aluminio pueden ser suministrados listos para pintar, usando tanto un disolvente de base líquida o un proceso seco (pintura pulverizada). El acabado se puede aplicar antes de la fabricación, a los materiales parcialmente fabricados, o a continuación de la fabricación. Las pinturas líquidas habitualmente se curan mediante estufa a una elevada temperatura. Las pinturas pulverizadas siempre se curan en estufa. En ambos casos las pinturas tratadas en estufa tienen propiedades mejoradas con respecto a la dureza y a la durabilidad comparadas con una pintura secada al aire. Tales acabados son adecuados para aplicación en bandas, rollos o perfiles estruidos. La pintura puede ser lo suficiente dúctil para permitir pequeñas deformaciones sin daño, tanto por estampado como por laminado. El uso de acabados aplicados en fábrica y materiales prepintados, generalmente suministra un aceptable grado de protección.

NOTA 2 – Pueden ser necesarias protecciones adicionales en las uniones (véase apartado 7.7.3). El fabricante debe asegurar que las aleaciones de aluminio no son significativamente debilitadas en el proceso de estufado.

NOTA 3 – Muchos de los acabados aplicados en fábrica se curan mediante calentamiento de alrededor de 200 °C durante un corto tiempo, el cual normalmente tiene sólo un muy pequeño efecto sobre las propiedades mecánicas. Es sin embargo posible que ocurra un significativo debilitamiento, dependiendo de la aleación, sus condiciones y también del perfil de temperaturas en el proceso de estufado. Es práctica habitual monitorizar la rutina térmica y esto es particularmente importante con perfiles gruesos, donde existe más riesgo de quedar por encima o por debajo del curado. Es recomendable un informe del historial térmico del metal como consecuencia del sistema de curado monitorizado.

7.7.3 Protección de las superficies de contacto metal con metal y en las uniones atornilladas y roblonadas

7.7.3.1 Generalidades

- (1)P En las superficies de contacto metal con metal se deberá aplicar una protección adicional a la indicada en el apartado 7.7.2, como la indicada en la tabla 3.8 y como lo especifique el proyectista. Los procedimientos de los sistemas de protección indicados en la tabla 3.8 deberán ser obtenidos siguiendo los procesos descritos en los apartados 7.7.3.2 hasta 7.7.3.4, utilizando el procedimiento de notación usado en la tabla 3.8. Cuando ocurren contactos metal con metal no cubiertos por la tabla 3.8 deberá ser consultado un especialista en la materia.
- (2) Para los procedimientos como los determinados en la tabla 3.8 aplicados a las áreas de contacto de las piezas estructurales, véase apartado 7.7.3.2; para los tratamientos aplicados a tornillos y roblones, véase apartado 7.7.3.3; y para tratamientos adicionales véase apartado 7.7.3.4.
- (3)P El metal pulverizado, si es especificado por el proyectista para pintar la estructura de acero que está en contacto con el aluminio, como un medio de protección del acero y el aluminio en contacto, debe cumplir con el grado 1050A.
- (4)P Las planchas de aluminio de cubrición y cerramiento deben ser protegidas de acuerdo con el proyecto de Norma Europea prEN 508-2:1996.

7.7.3.2 Tratamiento aplicado a las áreas de contacto de elementos estructurales

- (1) Proceso O

No se deberá aplicar tratamiento.

- (2) Proceso O/X

El tratamiento depende de las condiciones estructurales. Áreas de contacto pequeñas y áreas que secan rápidamente pueden ser ensambladas sin sellarlas (véase X).

- (3) Proceso X

Ambas superficies de contacto deben ser ensambladas de tal forma que no se existan hendiduras por las cuales pueda penetrar el agua. Ambas superficies de contacto, incluyendo los agujeros de tornillos y roblones deben ser, antes del ensamble, limpiadas, pretratadas y recibir una primera capa, véase apartado 7.7.2.4, o un material de sellado, extendido más allá de la zona de contacto. Las superficies deberán ser colocadas juntas mientras la primera capa esté todavía húmeda. Cuando se ensamblan elementos prepintados o componentes protegidos, el sellado de las superficies de contacto puede no ser necesario dependiendo de la composición de la pintura o del sistema de protección empleado, la vida útil esperada y el ambiente. La necesidad de sellado adicional se debe de establecer de acuerdo con el proyectista.

- (4) Proceso Y

El aislamiento eléctrico completo entre dos metales y todos los elementos de fijación se debe asegurar mediante la inserción de cintas no absorbentes, aislantes, juntas y arandelas para impedir el contacto metálico y eléctrico entre los diferentes metales de la unión. Se debe prestar atención a asegurar que no hay hendiduras entre los materiales de aislamiento y el metal. El uso de pintura adicional o selladores puede ser preciso.

(5) Proceso Z

Cuando se precisa el proceso Y y la transferencia de cargas a través de la unión imposibilita el uso de materiales aislantes, la unión debe ser ensamblada sin usar elementos de aislamiento, con el conjunto de la unión completamente sellado externamente para prevenir el ingreso de la humedad a los elementos de la unión. Se deben establecer los procedimientos de acuerdo con el proyectista.

7.7.3.3 Tratamiento aplicado a tornillos y roblones

(1)P Proceso 0

No se deberá aplicar tratamiento adicional.

(2) Proceso 1

Los tornillos de aluminio en 7075 ó 2017A deberían ser usados sin proteger sólo en climas secos y suaves, en otros casos deben ser adecuadamente protegidos.

(3) Proceso 2

Los tornillos de aluminio en 7075 ó 2017A no deberían ser usados, incluso si están protegidos.

(4)P Proceso 3

Las arandelas inertes o compuestos para juntas deberán ser aplicadas entre las cabezas de tornillos, tuercas, arandelas y materiales conectados para sellar la junta y para evitar que entre la humedad en la interfaz entre componentes y elementos de fijación. Se debe prestar atención a asegurar que la transferencia de cargas a través de la unión no quede adversamente afectada por las arandelas y los compuestos para juntas.

(5)P Proceso 4

Cuando la unión no está pintada o recubierta por otras razones, las cabezas de los tornillos, tuercas y roblones y las áreas circundantes anteriormente descritas, deberán ser protegidas con al menos una capa de imprimación (véase apartado 7.7.2.4), teniendo cuidado de sellar todas las hendiduras.

Cuando se usan tornillos recubiertos con zinc, la protección en la cara de aluminio de la unión no es necesaria.

Cuando se usan roblones y tornillos de aluminio, la protección en la cara de aluminio de la unión no es necesaria.

Cuando se usan tornillos de acero inoxidable en combinación con piezas de aluminio y de acero recubierto de zinc, las zonas circundantes a las áreas recubiertas de zinc de la unión deberán ser similarmente protegidas.

7.7.3.4 Tratamientos posteriores

(1) Proceso a

Si no se pinta por otras razones puede ser necesario proteger las piezas metálicas adyacentes de la zona de contacto mediante la adecuada capa de pintura en los casos en los que la suciedad pueda quedar atrapada o la humedad retenida.

(2) Proceso z

Puede ser necesario dar una protección adicional de recubrimiento de zinc a las piezas estructurales como un conjunto completo.

(3) Proceso g

La protección de todas las piezas de aluminio es generalmente necesaria, véase tabla 3.7.

7.7.4 Uniones resistentes a deslizamiento de alta resistencia

- (1)P Cuando se especifique protección adicional por el proyectista deberá cumplir con el apartado 7.7.3 hasta lo que permitan las propiedades mecánicas requeridas para la superficie de contacto de la unión. Cuando se ha usado resina epoxy otras protecciones son innecesarias, pero donde se use una unión seca los bordes de la misma deben ser sellados para evitar el ingreso de la humedad (véase apartado 7.7.3.3).

7.7.5 Uniones articuladas (de pasador)

- (1)P Cuando se especifique por el proyectista protección adicional deberá seguir el apartado 7.7.3 tanto como lo permitan los requisitos y la configuración de la unión.

NOTA – Protecciones adicionales pueden ser suministradas recubriendo las superficies de contacto, de los agujeros para el pasador y del pasador, con una grasa reversible de alto punto de reblandecimiento.

7.7.6 Uniones soldadas

- (1)P Los sistemas de protección especificados por el proyectista deberán ser aplicados en concordancia con los procesos del apartado 7.7.3.

7.7.7 Uniones por adherencia

- (1)P El sistema de protección especificado por el proyectista debe ser aplicado. El consejo del fabricante del adhesivo debe ser observado para asegurar que no existirá interacción entre el adhesivo y el sistema de protección, por ejemplo efectos de disolución o térmicos.

7.7.8 Contacto entre aluminio y materiales no metálicos

- (1) El método de protección especificado por el proyectista de evitar el contacto entre aluminio y materiales no metálicos, tales como los usados en la industria de la construcción, debe aplicarse de acuerdo con los requisitos de los correspondientes procedimientos de pintado y de protección.

7.8 Inspección y seguridad

- (1)P El proyectista o los correspondientes representantes de las agencias independientes de inspección y ensayo deben poder tener acceso a todos los lugares donde se hace el trabajo, tanto en obra como en talleres del contratista. Se deben dar facilidades para la inspección y ensayo del trabajo de acuerdo al procedimiento acordado entre el fabricante y el proyectista.

NOTA – Se tiene que prestar atención a los requisitos legales apropiados los cuales afectan a las operaciones envueltas en la manufactura, fabricación, montaje y servicio.

8 PROYECTO ASISTIDO POR ENSAYOS

8.1 Bases

- (1) Las disposiciones de este capítulo servirán de guía al proyectista que se sirva de técnicas experimentales.
- (2)P Cuando los modelos de cálculo existentes no son suficientes para una estructura particular o componente estructural, se deben emplear las técnicas experimentales como alternativa o como complemento al diseño mediante cálculos.
- (3) La verificación experimental puede adoptarse como alternativa a las reglas para el proyecto mediante cálculo dadas en este Eurocódigo cuando estas conducen a resultados antieconómicos. Sin embargo, no deberán ignorarse las hipótesis conservadoras de los modelos de cálculo especificados (previstas para considerar aspectos desfavorables no explícitamente incluidos en los modelos de cálculo citados).
- (4)P La planificación, ejecución, evaluación y documentación de los ensayos estarán de acuerdo con los requisitos mínimos dispuestos más adelante en este capítulo.
- (5) Debido a que las circunstancias y las condiciones de los ensayos pueden variar mucho, se recomienda el acuerdo previo de los procedimientos de ensayo entre todos los afectados.

8.2 Planificación de ensayos

- (1)P Las técnicas experimentales se basarán en modelos tentativos de cálculo, que pueden ser incompletos, pero que relacionan una o varias variables significativas con el comportamiento estructural que se considera, de modo que se prevean adecuadamente las tendencias básicas. El contraste experimental se referirá únicamente a la evaluación de los términos correctores del modelo tentativo de cálculo.
- (2)P Cuando sea extremadamente dudosa la predicción de los modelos de cálculo o del modo de fallo esperado en los ensayos, el plan de ensayos se desarrollará a partir de ensayos piloto.
- (3)P Antes de la ejecución de los ensayos, el proyectista y la empresa encargada de realizar los ensayos determinarán un plan de ensayos. Este contendrá los objetivos de los ensayos y todas las directrices y especificaciones necesarias para la selección o fabricación de las probetas de ensayo, la ejecución de los ensayos y su evaluación.
- (4) Como guía para la preparación del plan de ensayos, se puede tomar como referencia las normas de referencia 14 y 15 (véase anexo A) y el anexo J.
- (5)P El plan de ensayos abarcará los siguientes aspectos:
 - a) Alcance de la información requerida de los ensayos (por ejemplo, parámetros necesarios y campo de validez).
 - b) Descripción de todas las propiedades de las piezas consideradas que pueden influir en el comportamiento en estado límite último (por ejemplo, forma de la pieza, rigidez, tipo de aluminio y calidad y propiedades importantes del material, parámetros geométricos y estructurales y sus tolerancias, parámetros influidos por procesos de fabricación y puesta en obra).
 - c) Especificaciones sobre las propiedades de la probeta de ensayo (por ejemplo, proceso de toma de muestras, especificación de dimensiones, material y fabricación de prototipos, número de probetas, número de tomas, restricciones).
 - d) Descripción de las acciones frente a las que los elementos deberán reaccionar y que muestran las propiedades a que se refiere b) (por ejemplo, distribuciones de carga, casos de carga, combinaciones de cargas).

- e) Especificaciones de las condiciones de carga y de las condiciones ambientales en el ensayo (por ejemplo, puntos de aplicación de las cargas, métodos de carga, proceso de carga en el tiempo y en el espacio, temperaturas).
 - f) Modos de fallo y modelos previos de cálculo con las variables correspondientes, véase apartado 8.2 (1).
 - g) Disposiciones de ensayo (incluyendo medidas para asegurar una resistencia y una rigidez suficiente de los aparatos de carga y de sustentación, espacios diáfanos para flechas, etc.).
 - h) Determinación de los puntos de observación y de los métodos de observación y de registro (por ejemplo registro de deformaciones unitarias en el tiempo, de fuerzas y de flechas).
 - i) Determinación del tipo y control de la aplicación de la carga (tensión controlada, deformación controlada, etc.).
- (6)P Se deberá redactar un informe con todos los detalles de la toma o de la fabricación de las muestras, y se medirán las probetas antes de comenzar la ejecución de los ensayos, con el objeto de demostrar que se ha cumplido el plan de ensayo, o para revisarlo en caso contrario.

8.3 Ejecución de ensayos

- (1)P La realización de contrastes experimentales se confiará únicamente a organizaciones con un personal suficientemente preparado y experimentado en la planificación, ejecución y evaluación de los ensayos.
- (2)P El laboratorio de ensayos estará adecuadamente equipado y la organización encargada de realizar los ensayos asegurará un control cuidadoso y la documentación de todos los ensayos.

8.4 Interpretación de resultados

- (1)P La interpretación de los ensayos tendrá en cuenta el carácter aleatorio de todos los datos.
- (2) La interpretación de los ensayos deberá hacerse de acuerdo con el método desarrollado en el anexo Z de la Norma Europea Experimental ENV 1993-1-1:1992.

8.5 Documentación

- (1)P Se deberá suministrar la siguiente documentación en el informe de ensayos:
 - el plan de ensayos (incluyendo cualquier revisión);
 - descripción y especificaciones de todas las probetas de ensayo;
 - detalles de las disposiciones de ensayo;
 - detalles de la ejecución de los ensayos, y
 - los resultados de ensayos que son necesarios para la interpretación de resultados.

Anexo A (Normativo) para ser reemplazado por una norma europea “Ensayo del coeficiente de rozamiento para uniones en aluminio por rozamiento con tornillos de alta resistencia” (cuando esté disponible)

ANEXO A (Normativo)

ENSAYO DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

A.1 Propósito del ensayo

- (1) El propósito de éste procedimiento de ensayo es determinar el coeficiente de rozamiento de una superficie de fricción después de un tratamiento particular, que generalmente incorpora una superficie recubierta.
- (2) El procedimiento intenta asegurar el modo adecuado de tener en cuenta la posibilidad de deformación por creep de la unión.

A.2 Variables significativas

- (1)P La validez de los resultados de ensayo para superficies recubiertas está limitada a los casos en los que todas las variables significativas sean similares a las de las probetas de ensayo.
- (2)P Las siguientes variables deberán ser tomadas como significativas:
 - a) la composición del recubrimiento, véase capítulo A.2 (3);
 - b) el espesor máximo del recubrimiento, véase capítulo A.3 (5);
 - c) el intervalo mínimo de tiempo entre la aplicación del recubrimiento y la aplicación de carga en la unión, véase capítulo A.2 (4);
 - d) el procedimiento de curado, véase capítulo A.2 (5);
 - e) la clase del tornillo hexagonal, véase capítulo A.6 (4).
- (3)P La composición del recubrimiento deberá ser también tenida en cuenta, incluido el método de fabricación y cualquier diluyente usado.
- (4)P El procedimiento de curado deberá estar documentado, tanto por referencia a recomendaciones publicadas como detallando el procedimiento real.
- (5)P El intervalo de tiempo (en horas) entre el recubrimiento y el ensayo deberá registrarse.

A.3 Probetas de ensayo

- (1)P Las probetas de ensayo deberán cumplir con los detalles de dimensiones dados en las figuras A.1a) ó b). El material de aluminio deberá cumplir con las Normas Europeas EN 573, EN 515, EN 485, EN 586, EN 755, EN 52.1 y los proyectos de Norma Europea prEN 132/100, prEN 190/110.
- (2)P En orden a asegurar que las dos caras internas de las placas tengan el mismo espesor, se deben obtener mediante cortado consecutivo de la misma pieza de material y ser ensambladas en sus posiciones originales relativas.
- (3)P Las placas no tendrán los bordes cortados térmicamente. Deben ser lo suficientemente planas para permitir que las superficies preparadas estén en completo contacto cuando los tornillos han sido pretensados.

- (4)P El pretensado en los tornillos debe ser medido y debe ser igual al pretensado especificado para el tamaño y clase del tornillo usado.
- (5)P El tratamiento específico de la superficie y el recubrimiento debe ser aplicado a las superficies en contacto de las probetas de ensayo de una manera similar a la que se seguiría en la aplicación estructural. El espesor medio del recubrimiento en la superficie de contacto de las probetas de ensayo debe ser al menos 0,05 mm mayor que el espesor medio máximo especificado para el uso en la estructura.
- (6)P Las probetas de ensayo deben ser ensambladas de tal forma que los tornillos estén en contacto en sentido opuesto a la tracción aplicada.

A.4 Procedimiento de ensayo

- (1)P Se ensayarán cinco probetas de ensayo. Cuatro ensayos se cargarán a velocidad normal (duración aproximada del ensayo 10 a 15 minutos). La quinta probeta de ensayo se usará para un ensayo de creep.
- (2)P Las probetas de ensayo se ensayarán en una máquina de tracción. La relación carga-deslizamiento deberá ser registrada.
- (3)P El deslizamiento se tomará como un desplazamiento relativo entre puntos adyacentes en una placa interna y una placa de cubrición, en la dirección de la carga aplicada. Se debe medir para cada extremo de la probeta separadamente. Para cada extremo, el deslizamiento se tomará como la media de los desplazamientos en ambas caras de la probeta.
- (4) La carga de deslizamiento se define como la carga a la cual ocurre un deslizamiento de 0,15 mm.
- (5)P La quinta probeta se cargará con una carga específica del 90% de la carga media de deslizamiento de las cuatro primeras probetas (es decir, la media de los ocho valores).
- (6)P Si, transcurrido un periodo de tiempo de entre cinco minutos y tres horas después de la aplicación de la carga, los desplazamientos en cada extremo de la quinta probeta no se han incrementado más que 0,002 mm, la carga de deslizamiento de la quinta probeta se determinará como la primera de las cuatro. Si se producen desplazamientos mayores se deben llevar a cabo ensayos de creep ampliado, véase capítulo A.5.
- (7)P Si la desviación estándar de los 10 valores (obtenidos a partir de las cinco probetas) excede el 8% del valor medio, se deben ensayar probetas adicionales. El número total de probetas de ensayo (incluyendo las cinco primeras) se debe determinar mediante:

$$n \geq (\delta/3,5)^2 \quad (A.1)$$

donde

n es el número de probetas de ensayo;

δ es la desviación estándar de las cinco primeras probetas (diez valores) como un porcentaje del valor medio.

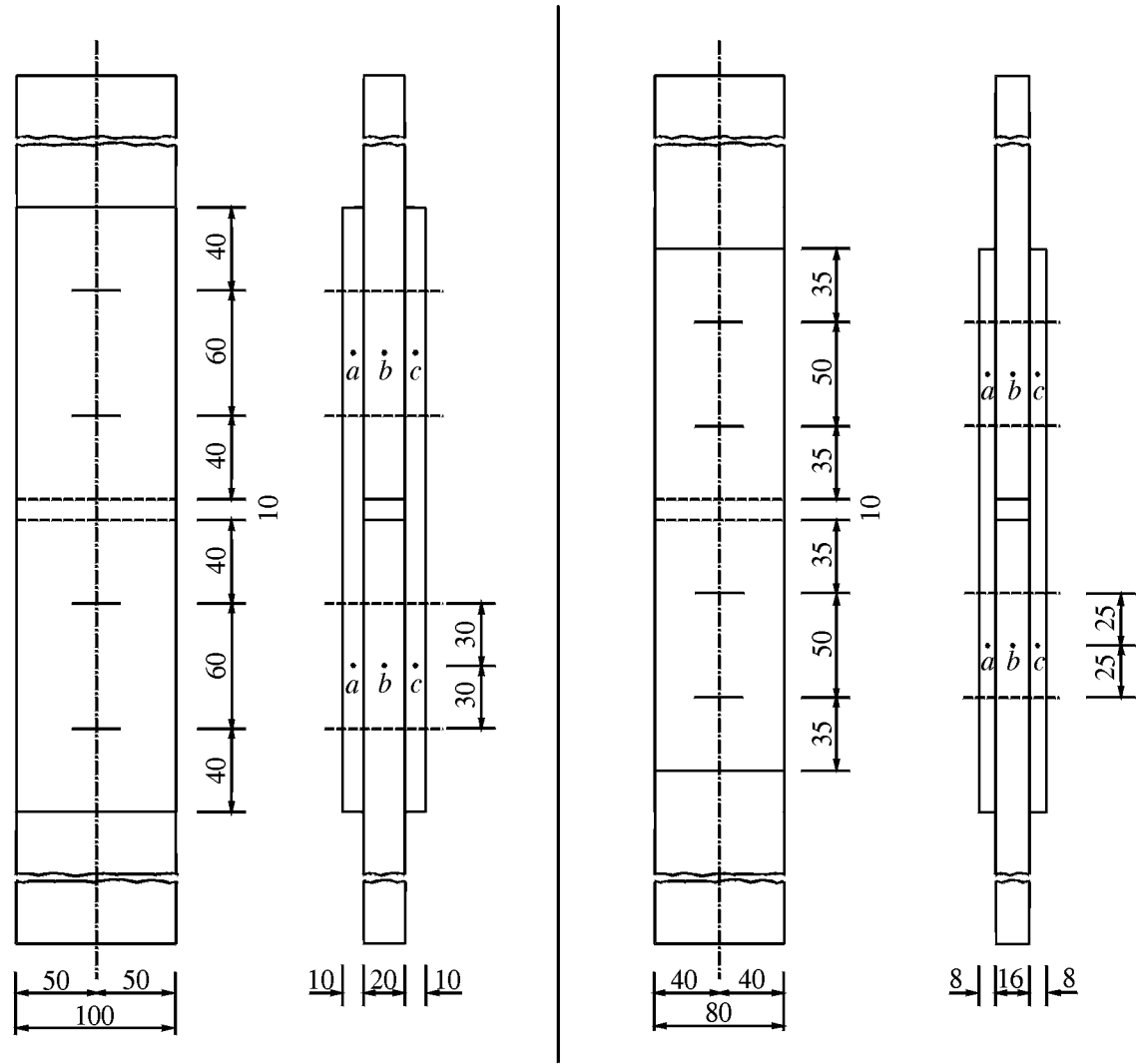
A.5 Ensayo de creep ampliado

- (1)P Cuando sea necesario llevar a cabo ensayos de creep ampliado, véase capítulo A.5 (6), al menos se deben ensayar tres probetas (seis uniones).
- (2)P Se debe aplicar una carga específica, determinada usando el coeficiente de rozamiento propuesto para el uso en la aplicación estructural.

- (3)P Se dibujará una “curva desplazamiento – log tiempo” (véase figura A.2) para demostrar que la carga determinada utilizando el coeficiente de rozamiento propuesto no causará desplazamientos mayores que 0,3 mm durante la vida de la estructura, tomada como 50 años a menos que se especifique otra cosa. La “curva desplazamiento – log tiempo” puede ser extrapolada linealmente tan pronto como la tangente pueda ser determinada con la suficiente precisión.

A.6 Resultados de ensayo

- (1)P El coeficiente de rozamiento característico resultante de los ensayos deberá ser tomado como el valor estadísticamente alcanzado en el 95% de todas las probetas de ensayo.
- (2) Para los diez valores, a partir de las cinco probetas, el valor característico se puede tomar como la media de los valores menos 1,83 veces la desviación estándar.
- (3) Para el ensayo de creep ampliado, el coeficiente de rozamiento característico se puede tomar como el valor demostrado que satisface el límite especificado de creep, véase capítulo A.5 (3).
- (4) El coeficiente de rozamiento determinado usando tornillos con propiedades de la clase 10.9 también se puede usar para tornillos con propiedades de la clase 8.8. Alternativamente se pueden llevar a cabo ensayos para tornillos con propiedades de la clase 8.8. Los coeficientes de rozamiento determinados utilizando tornillos con propiedades de la clase 8.8 no se pueden suponer válidos para tornillos con propiedades de la clase 10.9.



a) Tornillos M20 en agujeros de diámetro 22 mm

b) Tornillos M16 en agujeros de diámetro 18 mm

Fig. A.1 – Probetas de ensayo normalizadas para el ensayo del coeficiente de rozamiento

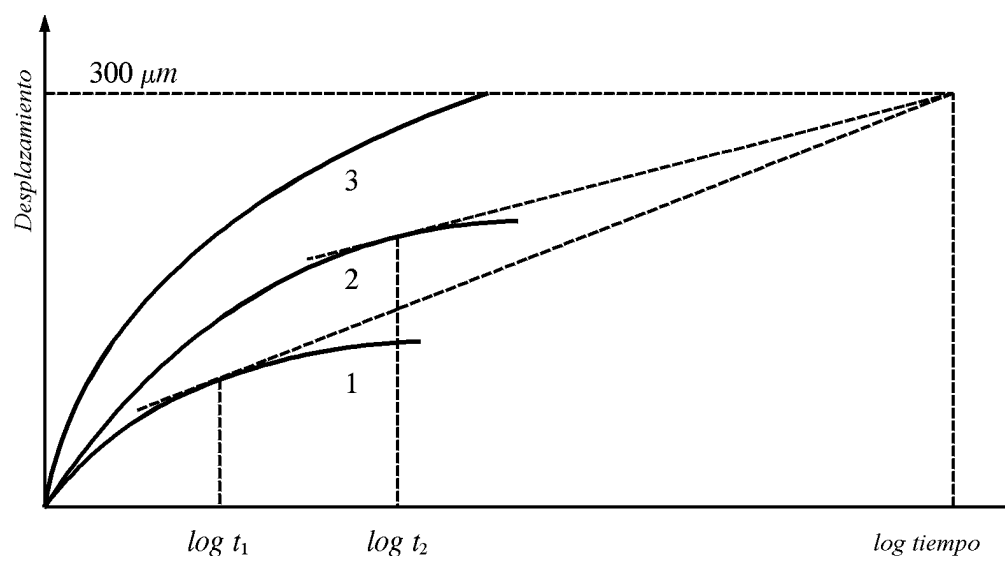


Fig. A.2 – Uso de la curva desplazamiento - log tiempo para el ensayo de creep ampliado

ANEXO B (Informativo)**SELECCIÓN DE MATERIALES****B.1 Generalidades**

- (1) La elección del aluminio adecuado o del material de la aleación de aluminio para cualquier aplicación en el ámbito de las estructuras se determina mediante una combinación de factores: resistencia, durabilidad, propiedades físicas, soldabilidad, conformabilidad y disponibilidad tanto de la aleación como en la forma concreta requerida. Las aleaciones forjadas y fundidas descritas posteriormente están subdivididas en aleaciones tratables térmicamente y no tratables térmicamente.
- (2) Las propiedades y las características de estas aleaciones se pueden comparar en términos generales en la tabla B.1 para aleaciones de aluminio forjadas y en la tabla B.2 para aleaciones fundidas. Las propiedades y las características pueden variar con el estado de entrega de la aleación.
- (3) Cuando hay que hacer conexiones a otros metales, se debe prestar especial cuidado a las medidas de protección necesarias para prevenir la corrosión galvánica.

B.2 Productos forjados**B.2.1 Aleaciones de productos forjados tratables térmicamente**

- (1) Dentro de las aleaciones de la serie 6xxx, las aleaciones EN AW-6082, EN AW-6061, EN AW-6005A, EN AW-6060, EN y EN AW-6063 son convenientes para aplicaciones estructurales. Las aleaciones EN AW-6082, EN AW-6061, EN AW-6005A, EN AW-6060 y EN AW-6063 tienen todas ellas una durabilidad de valor B. Dentro de las aleaciones de la serie 7xxx, la aleación EN AW-7020 es adecuada para aplicaciones estructurales generales y tiene una durabilidad de valor C.

B.2.1.1 Aleaciones EN AW-6082 y EN AW-6061

- (1) EN AW-6082 es una de las aleaciones tratables térmicamente más comúnmente usada y a menudo la principal aleación estructural en muchos países para aplicaciones soldadas y no soldadas. Es una aleación de alta resistencia disponible en muchas formas: extruidos sólidos y huecos, planchas, chapas, tubos y piezas forjadas, y encontrando un incremento del uso en componentes expuestos a ambientes marinos. EN AW-6061 es también una de las aleaciones tratables térmicamente más comúnmente usadas para aplicaciones soldadas y no soldadas disponible en forma de extruidos macizos y huecos y tubos. Ambas aleaciones se usan normalmente en el estado de completo tratamiento térmico EN AW-6082-T6 y EN AW-6061-T6.
- (2) La elección de estas aleaciones como material estructural se basa en una favorable combinación de propiedades; alta resistencia tras el tratamiento térmico, buena resistencia a la corrosión, buena soldabilidad tanto con el proceso MIG como con el TIG, buena conformabilidad en el estado de entrega T4 y buenas propiedades para el mecanizado. Se debe tener en cuenta y cuidado con los descensos de resistencias en la zona afectada térmicamente (HAZ) de las uniones soldadas. La resistencia puede ser recuperada en un grado limitado mediante un envejecimiento natural posterior a soldar. Cuando se usa en extruidos está generalmente restringido a formas intrincadas con espesores menores que los de otras aleaciones de la serie 6xxx. AW-6082 es una aleación común para extruidos, planchas y chapas para almacenes. La aleación puede ser roblonada usando aleaciones EN AW-6082, EN AW-5056A o EN AW-5086 en estados de entrega O ó endurecido, los metales de aportación para soldaduras están especificados en el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4.

- (1) La aleación EN AW-6005A también es recomendable para aplicaciones estructurales, está disponible sólo en forma de extruidos y combina resistencias medias con la capacidad para ser extruida en formas más complejas que aquellas que se obtienen con EN AW-6082 o EN AW-6061. Esto es particularmente cierto para formas huecas de paredes delgadas. Al igual que EN AW-6082 y EN AW-6061, las aleaciones son fácilmente soldables mediante los procesos TIG y MIG y tienen similar descenso de resistencias en la zona HAZ de las uniones soldadas. Los metales de aportación para soldadura de estas aleaciones están especificados en el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4.
- (2) La resistencia a la corrosión de los componentes soldados o sin soldar es similar o mejor que EN AW-6082. Las propiedades de mecanizado son similares a las de EN AW-6082.

Tabla B.1

Aleación nº CEN	Disponibilidad en forma y estado de entrega							Resistencia	Resistencia a la corrosión	Conformabilidad	Mecanizabilidad	Soldabilidad	Decorativo de anodizado duro
	Chapas, bandas y planchas	Productos extruidos			Productos estirados en frío	Piezas forjadas	Tubos soldados eléctricamente						
		Barra/ redondo	Tubo	Perfil									
EN AW-3103	0	-	-	-	-	-	0	II/IV	I	I/II	III/IV	I	II
EN AW-5083	0	0	0	x	0	0	-	I/II	I	II/IV	II/III	I	I/II
EN AW-5052	0	-	-	-	-	-	-	II/III	I	I/III	II/IV	I	I/II
EN AW-5454	0	-	-	-	-	-	-	II/III	I	I/III	II/IV	I	I/II
EN AW-5754	0	-	-	-	-	0	-	II/III	I	II/IV	II/III	I	I/II
EN AW-6060	-	0	0	0	0	-	-	II/III	II	II/III	II/III	I	I
EN AW-6061	-	0	0	0	0	-	-	II/III	II	II/III	II	I	I/II
EN AW-6063	-	0	0	0	0	-	-	II/III	II	II/III	II/III	I	I/II
EN AW-6005A	-	-	-	0	-	-	-	II	II	III	II	I	I
EN AW-6082	0	0	0	0	0	0	-	I/II	II	II/III	II	I	II
EN AW-7020	0	0	0	x	0	-	-	I	III	III	II	I	II
Símbolos:													
0 Disponible en un rango de estados de entrega, propiedades aplicables dentro de ese rango													
- Normalmente no disponible													
x Sólo perfiles simples													
I Excelente													
II Bueno													
III Regular													
IV Pobre													
NOTA – Estas indicaciones son sólo de guía y cada clasificación es sólo aplicable en la columna concerniente y puede variar con el estado de entrega.													

Tabla B.2
Comparación de características de fundiciones y otras propiedades generales

Aleación fundida	Tipo de fundición			Colabilidad			Resistencia	Mecanizabilidad		Resistencia a la corrosión	Anodizado decorativo	Soldabilidad
	Designación	Arena	Coquilla o molde permanente	Inyección a presión	Fluidez	Resistencia al desgarrro en caliente	Estanquidad	Como fundición	Después de tratamiento térmico			
EN AC-42100	•	•			II	I	II	II	-	II	IV	II
EN AC-42200	•	•			II	I	II	II	-	II	IV	II
EN AC-43200	•	•			I	I	II	III	III	II	V	II
EN AC-44100	•	•			I	I	I	IV	IV	-	II/III	I
EN AC-51300	•	•			III	IV	IV	IV	I	-	I	II
Símbolos: I Excelente II Bueno III Regular IV Pobre V No recomendable • Indica el método de fundir más comúnmente usado para cada aleación. NOTA 1 – Estas indicaciones son sólo de guía y cada grado es sólo aplicable a la columna concerniente. NOTA 2 – Las propiedades pueden variar con las condiciones de la fundición.												

B.2.1.3 Aleaciones EN AW-6060 y EN AW-6063

- (1) Las aleaciones EN AW-6060 y EN AW-6063 son recomendables para aplicaciones estructurales y sólo están disponibles en forma de productos estruidos y estirados en frío. Se usan cuando la resistencia no es de capital importancia y debe estar en compromiso con la apariencia, ofreciendo una buena durabilidad y acabado superficial y la capacidad para ser extruida con paredes delgadas y en formas intrincadas. Las aleaciones son particularmente indicadas para anodizados o procesos similares de acabado. Al igual que otras aleaciones de la serie 6xxx son fácilmente soldables tanto mediante el proceso MIG como el TIG con menores resistencias en las zonas afectadas térmicamente en las uniones soldadas. Los metales de aportación para la soldadura de estas aleaciones están especificados en el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4.

B.2.1.4 Aleaciones EN AW-7020

- (1) Las aleaciones EN AW-7020 son recomendables para aplicaciones estructurales soldadas o no soldadas. Es una aleación de alta resistencia disponible en extruidos macizos y huecos; planchas, chapas y tubo. Esta aleación no es tan sencilla de producir en extruidos complicados como con las aleaciones de la serie 6xxx y no está fácilmente disponible. Se usa normalmente en condición de tratamiento térmico completo EN AW-7020-T6. Tiene una mejor resistencia tras la soldadura que las de la serie 6xxx debido a su propiedad de envejecimiento natural. Esta aleación y otras de las aleaciones de la serie 7xxx son sin embargo sensibles a las condiciones ambientales y su comportamiento satisfactorio es tan dependiente de los correctos métodos de manufactura y fabricación como del control de la composición y de las propiedades de tracción. Debido a la susceptibilidad a la corrosión con exfoliación, el material en estado de entrega T4 sólo debe ser usado en la etapa de fabricación siempre que la estructura pueda ser artificialmente envejecida tras su acabado. Cuando no se aplica tratamiento térmico posterior a la soldadura, se debe comprobar la necesidad de protección de la zona HAZ con la condición definida en el apartado 3.4.3.1. Si un material, en el estado de entrega T6, es sometido a cualquier operación que induzca trabajo en frío tal como una flexión, cortadura o punzonamiento, etc., la aleación puede ser susceptible a la fisuración por corrosión bajo tensión. Es esencial por esto que haya una directa colaboración entre el proyectista y el fabricante en la propuesta de uso y de las adecuadas condiciones de servicio.

B.2.2 Aleaciones de productos forjados no tratables térmicamente

- (1) Dentro de las aleaciones de la serie 5xxx, las aleaciones EN AW-5052, EN AW-5454 y EN AW-5754 y EN AW-5083 son recomendables para aplicaciones estructurales y tienen todas ellas una durabilidad de valor I. Otra aleación no tratable térmicamente considerada para aplicaciones estructurales menores es la EN AW-3013 que sigue manteniendo una durabilidad de valor I.

B.2.2.1 EN AW-5052, EN AW-5454 y EN AW-5754

- (1) EN AW-5052, EN AW-5454 y EN AW-5754 están disponibles para soldar y para uniones estructurales mecánicas entre piezas sometidas a tensiones moderadas. Las aleaciones son dúctiles en estado de recocido, pero descendiende rápidamente la ductilidad con el conformado en frío. Son fácilmente soldables tanto mediante el proceso MIG como el TIG utilizando metales de aportación especificados en el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4, y ofrecen muy buena resistencia al ataque por corrosión, especialmente en atmósfera marina. Está disponible principalmente como productos laminados, su reducido contenido en magnesio también permite formas simples de piezas macizas extruidas.
- (2) Las aleaciones pueden ser fácilmente mecanizadas en los estados de suministro más duros. EN AW-5754 es la más robusta de las aleaciones de la serie 5xxx que ofrece inmunidad parcial a la corrosión intergranular y a la corrosión bajo tensión.

B.2.2.2 EN AW-5083

- (1) La aleación EN AW-5083 es la más robusta aleación no tratable térmicamente en el uso comercial general, incluyendo las aplicaciones marinas, y posee buenas propiedades de soldadura y muy buena resistencia a la corrosión en ambiente marino. Es dúctil en estado blando con buenas propiedades de conformado pero bajas ductilidades con conformado en frío, y puede llegar a ser dura con baja ductilidad.
- (2) Sin embargo la aleación puede en todos los estados de entrega, especialmente en los estados de entrega H32 y H34 (HX), ser susceptible de corrosión intergranular, la cual bajo ciertas circunstancias, puede desarrollar una fisuración por corrosión bajo tensión bajo cargas mantenidas. Estados especiales de entrega como el H116 han sido desarrollados para minimizar este efecto. No obstante el uso de esta aleación no es recomendable cuando el material va a estar sujeto a un intenso conformado en frío y/o cuando la temperatura de servicio esperada es superior a 65 °C. En tales casos se debe elegir en su lugar la aleación EN AW-5754.
- (3) Pero cuando haya un requerimiento particular para la selección de una combinación aleación /estado de entrega que puede ser susceptible de fisuración por corrosión bajo tensión debido a sus condiciones de servicio, este material deberá ser sometido a ensayos de corrosión de acuerdo a los procedimientos que se definan, cuando exista acuerdo entre fabricante y el comprador y conste en el pedido.
- (4) La aleación EN AW-5083 es fácilmente soldable tanto por el proceso MIG como por el TIG usando metales de aportación especificados en el proyecto de Norma Europea prEN 1011-4, pero cuando se suelden materiales endurecidos por deformación las propiedades de la zona HAZ revertirán a valores de recocido. La aleación se suministra en planchas, chapas tubos estirados y piezas forjadas. Debido al alto contenido en magnesio es particularmente dura para extruirla en perfiles huecos o complejos por lo que se limita su uso a simples perfiles completamente extruidos. Tiene un buen mecanizado en todos los estados de entrega. Para el roblonado se sugiere la aleación EN AW-5754-0 ó H32.

B.2.2.3 EN AW-3013

- (1) EN AW-3013 sólo se suministra en chapas y formas planas. Es ligeramente más robusta y dura que el aluminio “comercialmente puro” con alta ductilidad, soldabilidad y buena resistencia a la corrosión.

B.3 Productos fundidos

- (1) Se recomiendan cinco tipos de aleaciones fundidas para aplicaciones estructurales, tres aleaciones tratables térmicamente EN AC-42100, EN AC-42200 y EN AC-43200, más dos aleaciones no tratables, EN AC-44100 y EN AC-51400. Estas aleaciones se describen posteriormente. Todas pueden ser soldables usando metales de aportación especificados en la proyecto de Norma Europea prEN 1011-4, pero algunas combinaciones de aleación de productos fundidos y forjados no son recomendables debido a la formación de fragilización intermetálica.
- (2) Las reglas de proyecto dadas en la Parte 1.1 no se aplican a las fundiciones. Las aleaciones fundidas dadas posteriormente sólo se pueden usar en estructuras portantes después de que se hayan llevado a cabo tanto los adecuados ensayos como establecido los procedimientos de control de la producción de las piezas fundidas con la aprobación del proyectista.

B.3.1 Aleaciones fundidas tratables térmicamente EN AC-42100, EN AC-42200 y EN AC-43200

- (1) EN AC-42100, EN AC-42200 y EN AC-43200 son todas aleaciones del sistema Al-Si-Mg y responden a los tratamientos térmicos. Todas se suministran para fundición en arena y en coquilla o moldes permanentes pero no se usan normalmente para fundiciones inyectadas a presión excepto cuando se usan métodos avanzados de fundición. La mayor resistencia se alcanza con EN AC-42200-T6 pero con una menor ductilidad que con EN AC-42100.
- (2) EN AC-43200 muestra mejor colabilidad de la fundición con resistencia regular a la corrosión, buen mecanizado y soldabilidad. La colabilidad de las aleaciones EN AC-42100 y EN AC-42200 es buena, con buena resistencia a la corrosión, mecanizabilidad y soldabilidad.

B.3.2 Aleaciones fundidas no tratables térmicamente EN AC-44100 y EN AC-51300

- (1) EN AC-44100 y EN AC-51300 son aleaciones suministradas para fundiciones en arena y en coquilla o en moldes permanentes, pero no recomendable para fundiciones inyectadas a presión. La aleación EN AC-44100 posee excelente colabilidad, pero EN AC-51300 tiene regular colabilidad y es sólo adecuada para las formas más simples. EN AC-51300 tiene la más alta resistencia, tiene una excelente resistencia a la corrosión y es mecanizable. EN AC-44100 tiene mejor soldabilidad que EN AC-51300. La aleación EN AC-51300 puede ser anodizada decorativamente.

ANEXO C (Informativo)

CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS Y DE LOS MOMENTOS INTERNOS

C.1 Análisis global

- (1) Los esfuerzos y los momentos internos en una estructura estáticamente determinada deberán ser obtenidos usando la estática.
- (2) Los esfuerzos y los momentos internos en una estructura estáticamente indeterminada pueden ser generalmente determinados usando cualquiera de:
 - a) Análisis global elástico (lineal o no lineal).
 - b) Análisis global plástico (sin o con endurecimiento)
- (3) El análisis global elástico puede ser utilizado en todos los casos.
- (4) El análisis global plástico sólo puede usarse cuando las secciones transversales de las piezas satisfacen los requisitos especificados para la Clase 1 en el apartado 5.4. No está permitido para secciones transversales de las Clases 2, 3 y 4. Para las secciones transversales Clase 1 es siempre preciso comprobar la capacidad de deformación en relación con la demanda de ductilidad del esquema estructural (véase anexo D).
- (5) Para más detalles sobre los métodos de análisis global, véase anexo D.
- (6) Las hipótesis de cálculo para las uniones deben de cumplir los requisitos especificados en el capítulo C.2.

C.1.2 Análisis global elástico (lineal)

- (1) Cualquiera que sea el nivel de tensiones (véase figura C.1a), el análisis global elástico (en el rango lineal) se basará en la hipótesis de que el comportamiento de la relación tensión-deformación unitaria del material es lineal.
- (2) Esta hipótesis puede mantenerse en los análisis elásticos tanto de primero como de segundo orden (véase apartado C.1.6), incluso cuando la resistencia de la sección transversal esté basada en la resistencia más allá del límite elástico.
- (3) Tras un análisis elástico de primer orden, se puede efectuar una redistribución de los momentos elásticos de cualquier elemento, modificando los momentos hasta en un 15% del momento elástico máximo en ese elemento. Esto podrá realizarse siempre que:
 - a) los esfuerzos y los momentos internos de la estructura permanezcan en equilibrio con las cargas aplicadas; y
 - b) todos los elementos en los que se reduzcan los momentos tengan secciones transversales de las Clases 1 ó 2 (véase apartado 5.4).

C.1.3 Análisis global elástico (no lineal)

- (1) El análisis global elástico (en el campo no lineal) se basará en la hipótesis de que el comportamiento de la relación tensión-deformación unitaria del material es no lineal. El valor del módulo tangente instantáneo depende del nivel de tensiones (figura C.1b).

- (2) Esta hipótesis puede mantenerse en los análisis elásticos tanto de primero como de segundo orden (véase apartado C.1.6), incluso cuando la resistencia de la sección transversal esté basada en la resistencia más allá del límite elástico.
- (3) La caracterización de la ley tensión-deformación unitaria del material deberá tener en cuenta el comportamiento real no lineal de la aleación. Esta puede ser descrita basándose en los modelos dados en el anexo E.

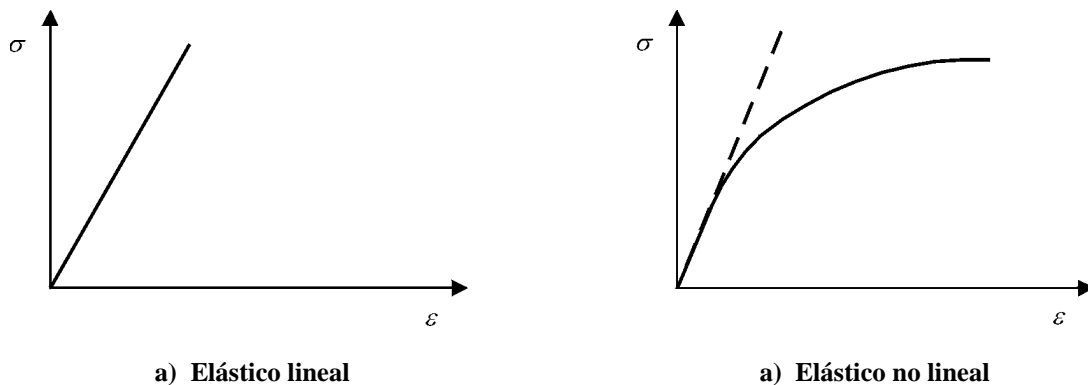


Fig. C.1 – Modelos de comportamiento del material para análisis global elástico

C.1.4 Análisis global plástico (sin endurecimiento)

- (1) El análisis global plástico (despreciando los efectos de endurecimiento) puede llevarse a cabo suponiendo para el material uno de los siguientes modelos de comportamiento:
 - Rígido - Perfectamente plástico (figura C.2a)
 - Elástico - Perfectamente plástico (figura C.2b)
 - Inelástico - Perfectamente plástico (figura C.2c)

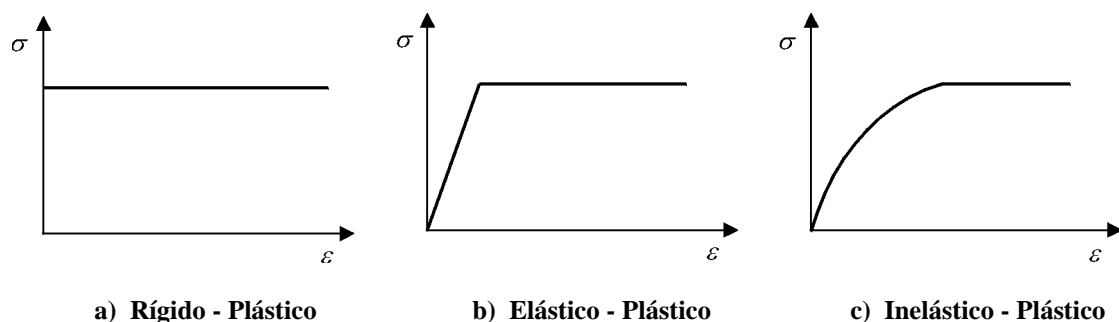


Fig. C.2 – Modelos de comportamiento del material para análisis global perfectamente plástico

- (2) En caso de usar para el material el modelo "Rígido – Perfectamente plástico", se despreciarán las deformaciones elásticas de las secciones transversales, de los elementos y de las cimentaciones. Se supondrá que las deformaciones plásticas se concentran en las rótulas plásticas.
- (3) En caso de usar para el material el modelo "Elástico - Perfectamente Plástico", se supondrá que la sección transversal permanece perfectamente elástica hasta que se alcanza la tensión del límite elástico en la fibra más altamente tensionada. La transición al campo plástico será más o menos gradual dependiendo tanto de las condiciones de carga como de la forma de la sección. Se supondrá que las deformaciones plásticas se concentran en las rótulas plásticas.

- (4) En caso de usar para el material el modelo "Inelástico - Plástico", se considera el comportamiento real no lineal tanto del material como de la sección transversal en la evaluación de las deformaciones que ocurren, en un elemento dado, antes de la formación de la rótula plástica. Las secciones transversales permanecen completamente elásticas hasta que la tensión en la fibra más solicitada alcance el límite elástico. Como las acciones internas continúan aumentando, la sección gradualmente entra en el rango inelástico, hasta que se alcanza la completa resistencia plástica.

C.1.5 Análisis global plástico (con endurecimiento)

- (1) El análisis global plástico teniendo en cuenta el efecto deformación unitaria-endurecimiento puede llevarse a cabo suponiendo para el material uno de los siguientes modelos de comportamiento:
- Rígido - Endurecimiento (figura C.3a)
 - Elástico - Endurecimiento (figura C.3b)
 - Generalmente inelástico (figura C.3c)

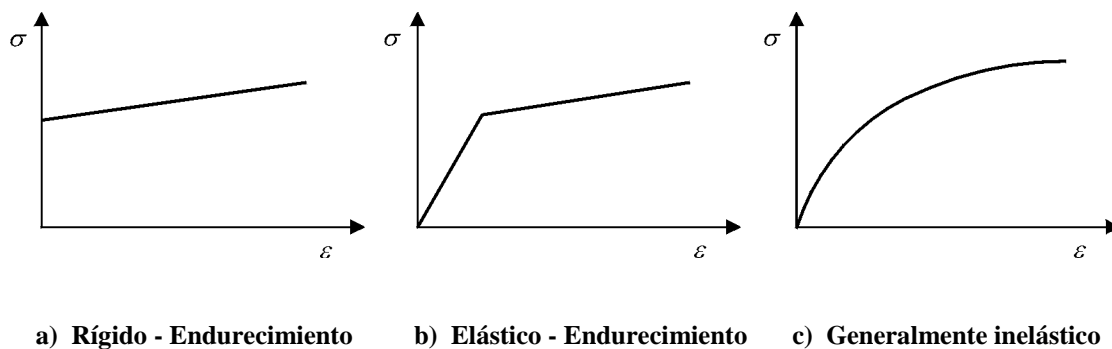


Fig. C.3 – Modelos de comportamiento del material para análisis global plástico con endurecimiento

- (2) En caso de usar para el material el modelo "Rígido – Endurecimiento", se despreciarán las deformaciones elásticas de las secciones transversales, de los elementos y de las cimentaciones. Se supondrá que las deformaciones plásticas se concentran en las rótulas plásticas. La resistencia de las rótulas plásticas continúa incrementándose tras alcanzar la resistencia plástica. El análisis finalizará cuando se alcance un valor límite dado de la resistencia o de la deformación.
- (3) En caso de usar para el material el modelo "Elástico – Endurecimiento", el comportamiento de las secciones transversales permanece elástico hasta que la tensión del límite elástico se alcanza en las fibras más solicitadas. La resistencia de las rótulas plásticas continúa incrementándose tras alcanzar la resistencia elástica límite, sin alcanzar una resistencia plástica última. La transición al rango plástico será más o menos gradual dependiendo tanto de las condiciones de carga como de la forma de la sección. El análisis finalizará cuando se alcance un valor límite dado de la resistencia o de la deformación. Las deformaciones plásticas se suponen concentradas en las localizaciones de las rótulas plásticas.
- (4) En caso de usar el modelo "Generalmente inelástico", tanto el material como las secciones se describen de acuerdo a sus relaciones reales entre tensiones-deformaciones unitarias y fuerzas generalizadas-desplazamientos generalizados, respectivamente. La transición del rango elástico al plástico es gradual y el alcance del estado límite último se define por un valor límite dado de la resistencia o de la deformación.

C.1.6 Influencia de las deformaciones

- (1) Los esfuerzos internos se pueden determinar generalmente aplicando una de las siguientes teorías:
 - a) teoría de primer orden, utilizando la geometría inicial de la estructura;
 - b) teoría de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.
- (2) Se podrá utilizar la teoría de primer orden para el análisis global en los siguientes casos:
 - a) pórticos intraslacionales;
 - b) métodos de cálculo en los que se consideren indirectamente los efectos de segundo orden.
- (3) Se podrá utilizar la teoría de segundo orden para el análisis global en todos los casos, excepto cuando se use el análisis basado en idealizaciones para la sección transversal rígida – perfectamente plástica o rígida - endurecimiento.

C.1.7 Evaluación de las relaciones entre fuerzas y desplazamientos generalizados para las secciones transversales

- (1) La elección de la relación entre fuerzas y desplazamientos generalizados de la sección a utilizar en el análisis deberá ser consistente con la hipótesis hecha para el comportamiento del material (véase anexo D).
- (2) Si se supone un comportamiento perfectamente plástico para el material, se pueden suponer las siguientes relaciones entre fuerzas (F) y desplazamientos generalizados (D) para las secciones transversales, de acuerdo tanto a la forma como a las propiedades mecánicas del material de la sección:
 - a) Elástico-Perfectamente plástico (figura C.4a)
 - b) Inelástico-Perfectamente plástico (figura C.4b)
- (3) Si se supone un comportamiento de endurecimiento para el material, se pueden suponer las siguientes relaciones entre fuerzas y desplazamientos generalizados para las secciones transversales, de acuerdo tanto a la forma como a las propiedades mecánicas del material de la sección:
 - a) Elástico-Endurecimiento (figura C.4c)
 - b) Generalmente inelástico (figura C.4d)

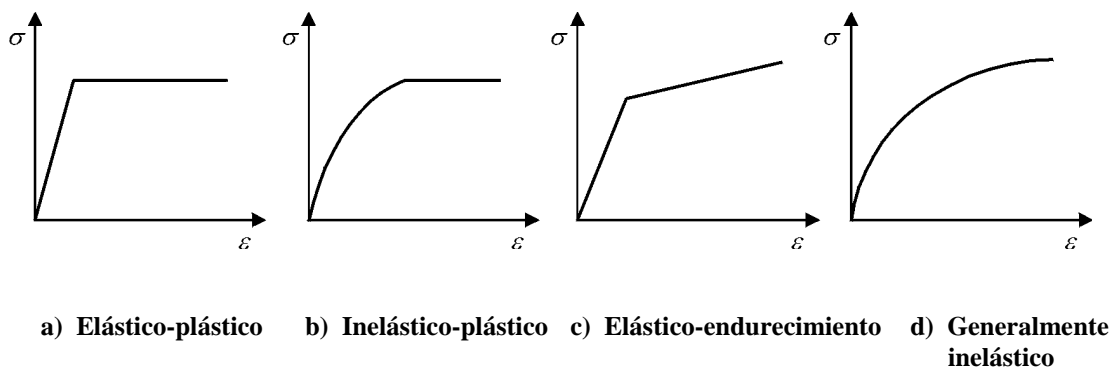


Fig. C.4 – Relación entre fuerzas y desplazamientos generalizados para secciones transversales

C.2 Hipótesis de cálculo

C.2.1 Bases

- (1) Las hipótesis que se adopten en el análisis global de la estructura serán coherentes con el comportamiento previsto de las uniones (véase apartado 6.4).
- (2) Las hipótesis que se adopten en el cálculo de las piezas serán coherentes (o estarán del lado de la seguridad) con el método empleado para el análisis global y con el comportamiento previsto de las uniones.
- (3) Los requisitos para los diferentes tipos de uniones se dan en el apartado 6.4.
- (4) En la tabla 6.4.1 se muestran los distintos tipos de uniones requeridas para los diferentes tipos de modelización de los pórticos, en función del método de análisis global que se utilice.
- (5) Cuando sea necesario calcular la carga crítica elástica de agotamiento de un pórtico traslacional, se considerarán los efectos de la rigidez real de las uniones, con independencia de que se utilice para el análisis global de la estructura un análisis elástico o plástico.
- (6) Cuando se calculen las cargas críticas elásticas o las longitudes de pandeo de una pieza, se deberá utilizar el valor real inicial de la rigidez de la unión.

C.2.2 Estructuras con nudos articulados

- (1) En las estructuras con nudos articulados puede suponerse que las uniones entre las piezas no transmiten momentos. En el análisis global se supondrá que las uniones entre las piezas son articulaciones efectivas.
- (2) Las uniones deberán cumplir los requisitos exigidos a las uniones articuladas (véase apartado 6.4.4.1).

C.2.3 Pórticos de nudos rígidos

- (1) El análisis Elástico (lineal o no lineal) se efectuará con la hipótesis de continuidad total, con uniones rígidas que satisfagan los requisitos especificados en el apartado 6.4.4.
- (2) El análisis Rígido-Plástico (con o sin endurecimiento) se efectuará con la hipótesis de continuidad total, con uniones totalmente resistentes que satisfagan los requisitos especificados en el apartado 6.4.4.
- (3) El análisis Elástico-Plástico (con o sin endurecimiento) se efectuará con la hipótesis de continuidad total, con uniones totalmente resistentes y rígidas que satisfagan los requisitos especificados en el apartado 6.4.4.
- (4) El análisis Inelástico (con o sin meseta) se efectuará con la hipótesis de continuidad total, con uniones totalmente resistentes y rígidas que satisfagan los requisitos especificados en el apartado 6.4.4.

C.2.4 Pórticos de nudos semirrígidos

- (1) El análisis Elástico (lineal o no lineal) se basará en relaciones de cálculo momento-curvatura o fuerza-desplazamiento para las uniones usadas que sean predecibles de forma segura.
- (2) El análisis Rígido-Plástico (con o sin endurecimiento) se basará en el momento resistente de cálculo de la unión, en el cual se tiene que demostrar que tiene la suficiente capacidad de rotación, véase anexo D.
- (3) El análisis Elástico-Plástico (con o sin endurecimiento) se basará en la relación de cálculo momento-curvatura o fuerza-desplazamiento de la unión, véase el apartado 6.4.4.
- (4) El análisis Inelástico (con o sin meseta) se basará en la relación de cálculo momento-curvatura o fuerza-desplazamiento de la unión, véase el apartado 6.4.4.

C.3 Sistema estructural

C.3.1 Estructuras

- (1) La amplitud del análisis global requerido dependerá del tipo de estructura, que puede ser como sigue:

a) Elementos estructurales simples:

Las vigas simplemente apoyadas y las piezas individuales traccionadas o comprimidas son estáticamente determinadas.

Las celosías pueden ser estáticamente determinadas o estáticamente indeterminadas.

b) Vigas continuas y pórticos intraslacionales:

En el caso de vigas continuas y de pórticos en los que los efectos de inclinación (efectos de segundo orden) sean despreciables o se hayan eliminado con medios adecuados (véase capítulo C.5), deberán ser analizadas bajo las apropiadas distribuciones de cargas variables para determinar aquellas combinaciones de esfuerzos internos que sean más críticas para verificar la resistencia de las piezas aisladas y la de sus uniones.

c) Pórticos traslacionales:

Los pórticos traslacionales (véase capítulo C.5) deben analizarse bajo las distribuciones de cargas variables que sean las más críticas frente a fallo por desplazamientos de los nudos (inclinación excesiva). Adicionalmente, los pórticos traslacionales deberán también analizarse como pórticos intraslacionales del modo descrito en b).

- (2) Se incluirán en el análisis global de todos los pórticos los desplazamientos horizontales debidos a las imperfecciones iniciales especificadas en el apartado C.4.3, y, cuando sea necesario, las imperfecciones de las piezas, véase apartado C.4.2 (4).

C.3.2 Sub-estructuras

- (1) Para el análisis global, podrá dividirse la estructura en un cierto número de subestructuras, siempre que:

- sea fiable el modelo de la interacción estructural entre las diferentes subestructuras;
- la distribución de las subestructuras sea adecuada al tipo de estructura empleado;
- se tengan en cuenta los posibles efectos desfavorables de la interacción entre las subestructuras.

C.3.3 Rigidez de las cimentaciones

- (1) Se tendrá en cuenta las características de deformación de las bases de apoyo u otras cimentaciones a las que los pilares estén rígidamente unidos. Se adoptarán unos valores apropiados de la rigidez al giro en todos los métodos de análisis global, excepto en los métodos rígido-plásticos.
- (2) Cuando se emplee una articulación o una biela, la rigidez al giro de la cimentación se tomará como nula.
- (3) Opcionalmente, también se podrán adoptar unos valores apropiados de la rigidez al giro para representar la naturaleza semirrígida de las bases nominalmente articuladas.

C.4 Consideración de las imperfecciones

C.4.1 Bases

- (1) Se tomarán las medidas oportunas para tener en cuenta los efectos de las imperfecciones de ejecución, entre las que se incluyen las tensiones residuales y las imperfecciones geométricas tales como la falta de verticalidad, la falta de rectitud, la falta de ajuste y las inevitables excentricidades menores presentes en las uniones prácticas.
- (2) Pueden emplearse unas imperfecciones geométricas equivalentes apropiadas, cuyos valores reflejen los posibles efectos de todo tipo de imperfección.
- (3) Se tendrán en cuenta los efectos de las imperfecciones en los siguientes casos:
 - a) Análisis global.
 - b) Análisis del sistema de arriostramiento.
 - c) Cálculo de las piezas.

C.4.2 Método de aplicación

- (1) Las imperfecciones se tendrán en cuenta en el análisis introduciendo unas magnitudes adicionales apropiadas, que incluyan las imperfecciones de los pórticos, las imperfecciones de las piezas y las imperfecciones para el análisis del sistema de arriostramiento.
- (2) Los efectos de las imperfecciones de los pórticos dadas en el apartado C.4.3 se incluirán en el análisis global de la estructura. Los esfuerzos y momentos resultantes serán las que se utilizarán en el cálculo de sus piezas.
- (3) Los efectos de las imperfecciones dados en el apartado C.4.4 se incluirán en el análisis del sistema de arriostrado. Los esfuerzos resultantes y los momentos serán los que se utilizarán en el cálculo de las piezas.
- (4) En el análisis global de pórticos, se pueden despreciar los efectos de las imperfecciones de las piezas (véase apartado C.4.5), excepto en el caso de pórticos traslacionales (véase apartado C.5.2), en los que existan piezas solicitadas a compresión axial, que tengan uniones resistentes a momentos y en las cuales:

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A_{fo}}{N_{Ed}}} \quad (C.1)$$

donde

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

$\bar{\lambda}$ es la esbeltez adimensional en el plano de la estructura (véase apartado 5.8.4), calculada utilizando una longitud de pandeo igual a la longitud real.

C.4.3 Imperfecciones estructurales para el análisis global

- (1) En el análisis de los pórticos se tendrán en cuenta los efectos de las imperfecciones mediante una imperfección geométrica equivalente representada por un desplazamiento inicial de imperfección ϕ , determinado por (véase figura C.5):

$$\phi = k_c k_s \phi_0 \quad (C.2)$$

donde

$$\phi_0 = 1/200$$

$$k_c = \sqrt{0,5 + 1/n_c} \quad \text{pero } k_c \leq 1,0$$

$$k_s = \sqrt{0,5 + 1/n_s} \quad \text{pero } k_s \leq 1,0$$

donde

n_c es el número de pilares por cada plano de estructura;

n_s es el número de plantas.

- (2) En n_c se incluirán únicamente aquellos pilares que soporten una carga vertical N_{Ed} de, al menos, el 50% del valor medio de la carga vertical por pilar en el plano considerado.
- (3) En n_c no se incluirán aquellos pilares que no se prolonguen a través de todas las plantas incluidas en n_s . Cuando se determine n_s no se incluirán aquellas plantas de suelo o techo que no estén conectadas con todas las columnas incluidas en n_c . Cuando más de una combinación de n_c y n_s satisfacen estas condiciones, cualquiera de ellas puede utilizarse del lado de la seguridad.
- (4) Los desplazamientos horizontales debido a imperfecciones iniciales se pueden producir en todas las direcciones, pero sólo necesitan ser considerados en una única dirección cada vez.
- (5) También se deben considerar los posibles efectos de torsión en la estructura como consecuencia de desplazamientos de sentido contrario en dos caras opuestas de la misma.
- (6) Se pueden sustituir las imperfecciones debidas a desplazamientos iniciales por un conjunto de fuerzas horizontales equivalentes, véase la figura C.5.
- (7) En los pórticos de edificación a base de vigas y pilares, estas fuerzas horizontales equivalentes deben ser aplicadas en cada nivel de planta de suelo o techo y serán proporcionales a las cargas verticales aplicadas a la estructura en esa planta, véase la figura C.6.
- (8) Las reacciones horizontales de cada soporte se calcularán utilizando las imperfecciones iniciales y no las fuerzas horizontales equivalentes. En ausencia de cargas horizontales aplicadas, la resultante de las reacciones horizontales será cero.

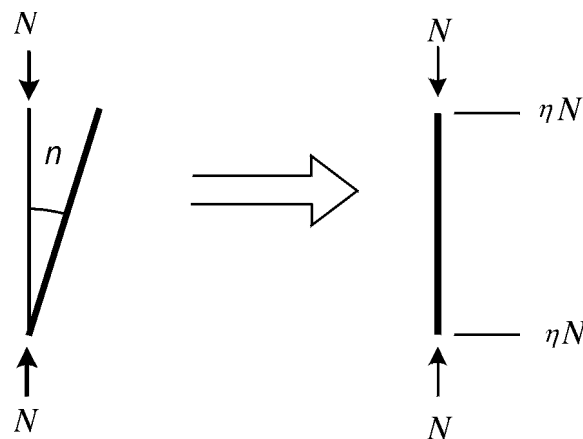


Fig. C.5 – Sustitución de imperfecciones debidas a un desplazamiento inicial por fuerzas horizontales equivalentes

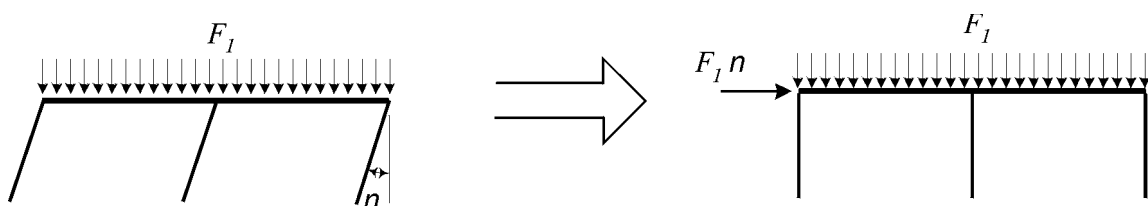


Fig. C.6 – Fuerzas horizontales equivalentes

C.4.4 Imperfecciones en el análisis de los sistemas de arriostramiento

- (1) En el análisis de aquellos sistemas de arriostramiento, necesarios para suministrar estabilidad lateral dentro de la longitud a vigas o piezas comprimidas, se deben considerar los efectos de las imperfecciones mediante una imperfección geométrica equivalente de las piezas a arriostrar, en la forma de una imperfección inicial:

$$e_0 = \frac{k_r L}{500} \quad (C.3)$$

donde

L es la luz del vano del sistema de arriostramiento

$$k_r = \sqrt{0,2 + 1/n_r} \quad \text{pero } k_r \leq 1,0$$

en la cual n_r es el número de piezas a arriostrar.

- (2) Si se considera conveniente, se pueden sustituir las curvaturas iniciales de las piezas a arriostrar mediante el sistema de arriostramiento por el esfuerzo estabilizador equivalente que se muestra en la figura C.7.
- (3) Cuando el sistema de arriostramiento se utilice para estabilizar una viga flectada, la fuerza N de la figura C.7 se obtendrá mediante:

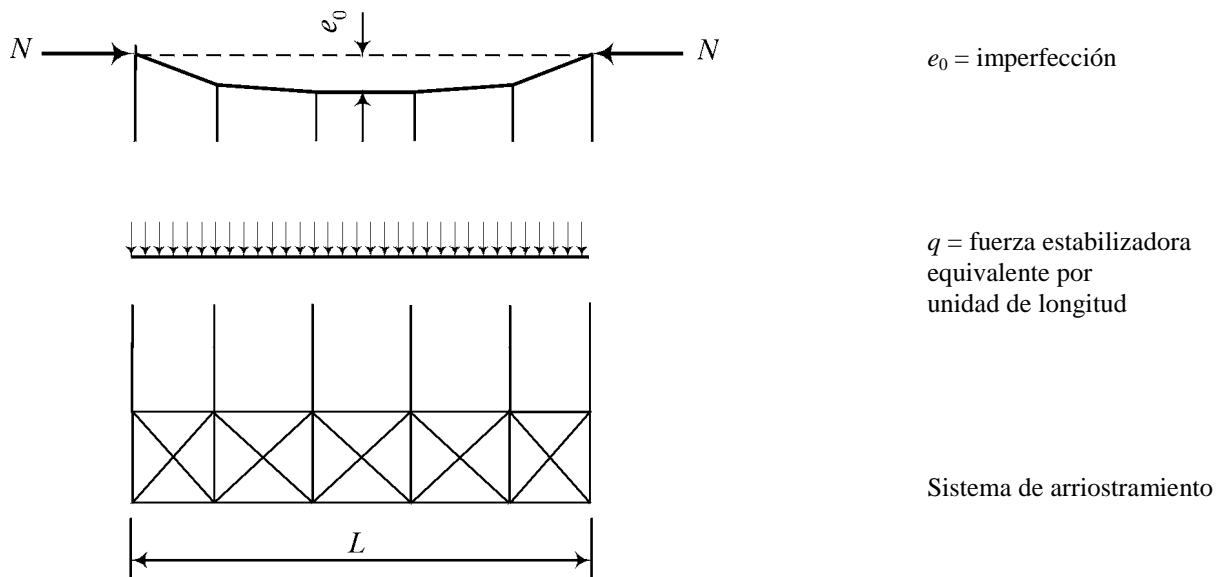
$$N = M/h \quad (C.4)$$

donde

M es el momento máximo en la viga;

h es el canto total de la viga.

- (4) En los puntos de empalme de las vigas o de las piezas comprimidas, también se deberá comprobar que el sistema de arriostramiento es capaz de resistir una fuerza local igual a $k_r N/100$ aplicada a cada una de las vigas o de las piezas comprimidas que estén empalmadas en ese punto, y de transmitir esta fuerza a los puntos adyacentes en los que las vigas o las piezas comprimidas estén fijas, véase figura C.8.
- (5) Cuando se efectúe la comprobación para esta fuerza localizada, se incluirá, además, cualquier carga externa que actúe sobre el sistema de arriostramiento, pero se podrán omitir las fuerzas debidas a las imperfecciones que se recogen en (1).



La fuerza N se supone constante (uniforme) a lo largo de la luz L del sistema de arriostramiento. Para una fuerza variable (no uniforme), esto es ligeramente conservador.

Para una pieza con arriostramiento simple:

$$\text{Para } \rho_q \leq \frac{L}{2500}: q = \frac{N}{50L}$$

$$\text{Para } \rho_q > \frac{L}{2500}: q = \frac{N}{60L} (1 + \sigma)$$

donde

ρ_q es la flecha en el plano del sistema de arriostramiento debida a q más cualquier carga externa

$$\sigma = 500 \rho_q r \text{ pero } \sigma \geq 0,2$$

Para una pieza con arriostramiento múltiple:

$$\text{Para } \rho_q \leq \frac{L}{2500}: q = \frac{\sum N}{60L} (k_r + 0,21)$$

$$\text{Para } \rho_q > \frac{L}{2500}: q = \frac{\sum N}{60L} (k_r + \sigma)$$

Fig. C.7 – Fuerzas estabilizadoras equivalentes

C.4.5 Imperfecciones de las piezas

- (1) Normalmente, ya se tienen en cuenta los efectos de las imperfecciones en el cálculo de las piezas empleando la formulación para pandeo que se recoge en este Eurocódigo.

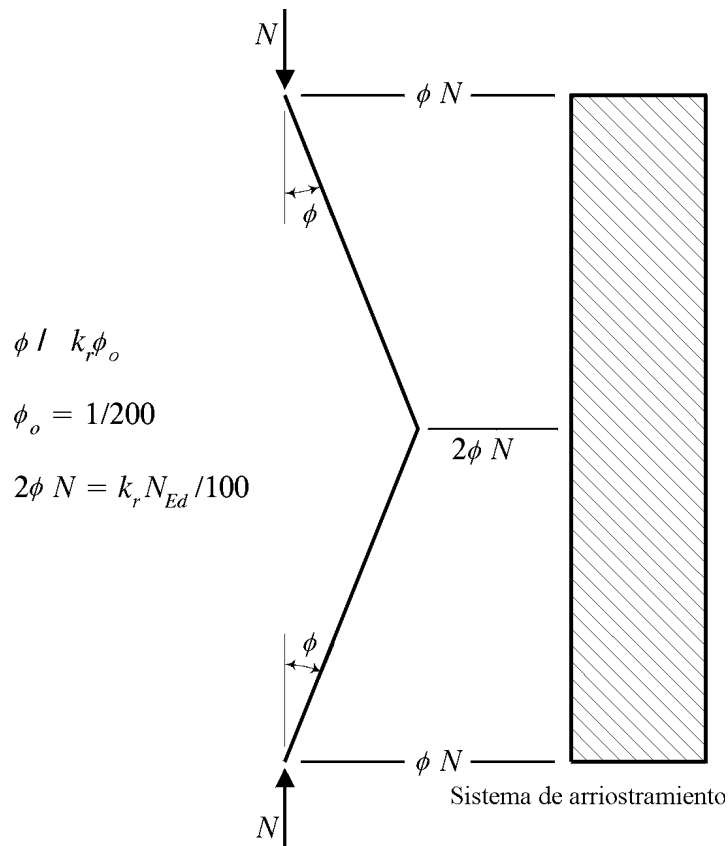


Fig. C.8 – Fuerzas a considerar en el sistema de arriostramiento en los puntos de empalme de piezas comprimidas

C.5 Estabilidad lateral

C.5.1 Rigidez lateral

- (1) Todas las estructuras deberán tener una rigidez suficiente para limitar los desplazamientos laterales. Esto puede conseguirse mediante:
- a) la rigidez lateral de sistemas de arriostramiento, los cuales pueden ser:
 - celosías;
 - pórticos rígidos;
 - muros, núcleos y similares.
 - b) la rigidez lateral de los pórticos, la cual se puede obtener por cualquiera de los siguientes medios:
 - triangulaciones;
 - la rigidez de las uniones;
 - pilares empotrados en su base.

- (2) Las uniones semirrígidas pueden utilizarse siempre que estas posean una rigidez a rotación suficiente para satisfacer las condiciones de estabilidad global para un modelo de pórtico traslacional, véase apartado 6.4.
- (3) Los métodos de cálculo para pórticos traslacionales se dan en el anexo F.

C.5.2 Clasificación como traslacional o intraslacional

- (1) Se clasificará un pórtico como intraslacional cuando su respuesta a las fuerzas horizontales contenidas en su plano es suficientemente pequeña para que sea aceptable despreciar cualquier sollicitación interna adicional debida a los desplazamientos horizontales de sus nudos.
- (2) En caso contrario se considerará el pórtico como traslacional y, en su cálculo, se considerarán los efectos de los desplazamientos horizontales de sus nudos.
- (3) Se clasificará un pórtico como intraslacional, para un determinado estado de cargas, si la relación entre carga elástica y crítica, V_{Ed} / V_{cr} , para ese estado de cargas, satisface la condición:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{cr}} \leq 0,1 \quad (C.5)$$

donde

V_{Ed} es el valor de cálculo de la carga vertical total;

V_{cr} es el valor elástico crítico de la carga vertical considerando un fallo del tipo traslacional.

- (4) Los pórticos planos de edificación con cada viga unida a cada pilar en cada planta (véase figura C.9), se considerarán como intraslacionales para un cierto estado de cargas, si se satisface el siguiente criterio. Cuando se utilice la teoría de primer orden, los desplazamientos horizontales de cada planta producidos por las cargas de cálculo (tanto horizontales como verticales), además de las imperfecciones debidas a un desplazamiento inicial (véase apartado C.4.3), aplicadas como fuerzas horizontales equivalentes, deberán cumplir el criterio:

$$\frac{\delta}{h} \frac{V}{H} \leq 0,1 \quad (C.6)$$

donde

δ es el desplazamiento horizontal en la parte superior de la planta, relativo a la parte inferior de la planta;

h es la altura entre plantas;

H es la reacción horizontal total en la parte inferior de la planta;

V es la reacción vertical total en la parte inferior de la planta.

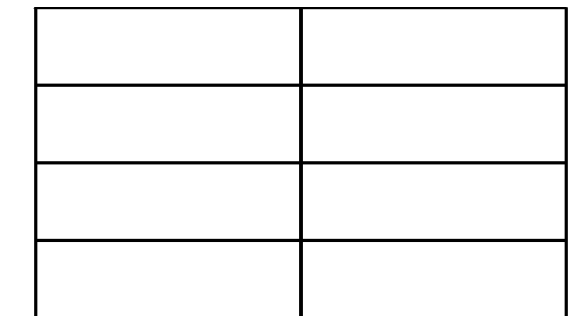


Fig. C.9 – Pórtico de edificación con vigas unidas a cada pilar en cada planta

C.5.3 Clasificación como pórticos arriostrados o no arriostrados

- (1) Un pórtico puede considerarse arriostrado cuando su resistencia al desplazamiento lateral está asegurada por un sistema de arriostramiento de forma que su respuesta a cargas horizontales en su plano es suficientemente rígida para que pueda ser aceptable considerar que todas las cargas horizontales son resistidas por el sistema de arriostramiento.
- (2) Un pórtico puede clasificarse como arriostrado si el sistema de arriostramiento reduce sus desplazamientos horizontales en, al menos, un 80%.
- (3) Un pórtico arriostrado se considerará como intraslacional.
- (4) En un pórtico arriostrado, se considerarán los efectos debidos a las imperfecciones iniciales (véase apartado C.4.3) en el cálculo del sistema de arriostramiento.
- (5) Puede considerarse que las imperfecciones iniciales (o las fuerzas horizontales equivalentes, véase apartado C.4.3), además de cualquier carga horizontal aplicada a un pórtico arriostrado, actúan únicamente sobre el sistema de arriostramiento.
- (6) Los sistemas de arriostramiento se dimensionarán para resistir:
 - cualquier carga horizontal aplicada al pórtico que arriostra;
 - cualquier carga horizontal o vertical aplicada al propio sistema de arriostramiento;
 - los efectos del desplazamiento inicial debido a las imperfecciones (o las fuerzas horizontales equivalentes) del sistema de arriostramiento en sí mismo y de todos los pórticos que arriostra.
- (7) Cuando el sistema de arriostramiento sea un pórtico o un subpórtico, éste puede ser a su vez traslacional o intraslacional, véase apartado C.5.2.
- (8) Cuando se aplique la limitación dada en el apartado C.5.2 (3), a un pórtico o sub-pórtico que actúe como sistema de arriostramiento, se incluirá también la carga vertical total que actúe sobre todos los pórticos que arriostra.
- (9) Cuando se aplique la limitación dada en el apartado C.5.2 (4) a un pórtico o subpórtico que actúe como sistema de arriostramiento, se incluirán también las cargas horizontales y verticales totales que actúen sobre todos los pórticos que arriostra, además de las imperfecciones debidas al desplazamiento inicial aplicadas como fuerzas horizontales equivalentes para el sistema de arriostramiento en sí mismo y para todos los pórticos que arriostra.

ANEXO D (Informativo)**MÉTODOS DE ANÁLISIS GLOBAL****D.1 Generalidades**

- (1) Para la clasificación general de los métodos de cálculo de las estructuras referirse al apartado 5.2.1.
- (2) Dependiendo de si el comportamiento estructural de la pieza es conocido o no, los métodos de análisis se dividen en:
 - a) Métodos en los cuales se opera con la estructura considerada como un ensamble de piezas estructurales simples (vigas, columnas, placas, etc.) cuyos comportamientos estructurales individuales son completamente conocidos.
 - b) Métodos en los que se requiere que la estructura sea discretizada en elementos finitos, en los cuales el comportamiento estructural individual se define mediante las adecuadas idealizaciones numéricas.
- (3) Los métodos de análisis global que desembocan en el punto previo a) son (véase apartado 5.2.1):
 - Análisis elástico lineal
 - Análisis rígido – perfectamente plástico
 - Análisis elástico – perfectamente plástico
 - Análisis rígido – endurecimiento
 - Análisis elástico – endurecimiento
- (4) Todos los métodos de análisis previamente listados están basados en el ensamblaje de piezas simples para las cuales es posible expresar la rigidez nodal o la deformabilidad mediante relaciones concluyentes.
- (5) Las posibles deformaciones plásticas se consideran como concentradas en secciones simples (secciones extremas, secciones de aplicación de carga, cambios de secciones transversales, etc.) en la forma de rótula plástica. En el intervalo entre dos de estas secciones el comportamiento permanece perfectamente elástico. Por esta razón, todos los métodos de análisis previamente listados, excepto el análisis elástico lineal, están referidos en lo que sigue como “métodos de rótulas plásticas”. Para más detalles sobre la aplicación de tales métodos véase el capítulo D.3.
- (6) Los métodos de análisis global que desembocan en el punto previo b) son (véase apartado 5.2.1):
 - Análisis elástico no lineal
 - Análisis inelástico – perfectamente plástico
 - Análisis generalmente inelástico
- (7) Estos métodos tienen en cuenta el comportamiento inelástico real de la estructura, con un grado de precisión que se incrementa en tanto en cuanto se incrementa el grado de discretización. En particular, se puede suponer que generalmente la aproximación inelástica suministra una representación más realista del comportamiento estructural con respecto a la evaluación de tanto la capacidad portante como la demanda de ductilidad (véase capítulo D.2).

- (8) Cualquiera que sea el método de análisis usado, las hipótesis sobre las relaciones fuerzas – desplazamientos generalizados para la sección transversal deben ser consecuentes con las hipótesis sobre la ley entre tensiones y deformaciones unitarias del material. Las posibles combinaciones se muestran en la tabla D.1 para perfiles sometidos a esfuerzos axiales y de flexión:

Tabla D.1
Relaciones entre modelos de comportamiento de materiales y sección

Ley del material (véase apartado 5.2.1)	Relación entre fuerzas y desplazamientos generalizados	
	Perfiles bajo esfuerzo axial ($N-\epsilon$)	Perfiles flectados ($M-\chi$)
Elástica lineal	Elástica lineal	Elástica lineal
Elástica no lineal	Elástica no lineal	Elástica no lineal
Rígida-plástica	Rígida-plástica	Rígida-plástica
Rígida-endurecimiento	Rígida-endurecimiento	Rígida-endurecimiento
Elástica-plástica	Elástica-plástica	Inelástica-plástica Elástica-plástica (para $\alpha_0 < 1,2$)
Elástica-endurecimiento	Elástica-endurecimiento	Generalmente inelástica Elástica-endurecimiento (para $\alpha_0 < 1,2$)
Inelástica-plástica	Inelástica-plástica	Inelástica-plástica
Generalmente inelástica	Generalmente inelástica	Generalmente inelástica

D.2 Verificación de la demanda de ductilidad

- (1) Las reglas suministradas en este apartado se aplican sólo a estructuras hechas con secciones transversales de la Clase 1 (véase anexo H), es decir en estructuras en las que el colapso ocurre debido a alcanzar la deformación última en un determinado número de secciones. Las estructuras con secciones transversales dentro de las clases 2, 3 o 4 no están cubiertas por las siguientes reglas, a menos que específicamente se tenga en cuenta el efecto del fenómeno del pandeo local para la evaluación tanto de la capacidad portante de carga como de la ductilidad disponible.
- (2) La evaluación de la demanda de ductilidad de un esquema estructural sometido a las acciones de cálculo puede ser tanto:
- Rigurosa
 - Convencional
- dependiendo de si se aplica a la estructura un sistema de desplazamientos o de fuerzas.
- (3) Si se aplica un sistema de desplazamientos a la estructura, indiferentemente de su capacidad resistente, la demanda de ductilidad puede ser evaluada rigurosamente como el máximo valor de un parámetro de deformación el cual la estructura debe ser capaz de alcanzar bajo un proceso de carga dado, en el cual un parámetro genérico de desplazamiento se supone como una variable independiente.
- (4) Si la estructura se carga mediante la aplicación de un sistema de fuerzas que se van incrementando hasta el colapso, la demanda de ductilidad debería ser nominalmente infinita. Por consiguiente, debe establecerse una definición convencional; para una estructura genérica en celosía o hecha de vigas, esto puede ser hecho de acuerdo a los siguientes criterios (véase figura D.1):
- La demanda de ductilidad se define como la curvatura requerida en la rótula plástica más desarrollada cuando el mecanismo de colapso es alcanzado. La estructura se supone que muestra una plasticidad concentrada y se resuelve por medio de uno de los métodos de rótulas plásticas listados en el apartado anterior. Si se supone una longitud conveniente para la rótula plástica, entonces la deformación unitaria máxima requerida puede ser evaluada.

- b) La demanda de ductilidad se define como la curvatura requerida en la rótula plástica más desarrollada cuando la idealización de la rótula plástica suministra la misma capacidad de carga que la predicha mediante un método de análisis inelástico general más refinado operando sobre un modelo discretizado. La estructura se supone que muestra una plasticidad concentrada y se resuelve con uno de los métodos de rótulas plásticas listados en el apartado anterior.
- c) La demanda de ductilidad se define a priori como una función de la máxima deformación unitaria elástica de la aleación. La correspondiente capacidad portante de carga puede ser evaluada mediante un análisis de rótulas plásticas usando un valor modificado del límite elástico convencional en orden a tener en cuenta el comportamiento real de la aleación en términos de ductilidad y endurecimiento (véase capítulo D.3).
- (5) Los requisitos de ductilidad mencionados en (4) se ajustarán con las características de deformación de las aleaciones mostradas en el anexo A.

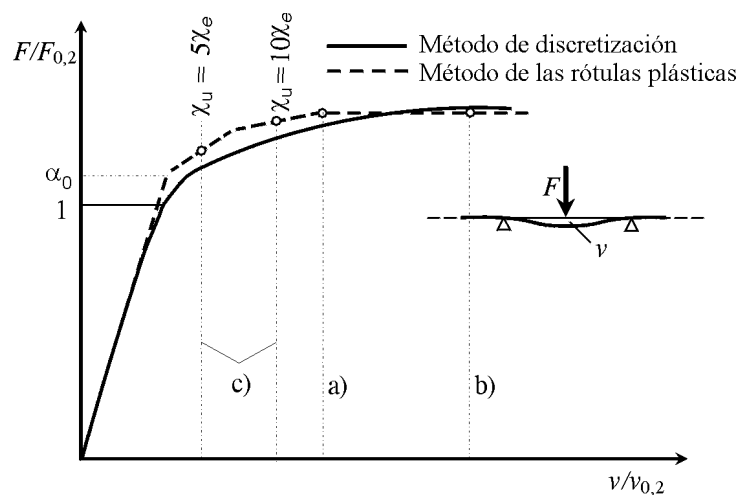


Fig. D.1 – Evaluación convencional de la demanda de ductilidad

D.3 Aplicación del método de las rótulas plásticas

- (1) Los métodos de las rótulas plásticas se pueden aplicar siempre que la ductilidad estructural sea suficiente para permitir el desarrollo completo del mecanismo de colapso plástico.
- (2) Como regla general, cuando se aplica el método de las rótulas plásticas considerando el comportamiento del material como elástico – perfectamente plástico, la demanda de ductilidad del esquema estructural se evaluará de acuerdo a uno de los criterios suministrados en el capítulo D.2(4) a) y b), cualquiera de ellos con tal de que sea el más severo.
- (3) Cuando la aplicación de los anteriores criterios conduzca a valores de ductilidad que sean incompatibles con la capacidad de deformación de la aleación, así como cuando el comportamiento de la aleación endurecida tenga que ser tenido en cuenta, entonces se pueden aplicar los métodos de rótulas plásticas mediante la asunción de la definición de demanda de ductilidad del punto (4) c) del capítulo D.2. En este caso el valor del límite elástico convencional f_y a ser usado en el análisis debe ser corregido. En general, f_y se toma en la forma:

$$f_y = \eta f_{0,2} \quad \text{si} \quad \eta f_{0,2} \leq f_t / \gamma_M$$

$$f_y \leq f_t / \gamma_M \quad \text{si} \quad \eta f_{0,2} > f_t / \gamma_M$$

donde

η es un parámetro numérico dependiente del factor geométrico de forma α_0 así como de la ductilidad convencional disponible del material;

γ_M es el coeficiente parcial de seguridad del material.

- (4) Si se supone para el material un comportamiento elástico–perfectamente plástico o rígido–perfectamente plástico, el método de las rótulas plásticas debe ser aplicado suponiendo para la sección genérica un momento último dado por:

$$M_u = \alpha_0 f_y W = \alpha_0 \eta f_{0,2} W$$

siendo

η coeficiente de corrección previamente definido.

- (5) Si se supone para el material un comportamiento elástico-endurecido ó rígido-endurecido, el método de las rótulas plásticas puede ser aplicado suponiendo para la sección genérica un momento de fluencia convencional, correspondiente al comienzo del endurecimiento por deformación, dado mediante:

$$M_y = \alpha_0 f_y W = \alpha_0 \eta f_{0,2} W$$

siendo

η coeficiente de corrección previamente definido.

El momento último debe ser calculado mediante la expresión

$$M_u = \alpha_\xi f_y W = \alpha_\xi \eta f_{0,2} W$$

siendo

ξ igual a 5 ó 10 dependiendo del rango de ductilidad de la aleación (para la definición de α_5 y α_{10} referirse al anexo H).

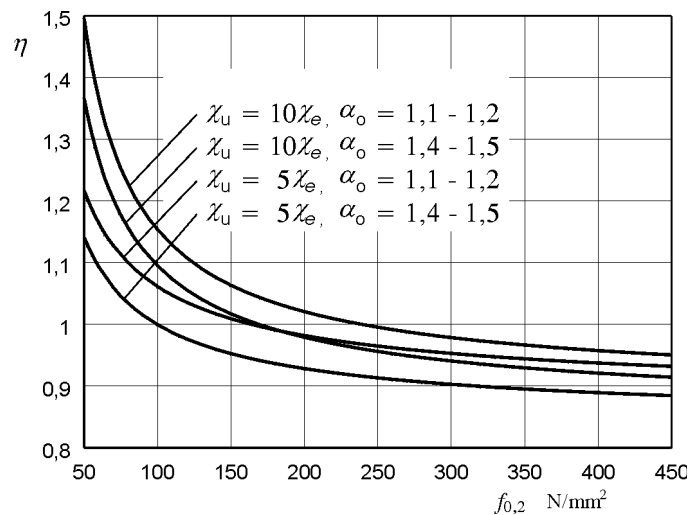


Fig. D.2 – Valor del coeficiente de corrección η

- (6) El coeficiente de corrección η se ajusta de tal forma que el análisis de rótulas plásticas suministra la capacidad portante de cargas real de la estructura, de acuerdo a la ductilidad disponible de la aleación. En general, η se expresa mediante:

$$\eta = \frac{1}{a + b f_{0,2}^c} \quad (f_{0,2} \text{ en } \text{N/mm}^2)$$

Para estructuras hechas de vigas flectadas, los coeficientes a , b y c de la ecuación previa se suministran en la tabla D.2.

- (7) La demanda convencional de ductilidad (véase capítulo D.2 (4) c) de la sección D.2) puede ser definida mediante la curvatura convencional última $\chi_u = 5$ ó $10 \chi_e$ (véase anexo H). La curvatura convencional última deberá ser elegida de acuerdo a las propiedades de ductilidad de la aleación. Esto puede ser hecho de acuerdo con la tabla D.3 (véase también la figura D.3).

Tabla D.2
Valores de los coeficientes a , b y c

Coeficientes de la ley $\eta = 1/[a+b f_{0,2}^c]$	$(\alpha_0 = 1,4 - 1,5)$		$(\alpha_0 = 1,1 - 1,2)$	
	$\chi_u = 5 \chi_e$	$\chi_u = 10 \chi_e$	$\chi_u = 5 \chi_e$	$\chi_u = 10 \chi_e$
a	1,2	1,18	1,15	1,13
b	- 5	- 8,4	- 4,4	- 11
c	- 0,7	- 0,75	- 0,66	- 0,81

- (8) Desde el punto de vista de la ductilidad, se definen dos grupos de aleaciones, dependiendo de si se alcanzan o no los límites de la curvatura convencional antes mencionados:
- aleaciones frágiles: si la deformación última de tracción es suficiente para desarrollar una curvatura última de flexión igual que $\chi_u = 5 \chi_e$.
 - aleaciones dúctiles: si la deformación última de tracción es suficiente para desarrollar una curvatura última de flexión igual o mayor que $\chi_u = 10 \chi_e$.

Los valores de la deformación correspondiente a χ_u igual a $5 \chi_e$ y $10 \chi_e$ se muestran en la tabla D.3 como una función de la tensión de fluencia convencional $f_{0,2}$. Si se suponen valores intermedios de la curvatura última, se aplicará interpolación lineal.

- (9) El coeficiente global de seguridad evaluado mediante los métodos de las rótulas plásticas aplicado con $\eta < 1$ no debe ser mayor que el evaluado mediante un análisis elástico lineal. Si esto ocurre, se deben considerar los resultados del análisis elástico.

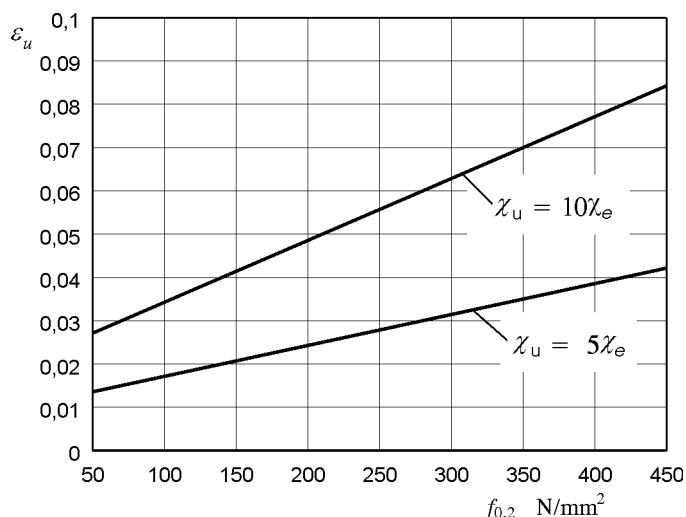


Fig. D.3 – Valores de la deformación unitaria última ϵ_u

Tabla D.2
Valores del coeficiente de corrección η

$f_{0,2}$ (N/mm ²)	$\chi_u = 5 \chi_e$ $\alpha_0 = 1,4 - 1,5$	$\chi_u = 10 \chi_e$ $\alpha_0 = 1,4 - 1,5$	$\chi_u = 5 \chi_e$ $\alpha_0 = 1,1 - 1,2$	$\chi_u = 10 \chi_e$ $\alpha_0 = 1,1 - 1,2$
50	1,14172	1,36725	1,21714	1,49615
60	1,09325	1,26786	1,16437	1,36657
70	1,05945	1,20272	1,12740	1,28451
80	1,03440	1,15652	1,09989	1,22769
90	1,01502	1,12193	1,07852	1,18590
100	0,99953	1,09498	1,06139	1,15380
110	0,98682	1,07335	1,04730	1,12833
120	0,97620	1,05558	1,03549	1,10760
130	0,96717	1,04069	1,02542	1,09038
140	0,95938	1,02801	1,01672	1,07583
150	0,95258	1,01709	1,00912	1,06337
160	0,94660	1,00756	1,00241	1,05256
170	0,94128	0,99917	0,99644	1,04309
180	0,93653	0,99172	0,99109	1,03473
190	0,93224	0,98505	0,98626	1,02728
200	0,92835	0,97905	0,98187	1,02060
210	0,92481	0,97362	0,97787	1,01457
220	0,92157	0,96868	0,97420	1,00911
230	0,91859	0,96415	0,97082	1,00412
240	0,91584	0,96000	0,96770	0,99956
250	0,91329	0,95617	0,96481	0,99537
260	0,91093	0,95263	0,96211	0,99150
270	0,90872	0,94934	0,95960	0,98792
280	0,90666	0,94628	0,95725	0,98459
290	0,90473	0,94342	0,95505	0,98150
300	0,90291	0,94075	0,95297	0,97861
310	0,90121	0,93824	0,95102	0,97590
320	0,89959	0,93588	0,94918	0,97336
330	0,89807	0,93366	0,94743	0,97097
340	0,89663	0,93156	0,94578	0,96872
350	0,89527	0,92958	0,94421	0,96660
360	0,89397	0,92770	0,94272	0,96459
370	0,89274	0,92591	0,94130	0,96269
380	0,89156	0,92422	0,93995	0,96089
390	0,89044	0,92261	0,93866	0,95917
400	0,88937	0,92107	0,93742	0,95754
410	0,88834	0,91961	0,93624	0,95599
420	0,88736	0,91821	0,93511	0,95451
430	0,88643	0,91687	0,93403	0,95309
440	0,88553	0,91558	0,93298	0,95174
450	0,88466	0,91436	0,93198	0,95045

Tabla D.3
Valores de la deformación unitaria última ε_u

$f_{0,2}$ (N/mm ²)	$\chi_u = 5 \chi_e$ $\alpha_0 = 1,4 - 1,5$	$\chi_u = 10 \chi_e$ $\alpha_0 = 1,4 - 1,5$
50	0,01357	0,02714
60	0,01429	0,02857
70	0,01500	0,03000
80	0,01571	0,03143
90	0,01643	0,03286
100	0,01714	0,03429
110	0,01786	0,03571
120	0,01857	0,03714
130	0,01929	0,03857
140	0,02000	0,04000
150	0,02071	0,04143
160	0,02143	0,04286
170	0,02214	0,04429
180	0,02286	0,04571
190	0,02357	0,04714
200	0,02429	0,04857
210	0,02500	0,05000
220	0,02571	0,05143
230	0,02643	0,05286
240	0,02714	0,05429
250	0,02786	0,05571
260	0,02857	0,05714
270	0,02929	0,05857
280	0,03000	0,06000
290	0,03071	0,06143
300	0,03143	0,06286
310	0,03214	0,06429
320	0,03286	0,06571
330	0,03357	0,06714
340	0,03429	0,06857
350	0,03500	0,07000
360	0,03571	0,07143
370	0,03643	0,07286
380	0,03714	0,07429
390	0,03786	0,07571
400	0,03857	0,07714
410	0,03929	0,07857
420	0,04000	0,08000
430	0,04071	0,08143
440	0,04143	0,08286
450	0,04214	0,08429

ANEXO E (Informativo)

MODELOS ANALÍTICOS PARA LAS RELACIONES ENTRE TENSIONES Y DEFORMACIONES UNITARIAS

E.1 Campo de aplicación

- (1) Este Anexo proporciona los modelos para la idealización de las relaciones entre tensiones y deformaciones unitarias de aleaciones de aluminio. Estos modelos están concebidos en orden a tener en cuenta el comportamiento real elástico-endurecimiento de tales materiales.
- (2) Los modelos propuestos tienen diferentes niveles de complejidad de acuerdo con la precisión requerida en los cálculos.

E.2 Modelos analíticos

- (1) La caracterización analítica de la relación entre tensiones (σ) y deformaciones unitarias (ϵ) de una aleación de aluminio se puede dar mediante uno de los siguientes modelos:
 - modelos por tramos;
 - modelos continuos.
- (2) Los parámetros numéricos con los cuales se define cada modelo tienen que ser calibrados en base a las propiedades mecánicas reales del material. Estas se obtendrán mediante el adecuado ensayo de tracción o, como una alternativa, basándose en los valores nominales dados, para cada aleación, en el capítulo 3.

E.2.1 Modelos por tramos

- (1) Estos modelos están basados en la hipótesis de que la ley del material σ - ϵ se describe por medio de una curva multilíneaal, cada rama de la cual representa la zona elástica, inelástica y plástica, con o sin endurecimiento, respectivamente.
- (2) De acuerdo con esta hipótesis, la caracterización de la relación entre tensiones y deformaciones unitarias generalmente puede llevarse a cabo utilizando cualquiera de:
 - modelo bilíneal con o sin endurecimiento (figura E.1);
 - modelo trilíneal con o sin endurecimiento (figura E.2).

E.2.1.1 Modelo bilíneal

- (1) Cuando se usa un modelo bilíneal con endurecimiento (figura E.1a), se pueden suponer las siguientes relaciones:

$$\sigma = E\epsilon \quad \text{para } 0 < \epsilon \leq \epsilon_p$$

$$\sigma = f_p + E_1 (\epsilon - \epsilon_p) \quad \text{para } \epsilon_p < \epsilon \leq \epsilon_{m\acute{a}x.}$$

donde

f_p = límite convencional de proporcionalidad elástica;

ϵ_p = deformación unitaria correspondiente a la tensión f_p ;

$\epsilon_{m\acute{a}x.}$ = deformación unitaria correspondiente a la tensión $f_{m\acute{a}x.}$;

E = módulo de elasticidad;

E_1 = módulo de endurecimiento.

- (2) En el caso de suponer el modelo “Elástico – Perfectamente Plástico” (figura E.1.b), el material permanece perfectamente elástico hasta la tensión del límite elástico f_p . Las deformaciones plásticas sin endurecimiento ($E_1 = 0$) deben ser consideradas hasta $\varepsilon_{máx.}$
- (3) En ausencia de una más precisa evaluación de los parámetros anteriores se pueden adoptar los siguientes valores para ambos modelos de las figuras E.1a) y b):

$$\begin{aligned} f_p &= \text{valor nominal de } f_{0,2} \text{ (véase el capítulo 3);} \\ f_{máx.} &= \text{valor nominal de } f_u \text{ (véase el capítulo 3);} \\ \varepsilon_{máx.} &= 0,5 \varepsilon_u; \\ \varepsilon_u &= \text{valor nominal de la deformación unitaria última (véase el capítulo 3);} \\ \varepsilon_p &= f_{0,2}/E; \\ E_1 &= (f_u - f_{0,2})/(0,5 \varepsilon_u - \varepsilon_p). \end{aligned}$$

E.2.1.2 Modelo trilineal

- (1) Cuando se usa un modelo trilineal con endurecimiento (figura E.2a), se pueden suponer las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \varepsilon && \text{para } 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ \sigma &= f_p + E_1 (\varepsilon - \varepsilon_p) && \text{para } \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_e \\ \sigma &= f_e + E_2 (\varepsilon - \varepsilon_e) && \text{para } \varepsilon_e < \varepsilon \leq \varepsilon_{máx.} \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} f_p &= \text{límite de proporcionalidad;} \\ f_e &= \text{límite de elasticidad;} \\ \varepsilon_p &= \text{deformación unitaria correspondiente a la tensión } f_p; \\ \varepsilon_e &= \text{deformación unitaria correspondiente a la tensión } f_e; \\ \varepsilon_{máx.} &= \text{deformación unitaria correspondiente a la tensión } f_{máx.}; \\ E &= \text{módulo de elasticidad;} \\ E_1 &= \text{primer módulo de endurecimiento;} \\ E_2 &= \text{segundo módulo de endurecimiento.} \end{aligned}$$

- (2) En el caso de suponer el modelo “Perfectamente Plástico” (figura E.2.b), las deformaciones plásticas sin endurecimiento ($E_2 = 0$) deben ser consideradas para el rango de deformaciones unitarias desde ε_e hasta $\varepsilon_{máx.}$
- (3) En ausencia de una evaluación más precisa de los parámetros anteriores se pueden adoptar los siguientes valores para ambos modelos de las figuras E.2a) y b):

$$\begin{aligned} f_e &= \text{límite reducido de elasticidad (tabla E.1);} \\ f_p &= \mu f_e; \\ f_{máx.} &= \text{valor nominal de } f_u \text{ (véase el capítulo 3);} \\ \varepsilon_{máx.} &= 0,5 \varepsilon_u; \\ \varepsilon_u &= \text{valor nominal de la deformación unitaria última (véase el capítulo 3);} \\ E &= \text{módulo de elasticidad reducido } E_r \text{ (tabla E.1);} \\ E_1 &= E_r/m; \\ E_2 &= (f_{máx.} - f_e)/(\varepsilon_{máx.} - \varepsilon_e); \\ \varepsilon_p &= f_p/E_r; \\ \varepsilon_e &= \varepsilon_p + (f_e - f_p)/E_1; \end{aligned}$$

con f_e , E_r , μ y m dados en la tabla E.1.

Tabla E.1
Valor de f_e , E_r , μ y m en los modelos trilineales

Aleaciones de aluminio	f_e N/mm ²	E_r N/mm ²	μ	m
AlZnMg 1 F36	290	68000	0,85	4,0
AlMgSi 1 F32	270	68000	0,85	4,0
AlMgSi 1 F28	210	65000	0,80	4,0
AlMgSi 0,5 F22	170	65000	0,85	4,5
EN AW 5083	230	65000	0,80	5,0
AlMg4,5 Mn w/F28 tubos + perfiles	150	65000	0,85	5,0
AlMgMnF23 EN AW 5454	170	65000	0,85	4,5
AlMgMnF20	110	60000	0,80	5,0
AlMgMn w/F18 EN AW 5754	80	55000	0,75	5,0

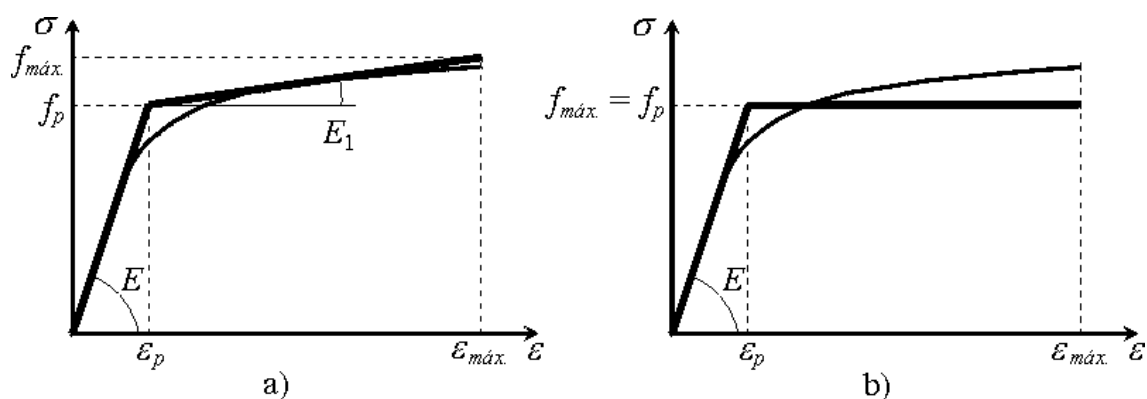


Fig. E.1 – Modelos bilineales

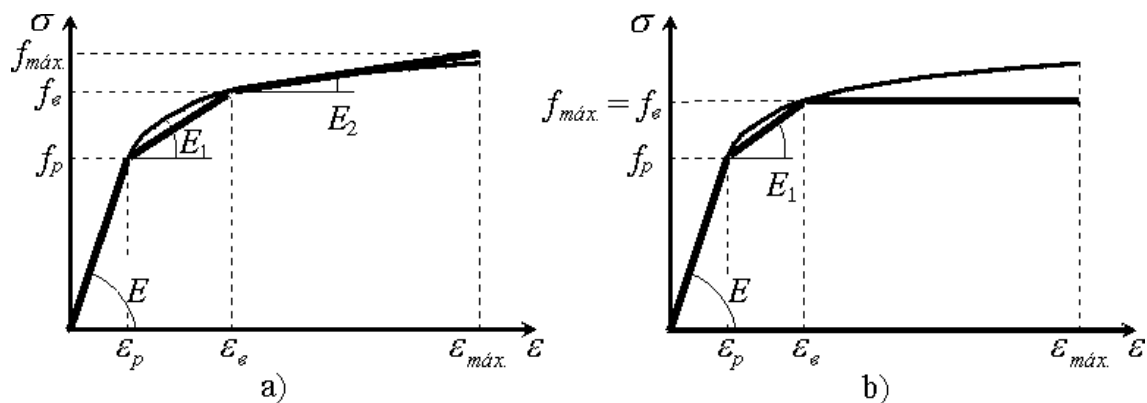


Figura E.2 – Modelos trilineales

E.2.2 Modelos continuos

- (1) Estos modelos se basan en la hipótesis de que la ley σ - ε del material está descrita por medio de una relación continua representando, respectivamente, la región elástica, inelástica y plástica, con o sin endurecimiento.
- (2) De acuerdo con esta hipótesis, la caracterización de la relación tensión-deformación unitaria puede generalmente ser llevada a cabo utilizando cualquiera de:
 - Modelos continuos en la forma $\sigma = \sigma(\varepsilon)$
 - Modelos continuos en la forma $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$

E.2.2.1 Modelos continuos en la forma $\sigma = \sigma(\varepsilon)$

- (1) Cuando se supone una ley $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, es conveniente identificar tres regiones diferentes las cuales se pueden definir de la siguiente forma (véase figura E.3a):
 - Región 1 comportamiento elástico
 - Región 2 comportamiento inelástico
 - Región 3 comportamiento de endurecimiento por deformación
- (2) En cada región el comportamiento del material está representado por medio de diferentes relaciones entre tensiones y deformaciones unitarias, las cuales deben asegurar la continuidad en sus puntos límites. De acuerdo a esta hipótesis, la caracterización de la relación entre tensiones y deformaciones unitarias se puede expresar como sigue (figuras E.3b):

Región 1 para $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_p$ con $\varepsilon_p = 0,5 \bar{\varepsilon}_l$ y $\bar{\varepsilon}_l = f_l / E$

$$\sigma = E \varepsilon$$

Región 2 para $\varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_l$ con $\varepsilon_l = 1,5 \bar{\varepsilon}_l$ y $\bar{\varepsilon}_l = f_e / E$

$$\sigma = f_e \left[-0,2 + 1,85 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_l} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_l} \right)^2 + 0,2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_l} \right)^3 \right]$$

Región 3 para $\varepsilon_l < \varepsilon \leq \varepsilon_{máx.}$

$$\sigma = f_e \left[\frac{f_{máx.}}{f_e} - 1,5 \left(\frac{f_{máx.}}{f_e} - 1 \right) \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} \right]$$

donde

- f_e = límite elástico convencional;
- $f_{máx.}$ = tensión de tracción en el punto superior de la curva $\sigma - \varepsilon$;
- ε_e = deformación unitaria correspondiente a la tensión f_e ;
- $\varepsilon_{máx.}$ = deformación unitaria correspondiente a la tensión $f_{máx.}$;
- E = módulo de elasticidad.

- (3) En ausencia de una evaluación más precisa de los parámetros anteriores, se pueden adoptar los siguientes valores:

f_e	=	valor nominal de $f_{0,2}$ (véase el capítulo 3);
$f_{máx.}$	=	valor nominal de f_u (véase el capítulo 3);
$\varepsilon_{máx.}$	=	$0,5 \varepsilon_u$;
ε_u	=	valor nominal de la deformación unitaria última (véase el capítulo 3);
E	=	valor nominal del módulo de elasticidad (véase el capítulo 3).

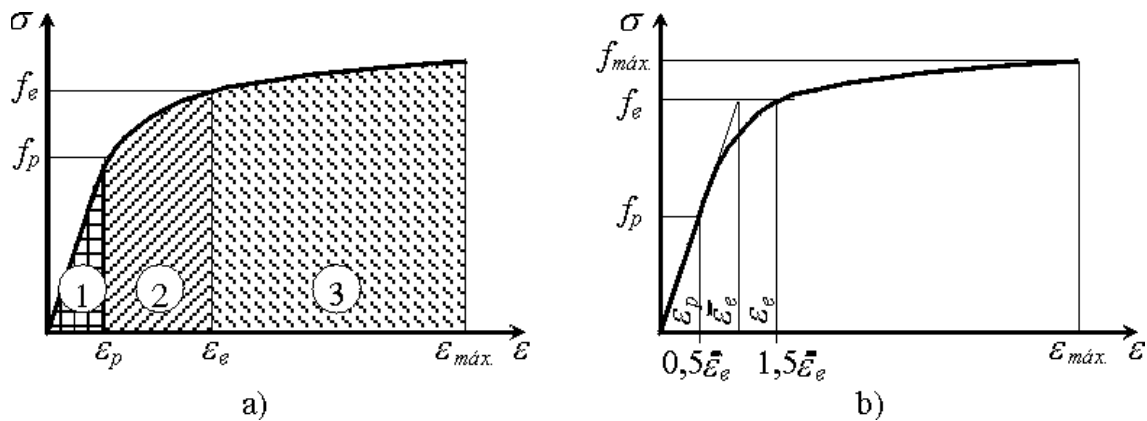


Fig. E.3 – Modelos continuos en la forma $\sigma = \sigma(\varepsilon)$

E.2.2.2 Modelos continuos en la forma $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$

- (1) Para materiales con leyes del tipo curvo, como las aleaciones de aluminio, se puede aplicar el modelo de Ramberg-Osgood para describir la relación entre tensiones y deformaciones unitarias en la forma $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$. Tal modelo puede ser expresado en una forma general como sigue (véase figura E.4a):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{o,e} \left(\frac{\sigma}{f_e} \right)^n$$

donde

f_e	=	límite elástico convencional;
$\varepsilon_{o,e}$	=	deformación unitaria residual correspondiente a la tensión f_e ;
n	=	exponente que caracteriza el grado de endurecimiento de la curva.

- (2) En orden a evaluar el exponente n , es precisa la elección de una segunda tensión de referencia f_x , adicional a la del límite elástico convencional f_e . Suponiendo (figura E.4b):

f_x	=	segunda tensión de referencia
$\varepsilon_{o,x}$	=	deformación unitaria residual correspondiente a la tensión f_x

el exponente n se expresa mediante:

$$n = \frac{\log (\varepsilon_{o,e} / \varepsilon_{o,x})}{\log (f_e / f_x)}$$

- (3) Como límite elástico convencional, se puede adoptar la tensión del límite elástico práctico evaluado por medio del método de la deformación remanente del 0,2%, es decir:

$$f_e = f_{0,2}$$

$$\varepsilon_{o,e} = 0,002$$

y el modelo de ecuación conduce a:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_{0,2}} \right)^n \quad \text{y} \quad n = \frac{\log (0,002 / \varepsilon_{o,x})}{\log (f_{0,2} / f_x)}$$

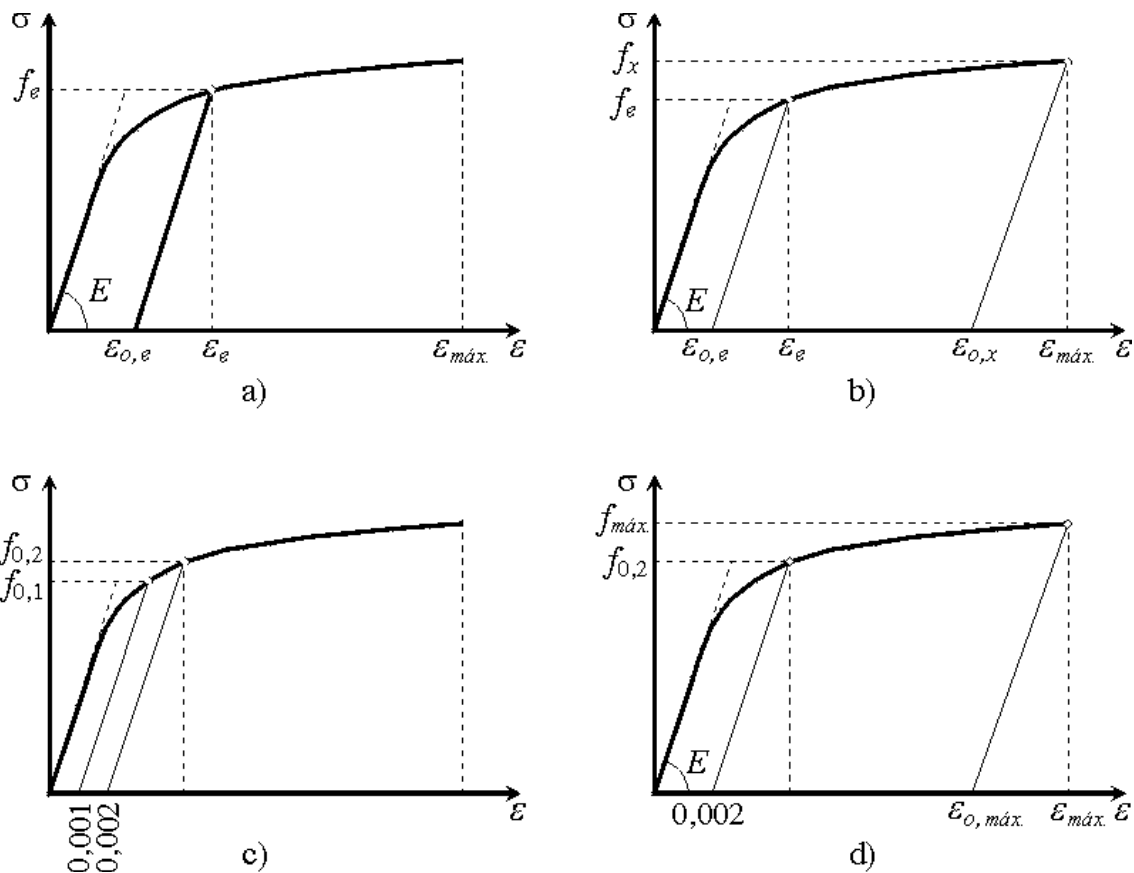


Fig. E.4 – Modelos continuos en la forma $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$

- (4) La elección del segundo punto de referencia ($f_x - \varepsilon_{o,x}$) se basará en el rango de deformaciones unitarias correspondiente al fenómeno bajo investigación. Se deben considerar los siguientes casos:

- a) si el análisis concierne al rango de las deformaciones elásticas, se puede adoptar el límite elástico práctico evaluado por medio del método de la deformación remanente del 0,1% como el segundo punto de referencia (véase figura E.4c), dando:

$$f_x = f_{0,1}$$

$$\varepsilon_{o,x} = 0,001$$

y, por consiguiente

$$n = \frac{\log 2}{\log f_{0,2} / f_{0,1}}$$

- b) si el análisis concierne al rango de deformaciones plásticas, la tensión de tracción en el punto superior de la curva σ - ϵ se puede suponer como el segundo punto de referencia (véase figura E.4d), dando:

$$f_x = f_{m\acute{a}x.}$$

$$\epsilon_{o,x} = \epsilon_{o,m\acute{a}x.} = \text{deformación unitaria residual correspondiente a la tensión } f_{m\acute{a}x.}$$

y, por consiguiente

$$n = \frac{\log (0,002 / \epsilon_{o,m\acute{a}x.})}{\log (f_{0,2} / f_{m\acute{a}x.})}$$

- (5) En ausencia de una evaluación más precisa de los parámetros anteriores, se pueden adoptar los siguientes valores:

- a) rango elástico ($f_x = f_{0,1}$)

$$n = \frac{\log 2}{\log (1 + k \chi)}$$

con:

$$k = 0,28 \text{ (mm}^2\text{/N)}$$

$$\chi = \frac{(f_u - f_{0,2})}{10 \epsilon_u} \frac{F_u}{f_{0,2}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$f_{0,2}$ = valor nominal del límite elástico práctico (véase el capítulo 3);

f_u = valor nominal de la resistencia última (véase el capítulo 3);

ϵ_u = valor nominal de la deformación unitaria última (véase el capítulo 3);

E = valor nominal del módulo de elasticidad (véase el capítulo 3).

- b) rango plástico ($f_x = f_{m\acute{a}x.}$)

$$n = \frac{\log (0,002 / \epsilon_{o,m\acute{a}x.})}{\log (f_{0,2} / f_{m\acute{a}x.})}$$

con:

$f_{0,2}$ = valor nominal del límite elástico práctico (véase el capítulo 3);

$f_{m\acute{a}x.}$ = valor nominal de f_u (véase el capítulo 3);

$\epsilon_{o,m\acute{a}x.}$ = $0,5 \epsilon_u - f_u / E$;

ϵ_u = valor nominal de la deformación unitaria última (véase el capítulo 3);

E = valor nominal del módulo de elasticidad (véase el capítulo 3).

ANEXO F (Informativo)**ESTABILIDAD DE PÓRTICOS****F.1 Generalidades**

- (1) Todos los pórticos deben tener una resistencia adecuada al fallo en un modo traslacional. Sin embargo, cuando el pórtico demuestra ser un pórtico intraslacional, véase apartado 5.2.5.2 no se requiere verificación adicional del tipo traslacional.
- (2) Todos los pórticos, incluyendo los pórticos traslacionales, también deben ser comprobados respecto a la adecuada resistencia respecto a modos de fallo intraslacionales.
- (3) Una comprobación debe incluir la posibilidad de modos de tipos de fallo locales en la altura de los pisos
- (4) Los pórticos con cubiertas inclinadas no trianguladas también deben ser comprobados para colapso mediante pandeo.
- (5) El uso del análisis global plástico con rótulas plásticas localizadas en las columnas debe estar limitado a los casos en los que se puede demostrar que las columnas son capaces de formar rótulas con suficiente capacidad de rotación, véase capítulo F.4.

F.2 Análisis elástico de pórticos traslacionales

- (1) Cuando se usa el análisis global elástico (lineal o no lineal), los efectos de segundo orden en el modo traslacional deben ser incluidos, bien sea directamente mediante el uso de análisis elástico de segundo orden, o bien sea indirectamente mediante el uso de uno de las siguientes alternativas:
 - a) Análisis elástico de primer orden, con momentos de traslación amplificados;
 - b) Análisis elástico de primer orden, con longitudes de pandeo del modo traslacional.
- (2) Cuando se usa un análisis global elástico de segundo orden, para el cálculo de piezas se pueden usar las longitudes de pandeo en el plano para el modo intraslacional.
- (3) En los métodos de amplificación de momentos de traslación, los momentos de traslación obtenidos mediante un análisis elástico de primer orden deben ser incrementados multiplicándolos por la relación:

$$\frac{1}{1 - V_{Ed}/V_{cr}}$$

donde

V_{Ed} es el valor de cálculo de la carga vertical total;

V_{cr} es el valor crítico elástico para el fallo en modo traslacional.

- (4) El método de amplificación de momentos por traslación no debe ser usado cuando la relación entre la carga elástica y la crítica V_{Ed}/V_{cr} es más de 0,25.
- (5) Los momentos traslacionales están asociados con traslaciones horizontales de la parte superior de la planta respecto a la parte inferior de la misma. Esto se produce con cargas horizontales y puede también producirse con carga vertical si la estructura o la carga son asimétricas.

- (6) Como una alternativa para determinar directamente V_{Ed}/V_{cr} en pórticos del tipo vigas-columnas, como los descritos en el apartado 5.2.5.2(4), se puede usar la siguiente aproximación:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{cr}} = \frac{\delta}{h} \frac{V}{H}$$

donde

δ , h , H y V están definidas en el apartado 5.2.5.2(4).

- (7) Cuando se emplea el método de amplificación de momentos por traslación, se pueden usar las longitudes de pandeo en el plano correspondientes a un modo intraslacional para los cálculos de las piezas.
- (8) Cuando se usa para el cálculo de la columna el análisis elástico de primer orden, con longitudes de pandeo en el plano correspondientes al modo traslacional, los momentos de traslación en las vigas y en las uniones vigas-columnas deben ser amplificados por el coeficiente 1,2, a menos que un valor menor se muestre adecuado mediante análisis.

F.3 Análisis plástico de pórticos traslacionales

- (1) Cuando se usa el análisis global plástico (con o sin endurecimiento), hay que tener en cuenta los efectos de segundo orden en el modo traslacional.
- (2) Esto se hará generalmente mediante el uso de un análisis de segundo orden elástico-plástico.
- (3) Sin embargo, como alternativa, se puede adoptar el análisis rígido-plástico teniendo en cuenta los efectos de segundo orden, como los dados posteriormente en (4), en los siguientes casos:
- a) pórticos de una o dos plantas:
 - no se producen localizaciones de rótulas plásticas en las columnas ó
 - las columnas satisfacen los requisitos dados en el capítulo F.4.
 - b) pórticos con empotramientos en las bases, en los cuales el modo de fallo traslacional implica localizaciones de rótulas plásticas en las columnas sólo en las bases empotradas y el cálculo está basado en un mecanismo en el cual la columna está calculada para permanecer elástica.
- (4) En los casos dados en (3), V_{Ed}/V_{cr} no debe exceder de 0,20 y todos los esfuerzos internos deben ser amplificados por la relación dada en el capítulo F.2(3).
- (5) Las longitudes de pandeo en el plano para un modo intraslacional pueden ser usadas en el cálculo de la pieza. Estas se determinarán teniendo en cuenta los efectos de las rótulas plásticas.

F.4 Requisitos en las columnas para análisis plástico (con o sin endurecimiento)

- (1) En los pórticos es necesario asegurar que, cuando se precise que se formen rótulas plásticas en las piezas que están también comprimidas, esté disponible la adecuada capacidad de rotación
- (2) Este criterio se puede suponer que se satisface cuando se usa el análisis global plástico, siempre que las secciones transversales satisfagan los requisitos dados en el Anexo D.

- (3) Cuando ocurre que se localizan rótulas plásticas en las columnas de los pórticos, calculados usando un análisis de primer orden rígido-plástico, las columnas deben cumplir lo siguiente:

– en pórticos arriostrados:

$$\bar{\lambda} \leq 0,40 \sqrt{\frac{Af_{0,2}}{N_{Ed}}}$$

– en pórticos no arriostrados:

$$\bar{\lambda} \leq 0,32 \sqrt{\frac{Af_{0,2}}{N_{Ed}}}$$

donde

$\bar{\lambda}$ es la esbeltez adimensional en el plano calculada usando una longitud de pandeo igual a la longitud del sistema.

- (4) En pórticos calculados usando análisis global de primer orden rígido-plástico, las columnas que contengan localizaciones de rótulas plásticas también deben ser comprobadas frente a resistencia a pandeo en el plano, utilizando longitudes de pandeo iguales a las longitudes del sistema.
- (5) Excepto para el método perfilado en el capítulo F.3 (3) b), el análisis global de primer orden rígido-plástico no deberá usarse para pórticos no arriostrados con más de dos plantas.

ANEXO G (Informativo)

COMPORTAMIENTO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES MÁS ALLÁ DEL LÍMITE ELÁSTICO

G.1 Generalidades

- (1) Este anexo proporciona especificaciones para la estimación del comportamiento post-elástico de las secciones transversales de acuerdo con las propiedades mecánicas del material y las disposiciones geométricas de la sección.
- (2) El comportamiento real de las secciones transversales más allá del límite elástico deberá ser considerado en cualquier tipo de análisis inelástico, incluyendo el simple análisis elástico cuando se tienen en cuenta redistribuciones de los esfuerzos internos (véase apartado 5.2.1). Adicionalmente, la adecuada limitación de la resistencia elástica deberá ser considerada también en el análisis elástico cuando se usan perfiles esbeltos.
- (3) La elección de la relación entre fuerzas y desplazamientos generalizados para la sección transversal debe ser consistente con las hipótesis en la ley del material y con las disposiciones geométricas de la sección en sí misma (véase capítulo G.5).
- (4) La veracidad de las hipótesis en el comportamiento de la sección transversal pueden ser comprobadas basándose en experimentación directa.

G.2 Definición de los estados límites de la sección transversal

- (1) El comportamiento de la sección transversal y la correspondiente idealización a usar en el análisis estructural deben estar referidos a la capacidad de alcanzar los estados límites posteriormente citados, cada uno de ellos corresponde a una hipótesis particular en el estado tensional actuante en la sección.
- (2) Referente al comportamiento global de una sección transversal, independientemente de las acciones internas consideradas (esfuerzo axial, momento flector o esfuerzo cortante), se pueden definir los siguientes estados límites:
 - estado límite de pandeo elástico
 - estado límite elástico
 - estado límite plástico
 - estado límite de colapso
- (3) El estado límite de pandeo elástico se refiere a la resistencia correspondiente al comienzo de fenómenos locales de inestabilidad elástica en las partes comprimidas de la sección.
- (4) El estado límite elástico se refiere a la resistencia correspondiente a alcanzar el límite elástico convencional del material $f_{0,2}$ en las partes más tensionadas de la sección.
- (5) El estado límite plástico se refiere a la resistencia de la sección, evaluada suponiendo un comportamiento perfectamente plástico para el material con un valor límite igual al límite elástico convencional $f_{0,2}$, sin considerar el efecto del endurecimiento.
- (6) El estado límite de colapso se refiere a la resistencia última real de la sección, evaluada suponiendo una distribución interna de tensiones teniendo en cuenta el comportamiento real de endurecimiento del material. Dado que, bajo esta hipótesis, la curva de fuerza–desplazamiento generalizado generalmente tiene un incremento, la resistencia de colapso puede estar referida a un límite dado del desplazamiento generalizado (véase capítulo G.5).

G.3 Clasificación de las secciones transversales en función de los estados límites

- (1) Las secciones transversales se pueden clasificar en función de su capacidad de alcanzar los estados límites anteriormente definidos. Tal clasificación es complementaria a la presentada en el apartado 5.3.2 y se puede adoptar cuando deben ser especificadas las capacidades de la sección para lograr entrar en el rango plástico. En tal sentido, referente a la relación de una fuerza generalizada F respecto a un desplazamiento D , las secciones transversales se pueden dividir como sigue (véase figura G.1):

- Secciones dúctiles (Clase 1)
- Secciones compactas (Clase 2)
- Secciones semicompactas (Clase 3)
- Secciones esbeltas (Clase 4)

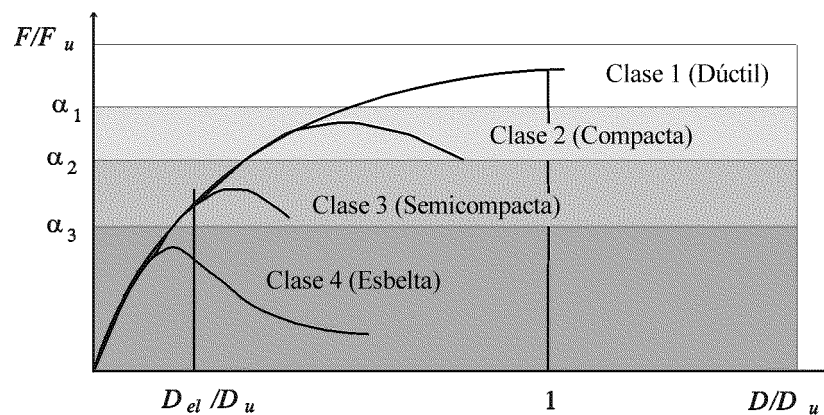


Fig. G.1 – Clasificación de las secciones transversales

- (2) Las secciones dúctiles (Clase 1) desarrollan la resistencia de colapso, tal como se define en el apartado (6) del capítulo G.2 sin ningún problema de inestabilidad local. La completa explotación de las propiedades de endurecimiento del material se tiene en cuenta hasta que se alcanza el valor último de la deformación, dependiente del tipo de aleación.
- (3) Las secciones compactas (Clase 2) son capaces de desarrollar la resistencia límite plástica, tal como se define en el apartado (5) del capítulo G.2. La completa explotación de las propiedades de endurecimiento del material está impedida por el comienzo de los fenómenos de inestabilidad plástica.
- (4) Las secciones semicompactas (Clase 3) son capaces de desarrollar sólo la resistencia límite elástica, tal como se define en el apartado (4) del capítulo G.2, sin entrar dentro del rango inelástico debido a los fenómenos de inestabilidad. Sólo se permiten pequeñas deformaciones plásticas dentro de la sección, cuyo comportamiento permanece esencialmente frágil.
- (5) Tanto el comportamiento en servicio como último de las secciones esbeltas (Clase 4) están gobernados por la ocurrencia de fenómenos de pandeos locales, lo cual causa que la resistencia última de la sección transversal se determine mediante el estado límite de pandeo elástico, tal como se define en el apartado (3) del capítulo G.2. No se permiten deformaciones plásticas dentro de la sección, cuyo comportamiento es remarcadamente frágil.

G.4 Evaluación del esfuerzo axial último

- (1) La capacidad portante de carga de las secciones transversales sometidas a esfuerzos axiales se puede evaluar, referida a los estados límites anteriormente mencionados, por medio de las siguientes reglas prácticas.

- (2) El valor del esfuerzo axial para un estado límite dado se puede expresar mediante la fórmula generalizada:

$$N = \alpha_{N,j} A f_d$$

donde

f_d el valor de cálculo de la resistencia;

A el área de la sección transversal neta;

$\alpha_{N,j}$ un coeficiente corrector, dado en la tabla G.1, que depende del estado límite supuesto.

Tabla G.1
Esfuerzo axial último

Esfuerzo axial	Estado límite	Clase de sección	Coefficiente de corrección
N_u	Colapso	Clase 1	$\alpha_{N,1} = f_t / f_d$
N_{pl}	Plástico	Clase 2	$\alpha_{N,2} = 1$
N_{el}	Elástico	Clase 3	$\alpha_{N,3} = 1$
N_{red}	Pandeo elástico	Clase 4	$\alpha_{N,4} = A_{eff}/A$

donde

A_{eff} es el área eficaz de la sección transversal, evaluada teniendo en cuenta los fenómenos de pandeo local (véase apartado 5.4).

- (3) La capacidad portante última de carga de una sección sometida a esfuerzos axiales, evaluada de acuerdo con el procedimiento anterior, no incluye la totalidad de los fenómenos de inestabilidad, los cuales se deben evaluar de acuerdo al apartado....
- (4) Cuando están implicadas secciones soldadas, se debe usar un valor reducido A_{red} del área neta de la sección transversal, evaluada teniendo en cuenta el HAZ.

G.5 Evaluación del momento flector último

- (1) La capacidad portante de carga de las secciones transversales sometidas a momentos flectores se puede evaluar, referida a los estados límites anteriormente mencionados, por medio de las siguientes reglas prácticas
- (2) El valor del momento flector para un estado límite dado se puede expresar mediante la fórmula generalizada:

$$M = \alpha_{M,j} W f_d$$

donde

f_d el valor de cálculo de la resistencia;

W el módulo resistente de la sección;

$\alpha_{M,j}$ un coeficiente corrector, dado en la tabla G.2, que depende del estado límite supuesto.

Tabla G.2
Momento flector último

Momento flector	Estado límite	Clase de sección	Coefficiente de corrección
M_u	Colapso	Clase 1	$\alpha_{M,1} = \alpha_5 = 5 - (3,89 + 0,00190n) / \alpha_0^{[0,270+0,0014n]}$ $\alpha_{M,1} = \alpha_{10} = \alpha_0^{[0,21 \log(1000n)]} 10^{[7,96 \times 10^{-2} - 8,09 \times 10^{-2} \log(n/10)]}$ (dependiente de la aleación – véase capítulo G.6)
M_{pl}	Plástico	Clase 2	$\alpha_{M,2} = \alpha_0 = Z/W$
M_{el}	Elástico	Clase 3	$\alpha_{M,3} = 1$
M_{red}	Pandeo elástico	Clase 4	$\alpha_{M,4} = W_{eff}/W$ (véase apartado 5.3.5)

donde

$n = f_{0,2}$ (en daNmm⁻²) es el exponente de la ley de Ramberg-Osgood que representa el comportamiento del material (véase anexo E);

α_5 y α_{10} son los factores de forma generalizados de la sección correspondientes, respectivamente, a los valores últimos de curvatura $\chi_u = 5\chi_{el}$ y $10\chi_{el}$, siendo χ_{el} la curvatura del límite elástico;

α_0 es el factor de forma geométrico;

Z es el módulo plástico resistente de la sección;

W_{red} es el módulo resistente de la sección evaluado teniendo en cuenta los fenómenos de pandeo local (véase apartado 5.4).

- (3) Cuando están implicadas secciones soldadas, se deben usar valores reducidos de W_{red} y Z_{red} de los módulos resistentes de la sección y del módulo plástico, evaluados teniendo en cuenta el HAZ
- (4) La evaluación del coeficiente de corrección $\alpha_{M,j}$ para un perfil soldado de la clase 1 puede ser hecha por medio de la siguiente fórmula:

$$\alpha_{M,red} = \psi \left(\frac{Z_{red}}{W_{red}} \right)$$

donde

$\psi = \alpha_{M,1}/\alpha_{M,2}$, siendo $\alpha_{M,1}$ y $\alpha_{M,2}$ los coeficientes de corrección para perfiles no soldados de las clases 1 y 2, respectivamente.

G.6 Predicción de la capacidad de rotación

- (1) Las disposiciones suministradas posteriormente se aplican sólo a secciones dúctiles (Clase 1) en orden a definir su capacidad nominal última de soportar carga. Sin embargo, también se pueden considerar válidas para la evaluación de la resistencia última de secciones compactas o semicompactas, siempre que no ocurra un pandeo prematuro.

- (2) Cuando no se pueden asegurar las propiedades de ductilidad o cuando no se pueden llevar a cabo ensayos específicos en el material, los valores últimos de M_u se deben referir a una convencional curvatura última de flexión dada por:

$$\chi_u = \xi \chi_{el}$$

donde

ξ es un coeficiente de ductilidad que depende del tipo de aleación y χ_{el} convencionalmente se supone igual a $\chi_{0,2}$, el cual corresponde a alcanzar el límite elástico práctico $f_{0,2}$ en las fibras más tensionadas.

- (3) Desde el punto de vista de la ductilidad las aleaciones comunes se pueden subdividir en dos grupos (véase también anexo D):
- aleaciones frágiles, que tienen $4\% \leq \varepsilon_u \leq 8\%$, para las cuales se puede suponer $\xi = 5$;
 - aleaciones dúctiles, que tienen $\varepsilon_u \geq 8\%$, para las cuales se puede suponer $\xi = 10$.
- (4) La evaluación del comportamiento elástico y postelástico de la sección transversal se puede hacer mediante la relación entre momentos y curvaturas, escrita en la forma de Ramberg-Osgood:

$$\frac{\chi}{\chi_{0,2}} = \frac{M}{M_{0,2}} + k \left[\frac{M}{M_{0,2}} \right]^m$$

donde

- $M_{0,2}$ y $\chi_{0,2}$ son los valores en el límite elástico convencional correspondientes a alcanzar la tensión del límite elástico $f_{0,2}$.
- m y k son parámetros numéricos, los cuales para secciones en flexión pura vienen dados por:

$$m = \frac{\log [(10 - \alpha_{10}) / (5 - \alpha_5)]}{\log (\alpha_{10} / \alpha_5)}$$

$$k = \frac{5 - \alpha_5}{\alpha_5 m} = \frac{10 - \alpha_{10}}{\alpha_{10} m}$$

- α_5 y α_{10} son los factores de forma generalizados correspondientes a valores de la curvatura iguales a 5 y 10 veces la curvatura elástica, respectivamente.

- (5) La parte estable de la capacidad de rotación R se define como la relación entre la rotación plástica en el estado límite de colapso $\Theta_p = \Theta_u - \Theta_{el}$ y la rotación en el límite elástico Θ_{el} (figura G.2):

$$R = \frac{\Theta_p}{\Theta_{el}} = \frac{\Theta_u - \Theta_{el}}{\Theta_{el}} = \frac{\Theta_u}{\Theta_{el}} - 1$$

donde

Θ_u es la rotación plástica máxima correspondiente a la curvatura última χ_u .

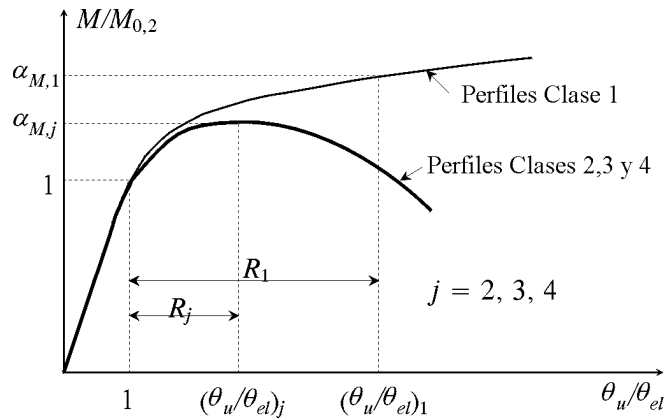


Fig. G.2 – Definición de capacidad de rotación

- (6) La capacidad de rotación R se puede calcular mediante la siguiente fórmula aproximada:

$$R = \alpha_{M,j} \left(1 + 2 \frac{k \alpha_{M,j}^{m-1}}{m + 1} \right) - 1$$

con m y k definidos anteriormente.

El valor de $\alpha_{M,j}$ se da en la tabla G.2 para las diferentes clases de comportamientos.

- (7) Cuando el exponente del material n es conocido (véase anexo E), se puede hacer una evaluación aproximada de α_5 y α_{10} mediante las fórmulas:

$$\alpha_5 = 5 - (3,89 + 0,00190 n) / \alpha_0^{(0,270 + 0,0014 n)}$$

$$\alpha_{10} = \alpha_0^{[0,21 \log (1000n)]} \times 10^{[7,96 \times 10^{-2} - 8,09 \times 10^{-2} \log (n/10)]}$$

$\alpha_0 = Z/W$ siendo el coeficiente geométrico de forma.

En ausencia de evaluaciones más refinadas, se puede suponer como valor de $n = f_{0,2}$ (en daNmm^{-2}).

ANEXO H (Informativo)

PANDEO LATERAL CON TORSIÓN

H.1 Momento crítico elástico y esbeltez

H.1.1 Bases

- (1) El momento crítico elástico para pandeo lateral con torsión de una viga de sección transversal simétrica uniforme con alas iguales, bajo condiciones estándar de coacción en cada extremo, cargada a través de su centro de cortadura y sometida a un momento uniforme viene dada por:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z}}$$

donde

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

I_t es la inercia a la torsión;

I_w es el módulo de alabeo;

I_z es el momento de inercia del área respecto al eje menor (débil);

L es la longitud de la viga entre puntos que tienen coacción lateral.

- (2) Las condiciones estándar de restricción en cada extremo son:
- restringido frente a movimiento lateral;
 - restringido frente a rotación respecto al eje longitudinal;
 - libre de rotar en el plano.

H.1.2 Fórmula general para secciones transversales simétricas respecto al eje débil

- (1) En el caso de una viga de sección transversal uniforme que sea simétrica respecto al eje menor (débil), para flexión respecto al eje mayor (fuerte) el momento crítico elástico para pandeo lateral con torsión viene dado por la fórmula general:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{0,5} - [C_2 z_g - C_3 z_j] \right\}$$

donde

C_1 , C_2 y C_3 son coeficientes dependientes de las cargas y de las condiciones de coacción de los extremos;

k y k_w son los coeficientes de longitud eficaz;

$$z_g = z_a - z_s;$$

$$z_j = z_s - 0,5 \int_A (y^2 + z^2) z dA / I_y;$$

z_a es la coordenada del punto de aplicación de la carga;

z_s es la coordenada del centro de cortadura.

NOTA – Véanse los apartados H.1.2 (7) y (8) para la convención de signos y el apartado H.1.4 (2) para aproximaciones para z_j .

- (2) Los coeficientes de longitud eficaz k y k_w varían desde 0,5 para extremos completamente restringidos a 1,0 para extremos no restringidos, con 0,7 para un extremo empotrado y el otro libre.
- (3) El coeficiente k se refiere a la rotación del extremo en el plano. Es análogo a la relación ℓ/L para un elemento comprimido.
- (4) El coeficiente k_w se refiere al alabeo del extremo. A menos que se adopten medidas especiales para fijar el alabeo, k_w se debe tomar como 1,0.
- (5) Los valores de C_1 , C_2 y C_3 están dados en las tablas H.1.1 y H.1.2 para varios casos de cargas, indicados mediante las formas de los diagramas de momentos flectores sobre la longitud L entre coacciones laterales. Los valores que se dan corresponden a varios valores de k .
- (6) Para los casos en que $k = 1,0$ el valor de C_1 para cualquier relación de cargas de momento de extremidad como las indicadas en la tabla H.1.1 viene dado aproximadamente por:

$$C_1 = 1,88 - 1,40 \psi + 0,52 \psi^2 \quad \text{pero} \quad C_1 \leq 2,70$$

- (7) La convención de signos para determinar z_j , véase figura 1.1, es:
- z es positiva para el ala comprimida;
 - z_j es positiva cuando el ala con el mayor valor de I_z está en compresión en el punto de mayor momento.
- (8) La convención de signos para determinar z_g es:
- para cargas gravitatorias z_g es positiva para las cargas aplicadas por encima del centro de cortante;
 - en el caso general z_g es positiva para cargas actuantes en dirección hacia el centro de cortante desde su punto de aplicación.

H.1.3 Vigas con sección transversal uniforme doblemente simétrica

- (1) Para secciones transversales doblemente simétricas $z_j = 0$, entonces

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + [C_2 z_g]^2 \right]^{0,5} - C_2 z_g \right\}$$

- (2) Para carga de momento de extremidad $C_2 = 0$ y para cargas transversales aplicadas en el centro de cortante $z_g = 0$. Para estos casos

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{0,5}$$

- (3) Cuando $k = k_w = 1,0$ (sin empotramiento de extremo):

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \left[\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{0,5}$$

Tabla H.1.1
Valores de los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 correspondientes a valores del coeficiente k :
Cargas de momentos de extremidad

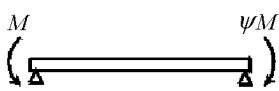









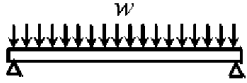
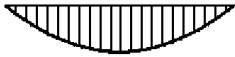
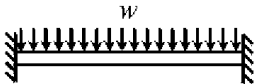

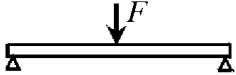

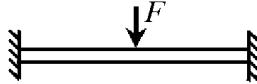
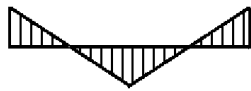
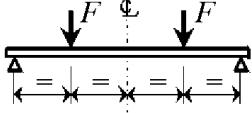
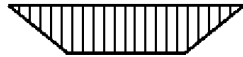
Cargas y condiciones de apoyo	Diagramas de momentos flectores	Valores de k	Valores de los coeficientes		
			C_1	C_2	C_3
	$\psi = +1$ 	1,0 0,7 0,5	1,000 1,000 1,000	-	1,000 1,113 1,144
	$\psi = +3/4$ 	1,0 0,7 0,5	1,141 1,270 1,305	-	0,998 1,565 2,283
	$\psi = +1/2$ 	1,0 0,7 0,5	1,323 1,473 1,514	-	0,992 1,556 2,271
	$\psi = +1/4$ 	1,0 0,7 0,5	1,563 1,739 1,788	-	0,977 1,531 2,235
	$\psi = 0$ 	1,0 0,7 0,5	1,879 2,092 2,150	-	0,939 1,473 2,150
	$\psi = -1/4$ 	1,0 0,7 0,5	2,281 2,538 2,609	-	0,855 1,340 1,957
	$\psi = -1/2$ 	1,0 0,7 0,5	2,704 3,009 3,093	-	0,676 1,059 1,546
	$\psi = -3/4$ 	1,0 0,7 0,5	2,927 3,009 3,093	-	0,366 0,575 0,837
	$\psi = -1$ 	1,0 0,7 0,5	2,752 3,063 3,149	-	0,000 0,000 0,000

Tabla H.1.2
Valores de los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 correspondientes a valores del coeficiente k :
Casos de cargas transversales

Cargas y condiciones de apoyo	Diagrama de momentos flectores	Valores de k	Valores de los coeficientes		
			C_1	C_2	C_3
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

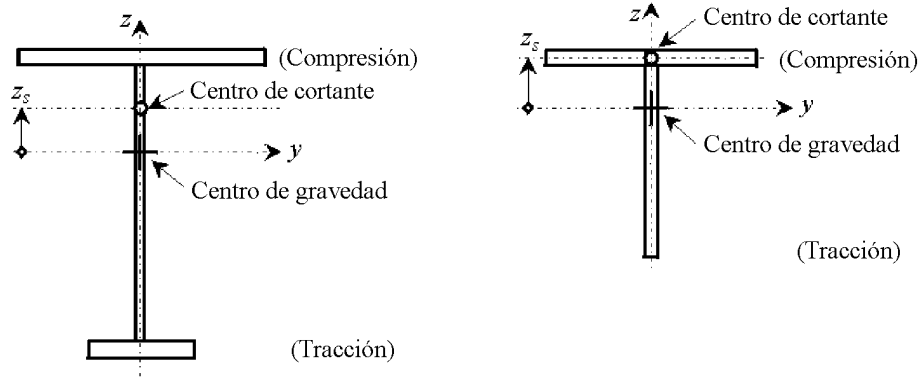


Fig. H.1.1 – Convención de signos para determinar z_j

H.1.4 Vigas con secciones transversales uniformes monosimétricas con alas desiguales

- (1) Para un perfil en I con alas desiguales:

$$I_w = \beta_f (1 - \beta_f) I_z h_s^2$$

donde

$$\beta_f = \frac{I_{fc}}{I_{fc} + I_{ft}}$$

I_{fc} es el momento de inercia del área del ala comprimida respecto al eje débil del perfil;

I_{ft} es el momento de inercia del área del ala traccionada respecto al eje débil del perfil;

h_s es la distancia entre los centros de cortante de las alas.

- (2) Se pueden utilizar las siguientes aproximaciones para z_j :

cuando

$$\beta_f > 0,5:$$

$$z_j = 0,8 (2 \beta_f - 1) h_s / 2$$

cuando

$$\beta_f \leq 0,5:$$

$$z_j = 1,0 (2 \beta_f - 1) h_s / 2$$

para perfiles con ala comprimida con labios:

$$z_j = 0,8 (2 \beta_f - 1) (1 + h_L/h) h_s / 2 \quad \text{cuando } \beta_f > 0,5$$

$$z_j = 1,0 (2 \beta_f - 1) (1 + h_L/h) h_s / 2 \quad \text{cuando } \beta_f \leq 0,5$$

donde

h_L es la profundidad del labio.

H.2 Esbeltez

H.2.1 Generalidades

- (1) La esbeltez adimensional λ_{LT} para pandeo lateral con torsión viene dada por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \sqrt{\alpha}$$

donde

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_o}} = 52,6 \varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_o}} \quad (f_o \text{ en N/mm}^2)$$

α es el factor de forma que se toma del apartado 5.3, pero con $\alpha \leq W_{pl,y} / W_{el,y}$

- (2) La esbeltez geométrica para pandeo lateral con torsión λ_{LT} viene dada, para todas las clases de secciones transversales, mediante:

$$\lambda_{LT} = \pi \sqrt{\frac{EW_{el,y}}{M_{cr}}}$$

H.2.2 Vigas con sección transversal uniforme doblemente simétrica

- (1) Para los casos en que $z_g = 0$ (carga de momento de extremidad o cargas transversales aplicadas en el centro de cortante) y $k = k_w = 1,0$ (sin empotramiento en extremos), el valor de λ_{LT} se puede obtener mediante:

$$\lambda_{LT} = \frac{L \left[\frac{W_{pl,y}^2}{I_z I_w} \right]^{0,25}}{C_1^{0,5} \left[1 + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_w} \right]^{0,25}}$$

la cual también puede ser escrita como:

$$\lambda_{LT} = \frac{L / i_{LT}}{C_1^{0,5} \left[1 + \frac{(L / a_{LT})^2}{25,66} \right]^{0,25}}$$

donde

$$a_{LT} = \sqrt{\frac{I_w}{I_t}}$$

- (2) Para un perfil I o H puro (sin labios):

$$I_w = I_z h_s^2 / 4$$

donde

$$h_s = h - t_f$$

- (3) Para un perfil de sección transversal doblemente simétrica, el valor de i_{LT} viene dado por:

$$i_{LT} = \left(\frac{I_z I_w}{W_{pl,y}^2} \right)^{0,25}$$

o con una suficiente aproximación mediante:

$$i_{LT} = [I_z / (A - 0,5 t_w h_s)]^{0,5}$$

- (4) Para perfiles I o H laminados conforme a la Norma de Referencia 2, se pueden usar las siguientes aproximaciones del lado de la seguridad:

$$\lambda_{LT} = \frac{L / i_{LT}}{C_1^{0,5} \left[1 + \frac{1}{20} \left[\frac{L / i_{LT}}{h / t_f} \right]^2 \right]^{0,25}}$$

$$\text{o } \lambda_{LT} = \frac{0,9 L / i_z}{C_1^{0,5} \left[1 + \frac{1}{20} \left[\frac{L / i_z}{h / t_f} \right]^2 \right]^{0,25}}$$

(5) Para cualquier perfil *I* o *H* puro con alas iguales, la siguiente aproximación es conservadora:

$$\lambda_{LT} = \frac{L / i_z}{C_1^{0,5} \left[1 + \frac{1}{20} \left[\frac{L / i_z}{h / t_f} \right]^2 \right]^{0,25}}$$

(6) Casos con $k < 1,0$ y/o $k_w < 1,0$ se pueden incluir usando:

$$\lambda_{LT} = \frac{kL \left[\frac{W_{p^{l,y}}^2}{I_z I_w} \right]^{0,25}}{C_1^{0,5} \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_w} \right]^{0,25}}$$

$$\text{o } \lambda_{LT} = \frac{kL / i_{LT}}{C_1^{0,5} \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{(kL / i_{LT})^2}{25,66} \right]^{0,25}}$$

o para perfiles normalizados *I* o *H* laminados:

$$\lambda_{LT} = \frac{kL / i_{LT}}{C_1^{0,5} \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{1}{20} \left[\frac{kL / i_{LT}}{h / t_f} \right]^2 \right]^{0,25}}$$

$$\text{o } \lambda_{LT} = \frac{0,9 kL / i_z}{C_1^{0,5} \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{1}{20} \left[\frac{kL / i_z}{h / t_f} \right]^2 \right]^{0,25}}$$

para cualquier perfil *I* o *H* puro con alas iguales:

$$\lambda_{LT} = \frac{kL / i_z}{C_1^{0,5} \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{1}{20} \left[\frac{kL / i_z}{h / t_f} \right]^2 \right]^{0,25}}$$

(7) A menos que se adopten medidas especiales para que sea un hecho la fijación frente al alabeo, k_w se debe tomar como 1,0.

- (8) Los casos en los que se apliquen cargas transversales por encima del centro de cortante ($z_g > 0,0$) o por debajo del centro de cortante ($z_g < 0,0$) se pueden incluir usando:

$$\lambda_{LT} = \frac{kL \left[\frac{W^2 p^{l,y}}{I_z I_w} \right]^{0,25}}{C_1^{0,5} \left\{ \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_w} + (C_2 z_g)^2 \frac{I_z}{I_w} \right]^{0,5} - C_2 z_g \left[\frac{I_z}{I_w} \right]^{0,5} \right\}^{0,5}}$$

o alternativamente:

$$\lambda_{LT} = \frac{kL/i_{LT}}{C_1^{0,5} \left\{ \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{(kL/a_{LT})^2}{25,66} + \left[\frac{2C_2 z_g}{h_s} \right]^2 \right]^{0,5} - \frac{2C_2 z_g}{h_s} \right\}^{0,5}}$$

o para perfiles laminados normalizados en I o H :

$$\lambda_{LT} = \frac{kL/i_{LT}}{C_1^{0,5} \left\{ \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{1}{20} \left[\frac{kL/i_{LT}}{h/t_f} \right]^2 + \left[\frac{2C_2 z_g}{h_s} \right]^2 \right]^{0,5} - \frac{2C_2 z_g}{h_s} \right\}^{0,5}}$$

o alternativamente:

$$\lambda_{LT} = \frac{0,9 kL/i_z}{C_1^{0,5} \left\{ \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{1}{20} \left[\frac{kL/i_z}{h/t_f} \right]^2 + \left[\frac{2C_2 z_g}{h_s} \right]^2 \right]^{0,5} - \frac{2C_2 z_g}{h_s} \right\}^{0,5}}$$

o para cualquier perfil I o H puro con alas iguales:

$$\lambda_{LT} = \frac{kL/i_z}{C_1^{0,5} \left\{ \left[\left[\frac{k}{k_w} \right]^2 + \frac{1}{20} \left[\frac{kL/i_z}{h/t_f} \right]^2 + \left[\frac{2C_2 z_g}{h_s} \right]^2 \right]^{0,5} - \frac{2C_2 z_g}{h_s} \right\}^{0,5}}$$

ANEXO J (Informativo)

PROPIEDADES A LA TORSIÓN DE PERFILES DE PARED DELGADA

Algunos procedimientos de cálculo dados en los apartados 5.6 y 5.8 precisan el uso de propiedades particulares de la sección transversal

J.1 Inercia a la torsión

- (1) Para un perfil de pared delgada compuesto únicamente por elementos planos, cada uno de espesor uniforme, y refuerzos con chaflanes y/o bulbos, el valor de la inercia a la torsión I_t viene dada por

$$\Sigma (p + qN)^4 t^4 + \Sigma \frac{bt^3}{3}$$

en la que

t = espesor del material plano adyacente;

N = dimensión del chaflán o bulbo, véase figura J.1;

p, q = coeficientes a leer en la figura J.1;

b = ancho del elemento plano, medido desde el borde del área sombreada en la figura J.1 en el caso de un elemento plano colindante con un chaflán o bulbo.

J.2 Posición del centro de cortante

- (1) La figura J.2 da la posición del centro de cortante para un cierto número de secciones transversales.

J.3 Constante de alabeo

- (1) Los valores de la constante de alabeo I_w para ciertos tipos de secciones transversales se pueden tomar como sigue:
- a) para perfiles compuestos completamente de elementos sobresalientes radiantes, por ejemplo, angulares, tes, cruciformes, se puede tomar conservadoramente para I_w el valor cero.
 - b) para los tipos específicos de perfiles mostrados en la figura J.2 los valores de I_w se pueden calcular utilizando la expresión allí dada.

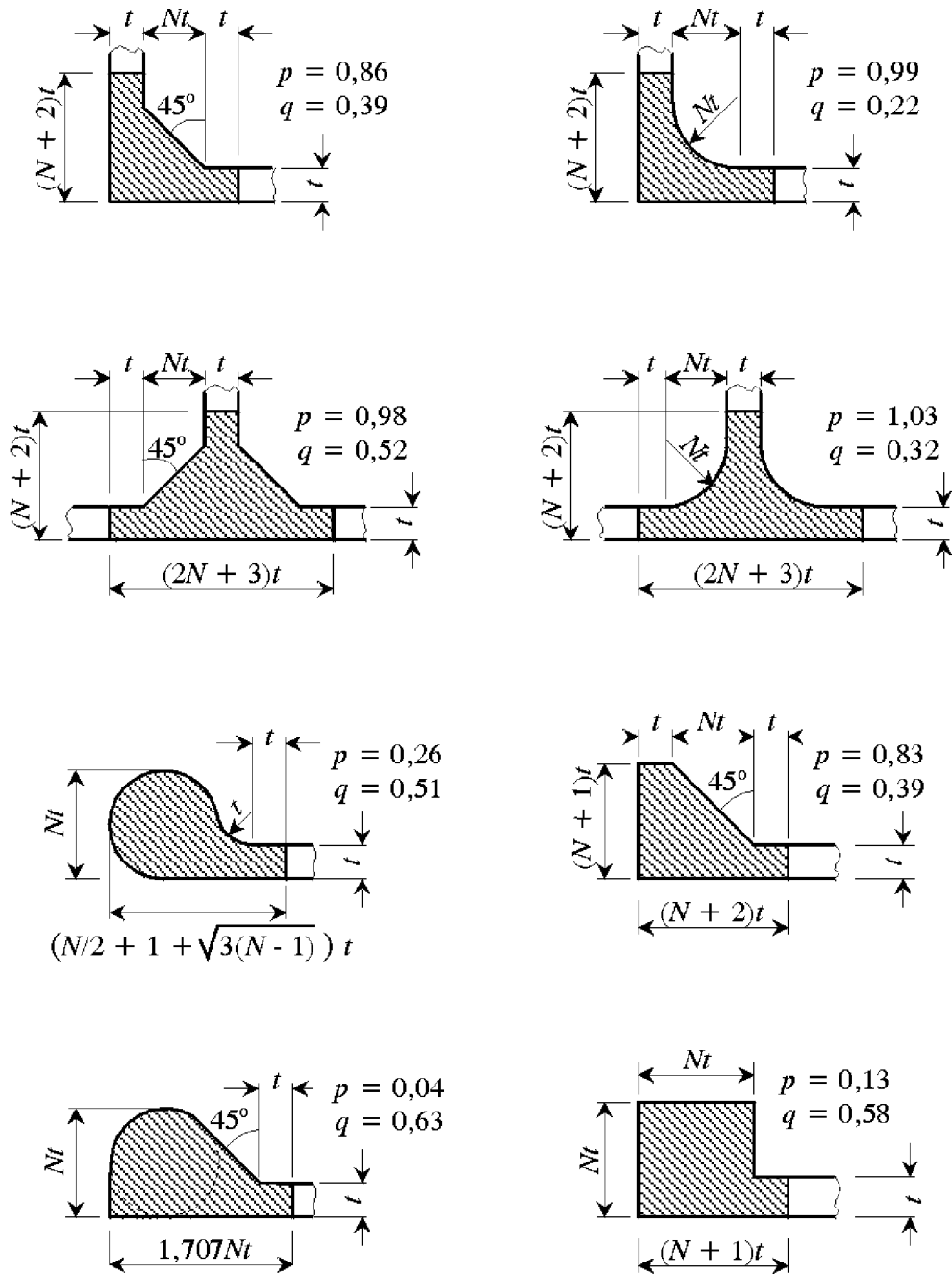


Fig. J.1 – Coeficientes de la inercia a la torsión para algunos chaflanes y bulbos

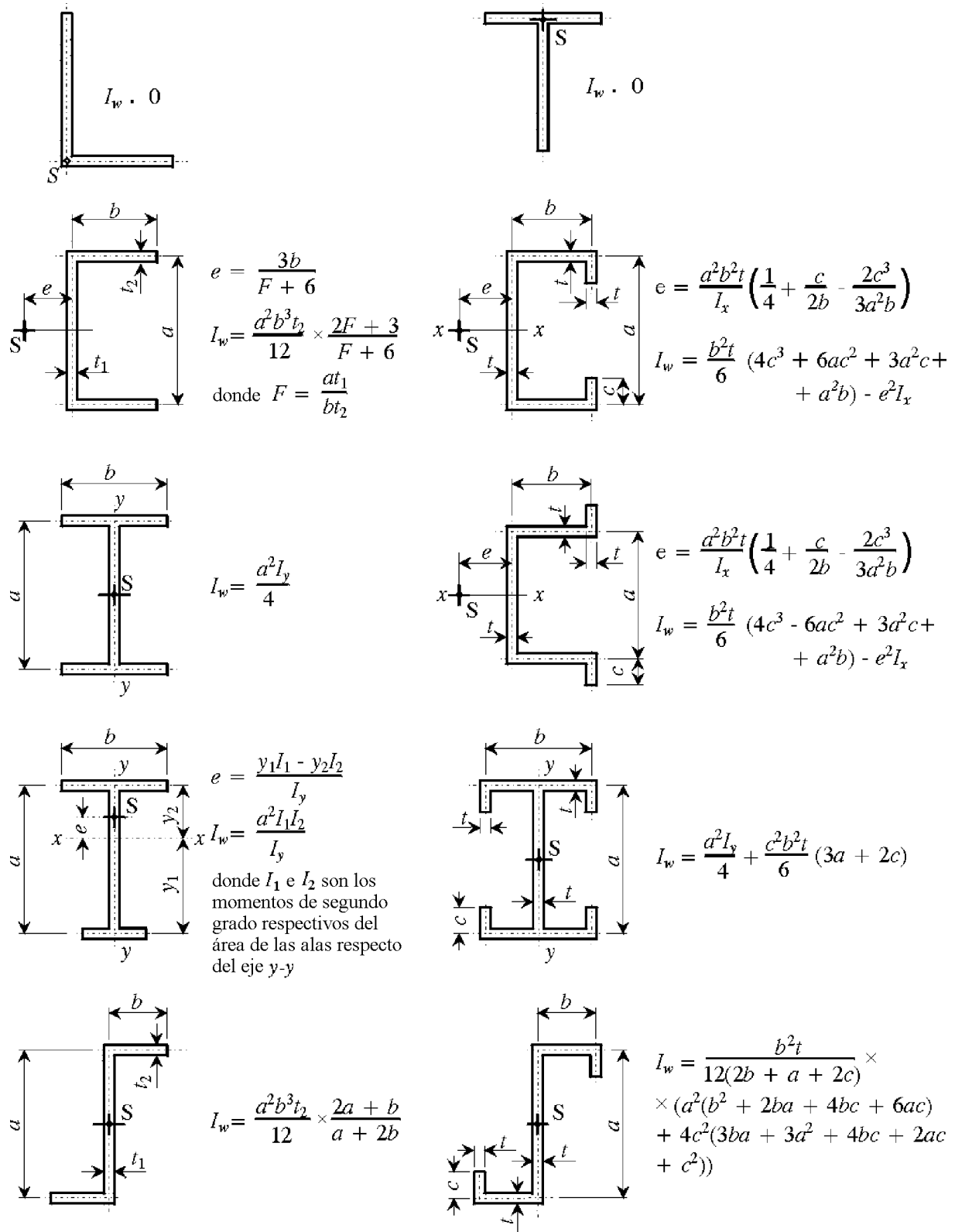


Fig. J.2 – Posición del centro de cortante (S) y coeficiente de alabeo (H) para algunos tipos de perfiles de pared delgada

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32