

Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural

(Tercera Edición)

© 2006 Euro Inox y el Steel Construction Institute

ISBN 2-87997-207-8 (3ª Edición)
ISBN 2-87997-040-7 (1ª Edición)

Euro Inox y el Steel Construction Institute han hecho un esfuerzo considerable para asegurar que la información presentada en esta publicación sea técnicamente correcta. En cualquier caso, se informa al lector que el material aquí recogido es sólo para información general. Euro Inox, el Steel Construction Institute y cualquier otra institución implicada en la realización de este documento rechazan específicamente cualquier responsabilidad sobre víctimas, daños o lesiones que pudieran resultar del uso de la información contenida en esta publicación.

CD-ROM, 7 idiomas ISBN 2-87997-187-X (3ª Edición)
ISBN 2-87997-080-6 (1ª Edición)

Versión en alemán	ISBN 2-87997-210-8 (3ª Edición) ISBN 2-87997-041-5 (1ª Edición)
Versión en finlandés	ISBN 2-87997-208-6 (3ª Edición) ISBN 2-87997-043-1 (1ª Edición)
Versión en francés	ISBN 2-87997-205-1 (3ª Edición) ISBN 2-87997-038-5 (1ª Edición)
Versión en inglés	ISBN 2-87997-204-3 (3ª Edición) ISBN 2-87997-037-7 (1ª Edición)
Versión en italiano	ISBN 2-87997-206-X (3ª Edición) ISBN 2-87997-039-3 (1ª Edición)
Versión en sueco	ISBN 2-87997-209-4 (3ª Edición) ISBN 2-87997-042-3 (1ª Edición)

PRÓLOGO

Tercera Edición

Esta Tercera Edición del Manual de Diseño ha sido preparada por el Steel Construction Institute como resultado de un proyecto financiado por la RFCS (*Research Fund for Coal and Steel*), *Proyecto de Valorización – Diseño estructural del acero inoxidable austenítico trabajado en frío* (contrato RFS2-CT-2005-00036). Este Manual de Diseño es una revisión completa de la Segunda Edición, extendiendo el campo de aplicación a los aceros inoxidables austeníticos trabajados en frío y actualizando todas las referencias a los borradores de los Eurocódigos. La Tercera Edición hace referencia a las partes correspondientes de las Normas Europeas EN 1990, EN 1991 y EN 1993. La aproximación al proyecto de estructuras frente a incendio de la Sección 7 se ha actualizado y se han añadido secciones nuevas sobre durabilidad del acero inoxidable en el terreno y costes de ciclo de vida.

Se han añadido tres nuevos ejemplos de dimensionamiento para demostrar el uso apropiado del acero inoxidable conformado en frío. Estos ejemplos han sido realizados por las siguientes instituciones:

- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Technical Research Centre of Finland (VTT)

Una comisión de seguimiento del proyecto, incluyendo representantes de cada institución socia del proyecto y de la institución de promoción y patrocinio, ha supervisado el trabajo y ha contribuido al desarrollo del Manual de Diseño. Las siguientes instituciones han participado en la preparación de la Tercera Edición:

- The Steel Construction Institute (SCI) (Coordinador del Proyecto)
- Centro Sviluppo Materiali (CSM)
- CUST, Blaise Pascal University
- Euro Inox
- RWTH Aachen, Institute of Steel Construction
- VTT Technical Research Centre of Finland
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Prólogo a la Segunda Edición

Este Manual de Diseño ha sido preparado por el Steel Construction Institute como resultado del proyecto financiado por la ECSC (CECA, Comunidad Europea del Carbón y del Acero), *Proyecto de Valorización – Desarrollo del empleo del acero inoxidable en construcción* (contrato 7215-PP-056). Dicho Manual es una revisión completa del *Manual de diseño para acero inoxidable estructural*, preparado por el Steel Construction Institute entre 1989 y 1992 y publicado por Euro Inox en 1994.

En esta segunda edición se han tenido en cuenta los avances en el conocimiento del comportamiento estructural del acero inoxidable en los últimos 10 años. En particular, se incluyen las nuevas recomendaciones de diseño derivadas del proyecto financiado por la ECSC (CECA, Comunidad Europea del Carbón y del Acero), *Desarrollo del empleo del acero inoxidable en construcción* (contrato 7210-SA/842) terminado recientemente, que han conducido a una extensión del Manual para cubrir las secciones huecas circulares y el proyecto de estructuras resistentes a fuego. En los últimos diez años se han publicado muchas normas europeas relativas al acero inoxidable, su fabricación, uniones, soldadura, montaje etc. Este Manual se ha actualizado haciendo referencia a las normas actuales y a los datos e información recogidos en dichas normas.

Una comisión de seguimiento del proyecto, incluyendo representantes de cada institución socia del proyecto, de cada institución subcontratada y de la institución de promoción y patrocinio, ha supervisado el trabajo y ha contribuido al desarrollo del Manual.

Los ejemplos de dimensionamiento han sido realizados por las siguientes instituciones socias del proyecto:

- Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM)
- Luleå Institute of Technology
- RWTH Aachen
- VTT Technical Research Centre of Finland
- The Steel Construction Institute (SCI)

Las siguientes personas han sido miembros del comité de seguimiento y/o han desarrollado los ejemplos de dimensionamiento.

Nancy Baddoo	The Steel Construction Institute
Massimo Barteri	Centro Sviluppo Materiali (CSM)
Bassam Burgan	The Steel Construction Institute
Helena Burstrand Knutsson	Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
Lars Hamrebjörk	Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
Jouko Kouhi	VTT Technical Research Centre of Finland
Roland Martland	Health and Safety Executive (UK)
Enrique Mirambell	Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Anders Olsson	AvestaPolarit AB (<i>anteriormente</i> , Luleå Inst. of Technology)
Thomas Pauly	Euro Inox
Esther Real	Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Ivor Ryan	Centre Technique Industriel de la Construction Métallique
Heiko Stangenberg	RWTH Aachen Institute of Steel Construction
Asko Talja	VTT Technical Research Centre of Finland

AGRADECIMIENTOS

Las siguientes organizaciones han proporcionado soporte económico para esta edición del Manual de Diseño y su colaboración es altamente agradecida.

- Research Fund for Coal and Steel (RFCS) (*anteriormente*, European Coal and Steel Community (ECSC))
- Euro Inox

El consorcio agradece la contribución realizada por los fabricantes europeos de acero inoxidable y otras organizaciones a esta edición del Manual, y a las dos anteriores.

PRESENTACIÓN

Este Manual de Diseño ha sido preparado para guiar a ingenieros con cierta experiencia en el dimensionamiento de estructuras de acero, aunque no necesariamente en el de estructuras de acero inoxidable. En ningún caso se pretende que adquiera un status legal ni que exima al ingeniero de su responsabilidad de asegurar que una estructura resulte funcional y segura.

El Manual está dividido en dos partes:

- Parte I - Recomendaciones
- Parte II - Ejemplos de dimensionamiento

Las Recomendaciones de la Parte I están soportadas en el método de los estados límite, y donde se considere adecuado, están de acuerdo con las siguientes Partes de Eurocódigo 3 *Proyecto de estructuras de acero*:

- EN 1993-1-1 *Design of steel structures: General rules and rules for buildings*
- EN 1993-1-2 *Design of steel structures: Structural fire design*
- EN 1993-1-3 *Design of steel structures: General rules: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*
- EN 1993-1-4 *Design of steel structures: General rules: Supplementary rules for stainless steels*
- EN 1993-1-5 *Design of steel structures: Plated structural elements*
- EN 1993-1-8 *Design of steel structures: Design of joints*
- EN 1993-1-9 *Design of steel structures: Fatigue*
- EN 1993-1-10 *Design of steel structures: Material toughness and through-thickness properties*

Este Manual de Diseño contiene valores recomendados para algunos coeficientes. Dichos valores están sujetos a modificaciones a nivel nacional, por los Anejos Nacionales.

Los Ejemplos de dimensionamiento incluidos en la Parte II muestran el empleo de las recomendaciones. El sistema cruzado de referencias utilizado permite obtener una rápida correspondencia entre los diferentes apartados de que consta la solución del ejemplo propuesto y las recomendaciones recogidas en el Manual.

Las Recomendaciones y los Ejemplos de dimensionamiento están disponibles en Steelbiz, un sistema de información técnica del SCI (www.steelbiz.org), y online en la web de Euro Inox (www.euro-inox.org). Existe un apartado de Comentarios a las Recomendaciones, también disponible online en estas webs, que incluye una completa selección de referencias. El propósito de los Comentarios es el de permitir al proyectista valorar las bases de las recomendaciones y facilitar el desarrollo de revisiones siempre y cuando haya nuevos datos disponibles. Se presentan también los

resultados de varios programas experimentales llevados a cabo específicamente para proporcionar datos de base para el Manual de Diseño. Las Recomendaciones, los Ejemplos de dimensionamiento y los Comentarios están también disponibles en un CD de Euro Inox.

En la web www.steel-stainless.org/software hay disponible una herramienta de diseño para el dimensionamiento de elementos de acero inoxidable conformados en frío sometidos a tracción, flexión y compresión. Dicha ayuda calcula las características de la sección transversal y las resistencias del elemento de acuerdo con las Recomendaciones de este Manual de Diseño.

Las recomendaciones de proyecto presentadas en este documento se basan en el mejor y más amplio conocimiento disponible a la fecha de publicación. Sin embargo, no se acepta ningún tipo de responsabilidad por parte de los socios del proyecto o de otras instituciones asociadas sobre lesiones, muerte, pérdida, daño o retraso que pudieran provenir del empleo de estas recomendaciones.

Índice

	Página No.
PRÓLOGO	iii
AGRADECIMIENTOS	v
PRESENTACIÓN	vi
PARTE I – RECOMENDACIONES	
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Ámbito de aplicación	1
1.2 Símbolos	1
1.3 Criterio de ejes	3
1.4 Unidades	3
2 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO	5
2.1 Requisitos generales	5
2.2 Método de los estados límite	5
2.3 Cargas	7
3 MATERIALES: PROPIEDADES, SELECCIÓN Y DURABILIDAD	11
3.1 Tipos y grados del material	11
3.2 Comportamiento mecánico y valores de cálculo de las propiedades del material	16
3.3 Propiedades físicas	21
3.4 Efectos de la temperatura	22
3.5 Coste de ciclo de vida	23
3.6 Selección de materiales	23
3.7 Durabilidad	26
4 PROPIEDADES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES	37
4.1 Aspectos generales	37
4.2 Máximas relaciones anchura-espesor	37
4.3 Clasificación de las secciones transversales	37
4.4 Anchos eficaces	41
4.5 Elementos rigidizados	46
4.6 Cálculo de características de las secciones transversales	49
4.7 Resistencia de las secciones transversales	52
5 DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	57
5.1 Introducción	57
5.2 Elementos sometidos a tracción	57
5.3 Elementos sometidos a compresión	58
5.4 Elementos sometidos a flexión	61
5.5 Elementos sometidos a esfuerzos combinados de axil y de flexión	72
6 DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES	75
6.1 Recomendaciones generales	75
6.2 Uniones atornilladas	77
6.3 Elementos de unión mecánicos para estructuras ligeras	82
6.4 Uniones soldadas	82

7	DIMENSIONAMIENTO FRENTE A FUEGO	87
7.1	Aspectos generales	87
7.2	Propiedades mecánicas a temperaturas elevadas	87
7.3	Propiedades térmicas a temperaturas elevadas	90
7.4	Determinación de la capacidad estructural frente a fuego	91
8	FATIGA	99
9	ENSAYOS	101
9.1	Aspectos generales	101
9.2	Determinación de la curva tensión-deformación	101
9.3	Ensayos de elementos estructurales	101
10	ASPECTOS DE FABRICACIÓN	103
10.1	Introducción	103
10.2	Almacenamiento y manipulación	104
10.3	Operaciones de conformado	105
10.4	Soldadura	106
10.5	Gripado y agarrotamiento	112
10.6	Acabado	112
	APÉNDICE A CORRESPONDENCIA ENTRE DESIGNACIONES DE ACERO INOXIDABLE	115
	APÉNDICE B PANDEO LATERAL	117
	APÉNDICE C DATOS DEL MATERIAL PARA EL CÁLCULO DE FLECHAS	121
	PARTE II – EJEMPLOS DE DIMENSIONAMIENTO	
	Ejemplo de dimensionamiento 1	125
	Ejemplo de dimensionamiento 2	127
	Ejemplo de dimensionamiento 3	131
	Ejemplo de dimensionamiento 4	139
	Ejemplo de dimensionamiento 5	143
	Ejemplo de dimensionamiento 6	151
	Ejemplo de dimensionamiento 7	157
	Ejemplo de dimensionamiento 8	163
	Ejemplo de dimensionamiento 9	169
	Ejemplo de dimensionamiento 10	177
	Ejemplo de dimensionamiento 11	185
	Ejemplo de dimensionamiento 12	191
	Ejemplo de dimensionamiento 13	199

PARTE I - RECOMENDACIONES

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Ámbito de aplicación

Las recomendaciones que se dan en esta Parte del Manual de Diseño se aplican a los grados de acero inoxidable utilizados normalmente en aplicaciones estructurales. Las recomendaciones están dirigidas, fundamentalmente, al proyecto de elementos estructurales y de los componentes estructurales secundarios de edificios, instalaciones offshore y estructuras similares. No deben aplicarse a estructuras especiales tales como las existentes en instalaciones nucleares o depósitos, para los cuales ya existen normas específicas para el empleo del acero inoxidable.

Las recomendaciones hacen referencia al comportamiento del material, al dimensionamiento de elementos conformados en frío y elementos soldados, y a sus uniones. Las recomendaciones son aplicables a los aceros inoxidables austeníticos y dúplex, que son los empleados habitualmente en aplicaciones estructurales y arquitectónicas. Las recomendaciones se soportan en el método de los estados límite.

1.2 Símbolos

En general, los símbolos utilizados en este Manual de Diseño son los mismos que los utilizados en EN 1993-1-1: Eurocode 3, *Design of steel structures: General rules and rules for buildings*. Es común el uso de subíndices, por ejemplo $N_{b,z,Rd}$ es la resistencia de cálculo (subíndice Rd) de un pilar sometido a esfuerzo axial (N) a pandeo (subíndice b) alrededor del eje débil (subíndice z).

Las dimensiones y los ejes de las secciones se muestran en la Figura 1.1. Nótese que, al contrario del criterio convencional de muchos países, el eje fuerte de una sección es el eje y-y mientras que el eje débil es el eje z-z, ver Sección 1.3.

Letras latinas mayúsculas

<i>A</i>	Acción accidental; Área
<i>C</i>	Valor fijo; Factor; Coeficiente
<i>E</i>	Módulo de elasticidad; Efecto de las acciones
<i>F</i>	Acción; Fuerza
<i>G</i>	Acción permanente; Módulo de deformación transversal
<i>I</i>	Momento de inercia
<i>L</i>	Longitud; Luz; Longitud de sistema
<i>M</i>	Momento flector
<i>N</i>	Esfuerzo axial
<i>Q</i>	Acción variable
<i>R</i>	Resistencia
<i>V</i>	Esfuerzo cortante
<i>W</i>	Módulo resistente

Letras griegas mayúsculas

Δ	Diferencia en(precede al símbolo principal)
----------	---

Letras latinas minúsculas

<i>a</i>	Distancia entre rigidizadores; Espesor de garganta del cordón de soldadura
<i>b</i>	Ancho; Anchura
<i>c</i>	Distancia; Vuelo
<i>d</i>	Diámetro; Canto
<i>e</i>	Excentricidad; Desplazamiento del eje neutro; Distancia al borde; Distancia al borde final
<i>f</i>	Resistencia (del material)
<i>g</i>	Espaciado
<i>h</i>	Altura
<i>i</i>	Radio de giro; Número entero
<i>k</i>	Coficiente; Factor
<i>l</i>	Longitud de pandeo
<i>m</i>	Constante
<i>n</i>	Número de ...
<i>p</i>	Remache; Espaciamiento
<i>q</i>	Fuerza distribuida
<i>r</i>	Radio; Radio de la raíz
<i>s</i>	Al tresbolillo
<i>t</i>	Espesor
<i>uu</i>	Eje fuerte (mayor)
<i>vv</i>	Eje débil (menor)
<i>w</i>	Curvado
<i>xx, yy, zz</i>	Ejes cartesianos

Letras griegas minúsculas

α	(alpha)	Relación; Factor
β	(beta)	Relación; Factor
γ	(gamma)	Coficiente parcial
ε	(epsilon)	Deformación; Coficiente = $\left(\frac{235 E}{210000 f_y} \right)^{0,5}$
λ	(lambda)	Esbeltez (una barra encima indica adimensional)
ρ	(rho)	Factor de reducción
σ	(sigma)	Tensión normal
τ	(tau)	Tensión tangencial
φ	(phi)	Relación
χ	(chi)	Coficiente de reducción (para pandeo)
ψ	(psi)	Relación de tensión; Factor de reducción

Subíndices

<i>a</i>	Media
<i>b</i>	Portante; Pandeo; Tornillo
<i>c</i>	Sección transversal
<i>cr</i>	Crítica
<i>d</i>	Diseño; Cálculo
<i>E</i>	Euler; Esfuerzo
<i>eff</i>	Eficaz
<i>e</i>	Eficaz (con más subíndices)
<i>el</i>	Elástico
<i>f</i>	Ala
<i>g</i>	Bruta
<i>i,j,k</i>	Índices (sustituir por números)
<i>k</i>	Característico

LT	Lateral (pandeo lateral)
M	(Considerando) Momento flector
N	(Considerando) Esfuerzo axial
net	Neta
o	Inicial
pl	Plástico
R	Resistencia
r	Valor reducido
S	Secante
s	Tensión de tracción (área de tracción); Rigidizador
t	Tensión; Tracción; Torsión
u	Eje fuerte (mayor) de la sección transversal; Último
V	(Considerando) Esfuerzo cortante
v	Cortante; Eje débil (menor) de la sección transversal
w	Alma; Soldadura; Alabeo
x	Eje longitudinal a lo largo del elemento
y	Plastificación (valor de prueba); Eje de la sección transversal (eje fuerte excepto para secciones no simétricas)
z	Eje de la sección transversal (eje débil excepto para secciones no simétricas)
σ	Tensión normal (longitudinal)
τ	Tensión tangencial

1.3 Criterio de ejes

En general, el criterio de ejes para los elementos estructurales es:

xx	eje a lo largo de la longitud del elemento estructural (eje longitudinal).
yy	eje de la sección transversal perpendicular al alma, o al lado mayor en el caso de angulares.
zz	eje de la sección transversal paralelo al alma, o al lado mayor en el caso de angulares.

El eje yy será normalmente el eje fuerte (mayor) de la sección mientras que el eje zz será el eje débil (menor). Para los angulares, los ejes fuerte y débil (uu y vv) están inclinados respecto a los ejes yy y zz, ver Figura 1.1.

El criterio seguido para los subíndices que indican los ejes de momentos es: “Utilizar el eje alrededor del cual actúa el momento”.

Por ejemplo, para una sección en I, un momento flector actuando en el plano del alma se representa por M_y , puesto que dicho momento actúa alrededor del eje yy de la sección transversal, perpendicular al alma.

1.4 Unidades

Se recomienda el empleo de las siguientes unidades para los cálculos:

- esfuerzos y cargas kN, kN/m, kN/m²
- unidad de masa kg/m³
- unidad de peso kN/m³
- tensiones y resistencias N/mm² (= MN/m² o MPa)
- momentos flectores kNm

Nótese que, de acuerdo con la práctica europea, se utiliza la coma “,” para separar la parte entera de un número de la parte decimal.

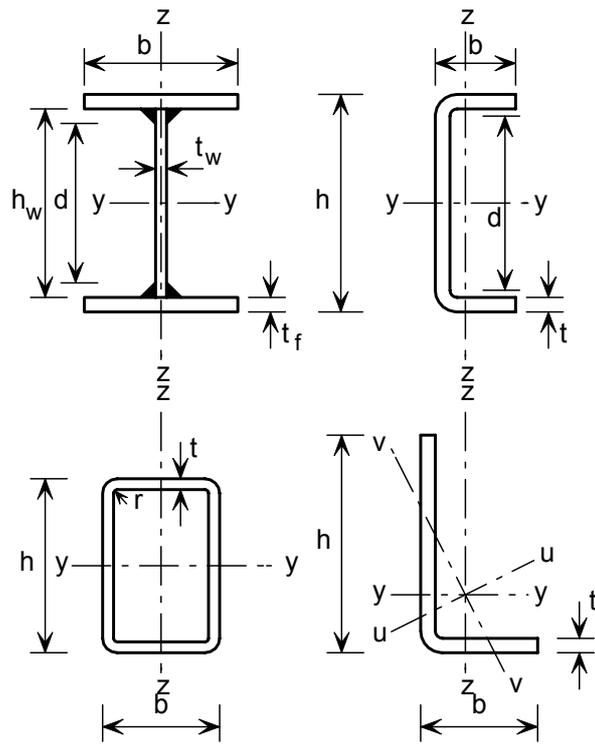


Figura 1.1 Dimensiones y ejes de las secciones

2 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

2.1 Requisitos generales

Una estructura debe ser proyectada y construida para:

- cumplir su función durante su vida útil prevista
- soportar las cargas que puedan presentarse durante las etapas de construcción, instalación y uso
- limitar el daño producido por sobrecargas accidentales
- presentar una adecuada durabilidad en relación al coste de mantenimiento.

Estos requisitos pueden satisfacerse con el empleo de materiales adecuados, un diseño apropiado y detallando y especificando los procedimientos de control de calidad para la construcción y el mantenimiento.

Las estructuras deben dimensionarse considerando todos los estados límite relevantes.

2.2 Método de los estados límite

Se definen como estados límite aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que la estructura no cumple alguna de las funciones para las que ha sido proyectada. Se consideran tres clases de estados límite: estados límite últimos, estados límite de servicio y estados límite de durabilidad. Los estados límite últimos son aquellos que, si se superan, pueden conducir al colapso de parte o de toda la estructura, poniendo en peligro la seguridad de las personas. Los estados límite de servicio corresponden a situaciones más allá de las cuales los criterios especificados de servicio dejan de satisfacerse. Los estados límite de durabilidad pueden ser considerados como subgrupos de los estados límite últimos y de servicio dependiendo de si, por ejemplo, la corrosión afecta a la resistencia de la estructura o a su apariencia estética. A continuación se dan ejemplos de estos estados límite:

Estados límite últimos

- Resistencia (incluyendo plastificación, fractura, pandeo y transformación en un mecanismo)
- Estabilidad frente a vuelco y deslizamiento
- Fractura debida a fatiga

Estados límite de servicio

- Deformación
- Vibración (p.e. oscilaciones producidas por el viento)
- Daño reparable debido a fatiga
- Fluencia

Estados límite de durabilidad

- Corrosión
- Estabilidad metalúrgica

Estados límite últimos

Para el dimensionamiento frente a los estados límite últimos, debe satisfacerse la siguiente relación:

$$E_d \leq R_d \quad (2.1)$$

en donde:

E_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones tal como un momento o un vector en el elemento considerado, debido a la combinación de acciones mayoradas que actúa sobre la estructura (ver Sección 2.3), y

R_d es la resistencia de cálculo correspondiente, dada en el apartado pertinente de estas recomendaciones.

La resistencia de cálculo, R_d , viene dada generalmente como R_k/γ_M siendo R_k la resistencia característica y γ_M un coeficiente parcial. El coeficiente parcial γ_M toma diversos valores. La Tabla 2.1 proporciona los valores de γ_M a utilizar en este Manual de Diseño, los cuales se toman de EN 1993-1-4 y EN 1993-1-8. Debe hacerse también referencia al Anejo Nacional (AN) de EN 1993-1-4 y de otras partes relevantes de EN 1993 del país para el cual se proyecta la estructura, ya que dichos documentos pueden dar valores modificados de γ_M que deberían ser utilizados, en vez de los recogidos en la Tabla 2.1 (si no existe el AN los factores γ_M deberán ser acordados con el organismo nacional competente.)

Como alternativa para el análisis, se puede determinar la resistencia de cálculo mediante ensayos de materiales, componentes y estructuras (ver Sección 9).

Tabla 2.1 Valores recomendados de γ_M

Para la resistencia de:	Símbolo	Valor (EN 1993-1-4)
Secciones transversales a plastificación excesiva, incluyendo abolladura	γ_{M0}	1,10
Elementos a inestabilidad	γ_{M1}	1,10
Secciones traccionadas, considerando rotura frágil	γ_{M2}	1,25
Tornillos, soldaduras, articulaciones y placas de apoyo	γ_{M2}	1,25
Para la resistencia de:	Símbolo	Valor (EN 1993-1-8)
Uniones en vigas trianguladas con perfiles huecos	γ_{M5}	1,00
Articulaciones en estado límite de servicio	$\gamma_{M6,ser}$	1,00

Estados límite de servicio

Para el dimensionamiento frente a los estados límite de servicio, debe satisfacerse la siguiente relación:

$$E_d \leq C_d \quad (2.2)$$

en donde:

E_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones especificadas en el criterio de servicio, p.e. la deformada de un elemento solicitado por unos esfuerzos internos, debida a la combinación de acciones no mayoradas que actúan sobre la estructura (F_k , ver Sección 2.3.4), y

C_d es el valor límite de cálculo del criterio de dimensionamiento correspondiente.

Estados límite de durabilidad

Estos estados requieren la consideración del fenómeno de corrosión, tratado en la Sección 3.7.

2.3 Cargas

2.3.1 Aspectos generales

En los Eurocódigos, las cargas se expresan en términos de ‘acciones’. Una ‘acción’ se define como:

- Un conjunto de fuerzas (cargas) aplicadas sobre la estructura (acción directa),
- Un conjunto de deformaciones impuestas o aceleraciones causadas, por ejemplo, por cambios de temperatura, variaciones higrométricas, asientos diferenciales o sismos (acción indirecta).

Los valores característicos (F_k) de las cargas individuales se especifican en:

- EN 1991 *Actions on structures* (teniendo en cuenta posibles consideraciones adicionales y/o cambios en el Anejo Nacional correspondiente) o en otras normas de acciones, o
- por el cliente, o por el proyectista consultando con el cliente, asegurando los mínimos especificados en las normativas relevantes de acciones, o por una autoridad competente.

Los valores de cálculo de las acciones individuales (F_d) se obtienen multiplicando las acciones características por los coeficientes parciales para acciones (γ_F).

Los estados de carga se establecen considerando todas las posibles combinaciones de acciones e identificando el estado de carga crítico.

2.3.2 Estados límite últimos – Cargas mayoradas en estructuras terrestres

Se consideran los siguientes tipos de acciones:

- Acciones “permanentes” (G) – p.e. peso propio de la estructura, instalaciones, elementos auxiliares y equipamiento fijo
- Acciones “variables” (Q) – p.e. sobrecargas de uso, cargas de viento, cargas de nieve y cargas térmicas
- Acciones “accidentales” (A) – p.e. explosiones, fuego e impacto de vehículos.

EN 1990 *Basis of structural design* proporciona las combinaciones de acciones para el proyecto de edificios y los valores recomendados para los coeficientes parciales para las acciones (γ_F). Debe hacerse también referencia al Anejo Nacional de EN 1990 del país para el cual se proyecta la estructura, ya que puede

proporcionar valores modificados de γ_F que deberían utilizarse en lugar de los valores recomendados. El AN proporciona también valores recomendados para los coeficientes de combinación (coeficientes ψ) y las acciones permanentes desfavorables (coeficientes ξ). (Si no existe el AN, entonces los coeficientes γ_F , ψ y ξ deben acordarse con el organismo nacional competente.) Debe hacerse referencia al Anejo Nacional de EN 1991, en lo que se refiere a los valores numéricos de las cargas.

Tal como aparece en EN 1990, para condiciones normales, es decir, en situaciones no accidentales, la combinación de acciones puede expresarse como:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.3)$$

o de manera alternativa, como la más desfavorable de las siguientes expresiones:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.4a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.4b)$$

donde

- $G_{k,j}$ es el valor característico de las acciones permanentes
- $Q_{k,1}$ es el valor característico de la acción variable 1 dominante (es decir, la acción variable más desfavorable)
- $Q_{k,i}$ es el valor característico de todas las demás acciones variables i
- j es el índice para las acciones permanentes
- i es el índice para las acciones variables
- $\gamma_{G,j}$ es el coeficiente parcial para las acciones permanentes
- $\gamma_{Q,1}$ es el coeficiente parcial para la acción variable dominante 1
- ξ_i es el coeficiente de reducción para las acciones permanentes desfavorables G
- $\psi_{0,i}$ es el coeficiente de reducción para el valor de combinación de la acción variable Q .

Sin embargo, otra vez debe hacerse referencia al AN del país para el cual se proyecta la estructura.

EN 1990 recomienda los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \gamma_{G,j} &= 1,35 \text{ (efecto desfavorable)} \\ \gamma_{Q,1} &= 1,5 \quad \gamma_{Q,i} = 1,5 \\ \xi &= 0,85 \end{aligned}$$

El valor de ψ_0 depende del tipo de carga (ver EN 1990)

Las ecuaciones 2.4a y 2.4b se han introducido puesto que la ecuación 2.3 era demasiado pesimista para estructuras pesadas. Para estructuras de acero, las ecuaciones 2.4a y 2.4b proporcionan, en general, cargas más ligeras que la ecuación 2.3.

2.3.3 Estados límite últimos – Cargas mayoradas en estructuras marinas

Debe hacerse referencia a la norma API RP2A – LRFD *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design*, First Edition, 1993.

Se sugiere considerar para la aplicación de este manual de Diseño las combinaciones de acciones de API RP2A para las condiciones del emplazamiento, junto con las cargas especificadas en API RP2A para el dimensionamiento de elementos de acero inoxidable. La notación utilizada es, asimismo, la correspondiente a dicha norma.

Condiciones de operación:

$$1,3D_1 + 1,3D_2 + 1,5L_1 + 1,5L_2 + 1,2(W_o + 1,25D_n) \quad (2.5)$$

Condiciones extremas de tempestad:

$$1,1D_1 + 1,1D_2 + 1,1L_1 + 1,35(W_e + 1,25D_n) \quad (2.6)$$

Cuando los esfuerzos debidos a cargas gravitatorias son de signo contrario a los esfuerzos ocasionados por el viento, corrientes y oleaje, las cargas gravitatorias deben reducirse de la siguiente manera:

$$0,9D_1 + 0,9D_2 + 0,8L_1 + 1,35(W_e + 1,25D_n) \quad (2.7)$$

donde

- D_1 es la carga permanente que incluye peso propio de la estructura, instalaciones, elementos auxiliares y equipo fijo
- D_2 es la carga permanente que incluye el peso de los equipos y otros objetos que pueden cambiar de un modo de operación a otro
- L_1 es la carga variable 1 (incluye el peso de provisiones y fluidos en tuberías y depósitos)
- L_2 es la carga variable 2 (cargas de corta duración que se producen en operaciones tales como la elevación del equipo de perforación, maniobras de grúas, operaciones con maquinaria, amarre de buques y carga de helicópteros)
- W_o es el viento de operación, corrientes y oleaje o efectos asociados (establecido por el usuario)
- W_e es el viento extremo, corrientes y oleaje o sus efectos (período de retorno de 100 años)
- D_n son las fuerzas de inercia.

2.3.4 Estados límite de servicio – Cargas

Los estados límite de servicio deberían comprobarse para las siguientes combinaciones:

- característica
- frecuente
- cuasi-permanente

EN 1990 proporciona las combinaciones de acciones a considerar para el proyecto de edificios. (Debería hacerse referencia también al AN del país para el cual se proyecta la estructura.) EN 1990 exige que los valores de las flechas admisibles se establezcan de acuerdo con el cliente.

Para la combinación característica, usada generalmente para estados límite irreversibles, debería emplearse la siguiente combinación de acciones:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.8)$$

donde todos los términos ya se han definido en la Sección 2.3.2.

Cabe destacar que EN 1990 proporciona las apropiadas combinaciones de acciones para las siguientes situaciones:

- para el cálculo de deformaciones bajo las combinaciones normales de acciones (cláusula A.1.4.3(1)),
- cuando se deban considerar deformaciones a largo plazo debidas a relajación, retracción o fluencia (cláusula A.1.4.3(6)),
- cuando se considere la apariencia de la estructura o el confort del usuario o el funcionamiento de la maquinaria (cláusulas A.1.4.3(4) y (5)).

3 MATERIALES: PROPIEDADES, SELECCIÓN Y DURABILIDAD

3.1 Tipos y grados del material

3.1.1 Introducción

Existen muchos tipos de acero inoxidable y no todos son adecuados para aplicaciones estructurales, particularmente cuando se llevan a cabo operaciones de soldadura. Hay cinco grupos básicos de acero inoxidable clasificados de acuerdo con su estructura metalúrgica: austeníticos, ferríticos, martensíticos, dúplex y de precipitación-endurecimiento (endurecimiento por precipitación). Los aceros inoxidables austeníticos y dúplex son, en general, los grupos más empleados en aplicaciones estructurales.

Los aceros inoxidables austeníticos proporcionan una buena combinación de resistencia a la corrosión y de las propiedades de fabricación. Los aceros inoxidables dúplex tienen una resistencia elevada y también una alta resistencia al desgaste, con una muy buena resistencia a la corrosión bajo tensión.

Los grados más utilizados, referidos generalmente como grados austeníticos estándares, son 1.4301 (comúnmente conocido como 304) y 1.4401 (comúnmente conocido como 316). Estos aceros inoxidables contienen entre un 17-18% de cromo y un 8-11% de níquel. El grado 1.4301 es adecuado en ambientes rurales, urbanos y ligeramente industriales, mientras que el 1.4401 es un grado más aleado y por tanto recomendable en ambientes marinos e industriales.

Las versiones de estos mismos grados con bajo contenido en carbono son 1.4307 (304L) y 1.4404 (316L). Los grados 1.4301 y 1.4401 se fabricaban anteriormente con contenidos de carbono más elevados lo cual tenía implicaciones en el comportamiento de los mismos frente a la corrosión¹. Tanto el grado 'L' como un acero estabilizado tal como el 1.4541 y el 1.4571 deberían utilizarse cuando sea determinante el comportamiento frente a corrosión en estructuras soldadas.

El grado 1.4318 es un acero inoxidable con bajo contenido en carbono y alto contenido en nitrógeno, que endurece rápidamente con el trabajado en frío. Posee una larga trayectoria de comportamiento satisfactorio en la industria del ferrocarril y es igualmente adecuado para aplicaciones en automoción, aviación y arquitectura. El grado 1.4318 tiene una resistencia a la corrosión similar a la del grado 1.4301 y es el más adecuado para aplicaciones que requieran mayor resistencia estructural que la del grado 1.4301 cuando se precise un mayor volumen de material. Se obtiene directamente de la acería; cuando interese utilizar el grado 1.4318 debería comprobarse la disponibilidad directamente con la acería. Su precio es, probablemente, ligeramente superior al del 1.4301, dependiendo de la cantidad necesaria.

¹ El carbono presente en el acero reacciona con el cromo y precipita carburos de cromo en los bordes de grano bajo ciertos ciclos térmicos, por ejemplo en las zonas afectadas por el calor de soldadura. La pérdida local de cromo de la región intersticial hacia las partículas de carburo permite un ataque preferencial de la corrosión intergranular y entonces se dice que el acero está sensibilizado, o que sufre una degradación por soldadura (ver Sección 3.7.2).

El creciente empleo del acero inoxidable en aplicaciones para soportar cargas ha propiciado la demanda de grados dúplex ligeros en los que se combinan las propiedades mecánicas y de corrosión de los grados dúplex con una composición química levemente aleada. En las Partes 4 y 5 de la próxima versión de EN 10088 (ver Sección 3.1.2) se incluye el nuevo grado dúplex 1.4162. Este grado de acero es adecuado para muchas aplicaciones del sector de la construcción con una resistencia del orden de 450 – 530 N/mm², una resistencia a la corrosión entre los grados austeníticos 1.4301 y 1.4404 y una composición química levemente aleada.

Sólo se consideran las versiones de acero laminado. La Sección 3.6 presenta una guía para la selección de grados para aplicaciones particulares.

3.1.2 Normas aplicables

Productos planos y largos

La Norma aplicable es EN 10088, *Stainless steels*. Dicha norma consta de tres partes:

- Part 1, *Lists of stainless steels*, proporciona la composición química y los datos de referencia de algunas propiedades físicas, como por ejemplo el módulo de elasticidad, *E*.
- Part 2, *Technical delivery conditions for sheet, plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes*, proporciona las propiedades técnicas y composiciones químicas de los materiales empleados en el conformado de las secciones estructurales.
- Part 3, *Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes*, proporciona las propiedades técnicas y composiciones químicas de los materiales empleados en productos largos.

Actualmente se están preparando las Partes 4 (productos planos) y 5 (productos largos) de EN10088 para cubrir los materiales de construcción. Se publicarán probablemente en 2007.

La nomenclatura utilizada en EN 10088 incluye la denominación numérica europea del acero y su nombre.

Por ejemplo, al acero inoxidable de grado 304L le corresponde el número 1.4307, donde:

1.	43	07
Indica acero	Indica un grupo de acero inoxidable	Grado de identificación individual

El sistema de nomenclatura proporciona información relevante sobre la composición del acero. El nombre del acero con número 1.4307 es X2CrNi18-9, donde:

X	2	CrNi	18-9
Indica alto grado de aleación	100 x % de carbono	Símbolos químicos de los principales elementos aleados	% de los principales elementos aleados

A cada nombre de acero inoxidable le corresponde una única numeración. En el Apéndice A se presenta una tabla en la que se muestran las designaciones para los grados equivalentes de acero inoxidable, en varias normas nacionales y europeas.

En la Tabla 3.1 se presentan los valores mínimos especificados para las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables más comunes según EN 10088-2. La composición química de estos aceros se presenta en la Tabla 3.2.

Se adopta la hipótesis de trabajo de que los aceros inoxidables austeníticos y dúplex presentan una adecuada tenacidad y no son susceptibles a la rotura frágil para temperaturas de servicio inferiores a -40°C .

Los valores de cálculo de las propiedades mecánicas se presentan en la Sección 3.2.4.

Tabla 3.1 *Propiedades mecánicas especificadas para los aceros inoxidables usuales según EN 10088-2*

	Grado	Producto ¹⁾	Espesor máximo (mm)	Mínima resistencia ²⁾ correspondiente al 0.2% (N/mm ²)	Resistencia última a tracción (N/mm ²)	Alargamiento de rotura (%)	
Aceros inoxidables austeníticos básicos de cromo y níquel	1.4301	C	8	230	540 – 750	45 ⁽³⁾	
		H	13,5	210	520 – 720	45 ⁽³⁾	
		P	75	210	520 – 720	45	
	1.4307	C	8	220	520 – 700	45	
		H	13,5	200	520 – 700	45	
		P	75	200	500 – 700	45	
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo y níquel	1.4401	C	8	240	530 – 680	40	
		H	13,5	220	530 – 680	40	
		P	75	220	520 – 670	45	
	1.4404	C	8	240	530 – 680	40	
		H	13,5	220	530 – 680	40	
		P	75	220	520 – 670	45	
Aceros inoxidables austeníticos estabilizados	1.4541	C	8	220	520 – 720	40	
		H	13,5	200	520 – 720	40	
		P	75	200	500 – 700	40	
	1.4571	C	8	240	540 – 690	40	
		H	13,5	220	540 – 690	40	
		P	75	220	520 – 670	40	
Aceros inoxidables austeníticos bajos en carbono, altos en nitrógeno	1.4318	C	8	350	650 – 850	35	
		H	13,5	330	650 – 850	35	
		P	75	330	630 – 830	45	
	Aceros inoxidables dúplex	1.4362	C	8	450	650 – 850	20
			H	13,5	400	650 – 850	20
			P	75	400	630 – 800	25
1.4462		C	8	500	700 – 950	20	
		H	13,5	460	700 – 950	25	
P	75	460	640 – 840	25			

Notas:

- 1) C=fleje laminado en frío, H=fleje laminado en caliente, P=chapa laminada en caliente
- 2) Propiedades transversales
- 3) Para material más estirado, los valores mínimos son un 5% más bajos

Tabla 3.2 Composición química según EN 10088-2

	Grado	Contenido de los elementos de la aleación (valor máximo o rango permitidos) peso %				
		C	Cr	Ni	Mo	Otros
Aceros inoxidables Austeníticos	1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4541	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0		Ti: 5xC – 0,7 ⁽¹⁾
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 ⁽¹⁾
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
Aceros dúplex	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22

Nota:

(1) Se añade titanio para estabilizar el carbono y mejorar así el comportamiento frente a corrosión en la zona afectada por el calor en las soldaduras. Sin embargo, excepto para construcción pesada, el empleo de titanio para estabilizar aceros austeníticos ha sido sustituido por la disponibilidad ya existente de los grados de bajo contenido en carbono, 1.4307 y 1.4404.

Tornillos

Los tornillos de acero inoxidable están tratados en EN ISO 3506, *Corrosion-resistant stainless steel fasteners*. Dicha norma proporciona la composición química y las propiedades mecánicas para las uniones de los grupos austeníticos, martensíticos y ferríticos. Se admiten otros materiales alternativos no recogidos de forma concreta en la norma siempre que se ajusten a los requisitos de las propiedades físicas y químicas y presenten una resistencia a la corrosión equivalente.

En EN ISO 3506, los tornillos y tuercas se clasifican con la letra: “A” para acero inoxidable austenítico, “F” para ferrítico y “C” para martensítico. Se recomienda la utilización de tornillos con acero austenítico. Las propiedades mecánicas y composición química de éstos están recogidas en las Tablas 3.3 y 3.4 (tomadas de EN ISO 3506). La letra va seguida de un número (1, 2, 3, 4 o 5) que indica el grado de resistencia a la corrosión, representando el 1 el grado menos durable y el 5 el grado más durable.

Los aceros inoxidables de grado A1 están especialmente diseñados para mecanizado. Debido a su alto contenido en sulfuro los aceros de este grado tienen menor resistencia a la corrosión que los aceros correspondientes con contenidos normales de sulfuro. Debe tenerse especial cuidado si se utilizan tornillos de grado A1, ver Sección 3.6.1.

Los aceros de grado A2 tienen una resistencia a la corrosión equivalente a los de grado 1.4301. Los aceros de grado A3 son aceros inoxidables estabilizados con una resistencia a la corrosión equivalente a la del grado 1.4541 (un acero estabilizado es aquél que contiene una adición de un agente, como el titanio, que favorece fuertemente la formación de carburos; es decir, la formación de carburo de titanio inhibe la formación de carburos de cromo).

Los aceros de grado A4 contienen molibdeno y tienen una resistencia a la corrosión equivalente a los de grado 1.4401. Los aceros de grado A5 son aceros inoxidables estabilizados con molibdeno con las propiedades del acero de grado 1.4571.

Los tornillos con acero austenítico pueden obtenerse con tres niveles de resistencia última (conocidos como clases), ver Tabla 3.3. Cabe destacar que dichos valores son aplicables a tornillos mayores que los correspondientes a la métrica M39 para la clase 50 y a la métrica M24 para las clases 70 y 80, pues dichos valores dependen de la aleación y del método de fabricación.

Los tornillos fabricados para la clase 50 serán no magnéticos, pero los de las clases 70 y 80 pueden mostrar algunas propiedades magnéticas.

Los tornillos de la clase 50 tienen una condición de aleación débil, con lo que se consigue una mayor resistencia a la corrosión. Los tornillos de las clases 70 y 80 están trabajados en frío y ello puede afectar ligeramente a la resistencia a la corrosión. Los tornillos de la clase 50 con rosca mecanizada pueden ser más susceptibles al gripado, ver Sección 10.5.

Debería prestarse atención al hecho de que la resistencia del material y la resistencia a la corrosión de los tornillos y del metal de base sean muy similares.

EN 14399 proporciona reglas para el marcado CE de tornillos.

Tabla 3.3 *Valores mínimos especificados de las propiedades mecánicas de los tornillos y tuercas de grado austenítico según EN ISO 3506*

Grado ⁽¹⁾	Clase	Rango del diámetro de la rosca	Tornillos		Tuercas
			Resistencia última a tracción ⁽²⁾ (N/mm ²)	Tensión correspondiente al 0,2% de deformación remanente (N/mm ²)	Tensión de prueba (N/mm ²)
A1, A2, A3, A4 y A5	50	≤ M39	500	210	500
	70	≤ M24 ⁽³⁾	700	450	700
	80	≤ M24 ⁽³⁾	800	600	800

Notas:

- (1) Además de los tipos de acero tratados en EN ISO 3506, correspondientes a las clases 50, 70 y 80, pueden utilizarse otros tipos de acero, de acuerdo con EN 10088-3.
- (2) La tensión de tracción se calcula sobre el área resistente a tracción.
- (3) Para medios de unión con diámetros nominales de rosca $d > 24$ mm, las propiedades mecánicas serán acordadas entre el usuario y el fabricante y marcadas con el grado y clase de acuerdo con esta tabla.

Tabla 3.4 Composición química de los tornillos según EN ISO 3506

Grado	Composición química (tanto por ciento en peso) ⁽¹⁾								Otros
	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	
A1	0,12	16,0 – 18,0	5,0 – 10,0	0,7	1,0	6,5	0,20	0,15 – 0,35	
A2	0,1	15,0 – 20,0	8,0 – 19,0	- ⁽²⁾	1,0	2,0	0,05	0,03	
A3	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0	- ⁽²⁾	1,0	2,0	0,045	0,03	o Ti: ≥ 5xC – 0,8 o Nb/Ta: ≥ 10xC – 1,0
A4	0,08	16,0 – 18,5	10,0 – 15,0	2,0 – 3,0	1,0	2,0	0,045	0,03	
A5	0,08	16,0 – 18,5	10,5 – 14,0	2,0 – 3,0	1,0	2,0	0,045	0,03	o Ti: ≥ 5xC – 0,8 o Nb/Ta: ≥ 10xC – 1,0

Notas:
(1) Los valores son máximos, a no ser que se indique lo contrario
(2) El fabricante puede incluir molibdeno

3.2 Comportamiento mecánico y valores de cálculo de las propiedades del material

3.2.1 Comportamiento tenso-deformacional básico

El comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable difiere del comportamiento del acero al carbono en varios aspectos. La diferencia más importante reside en la forma de la curva tensión-deformación. Mientras el acero al carbono exhibe un comportamiento elástico lineal hasta su límite elástico y una zona plana antes del endurecimiento por deformación, el acero inoxidable presenta una curva tensión-deformación con forma más redondeada sin límite elástico definido (ver Figura 3.1). Por ello, el “límite elástico” del acero inoxidable se expresa, en general, en términos de una resistencia de prueba definida para un determinado valor de deformación remanente (convencionalmente la deformación del 0,2%), tal y como se muestra en la figura.

En la Figura 3.1 se presentan otras curvas tensión-deformación experimentales típicas, representativas de los materiales acero al carbono y acero inoxidable. Dichas curvas no deben utilizarse en el dimensionamiento.

En cualquier caso, debe señalarse que el acero inoxidable puede absorber impactos considerables sin que sobrevenga la fractura, gracias a su excelente ductilidad (especialmente los grados austeníticos) y a sus características de endurecimiento por deformación.

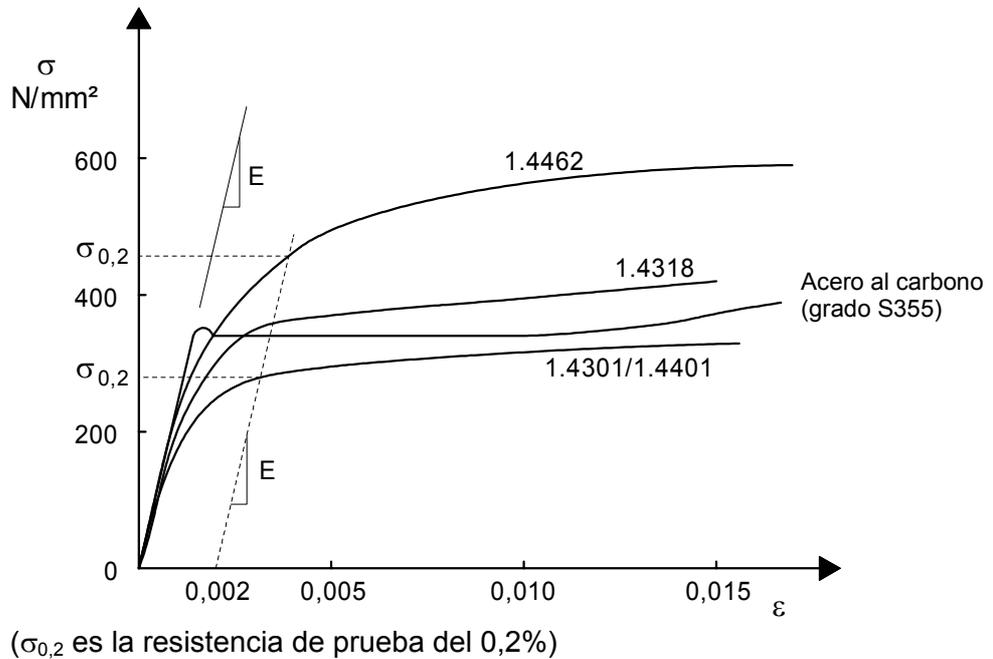


Figura 3.1 Curvas tensión-deformación típicas para el acero inoxidable y el acero al carbono en la condición de recocido (para tensión longitudinal)

3.2.2 Factores que influyen en el comportamiento tenso-deformacional

Existen unos factores que pueden cambiar la forma de la curva básica tensión-deformación para cualquier tipo de acero inoxidable. Estos factores son, en mayor o menor medida, interdependientes:

Trabajado en frío

Los niveles de resistencia de los aceros inoxidables austeníticos y dúplex aumentan con el trabajado en frío (tal como ocurre durante las operaciones de conformado en frío incluyendo el nivelado/aplanado mediante rodillo y también durante la fabricación). Asociada a esta mejora de los niveles de resistencia se produce una reducción de la ductilidad, aunque generalmente tiene poca consecuencia gracias a los altos valores iniciales de ductilidad, especialmente para los aceros inoxidables austeníticos.

La Tabla 3.5 proporciona los valores de conformado en frío especificados en EN 1993-1-4, los cuales se han tomado de la Norma Europea para acero inoxidable EN 10088. Los aceros conformados en frío pueden especificarse en términos de la mínima tensión correspondiente al 0,2% de deformación remanente o de la resistencia última a tracción o de la dureza, pero solamente puede usarse uno de estos parámetros.

El trabajado en frío del acero inoxidable tiende a aumentar la asimetría en el comportamiento a tracción y compresión y la anisotropía (se obtienen diferentes curvas características tensión-deformación en las direcciones paralela y perpendicular al laminado). El grado de asimetría y de anisotropía depende del grado, del nivel de trabajado en frío y de la línea de fabricación. En la Figura 3.2 se presentan las curvas tensión deformación para el grado 1.4318 trabajado en frío a C850; la curva de resistencia a la compresión en la dirección longitudinal está por debajo de las curvas de resistencia a la tracción tanto en dirección longitudinal

como transversal (los valores que tradicionalmente se dan en las normas de materiales como EN 10088, y que son presentados, por consiguiente, por los suministradores). Es por tanto necesario tener especial cuidado en la elección de la resistencia de cálculo para material trabajado en frío (ver Sección 3.2.4). La información adicional de los valores relativos a otros tipos de material o direcciones de carga debe ser suministrada por el suministrador.

El precio del acero inoxidable trabajado en frío es ligeramente superior al del material recocido equivalente, dependiendo del grado, de la forma del producto y del nivel de trabajado en frío.

Tabla 3.5 Niveles de resistencia para el trabajado en frío según EN 10088-2
(aplicable a materiales con espesor ≤ 6 mm)

Condición de trabajado en frío	Mínima resistencia correspondiente a 0.2%	Resistencia mínima a tracción ¹⁾²⁾	Grados de acero inoxidable disponibles en la condición de trabajado en frío
CP350	350	700 ³⁾	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571
CP500	500	850 ³⁾	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571, 1.4318
CP700	700	1000 ³⁾	1.4318, 1.4301
C700	350 ³⁾	700	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571
C850	500 ³⁾	850	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571, 1.4318
C1000	700 ³⁾	1000	1.4318, 1.4301

Nota:

- (1) Deben acordarse los valores intermedios de la resistencia correspondiente al 0,2% o de la resistencia a tracción.
- (2) El espesor máximo del producto para cada nivel de resistencia disminuye con la resistencia. El espesor máximo del producto y la deformación remanente dependen también del comportamiento al endurecimiento por trabajado del acero y de las condiciones de trabajado en frío – puede pedirse información más detallada al fabricante.
- (3) No está especificado, son valores mínimos indicativos.

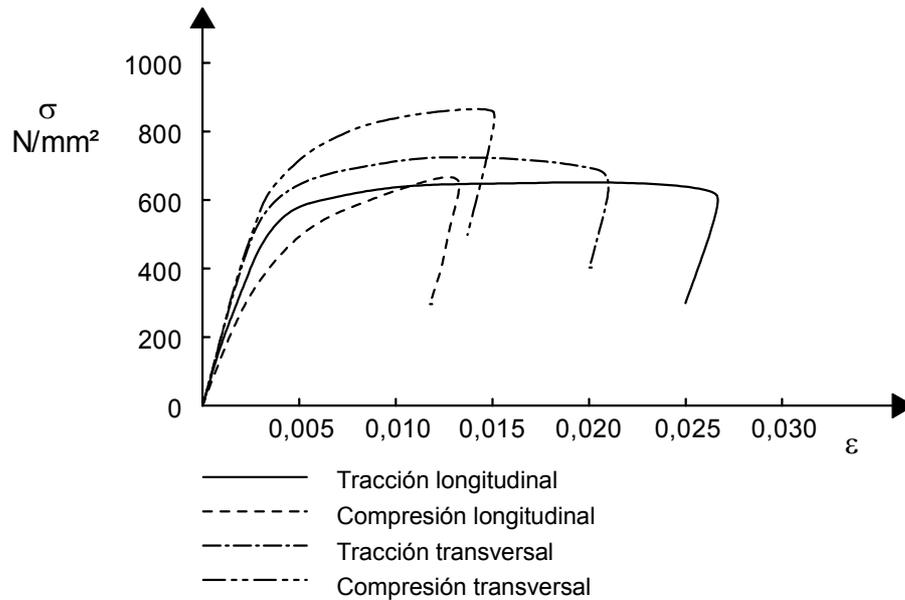


Figura 3.2 *Curvas tensión-deformación típicas para el grado 1.4318 con un nivel de trabajado en frío C850.*

Las esquinas de las secciones transversales conformadas en frío pueden llegar a aumentar su límite elástico hasta alrededor de un 50% durante la fabricación. Sin embargo, el efecto de dicha mejora está muy localizado y el incremento de resistencia del elemento estructural depende de la posición relativa de las esquinas en la propia sección transversal; por ejemplo en una viga con esquinas próximas a la fibra neutra no se obtendría un incremento significativo de su resistencia estructural. El aumento de resistencia compensa de forma sobrada cualquier efecto ocasionado por la disminución de material en las esquinas trabajadas en frío. Si se ha de tener en cuenta la mejora que proporciona el aumento de resistencia debido al proceso de fabricación se recomienda que ello sea comprobado mediante ensayos (ver Sección 9).

La soldadura posterior del elemento tendrá un efecto parcial de recocido con la consecuente reducción de las propiedades mejoradas de resistencia, resultantes del trabajado en frío – la Sección 6.4.4 establece una guía de dimensionamiento de uniones soldadas para elementos trabajados en frío.

Sensibilidad a la velocidad de deformación

La sensibilidad a la velocidad de deformación es más pronunciada en aceros inoxidable que en aceros al carbono. Es decir, a una rápida velocidad de deformación, puede alcanzarse proporcionalmente una mayor resistencia en los aceros inoxidable que en los aceros al carbono.

Tratamiento del calor

El recocido, o el reblandecimiento, reducen la mejora de resistencia y la anisotropía.

3.2.3 Valores típicos de las propiedades del material

En base a lo expuesto en las Secciones 3.2.1 y 3.2.2, se desprende que las propiedades mecánicas del acero inoxidable dependen de más factores que en el caso del acero al carbono. Su metalurgia es más compleja y el proceso de fabricación tiene un elevado impacto en las propiedades finales. Para cualquier

grado de acero inoxidable es de esperar que haya diferencias entre los materiales elaborados por distintos fabricantes. Sin embargo, las propiedades mecánicas, dependientes de la composición química y del tratamiento termo-mecánico, están, en gran medida, bajo el control del fabricante, siendo posible negociar con él las propiedades deseadas.

Desde un punto de vista estructural, la resistencia real, correspondiente al 0,2%, supera al valor mínimo especificado de dicha tensión, de forma significativa. Las tensiones de prueba medias están entre un 20 y 35% por encima del valor mínimo especificado. Los incrementos observados para la tensión de prueba no coinciden con los incrementos de resistencia última, que están en general sólo un 10% por encima de los mínimos especificados.

3.2.4 Valores de cálculo de las propiedades del material

Productos planos

Pueden considerarse tres opciones: valores especificados mínimos, valores obtenidos mediante ensayos y valores certificados de fábrica.

- (i) Dimensionamiento utilizando los valores especificados mínimos

Material recocido

Se toma para la resistencia de cálculo característica, f_y (límite elástico), y para la resistencia última característica, f_u los valores especificados mínimos en la Norma EN 10088-2 (presentados en la Tabla 3.1).

Material trabajado en frío

Para el material suministrado en las condiciones de trabajado en frío especificadas en EN 10088 deben adoptarse valores nominales incrementados de f_y y f_u .

Para un material suministrado con un determinado valor de la resistencia correspondiente al 0,2% (p.e. CP350), debe tomarse como resistencia característica el valor de la mínima resistencia correspondiente al 0,2% de la Tabla 3.5. Para tener en cuenta la asimetría del material conformado en frío en aquellos casos en los que la compresión en la dirección longitudinal sea una condición resistente relevante (p.e. en pilares sometidos a flexión), debe tomarse un valor característico de la resistencia de cálculo de 0,8 x la resistencia correspondiente al 0,2% de la Tabla 3.5. Podrán usarse valores mayores siempre y cuando sea comprobado mediante ensayos.

Para un material suministrado con una determinada resistencia a la tracción (p.e. C700), se debe tomar como resistencia característica la resistencia mínima a tracción de la Tabla 3.5; la mínima resistencia correspondiente al 0,2% deberá obtenerse del suministrador.

Nota 1: Las secciones huecas rectangulares están disponibles en material trabajado en frío para resistencias intermedias entre CP350 y CP500 con un límite elástico y una resistencia última a tracción garantizadas por el fabricante (siendo el límite elástico válido en tracción y compresión).

Nota 2: Las reglas de dimensionamiento de este Manual de Diseño son aplicables para materiales hasta grados CP500 y C850. Para niveles superiores de trabajado en frío, el dimensionamiento debe realizarse mediante ensayos de acuerdo con la Sección 9. Los elementos con secciones transversales de Clase 1, 2 y 3, los cuales no están sujetos a

inestabilidades locales o globales, son una excepción, y la resistencia de la sección transversal puede calcularse de acuerdo con la Sección 4.

(ii) Dimensionamiento utilizando datos de ensayos

Este procedimiento de dimensionamiento debería solamente ser considerado como una opción cuando hayan sido realizados ensayos a tracción de testigos cortados de las láminas o placas a partir de las cuales se conforman o fabrican los elementos estructurales. El proyectista debe poseer el convencimiento de que los ensayos se han llevado a cabo según una norma reconocida, por ejemplo EN 10002-1, y que los procedimientos adoptados por el fabricante son tales que el elemento estará realmente confeccionado con el material ensayado, y posicionado correctamente en la estructura.

Un valor para la resistencia de cálculo puede determinarse a partir de una aproximación estadística según las recomendaciones del Anejo D de EN 1990.

Se recomienda que la resistencia última característica, f_u , se base en el valor mínimo especificado dado en EN 10088-2.

(iii) Dimensionamiento utilizando valores certificados de fábrica

Los valores medidos de la resistencia del 0,2% se dan en el certificado de fábrica. Un valor para la resistencia de cálculo puede determinarse a partir de una aproximación estadística según las recomendaciones del Anejo D de EN 1990.

Se recomienda que la resistencia última característica, f_u , se base en el valor mínimo especificado dado en EN 10088-2.

Para todos los aceros inoxidables austeníticos y dúplex utilizados habitualmente en aplicaciones estructurales se adopta el valor de 200 000N/mm² para el módulo de Young, de acuerdo con la Norma EN 10088-1. Para el cálculo de flechas, es más adecuado utilizar el módulo secante, ver Sección 5.4.6. Para estos tipos de acero inoxidable se adopta un valor de 0,3 para el coeficiente de Poisson y de 76 900 N/mm² para el módulo de deformación transversal, G.

Tornillos

Para el cálculo de la resistencia de un tornillo a tracción, a cortante o al efecto combinado de ambos, para la resistencia básica f_{ub} se toma:

$$f_{ub} = \sigma_{ub}$$

donde σ_{ub} es la resistencia última a tracción mínima especificada dada en la Tabla 3.3 para la clase apropiada de acero inoxidable.

Cuando sea necesario considerar la resistencia a largo plazo del tornillo, deberá hacerse referencia a EN 1990 para la combinación apropiada de acciones en estado límite último.

3.3 Propiedades físicas

La Tabla 3.6 presenta las propiedades físicas a temperatura ambiente, en condición de recocido, para los grados de acero inoxidable de EN 10088 cubiertos en este Manual de Diseño. Las propiedades físicas pueden variar ligeramente con la forma

y el tamaño del producto, pero tales variaciones no suelen ser de importancia crítica para su aplicación.

Tabla 3.6 *Propiedades físicas a temperatura ambiente, acero recocido*

Grado	Densidad (kg/m ³)	Coefficiente de dilatación térmica 20 – 100°C (10 ⁻⁶ /°C)	Conductividad térmica (W/m°C)	Capacidad calorífica (J/kg°C)
1.4301	7900	16	15	500
1.4307	7900	16	15	500
1.4401	8000	16	15	500
1.4404	8000	16	15	500
1.4541	7900	16	15	500
1.4571	8000	16,5	15	500
1.4318	7900	16	15	500
1.4362	7800	13	15	500
1.4462	7800	13	15	500

Desde un punto de vista estructural, la propiedad física más importante es el coeficiente de dilatación térmica lineal que, para los grados austeníticos, difiere considerablemente del correspondiente al acero al carbono ($12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). En los casos en los que se utilice conjuntamente acero al carbono y acero inoxidable, deberá considerarse en su dimensionamiento el efecto de dicha dilatación térmica diferencial.

Los aceros inoxidables dúplex y ferríticos son magnéticos. Cuando las propiedades no magnéticas de los grados austeníticos sean de importancia para su aplicación, deberá tenerse cuidado al seleccionar los consumibles de soldadura adecuados para minimizar el contenido de ferrita en la soldadura. Un trabajo en frío considerable, en especial el del acero austenítico aleado, puede aumentar también la permeabilidad magnética; un posterior recocido restablecería las propiedades no magnéticas. Para aplicaciones no magnéticas, se recomienda seguir los informes y consejos del fabricante del acero.

3.4 Efectos de la temperatura

Los aceros inoxidables austeníticos se utilizan en aplicaciones criogénicas. Al otro extremo de la escala de temperaturas, los grados austeníticos y dúplex conservan una mayor proporción de su resistencia a temperaturas por encima de los 550°C que el acero al carbono. Sin embargo, el dimensionamiento de estructuras sometidas durante largo plazo a temperaturas criogénicas o a elevadas temperaturas está fuera del alcance de este Manual de Diseño. Basta mencionar que otras propiedades mecánicas y tipos de corrosión, distintos a los ya considerados en la Sección 3, cobran una mayor importancia. Otros aceros inoxidables, aparte de los seleccionados aquí son, en la mayoría de los casos, más idóneos para aplicaciones a elevadas temperaturas, debiendo solicitarse informes adicionales complementarios.

Los aceros inoxidables dúplex no deberían utilizarse durante largos períodos de tiempo a temperaturas superiores a 300°C, debido a la posibilidad de fragilización.

La Sección 7 cubre el dimensionamiento frente a fuego y proporciona las propiedades físicas y mecánicas de los aceros inoxidables a altas temperaturas.

3.5 Coste de ciclo de vida

Hay una creciente conciencia de que para seleccionar el material deberían considerarse los costes de ciclo de vida (o de toda la vida), y no solamente los iniciales. Los costes de ciclo de vida tienen en cuenta:

- costes iniciales,
- costes de explotación,
- valor residual.

El acero inoxidable es a veces considerado como un material caro. Si embargo, la experiencia ha demostrado que el uso de materiales resistentes a la corrosión con el fin de disminuir los costes de mantenimiento y reparación puede llegar a compensar el empleo de un material con un mayor coste inicial.

El coste inicial de un producto estructural de acero inoxidable es considerablemente superior, dependiendo del grado de acero inoxidable, al de uno equivalente en acero al carbono. Sin embargo, puede ahorrarse al no tener que proteger sistemáticamente la superficie.

La excelente resistencia del acero inoxidable puede ofrecer muchos beneficios, como por ejemplo:

- reducción de la frecuencia de la inspección y de los costes asociados,
- reducción de costes de mantenimiento,
- mayor vida útil.

El acero inoxidable es un material con un alto valor residual (es decir, el valor de la estructura al final de su vida), aunque raramente éste sea un factor decisivo para estructuras con una larga vida útil (por ejemplo más de 50 años).

El coste de ciclo de vida utiliza los principios contables generalmente aceptados de descuento de los flujos de caja para reducir todos esos costes a valor actual. La tasa de descuento abarca la inflación, los tipos de interés, impuestos y, posiblemente, un factor de riesgo. Esto permite llevar a cabo un análisis comparativo real de las opciones disponibles y de los beneficios potenciales que a largo plazo puede ofrecer el acero inoxidable frente a la elección de otros materiales.

3.6 Selección de materiales

3.6.1 Grados

En la gran mayoría de aplicaciones estructurales en las que se utiliza acero inoxidable, es la resistencia a la corrosión la propiedad que más se explota, ya sea por razones estéticas, de mínimo mantenimiento o de durabilidad a largo plazo. Por lo tanto, la resistencia a la corrosión deberá ser el factor primordial ante la selección del grado adecuado.

Los aceros inoxidables son resistentes a la corrosión gracias a la presencia de una película superficial pasivante la cual, dada una adecuada entrada al oxígeno o a los agentes oxidantes apropiados, se autosella cuando está dañada. Esta película de óxido es principalmente consecuencia del contenido de cromo en el acero, aunque la adición de níquel y de otros elementos aleados puede mejorar significativamente la protección ofrecida por la película. En particular, se utiliza un pequeño

porcentaje de molibdeno para mejorar la resistencia del acero a las picaduras (ver Sección 3.7.2).

Cuando la película superficial de óxido se destruye, posiblemente por ataque electroquímico o daño mecánico, puede iniciarse la corrosión.

Un proyecto esmerado debería asegurar un comportamiento estructural exento de problemas; en cualquier caso el proyectista debe conocer que incluso el acero inoxidable puede estar sometido a varias formas de corrosión en ciertas circunstancias. A pesar de la potencial existencia de estos efectos de degradación, es perfectamente posible emplear aceros inoxidables extremadamente efectivos, siempre que se tengan presentes algunos principios elementales. Solamente cuando estos materiales se emplean sin tener en cuenta tales principios, los que hay detrás de sus propiedades de resistencia a la corrosión, es cuando pueden aparecer problemas.

La selección del grado correcto de acero inoxidable debe tener en cuenta el entorno de aplicación, la línea y el proceso de fabricación, el acabado superficial y el mantenimiento de la estructura. Debe destacarse que los requisitos de mantenimiento son mínimos; meramente, el lavado del acero inoxidable, incluso de forma natural con agua de lluvia, ayudará notablemente a alargar la vida en servicio.

El primer paso es la caracterización del entorno de servicio, considerando anticipadamente desviaciones razonables de las condiciones de proyecto. En ambientes atmosféricos, debe prestarse especial atención a situaciones de emplazamiento muy localizadas tales como la proximidad a chimeneas que emitan humos corrosivos. También deberían considerarse posibles futuros desarrollos o cambios de uso de la estructura. La condición superficial y la temperatura del acero, así como el estado tensional previsto, pueden ser también parámetros de especial importancia para la toma de decisión (ver Sección 3.7.2).

Los posibles grados de acero inoxidable pueden elegirse para ofrecer en conjunto una satisfactoria resistencia a la corrosión en el entorno. La selección de un posible acero debe considerar cuáles son las posibles formas de corrosión que pueden ser significativas en el entorno de operación. Para ello se requieren ciertas valoraciones acerca de la naturaleza de la corrosión encontrada en los aceros inoxidables. La Sección 3.7 traza los principios esenciales subyacentes a la corrosión de los aceros inoxidables, e indica las condiciones en donde el empleo de aceros inoxidables debería estar libre de riesgos excesivos y complicaciones. También se pretende ilustrar los aspectos generales de buena práctica, así como aquellas circunstancias en donde los aceros inoxidables deben ser utilizados con precaución. En este caso deben solicitarse informes especializados a un técnico competente, puesto que todavía en muchos casos los aceros pueden emplearse con éxito.

Así pues, deben considerarse las propiedades mecánicas, la facilidad de fabricación, la disponibilidad de formas de productos, el acabado superficial y los costes.

Para valorar la adecuación de los posibles grados, lo mejor es recurrir a la experiencia del empleo de los aceros inoxidables en aplicaciones y entornos similares. La Tabla 3.7 ofrece una guía práctica para la selección de los grados adecuados en ambientes atmosféricos. Las normativas nacionales también deberían consultarse, ya que en algunos casos pueden ser más restrictivas. En el caso de aceros inoxidables sumergidos, véase la Sección 3.7.3. Cuando el acero

inoxidable entra en contacto con sustancias químicas, siempre se debe solicitar un informe experto.

Por otra parte, debe tenerse precaución al utilizar aceros inoxidable para uniones no mecanizadas. La adición de sulfuro en la composición de estos aceros inoxidable austeníticos les hace más susceptibles a la corrosión, especialmente en ambientes industriales y marinos. En particular, ello debe considerarse en las uniones con materiales de la categoría A1 de acuerdo con EN ISO 3506, ver Tabla 3.3.

Tabla 3.7 Grados recomendados para aplicaciones en ambientes atmosféricos

Grado de acero	Emplazamiento											
	Rural			Urbano			Industrial			Marino		
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
Aceros austeníticos básicos cromo - níquel (p.e. 1.4301, 1.4307, 1.4541, 1.4318)	T	T	T	T	T	(T)	(T)	(T)	X	T	(T)	X
Aceros austeníticos molibdeno – cromo – níquel (p.e. 1.4401, 1.4404, 1.4571) y dúplex 1.4362	0	0	0	0	T	T	T	T	(T)	T	T	(T)
Aceros dúplex 1.4462	0	0	0	0	0	0	0	0	T	0	0	T

B - Condiciones menos corrosivas de esta categoría, p.e. suavizadas por humedad baja o por bajas temperaturas.
M - Condiciones bastante típicas de esta categoría.
A - Corrosión superior a la típica, p.e. incrementada por una persistente humedad alta, temperaturas elevadas, y particularmente agentes agresivos contaminantes de aire.
O - Potencialmente sobre-especificado desde el punto de vista de resistencia a la corrosión.
T - Probablemente la mejor elección para resistencia a corrosión y coste.
X - Probable que sufra corrosión excesiva.
(T) - Merece ser considerado si se toman precauciones (es decir, si se especifica una superficie relativamente lisa y si se lava con regularidad).

NOTA: Las reglamentaciones nacionales pueden contener requisitos más estrictos.

3.6.2 Disponibilidad de formas de productos

Tipos generales de formas de productos

Láminas, chapas y barras están ampliamente disponibles en los grados de aceros considerados en este Manual de Diseño. Los productos tubulares están disponibles en los grados austeníticos y dúplex 1.4462 (2205). Los productos tubulares del grado dúplex 1.4362 (2304) no están tan ampliamente disponibles ya que se trata de un grado relativamente nuevo en la industria de la construcción, aunque ha sido utilizado durante años en muros de contención en estructuras offshore.

Hay un rango de secciones laminadas (angulares, secciones en U, secciones en T, secciones huecas rectangulares y secciones en I) en los grados austeníticos normales 1.4301 y 1.4401, pero ninguno en los grados dúplex. Generalmente, las secciones se fabrican por conformado en frío (por rodillo o por plegado), o mediante soldadura.

El material en la condición de trabajado en frío está disponible en varias formas de producto incluyendo placas, láminas, bobinas, flejes, barras y secciones huecas:

- placas, láminas, bobinas, flejes (en espesores típicamente $\leq 6,0$ mm)
- barras redondas (diámetros de 5 mm a 60 mm)

- secciones huecas cuadradas y rectangulares (dimensiones de la sección transversal hasta 400 mm, espesores desde 1,2 a 6 mm).

Los grados de acero inoxidable que están disponibles comercialmente en la condición de trabajado en frío se presentan en la Tabla 3.5.

Conformado en frío

Es importante debatir cuanto antes con los posibles fabricantes para averiguar los límites del conformado en frío, ya que los aceros inoxidables requieren mayores cargas para el conformado que los aceros al carbono. La longitud de las secciones conformadas en frío se encuentra necesariamente limitada por el tamaño de la máquina o por la capacidad de potencia en el caso de materiales más anchos o más resistentes. Los grados dúplex requieren aproximadamente el doble de carga de conformado que el que necesitan los aceros austeníticos y, por ello, el posible rango de secciones en dúplex es más limitado. Además, debido a la ductilidad más baja del material dúplex, se deberían emplear unos radios de curvatura mayores para el doblado. En la Sección 10.3.2 puede encontrarse información adicional.

Acabado superficial

En determinadas aplicaciones el acabado superficial y la apariencia son importantes. Los fabricantes ofrecen una amplia gama de acabados estándar, desde el acabado de fábrica, hasta acabados mates y pulidos brillantes. También pueden ofrecerse acabados con texturas propias. Debe señalarse que, aunque los acabados son estándares, la variabilidad existente en el proceso de acabado introduce diferencias en la apariencia entre los fabricantes. Los acabados brillantes se emplean con frecuencia en aplicaciones arquitectónicas y debe mencionarse que este tipo de acabado pone más de manifiesto cualquier deformación no plana del material, especialmente en superficies de paneles. Los laminados rigidizados, estampados, con textura, modelados y contorneados con un elemento rígido pueden mitigar esta tendencia.

Tornillos

Los tornillos más ampliamente disponibles son las de la clase 70 de acuerdo con EN ISO 3506. Existen ciertas restricciones al tamaño y longitud de los tornillos de las clases 70 y 80, ver Tabla 3.3. Es posible encargar productos especiales, y ello conduce en ocasiones, a una solución económica.

Los tornillos pueden producirse mediante diversas técnicas, por ejemplo mecanizado, conformado en frío y forjado. Las roscas de tornillo mecanizadas no deben utilizarse en ambientes muy agresivos (p.e. marinos) debido a los problemas potenciales de corrosión en hendiduras. Las roscas laminadas son preferibles a las mecanizadas, ya que generalmente son más resistentes y proporcionan una mayor resistencia al gripado.

3.7 Durabilidad

3.7.1 Introducción

Los aceros inoxidables son, en general, muy resistentes a la corrosión y se comportan satisfactoriamente en la mayoría de ambientes. El límite de la resistencia a la corrosión de un determinado acero inoxidable depende de sus elementos constituyentes, lo cual significa que cada grado de acero tiene una respuesta ligeramente diferente cuando se expone a ambientes corrosivos. Así pues, es necesario seleccionar cuidadosamente el grado de acero inoxidable más apropiado para una determinada aplicación. Generalmente, cuanto mayor sea el nivel de resistencia a la corrosión exigido, mayor es el coste del material. Por

ejemplo, el acero de grado 1.4401 es más caro que el de grado 1.4301, debido a la adición de molibdeno.

El material en la condición de trabajado en frío tiene una resistencia a la corrosión similar a la del material recocido.

Las razones más habituales por las que un metal no cumple las expectativas previstas en lo que a resistencia a la corrosión se refiere son:

- (a) una incorrecta valoración del ambiente en el que se ubica o unas condiciones de exposición no previstas, por ejemplo contaminación no prevista por iones cloruro.
- (b) la forma en que se ha trabajado o tratado el acero inoxidable puede introducir un estado no previsto en la valoración inicial.

Aunque el acero inoxidable puede estar sujeto a decoloración y manchas (a menudo debido a la contaminación por acero al carbono), presenta excelentes características de durabilidad en edificios. En ambientes agresivos industriales y marinos, los ensayos no han mostrado ninguna reducción en la capacidad de su durabilidad, incluso cuando aparece alguna pequeña pérdida de peso. Sin embargo, la aparición de manchas antiestéticas de óxido en superficies externas puede ser considerada como un fallo por parte del usuario. Del mismo modo, una cuidadosa selección del material, buenos detalles constructivos y una correcta ejecución pueden reducir de manera significativa la probabilidad de aparición de manchas y corrosión; en la Sección 10 se presenta una guía práctica a tal fin. La experiencia señala que cualquier problema serio de corrosión aparece con mayor probabilidad durante los dos o tres primeros años de servicio.

En ciertos ambientes agresivos, algunos grados de acero inoxidable son susceptibles a ataques de carácter localizado. A continuación se describen seis posibles mecanismos de corrosión, aunque los tres últimos no suelen encontrarse en edificación convencional.

Debe enfatizarse que es necesaria la presencia de humedad (incluida la debida a condensación) para que ocurra la corrosión.

3.7.2 Tipos de corrosión y comportamiento de los grados de aceros

Corrosión por picaduras

Como el nombre indica, la corrosión por picaduras toma la forma de pequeños hoyos localizados. Ello ocurre como resultado de la rotura local de la capa pasivante, normalmente por iones cloruro, aunque otros haluros y otros aniones pueden tener un efecto similar. Durante el desarrollo de una picadura, los productos corrosivos pueden crear una solución muy corrosiva, que a menudo conduce a procesos de corrosión de alta velocidad. Sin embargo, en la mayoría de aplicaciones estructurales, las picaduras suelen ser sólo superficiales y la reducción de sección es despreciable. Por otra parte, los productos corrosivos pueden ensuciar los principales rasgos arquitectónicos de una obra. En estructuras de canalización, tuberías y contenedores debe adoptarse una tolerancia menor en cuanto a la corrosión por picaduras.

Dado que el ión cloruro es, con diferencia, el causante más común del ataque por picaduras, los ambientes costeros y marinos son bastante agresivos. La probabilidad de que un cierto entorno provoque ataque por picaduras depende, además del contenido de cloruros, de factores tales como la temperatura, la acidez o la alcalinidad y el contenido de gases oxidantes. La resistencia al ataque por

picaduras de un acero inoxidable depende de su composición química. El cromo, el molibdeno y el nitrógeno mejoran la resistencia al ataque por picaduras.

Una medida aproximada de la resistencia al ataque por picaduras viene dada por el Índice de Picaduras o Equivalente a la resistencia al ataque por picaduras (*Pitting Resistance Equivalent, PRE*) definido como:

$PRE = \% \text{ peso Cr} + 3,3(\% \text{ peso Mo}) + 30(\% \text{ peso N})$ para grados austeníticos

$PRE = \% \text{ peso Cr} + 3,3(\% \text{ peso Mo}) + 16(\% \text{ peso N})$ para grados dúplex

La determinación del PRE de un acero inoxidable permite llevar a cabo un análisis comparativo entre los diferentes aceros inoxidables.

El acero de grado 1.4301 tiene el PRE más bajo de todos los aceros considerados en este Manual de Diseño y no es, por tanto, el grado más adecuado para aplicaciones arquitectónicas en ambientes marinos excepto, quizás, para elementos estructurales internos protegidos de forma efectiva de espuma marina y niebla. El acero de grado 1.4301 también puede presentar niveles inaceptables de picaduras en atmósferas industriales severas y por consiguiente será preferible seleccionar el acero de grado 1.4401 o acero dúplex.

Corrosión en hendiduras

La corrosión en hendiduras ocurre en los mismos ambientes que la corrosión por picaduras. La corrosión se inicia más fácilmente en una hendidura que en una superficie libre ya que la difusión de oxidantes necesaria para mantener la capa pasivante está restringida. La severidad de la corrosión en hendiduras depende, en gran medida, de su geometría: cuanto más estrecha y profunda sea la hendidura más severas son las condiciones de corrosión. Es un problema probable solamente en soluciones estancadas en las que puede producirse una concentración de cloruros.

Las hendiduras pueden presentarse en uniones metal-metal, juntas, incrustaciones biológicas, sedimentos y daños superficiales tales como rayas profundas. Las hendiduras deben ser eliminadas aunque a menudo no es posible hacerlo en su totalidad.

Al igual que en la corrosión por picaduras, los elementos de aleación como el cromo, el molibdeno y el nitrógeno aumentan la resistencia a la corrosión en hendiduras y por tanto dicha resistencia aumenta del acero de grado 1.4301 a los aceros de grados 1.4401 a 1.4462.

Corrosión bimetalica (galvánica)

Cuando dos metales diferentes están en contacto eléctrico y a su vez conectados por medio de un electrolito (p.e. un líquido conductor como el agua de mar o agua dulce impura), fluye una corriente desde el metal anódico al catódico o metal más noble a través del electrolito. Como resultado, el metal menos noble se corroe.

Este tipo de corrosión es especialmente relevante cuando se plantean uniones de acero inoxidable con acero al carbono o aceros de baja aleación. Es importante seleccionar los materiales de soldadura de modo que sean al menos tan nobles como el material base. En ambientes corrosivos en los que pudiera estar presente el agua, tales como ambientes industriales pesados, atmósferas marinas, y donde pudiera existir inmersión en agua salobre o marina, deben evitarse las uniones de aceros inoxidables austeníticos mediante tornillos martensíticos y ferríticos (ver Sección 3.1.2).

La corrosión galvánica no debiera ser un problema en aceros inoxidable, aunque a veces su prevención pueda requerir precauciones que a primera vista resultan sorprendentes. Para evitar la corrosión galvánica, en principio, debe impedirse el flujo de corriente:

- aislando los metales diferentes, por ejemplo rompiendo la conexión metálica (ver Sección 6.1.1).
- evitando la formación de puentes electrolíticos, por ejemplo rompiendo la conexión electrolítica con pinturas u otros recubrimientos. Cuando se persigue conseguir la protección de esta manera, y no es posible recubrir ambos metales, es preferible recubrir el más noble (p.e. el acero inoxidable en el caso de unión acero inoxidable/acero al carbono)

El riesgo de un ataque profundo de corrosión es mayor si el área del metal más noble (p. e. el acero inoxidable) es mayor que el área del metal menos noble (p.e. el acero al carbono). Debe prestarse una especial atención al empleo de pinturas u otros recubrimientos sobre acero al carbono. Si existen pequeños poros o agujeros en el recubrimiento, la pequeña área de acero al carbono desnuda proporcionará relaciones de área cátodo/ánodo muy grandes, dando lugar a un severo ataque por picaduras del acero al carbono. Por supuesto, el ataque será probablemente mucho más intenso en condiciones de inmersión. Por esta razón es preferible pintar el acero inoxidable.

Relaciones desfavorables de área tienen lugar probablemente con tornillos y en uniones. El empleo de tornillos de acero al carbono en elementos de acero inoxidable debe evitarse ya que la relación de área del acero inoxidable en relación con el acero al carbono es grande y los tornillos estarán sujetos a un ataque agresivo. Por el contrario, la velocidad de ataque de un elemento de acero al carbono por un tornillo de acero inoxidable es mucho más lenta. Es generalmente útil apoyarse en experiencias previas en emplazamientos similares ya que metales diferentes pueden a menudo trabajar unidos sin peligro bajo condiciones de condensación o humedad ocasional sin efectos adversos, especialmente cuando la conductividad del electrolito es baja.

La predicción de estos efectos es difícil ya que la velocidad de corrosión se determina a partir de una serie de variables de cierta complejidad. El empleo de tablas de potencial eléctrico ignora la presencia de películas superficiales de óxido y los efectos de relaciones de área y de diferentes soluciones (electrolitos) químicas. Por esta razón, un empleo desinformado de estas tablas puede conducir a resultados erróneos. Dichas tablas deberían utilizarse de manera cuidadosa y solamente para valoraciones iniciales.

Los aceros inoxidables generalmente forman el cátodo en un enlace bimetalico y por ello no sufren corrosión. El contacto entre aceros inoxidables austeníticos y zinc o aluminio puede dar lugar a una corrosión adicional de los últimos dos metales. Es poco probable que el efecto de dicha corrosión sea significativo desde un punto de vista estructural; no obstante, el polvo blanco/gris resultante es absolutamente antiestético. El acoplamiento con cobre debe ser en general evitado excepto bajo condiciones adecuadas no severas.

El comportamiento general de los metales en contacto bimetalico en ambientes rurales, urbanos, industriales y costeros está completamente documentado en BS PD 6484 *Commentary on corrosion at bimetallic contacts and its alleviation*.

Fisuración por corrosión bajo tensión

El desarrollo de la corrosión bajo tensión (*Stress Corrosion Cracking, SCC*) requiere la existencia simultánea de tensiones de tracción y de factores ambientales específicos que difícilmente se encuentran en condiciones ambientales normales de edificación. Las tensiones no necesitan ser altas en relación con la tensión de prueba del material y pueden estar generadas por cargas y durante los procesos de fabricación tales como soldadura o el doblado.

Los aceros inoxidable dúplex muestran generalmente una mayor resistencia a la corrosión bajo tensión que los aceros austeníticos considerados en este Manual de Diseño. Se han desarrollado aceros inoxidable austeníticos con aleaciones superiores, como por ejemplo los grados 1.4539, 1.4529, 1.4547 y 1.4565 (no cubiertos en este Manual de Diseño) para aplicaciones en las que existe riesgo de corrosión bajo tensión.

Debe prestarse atención al empleo de elementos estructurales de acero inoxidable con tensiones residuales elevadas (p.e. ocasionadas por el trabajado en frío) en ambientes ricos en cloruros (p.e. piscinas interiores, estructuras en ambiente marino, estructuras offshore). EN 1993-1-4 aconseja que para elementos con capacidad resistente ubicados en atmósferas que contengan cloruros que no puedan limpiarse regularmente (p.e. cielos rasos en piscinas), solamente debe usarse los grados 1.4529, 1.4547 y 1.4565, a menos que la concentración de iones de cloruro en el agua de la piscina sea (inusualmente) ≤ 250 mg/l, en tal caso también es apropiado el grado 1.4539. También pueden usarse otros grados que hayan demostrado tener una resistencia a corrosión bajo tensión en estas atmósferas.

Corrosión generalizada (uniforme)

Bajo condiciones normales existentes en aplicaciones estructurales, el acero inoxidable no sufre una pérdida general de sección resistente, característica de la oxidación en hierros y aceros no aleados.

El acero inoxidable es resistente a muchas sustancias químicas; incluso algunas veces se utiliza como material para contener tales sustancias. En cualquier caso, cuando el acero inoxidable está en contacto con sustancias químicas, deberá solicitarse información adicional a los fabricantes o un informe al respecto, realizado por un técnico competente.

Corrosión intergranular (sensibilización) y degradación por soldadura

Cuando los aceros inoxidable se someten a prolongados períodos de calentamiento a temperaturas entre 450°C y 850°C, el carbono presente en el acero se difunde hacia los contornos del grano, precipitando carburo de cromo. Ello hace que el cromo desaparezca de la solución sólida y deje un bajo contenido en cromo adyacente al contorno del grano. En estas condiciones se dice que el acero se *sensibiliza*. Los contornos del grano son propensos a un ataque preferencial en una exposición posterior a un ambiente corrosivo. Este fenómeno se conoce como degradación por soldadura cuando ello ocurre en la zona afectada por el calor de una soldadura.

Existen tres vías para evitar la corrosión intergranular:

- utilizar aceros con un bajo contenido en carbono,
- utilizar aceros estabilizados con titanio o niobio, porque estos elementos se combinan preferentemente con el carbono para formar partículas estables, reduciéndose de este modo el riesgo de formación de carburo de cromo,

- utilizar tratamientos térmicos, sin embargo este método no suele emplearse en la práctica.

Los grados de acero inoxidable con bajo contenido en carbono (máximo 0,03%) y hasta espesores de 20 mm no deberían sufrir corrosión intergranular después de la soldadura por arco.

3.7.3 Corrosión en ambientes específicos

Aire

Los ambientes atmosféricos son variados, al igual que lo es su efecto sobre los aceros inoxidables. Las atmósferas rurales, no contaminadas por humos industriales ni sales marinas, son muy suaves desde el punto de vista de la corrosión, incluso en áreas de humedad elevada. Las atmósferas industriales y marinas son considerablemente más severas. La Tabla 3.7 ofrece una guía para la selección de los tipos de aceros inoxidables más adecuados.

Las causas más comunes de corrosión atmosférica son las partículas de hierro, procedentes de las operaciones de fabricación tanto en taller como en obra, y los cloruros provenientes del mar, de los procesos industriales o del cloruro cálcico empleado para producir cemento. Algunas partículas depositadas, aunque inertes, son capaces de absorber, soluciones ácidas débiles de dióxido de azufre de la atmósfera, las cuales pueden romper localmente la capa pasivante.

La apariencia general del acero inoxidable expuesto viene afectada por el acabado superficial (cuanto más liso mejor) y por el posible lavado de forma regular realizado (ya sea intencionadamente, ya sea debido a la lluvia).

Agua de mar

El agua de mar, incluyendo el agua salobre, contiene altos niveles de cloruros y por consiguiente es muy corrosiva, particularmente cuando el flujo de agua es bajo (menos de 1.5 m/s). Con flujos bajos de corriente, puede producirse un severo ataque por picaduras en los grados 1.4301 y 1.4401. Estos grados pueden sufrir también un ataque por corrosión en hendiduras, resultante de detalles de proyecto o de organismos marinos como los percebes.

La espuma salada puede causar un ataque tan importante como el que causaría una inmersión completa ya que la concentración de cloruros aumenta por evaporación del agua o por depósitos de cristales de sal.

La posibilidad de una corrosión galvánica severa en presencia de agua de mar debe considerarse si el acero inoxidable se utiliza con otros metales.

Otros tipos de agua

Los aceros inoxidables austeníticos se comportan normalmente de forma satisfactoria en agua destilada, potable y de caldera. Cuando la acidez es alta, el grado 1.4401 es el adecuado; sino, el grado 1.4301 es habitualmente suficiente. El grado 1.4401 también es el más adecuado cuando hay cantidades muy pequeñas de cloruros para evitar posibles problemas de corrosión por picaduras o en hendiduras. El agua de río necesita una consideración especial; la actividad biológica y microbiológica puede producir picaduras en los aceros inoxidables austeníticos en un plazo relativamente corto.

La posibilidad de erosión-corrosión debería considerarse en aguas que contengan partículas abrasivas.

Ambientes químicos

El rango de aplicación de los aceros inoxidable en ambientes químicos es amplio; este tema, en cualquier caso, no queda cubierto en detalle en este Manual. Sin embargo, debe señalarse que otros aceros diferentes a los considerados en este Manual pueden ser más adecuados en muchas aplicaciones. Debería solicitarse el informe de un ingeniero especialista en corrosión.

Los gráficos publicados por los fabricantes que muestran los resultados de ensayos de corrosión en diferentes ámbitos químicos requieren una interpretación cuidadosa. Aunque dan una idea de la resistencia de un grado en particular, las condiciones de servicio (temperaturas, presiones, concentraciones, etc.) varían y difieren generalmente de las condiciones de ensayo. También el efecto de las impurezas y el grado de aireación pueden influir significativamente en los resultados.

Suelos

La corrosión externa de los aceros inoxidable enterrados depende de la composición química del suelo y de su resistividad. Los suelos tienen diferente capacidad de corrosión en función de su nivel de humedad, pH, aireación, presencia de contaminación química, actividad microbiana y drenaje superficial. El acero inoxidable, en general, funciona bien en una gran variedad de suelos y especialmente bien en suelos con alta resistividad, aunque en algunos casos de suelos húmedos con baja resistividad pueden aparecer picaduras. La presencia de especies químicas agresivas tales como iones cloruro, así como algunos tipos de bacterias, y corrientes erráticas (causadas por algún sistema eléctrico de transporte como por ejemplo un tren o un tranvía) pueden causar corrosión localizada. El desarrollo de corrientes erráticas puede ser suprimido con un aislamiento eléctrico adecuado de la tubería (revestimientos o envoltorios) y/o protección catódica.

Para la selección de grados es recomendable considerar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable enterrado en primer lugar en función de la presencia de los iones de cloruro y en segundo lugar en función de la resistividad del suelo y el pH, asumiendo en todos los casos suelos mal drenados. La Tabla 3.8 recomienda los grados apropiados para las diferentes condiciones del suelo.

Tabla 3.8 *Grados de acero inoxidable para su empleo en diferentes condiciones de suelo*

Localización típica	Condición de suelo	Grado de acero inoxidable
Interior	Cl < 500 ppm	1.4301
	Resistividad >1000 ohm.cm	1.4404
	pH > 4.5	
Marina – zona de no marea	Cl < 1500 ppm	
	Resistividad >1000 ohm.cm	1.4404
	pH > 4.5	
Marine – zona de marea	Cl < 6000 ppm	
	Resistividad >500 ohm.cm	1.4410
	pH > 4.5	1.4547

Nota:

El 1.4410 es un grado dúplex y el 1.4547 es un grado super-austenítico. Estos grados no se usan generalmente en aplicaciones de construcción y están fuera del campo de aplicación de este Manual de Diseño.

Diseño frente a corrosión

La medida más importante a tomar para prevenir los problemas que puede ocasionar la corrosión es seleccionar adecuadamente el grado de acero inoxidable con los procedimientos de fabricación idóneos para el ambiente que se prevea. En cualquier caso, tras la selección adecuada de un determinado acero se conseguirá hacer uso de todo el potencial de resistencia a corrosión que puede ofrecer dicho acero, si tal selección viene acompañada por buenos detalles constructivos. Las medidas anticorrosivas a adoptar deberían estar presentes en la fase de planteamiento del proyecto y obra y en el desarrollo y diseño de todos los detalles constructivos.

En la Tabla 3.9 se presenta una lista de recomendaciones a seguir para reducir, en la medida de lo posible, los efectos perjudiciales de la corrosión. No todos los puntos darían el mejor detalle desde el punto de vista de la resistencia estructural y tampoco todos los puntos se aplican a todos los ambientes. En particular, en los ambientes de poca corrosividad o en los que se efectúa un mantenimiento regular muchos podrían no ser necesarios. La Figura 3.3 ilustra algunos pobres y buenos diseños de detalles constructivos para asegurar la durabilidad de la estructura.

Tabla 3.9 *Medidas a adoptar frente a la corrosión*

Evitar la suciedad

- orientar los angulares y los perfiles en U para minimizar la tendencia a la retención de suciedad
- proyectar bajantes, asegurando que sean suficientemente grandes para evitar su obturación
- evitar superficies horizontales
- dar una pequeña pendiente a cartelas que nominalmente estén en un plano horizontal
- emplear secciones tubulares y barras (tubos sellados con gas seco o aire cuando hay riesgo de formación de condensaciones perjudiciales)
- especificar acabados lisos

Evitar hendiduras

- emplear uniones soldadas mejor que atornilladas
- emplear soldaduras cerradas o rellenos de mástico (soldaduras compactas o rellenadas)
- preferiblemente, soldaduras realizadas por capas
- prevenir incrustaciones biológicas.

Reducir la tendencia a la fisuración por corrosión bajo tensión en aquellos ambientes específicos en los que pueda ocurrir (ver Sección 3.7.2):

- minimizar las tensiones de fabricación mediante una cuidadosa elección de la secuencia de soldadura
- remache (evitando el empleo de remaches de hierro/acero).

Reducir la tendencia a la corrosión por picaduras (ver Sección 10):

- eliminar salpicaduras de soldadura
- decapado del acero inoxidable para eliminar los productos de soldadura no deseados. Deben evitarse los reactivos fuertemente oxidantes con contenidos de cloruros tales como el cloruro férrico; mejor dicho, debería usarse un baño decapante o una pasta de decapado, ambos conteniendo una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico. Las soldaduras deberían limpiarse para restablecer la resistencia a la corrosión.
- evitar la captación de partículas de acero al carbono (p.e. utilizar áreas de trabajo y herramientas dedicadas al acero inoxidable)
- seguir un programa de mantenimiento adecuado.

Reducir la tendencia a la corrosión galvánica (ver Sección 3.7.2).

- proporcionar aislamiento eléctrico
 - emplear pinturas de modo apropiado
 - minimizar los períodos de humectación
 - emplear metales con potenciales eléctricos cercanos.
-

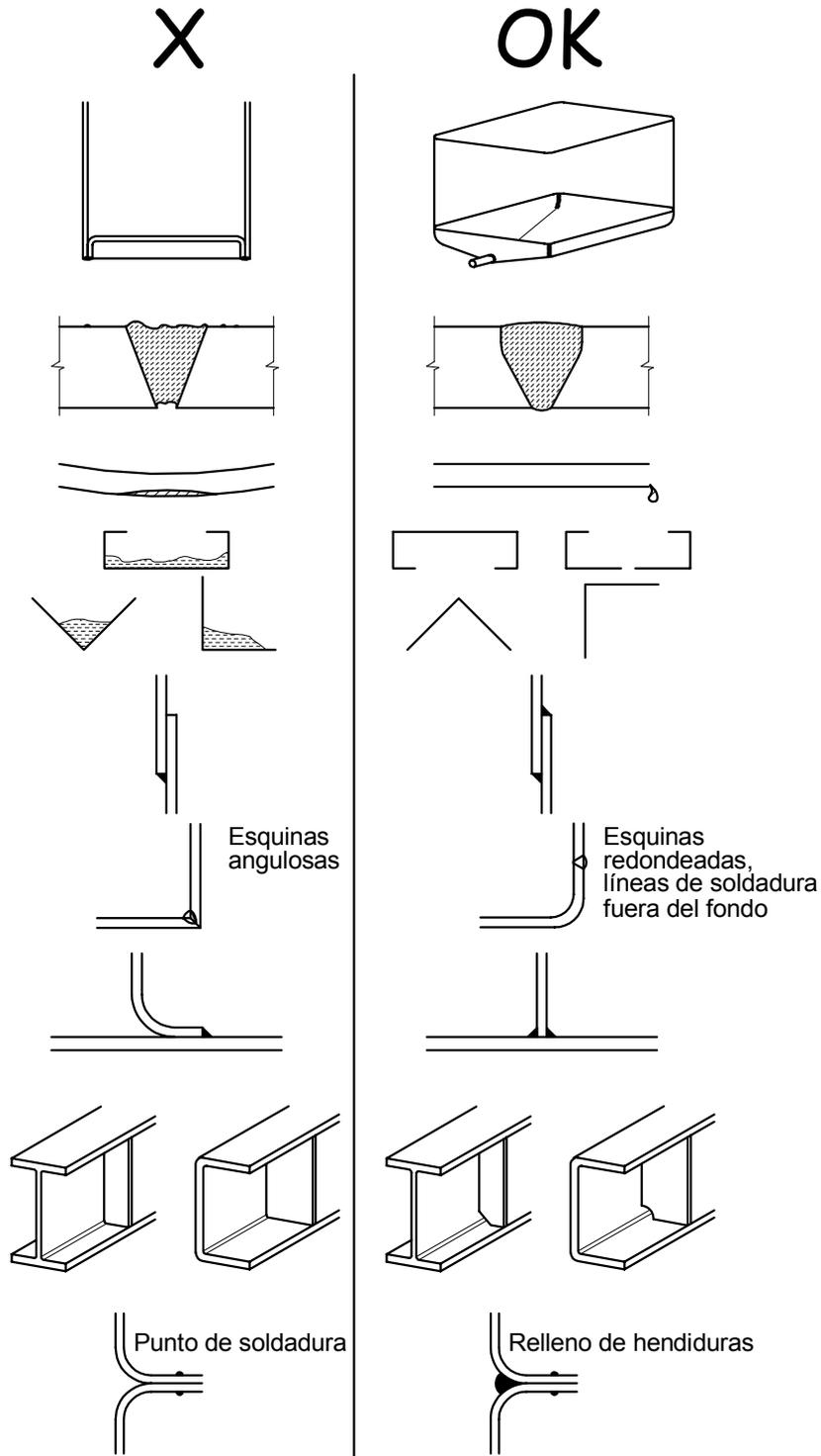


Figura 3.3 *Malos y buenos diseños de detalles constructivos para la durabilidad*

4 PROPIEDADES DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES

4.1 Aspectos generales

Las recomendaciones de las Secciones 4 y 5 son válidas para las secciones transversales de elementos estructurales que obedecen a los límites dimensionales establecidos en la Sección 4.2.

Las relaciones anchura-espesor de los elementos que están parcial o totalmente comprimidos determinan si están sujetos a abolladura, con la consecuente reducción de resistencia de la sección transversal. Los elementos y las secciones transversales se clasifican en Clase 1, 2, 3 o 4 dependiendo de su susceptibilidad a la abolladura y de su capacidad de rotación (Clase 1 y 2), ver Sección 4.3.

La reducción de resistencia de las secciones transversales de Clase 4 puede tenerse en cuenta en el dimensionamiento mediante la utilización de los anchos eficaces de los elementos, ver Sección 4.4.1.

Solamente pueden usarse las dimensiones de la línea media para el cálculo de las propiedades seccionales en paneles y secciones conformados en frío. Para los demás tipos de secciones transversales deben usarse las dimensiones globales de la sección transversal. EN 1993-1-3 y EN 1993-1-5 permiten usar las dimensiones de la línea media para calcular las resistencias. EN 1993-1-1 también permite el uso de las dimensiones de la línea media en determinadas circunstancias (ver 6.2.1 (9) y 6.2.5 (2) de EN 1993-1-1).

4.2 Máximas relaciones anchura-espesor

En la Tabla 4.1 se presentan las máximas relaciones anchura-espesor para elementos de acero inoxidable.

4.3 Clasificación de las secciones transversales

4.3.1 Definición de clases

En principio, las secciones transversales de acero inoxidable pueden clasificarse del mismo modo que las de acero al carbono. A continuación se definen las cuatro clases de secciones:

- | | |
|---------|--|
| Clase 1 | secciones transversales en las que se puede formar una rótula plástica con la capacidad de rotación requerida para un análisis plástico. |
| Clase 2 | secciones transversales en las que se puede alcanzar el momento plástico, pero tienen una capacidad de rotación limitada. |
| Clase 3 | secciones transversales en las que la tensión en la fibra más comprimida de la pieza puede alcanzar el límite elástico, pero la abolladura puede impedir alcanzar el momento plástico. |

Clase 4 secciones transversales en las que la abolladura ocurre antes de que se alcance la tensión de límite elástico en una o más partes de la sección transversal.

Tabla 4.1 Máximas relaciones anchura-espesor

a) Elemento plano o elemento con rigidización intermedia unido a un alma a lo largo de un borde, con el otro borde libre:	$b/t \leq 50$		
b) Elemento plano o elemento con rigidización intermedia unido a un alma a lo largo de un borde y provisto de un pequeño labio a lo largo del otro borde:	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$		
c) Elemento plano o elemento con rigidización intermedia unido a lo largo de los dos bordes a almas o alas:	$b/t \leq 400$		
	$h/t \leq 400$		

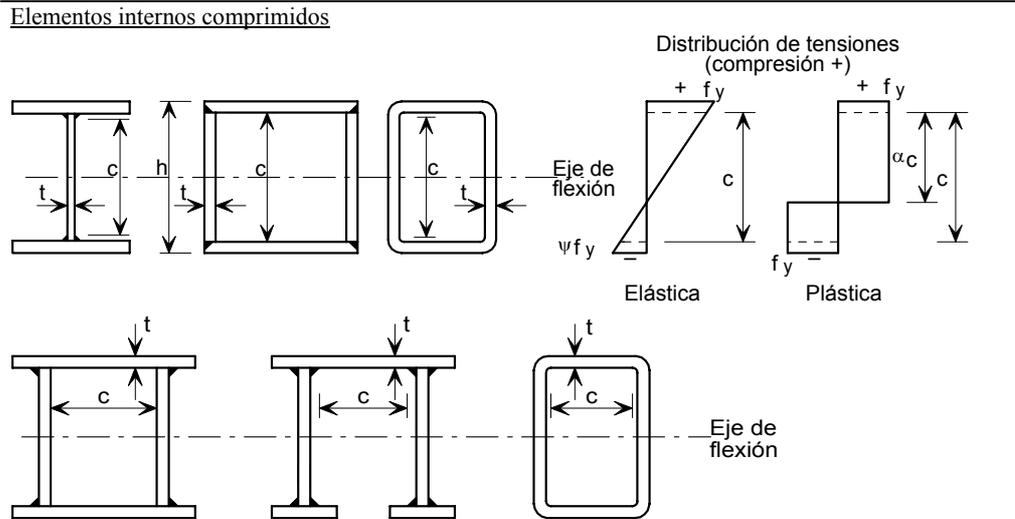
Nota: Los elementos planos soportados como en a) con relaciones b/t mayores que aproximadamente 30 y los elementos planos soportados de otra manera con relaciones b/t mayores que aproximadamente 75 probablemente desarrollen una distorsión visual bajo cargas de servicio.

La clasificación de una sección transversal depende de la clase más alta (menos favorable) de sus partes constituyentes, que se encuentran parcial o totalmente comprimidas. Debe señalarse que la clasificación de una sección transversal puede variar en función de la proporción de esfuerzo axial o momento flector a que está sometida y por consiguiente puede variar a lo largo de la longitud del elemento estructural.

4.3.2 Límites para la clasificación de las partes de las secciones transversales

Las secciones se clasifican como Clase 1, 2 o 3 en función de los límites expuestos en la Tabla 4.2. Se clasificarán como Clase 4 las secciones que no cumplan el criterio establecido para la Clase 3.

Tabla 4.2 Relaciones anchura-espesor máximas en elementos comprimidos



Clase	Elemento sometido a flexión	Elemento sometido a compresión	Elemento sometido a flexión y compresión	
1	$c/t \leq 56,0\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	cuando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq 308\varepsilon/(13\alpha - 1)$	
			cuando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 28\varepsilon/\alpha$	
2	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	cuando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq 320\varepsilon/(13\alpha - 1)$	
			cuando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 29,1\varepsilon/\alpha$	
3	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 15,3\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver 4.4.1	
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Grado	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Notas:

Para secciones huecas, c puede tomarse, de modo conservador, igual a $(h-2t)$ o $(b-2t)$

$E = 200\,000$ N/mm²

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right) \text{ para secciones simétricas alrededor del eje fuerte}$$

Tabla 4.2 (cont.) Relaciones anchura-espesor máximas en elementos comprimidos

Elementos en voladizo

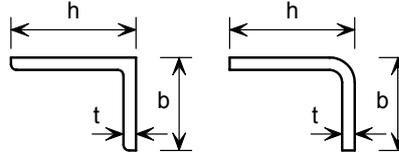
Distribución de tensiones (compresión + extremo en compresión extremo en tracción)

Clase	Tipo de sección	Elemento sometido a compresión	Elemento sometido a compresión y flexión	
			Extremo en compresión	Extremo en tracción
1	Conformada en frío	$c/t \leq 10,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldada	$c/t \leq 9,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Conformada en frío	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldada	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	Conformada en frío	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 18,1\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	Para k_σ ver 4.4.1.
	Soldada	$c/t \leq 11,0\varepsilon$	$c/t \leq 16,7\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	Para k_σ ver 4.4.1.

Angulares

Véase también Elementos en voladizo

No aplica para el caso de angulares en contacto continuo con otros elementos



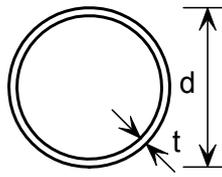
Clase	Sección sometida a compresión			
3	$h/t \leq 11,9 \varepsilon$; $(b+h)/2t \leq 9,1 \varepsilon$			
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Grado	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Nota: $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right) \text{ para secciones simétricas alrededor del eje fuerte}$$

Tabla 4.2 (cont.) Relaciones anchura-espesor máximas en elementos comprimidos

Secciones tubulares



Clase	Sección sometida a flexión	Sección sometida a compresión		
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$	$d/t \leq 50\varepsilon^2$		
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$	$d/t \leq 70\varepsilon^2$		
3	$d/t \leq 280\varepsilon^2$	$d/t \leq 90\varepsilon^2$		
	Nota: para $d/t > 280\varepsilon^2$ ver EN 1993-1-6	Nota: para $d/t > 90\varepsilon^2$ ver EN1993-1-6		
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Grado	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Nota: $E = 200\,000$ N/mm²

4.4 Anchos eficaces

4.4.1 Anchos eficaces de elementos en secciones de Clase 4

Las características de las secciones de Clase 4 pueden determinarse a partir de los anchos eficaces de sus elementos comprimidos, sometidos a compresión en su totalidad o parcialmente. Como alternativa, se pueden utilizar ensayos, ver Sección 9.

El área eficaz de una sección transversal de Clase 4, total o parcialmente comprimida, A_{eff} , es el área bruta menos la suma de las áreas no eficaces de cada uno de los elementos esbeltos que componen la sección transversal. El área eficaz de cada elemento de Clase 4 es el ancho eficaz b_{eff} , calculado como se indica más abajo, multiplicado por el espesor del elemento. En el caso de secciones sometidas a flexión es necesario calcular además el momento de inercia de la sección eficaz I_{eff} y el módulo resistente elástico de la sección eficaz W_{eff} .

Los anchos eficaces de los elementos total o parcialmente comprimidos se obtienen de la Tabla 4.3 para elementos o partes internas, y de la Tabla 4.4 para partes externas.

Para determinar los anchos eficaces de las alas comprimidas, la relación de tensiones ψ definida en las Tablas 4.3 o 4.4 se calculará con las propiedades de la sección transversal bruta. Para determinar la anchura eficaz de un elemento de alma, la relación de tensiones ψ se calculará utilizando el área eficaz del ala comprimida y el área bruta del alma y del ala traccionada.

El factor de reducción ρ puede obtenerse como se indica a continuación:

Elementos internos conformados en frío o soldados:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{siendo } \leq 1 \quad (4.1a)$$

Elementos externos en voladizo conformados en frío:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{siendo } \leq 1 \quad (4.1b)$$

Elementos externos en voladizo soldados:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{siendo } \leq 1 \quad (4.1c)$$

donde $\bar{\lambda}_p$ es la esbeltez del elemento definida como:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (4.2)$$

en donde:

t es el espesor correspondiente del elemento en estudio

k_σ es el coeficiente de abolladura correspondiente a la relación de tensiones ψ , a partir de la Tabla 4.3 o de la Tabla 4.4

\bar{b} es la anchura eficaz definida como:

$\bar{b} = d$ para almas (excepto para secciones rectangulares huecas)

$\bar{b} =$ anchura del elemento plano para almas de secciones rectangulares huecas, que puede tomarse de modo conservador igual a $h-2t$

$\bar{b} = b$ para elementos interiores de alas (excepto para secciones rectangulares huecas)

$\bar{b} =$ anchura del elemento plano para alas de secciones rectangulares huecas, que puede tomarse de modo conservador igual a $b-2t$

$\bar{b} = c$ para elementos en voladizo

$\bar{b} = h$ para angulares de lados iguales y de lados desiguales

ε es el coeficiente definido en la Tabla 4.2.

En general, el eje neutro de la sección eficaz se desplazará una distancia e con respecto al eje neutro de la sección bruta, ver Figuras 4.1 y 4.2. Este hecho deberá tenerse en cuenta al calcular las propiedades de la sección eficaz.

Cuando la sección transversal esté sometida a un esfuerzo axial de compresión, se utilizará el método propuesto en 5.5.2 para su dimensionamiento, considerando el momento adicional ΔM_{Ed} dado por:

$$\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N$$

donde e_N es el desplazamiento del eje neutro cuando la sección está sometida a una compresión uniforme, ver Figura 4.2.

Tabla 4.3 Elementos internos sometidos a compresión

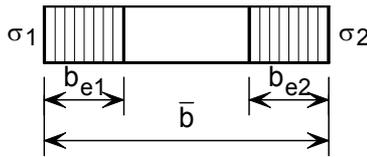
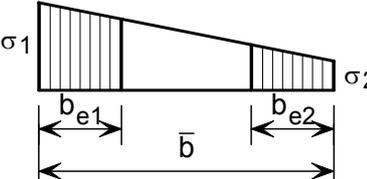
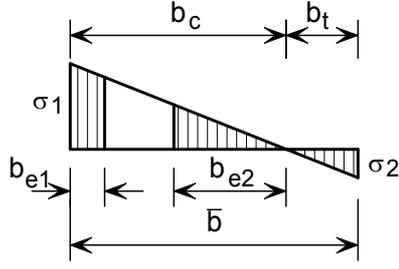
Distribución de tensiones (compresión positiva)				Ancho eficaz b_{eff}		
				$\psi = 1 :$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0 :$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Coefficiente de abolladura k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabla 4.4 Elementos externos sometidos a compresión

Distribución de tensiones (compresión positiva)		Ancho eficaz b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$+1 \geq \psi \geq -3$	
Coeficiente de abolladura k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coeficiente de abolladura k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8

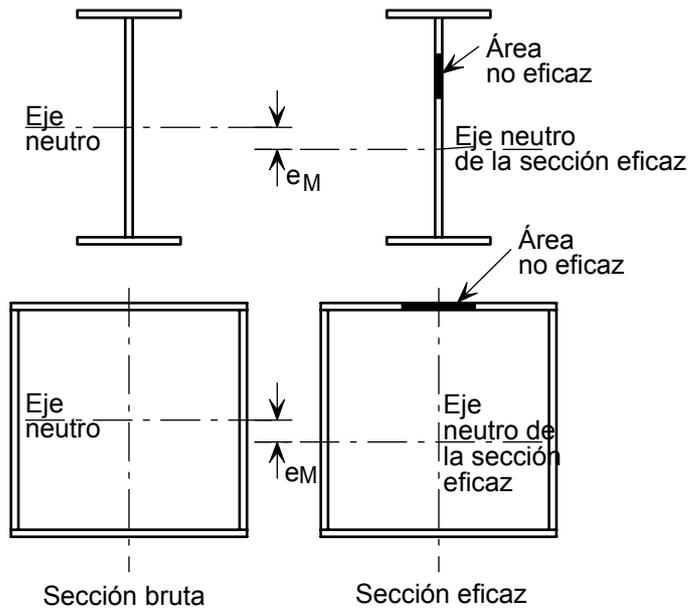


Figura 4.1 Secciones de Clase 4 sometidas a flexión

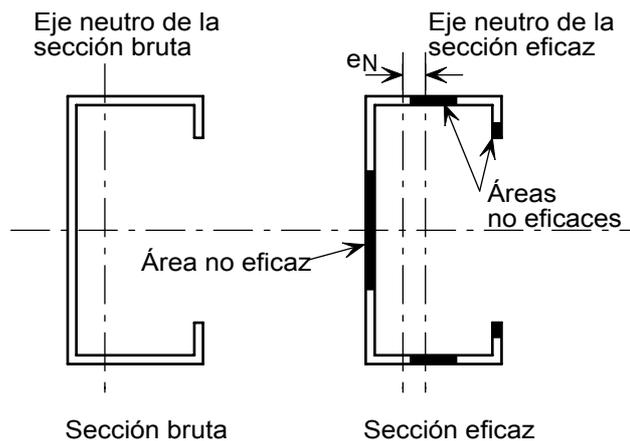


Figura 4.2 Secciones de Clase 4 sometidas a compresión

4.4.2 Influencia del arrastre por cortante

La influencia del arrastre por cortante en alas puede despreciarse si $b_0 \leq L_e/10$, donde b_0 es el vuelo del ala o la mitad del ancho para un elemento interno y L_e es la longitud entre puntos de momento nulo. Cuando este límite para b_0 se supere debería considerarse el efecto del arrastre por cortante en alas; a tal fin, puede aplicarse lo expuesto en EN 1993-1-5 para acero al carbono. Nótese que en EN 1993-1-5 el efecto del arrastre por cortante debe considerarse en estados límite últimos y en estados límite de servicio.

4.4.3 Curvado del ala

El efecto de curvado del ala sobre la capacidad de carga de perfiles con alas muy anchas sometidos a flexión (p.e. curvatura hacia el plano neutro), o de perfiles curvos flectados en los que el lado cóncavo esté comprimido debería considerarse, a menos que dicho efecto de curvado sea menor que el 5% del canto de la sección. Si el curvado es mayor deberá considerarse una reducción de la capacidad

resistente, debida a la disminución de la longitud del brazo de palanca para parte de las alas anchas.

Las relaciones anchura-espesor de alas para vigas usuales de acero inoxidable hacen que el efecto del curvado del ala no se considere. Cuando se requiera considerarlo, puede aplicarse lo expuesto en EN 1993-1-3 para acero al carbono.

4.5 Elementos rigidizados

4.5.1 Rigidizadores de borde

Puede aplicarse lo establecido para acero al carbono en EN 1993-1-3.

4.5.2 Rigidizadores intermedios

Puede aplicarse lo establecido para acero al carbono en EN 1993-1-3.

4.5.3 Perfiles laminados trapezoidales con rigidizadores intermedios de ala

La sección eficaz de un ala con rigidizadores intermedios y sometida a compresión uniforme está constituida por las áreas efectivas reducidas $A_{s,red}$ incluyendo dos bandas de ancho $0,5b_{eff}$ o $15t$ adyacentes a los rigidizadores, ver Figura 4.3 y Figura 4.4.

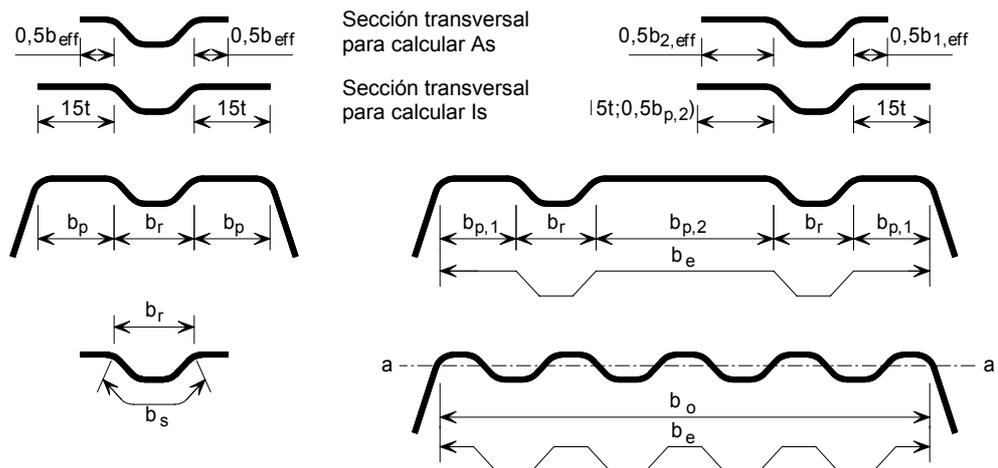


Figura 4.3 Ala comprimida con uno, dos o múltiples rigidizadores

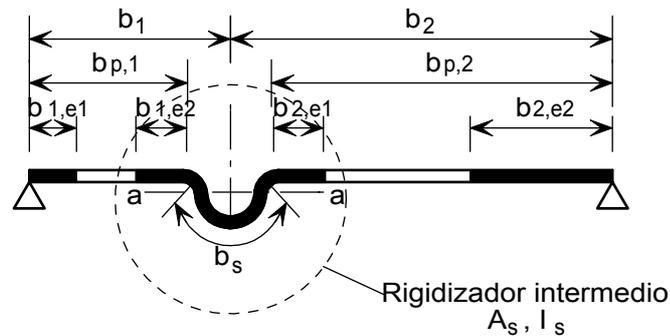


Figura 4.4 Rigidizador intermedio

Para un ala con un rigidizador central, la tensión crítica elástica de abolladura (utilizada para calcular $\bar{\lambda}_d$) se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} \quad (4.3)$$

donde:

- b_p es el ancho recto teórico del elemento presentado en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5
- b_s es la anchura del rigidizador, medida a lo largo del perímetro del rigidizador, ver Figuras 4.3, 4.4 y 4.5
- A_s es el área de la sección transversal de un rigidizador según las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5
- I_s es el momento de inercia del rigidizador según las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5
- k_w es un coeficiente que tiene en cuenta la coacción parcial a giro del ala rigidizada debido a la existencia de las almas u otros elementos adyacentes. Para el cálculo de la sección eficaz sometida a compresión $k_w=1,0$.

Para el caso de dos rigidizadores de alas situados simétricamente, la tensión crítica elástica de abolladura $\sigma_{cr,s}$ se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8b_1^2(3b_e - 4b_1)}} \quad (4.4)$$

en la cual:

$$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s \quad (4.5)$$

$$b_1 = b_{p,1} + 0,5b_r \quad (4.6)$$

donde

- $b_{p,1}$ es el ancho recto teórico de un elemento exterior plano, tal como se muestra en la Figura 4.4
- $b_{p,2}$ es el ancho recto teórico del elemento central plano, tal como se muestra en la Figura 4.4
- b_r es el ancho total de un rigidizador, ver Figura 4.3

El valor de k_w puede calcularse a partir de la longitud de pandeo l_b del ala comprimida, como se indica a continuación:

$$\text{si } \frac{l_b}{s_w} \geq 2, \quad k_w = k_{w0} \quad (4.7)$$

$$\text{si } \frac{l_b}{s_w} < 2, \quad k_w = k_{w0} - (k_{w0} - 1) \left[\frac{2l_b}{s_w} - \left(\frac{l_b}{s_w} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

donde:

- s_w es la altura inclinada del alma, ver Figura 4.5.

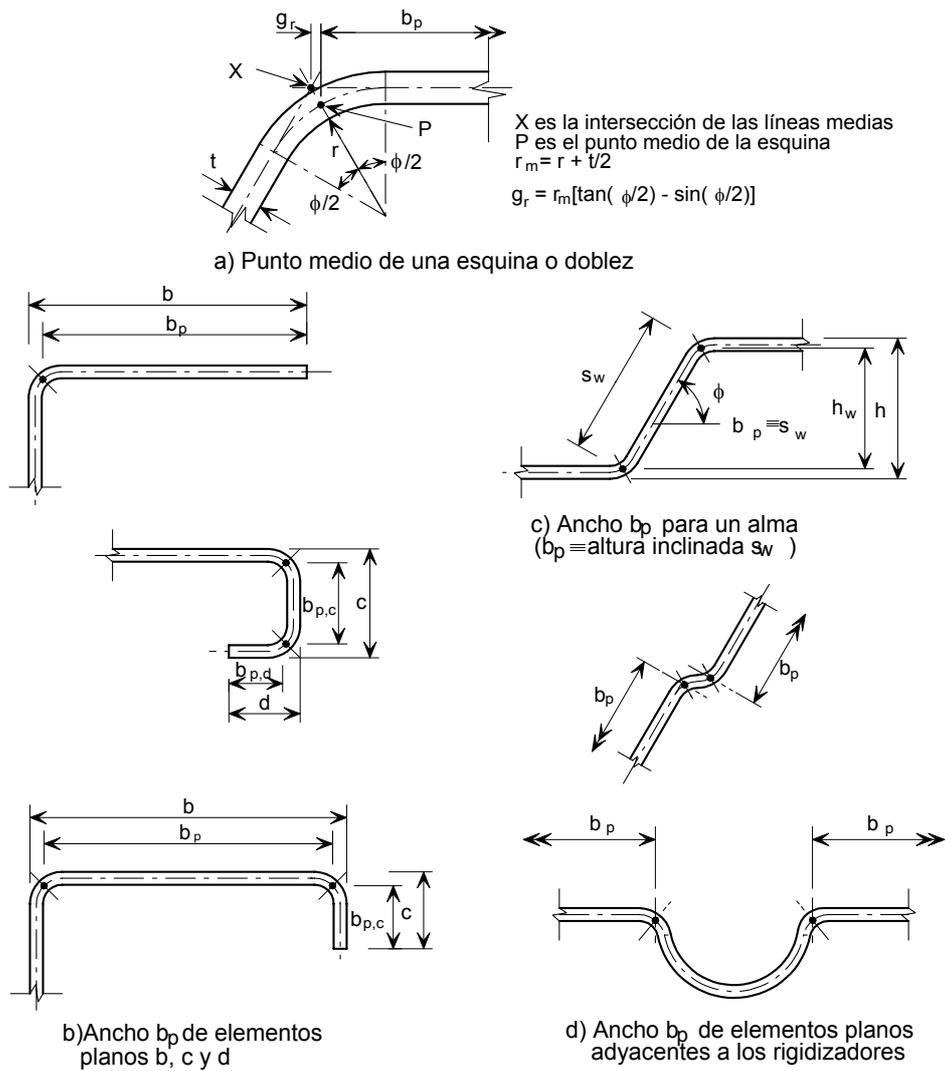


Figura 4.5 Anchos rectos teóricos b_p de elementos planos considerando los acuerdos de esquina

Alternativamente, el coeficiente de coacción al giro k_w puede tomarse, de modo conservador, igual a 1,0, correspondiente a la condición de unión articulada.

Los valores de l_b y k_{w0} pueden determinarse mediante las siguientes expresiones:

a) para un ala comprimida con un rigidizador intermedio:

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2b_p + 3b_s)}{t^3}} \quad (4.9)$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} \quad (4.10)$$

$$\text{con } b_d = 2b_p + b_s \quad (4.11)$$

b) para un ala comprimida con dos o tres rigidizadores intermedios:

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{\frac{I_s b_1^2 (3b_e - 4b_1)}{t^3}} \quad (4.12)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1)}{b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3b_e - 4b_1)}} \quad (4.13)$$

El área eficaz reducida del rigidizador $A_{s,red}$ que tiene en cuenta el pandeo por distorsión debe tomarse como:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_y / \gamma_{MO}}{\sigma_{com,ser}} \quad \text{siendo } A_{s,red} \leq A_s \quad (4.14)$$

donde:

$\sigma_{com,ser}$ es la máxima tensión de compresión en el rigidizador (calculada utilizando la sección eficaz) bajo la actuación de los estados de carga en estado límite de servicio

Si las almas no están rigidizadas, el factor de reducción χ_d se obtendrá de la siguiente manera:

$$\text{si } \bar{\lambda}_d \leq 0,65, \quad \chi_d = 1,0 \quad (4.15)$$

$$\text{si } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38, \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad (4.16)$$

$$\text{si } \bar{\lambda}_d \geq 1,38, \quad \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad (4.17)$$

donde $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,s}}$

Si las almas también están rigidizadas, debe hacerse referencia a EN 1993-1-3.

Para el cálculo de las características de la sección eficaz, el área eficaz reducida $A_{s,red}$ debe calcularse utilizando un espesor reducido $t_{red} = t A_{red} / A_s$ en todos los elementos incluidos en A_s .

4.6 Cálculo de características de las secciones transversales

4.6.1 Aspectos generales

El cálculo de las características de las secciones se debe realizar de acuerdo con las normas de buena práctica teniendo en cuenta, si es necesario, cualquier reducción del área de la sección bruta debida a la abolladura o a la existencia de agujeros para alojamiento de tornillos. La reducción de espesor de chapa en las esquinas de los perfiles conformados puede despreciarse, puesto que concomitantemente existe un incremento de resistencia proporcionado por el endurecimiento del trabajado.

4.6.2 Influencia de las esquinas redondeadas

La influencia de las esquinas redondeadas sobre la resistencia de la sección puede despreciarse si se cumple que el radio interno $r \leq 5t$ y $r \leq 0.10b_p$ y la sección transversal puede entonces consistir de elementos planos con esquinas agudas

rectas. Para el cálculo de rigideces de la sección transversal, debería tenerse en cuenta la influencia de las esquinas redondeadas.

La influencia de las esquinas redondeadas sobre las propiedades de la sección puede tenerse en cuenta con suficiente precisión reduciendo las características calculadas para otra sección similar con esquinas rectas, ver Figura 4.6, mediante las siguientes expresiones:

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) \quad (4.18)$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad (4.19)$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad (4.20)$$

en las cuales

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} \quad (4.21)$$

donde:

A_g es el área de la sección bruta

$A_{g,sh}$ es el valor de A_g para una sección transversal con esquinas rectas

$b_{p,i}$ es el ancho recto teórico del elemento plano i para una sección transversal con esquinas rectas.

I_g es el momento de inercia de la sección bruta

$I_{g,sh}$ es el valor de I_g para una sección transversal con esquinas rectas

I_w es el módulo de alabeo de la sección bruta

$I_{w,sh}$ es el valor de I_w para una sección transversal con esquinas rectas

ϕ_j es el ángulo entre dos elementos planos

m es el número de elementos planos

n es el número de elementos curvos

r_j es el radio de curvatura interno del elemento j

Las reducciones presentadas anteriormente pueden aplicarse también para el cálculo de las características de la sección transversal eficaz A_{eff} , $I_{y,eff}$, $I_{z,eff}$ y $I_{w,eff}$ siempre que los anchos rectos teóricos de los elementos planos se midan desde los puntos de intersección de sus líneas medias.

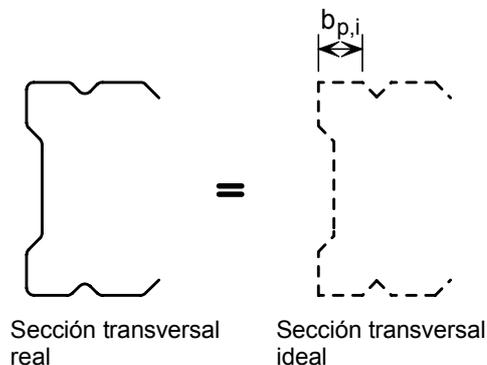


Figura 4.6 Sección transversal real e ideal

4.6.3 Sección transversal bruta

Cuando se calculen las características de la sección transversal bruta, no será necesario deducir los agujeros para alojamiento de tornillos, pero sí se considerarán aberturas más grandes.

4.6.4 Sección neta

El área neta de una sección transversal o de un elemento de una sección transversal será su sección bruta descontando todas las aberturas, incluyendo los agujeros para tornillos. Al descontar los agujeros para tornillos, deberá utilizarse el diámetro nominal.

Siempre que los agujeros de los tornillos no estén dispuestos al tresbolillo, el área total que habrá que descontar para los agujeros de tornillos será la máxima suma de áreas seccionales de los agujeros en cualquier sección perpendicular al eje de la pieza (ver plano de rotura (2) en la Figura 4.7).

Cuando los agujeros de los tornillos estén dispuestos al tresbolillo, el área total que habrá que descontar para los agujeros de tornillos será la mayor de:

- el área descontada para tornillos que no estén dispuestos al tresbolillo
- $t \left(nd_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right)$

donde:

- s es la distancia entre centros de dos agujeros consecutivos medida paralelamente al eje de la pieza
- p es la distancia entre centros de los mismos agujeros, medida perpendicularmente al eje de la pieza
- t es el espesor
- n es el número de agujeros en una diagonal o línea en zig-zag a través del elemento o parte del mismo, ver Figura 4.7
- d_0 es el diámetro del agujero

Para secciones como angulares con agujeros en ambos lados, la distancia p se medirá a lo largo de la línea media de la pieza, ver Figura 4.8

Para angulares unidos por un ala, ver Sección 6.2.

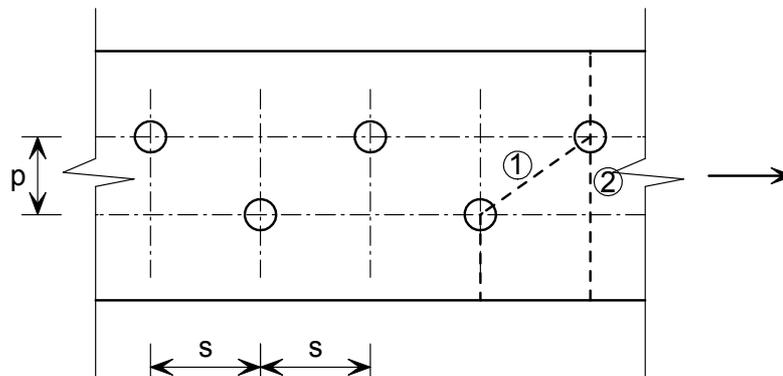


Figura 4.7 Agujeros al tresbolillo y líneas críticas de rotura 1 y 2

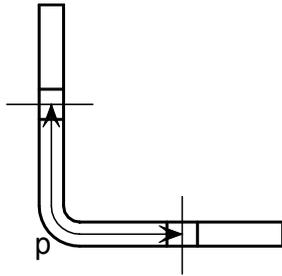


Figura 4.8 Longitud p para angulares con agujeros en ambos lados

4.7 Resistencia de las secciones transversales

4.7.1 Aspectos generales

Esta Sección hace referencia únicamente a la resistencia de la sección transversal; será necesario además comprobar los posibles modos de pandeo para valorar la resistencia del elemento estructural. El pandeo de las piezas se expone en la Sección 5. Los factores γ_M utilizados en esta Sección se presentan en la Tabla 2.1.

El endurecimiento asociado a las operaciones de conformado en frío durante la fabricación (ver Sección 3.2.2) incrementa en general la resistencia de la sección transversal pero no se dispone de suficientes datos, para el caso del acero inoxidable, que permitan establecer recomendaciones de diseño al respecto. En el caso de utilizar las ventajas aportadas por el endurecimiento por trabajado, se recomienda determinar la resistencia de la sección transversal mediante ensayos (ver Sección 9).

Bajo circunstancias excepcionales, puede permitirse hacer uso de la capacidad de endurecimiento por deformación del material acero inoxidable en el dimensionamiento, ver Sección 4.7.7.

4.7.2 Secciones sometidas a tracción

La resistencia de cálculo de una sección transversal sometida únicamente a una distribución uniforme de tensiones de tracción, $N_{t,Rd}$, puede tomarse igual a la menor de:

a) la resistencia plástica de cálculo de la sección bruta

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.22)$$

b) la resistencia última de cálculo de la sección neta, considerando los agujeros para tornillos

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.23)$$

donde:

A_g es el área bruta

A_{net} es el área neta de la sección transversal (ver Sección 4.6.4)

f_y es el límite elástico característico (generalmente la resistencia del 0,2% mínima especificada, ver Tabla 3.1)

f_u es la resistencia característica última a tracción (generalmente el mínimo valor especificado, ver Tabla 3.1)

$$k_r = [1 + 3r(d_0 / u - 0,3)] \text{ siendo } k_r \leq 1,0 \quad (4.24)$$

r = [número de tornillos en la sección transversal]/[número total de tornillos en la unión]

d_0 es el diámetro nominal del agujero del tornillo

u = $2e_2$ siendo $u \leq p_2$.

4.7.3 Secciones sometidas a compresión

La resistencia de cálculo de una sección transversal sometida a un esfuerzo de compresión, $N_{c,Rd}$, cuya resultante actúa en el centro de gravedad de la sección bruta (para secciones de Clase 1, 2 y 3) o de la sección eficaz (para secciones de Clase 4) puede calcularse como:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para secciones de Clase 1, 2 o 3} \quad (4.25)$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (4.26)$$

Nota: Las secciones de Clase 4 que no sean doblemente simétricas deberán calcularse de acuerdo con la Sección 4.7.6, para así considerar el momento flector adicional ΔM_{Ed} debido a la excentricidad del eje que pasa por el centro de gravedad de la sección eficaz, ver Sección 4.4.1.

4.7.4 Secciones sometidas a flexión

En ausencia de esfuerzo cortante y axil, la resistencia de cálculo a flexión de una sección transversal sometida a un momento flector uniaxial, $M_{c,Rd}$, se determinará:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para secciones de Clase 1 o 2} \quad (4.27)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para secciones de Clase 3} \quad (4.28)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (4.29)$$

donde:

W_{pl} es el módulo resistente plástico de la sección

$W_{el,min}$ es el módulo resistente elástico de la sección correspondiente a la fibra con máxima tensión elástica (ver Sección 4.1 para secciones conformadas en frío)

$W_{eff,min}$ es el módulo resistente elástico de la sección eficaz correspondiente a la fibra con máxima tensión elástica (ver Sección 4.1 para secciones conformadas en frío).

Para secciones transversales sometidas a flexión esviada, ver 4.7.6.

4.7.5 Secciones sometidas a cortante

La resistencia de cálculo de una sección transversal sometida a cortante, $V_{pl,Rd}$, puede tomarse, en general, igual a la resistencia plástica a cortante:

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} \quad (4.30)$$

donde

A_v es el área a cortante, que puede tomarse como:

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

donde

- A es el área de la sección transversal
- b es la anchura total
- h es el canto total
- h_w es la altura del alma
- r es el radio de acuerdo
- t_f es el espesor del ala
- t_w es el espesor del alma (si el espesor del alma no es constante, t_w debe tomarse como el espesor mínimo).
- η ver EN 1993-1-5. (EN 1993-1-4 recomienda $\eta = 1,20$.)

Nota: Para calcular la resistencia a la abolladura por cortante debe usarse el mismo valor de η que se usa para calcular la resistencia plástica a cortante.

También deberá comprobarse la resistencia a la abolladura por cortante, ver Sección 5.4.3.

4.7.6 Secciones sometidas a esfuerzos combinados

Cuando existan esfuerzos axiales, deberá tenerse en cuenta su efecto en la determinación del momento plástico de la sección. Para secciones Clase 1 y 2 deberá satisfacerse el siguiente criterio:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (4.31)$$

donde:

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

Para secciones doblemente simétricas en I y H u otras secciones con alas, no es necesario considerar el efecto del axil en la resistencia plástica de cálculo a flexión alrededor del eje y-y si se satisfacen las siguientes condiciones:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \text{ y} \quad (4.32a)$$

$$N_{Ed} \leq 0,5h_w t_w f_y / \gamma_{M0} \quad (4.32b)$$

Si no hay esfuerzo cortante, para las secciones Clase 3 y Clase 4 la máxima tensión longitudinal debe satisfacer el siguiente criterio:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_y / \gamma_{M0} \quad (4.33)$$

donde:

$\sigma_{x,Ed}$ es el valor de cálculo de la tensión longitudinal local debida al momento flector y al axil, teniendo en cuenta los agujeros para tornillos cuando sea necesario.

Para secciones Clase 4, debe cumplirse además que:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (4.34)$$

donde:

A_{eff} es el área eficaz de la sección transversal sometida a compresión uniforme

$W_{eff,min}$ es el módulo resistente elástico de la sección eficaz cuando está sometida solamente a un momento alrededor del eje correspondiente

e_N es la excentricidad del eje neutro cuando la sección está sometida a compresión uniforme.

Para el caso de angulares, los ejes y y z utilizados anteriormente deben sustituirse por los ejes u y v respectivamente.

Cuando V_{Ed} supere el 50% de $V_{pl,Rd}$, la resistencia de cálculo de la sección transversal sometida a la combinación de esfuerzo axil y de momento flector deberá calcularse con un límite elástico reducido $(1 - \rho) f_y$ para el área de cortante, donde $\rho = (2V_{Ed}/V_{pl,Rd} - 1)^2$.

4.7.7 Consideración del endurecimiento por deformación

En determinadas circunstancias, como por ejemplo vigas sometidas a acciones accidentales de corta duración, es posible considerar las ventajas que ofrece el endurecimiento por deformación del acero inoxidable en el dimensionamiento.

Ello puede lograrse utilizando para los cálculos una resistencia mayorada, σ_0 , en lugar de la resistencia f_y del 0,2%. En ausencia de una valoración más detallada, basada por ejemplo en formulaciones de elementos finitos para análisis no lineal, se recomienda cumplir las siguientes limitaciones:

- La sección transversal debe ser de Clase 1 o 2 para tomar σ_0 en lugar de f_y al determinar ε en la Tabla 4.2.
- La sección transversal solamente está sometida a flexión alrededor del eje fuerte.
- El elemento estructural en cuestión no está sometido a ningún tipo de inestabilidad (pandeo por flexión, por torsión, por distorsión o pandeo lateral – ver Sección 5), utilizando también para todos los cálculos el valor de σ_0 .

- Las uniones a los elementos adyacentes y los propios elementos estructurales son suficientemente resistentes como para alcanzar la resistencia mejorada del elemento estructural en cuestión.

Se debe prestar especial atención a la valoración de los requisitos de resistencia de las uniones.

Para secciones de Clase 3 y 4, las resistencias mejoradas pueden utilizarse siempre que dichos valores se verifiquen mediante ensayos, de acuerdo con la Sección 9.

5 DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

5.1 Introducción

Los criterios de dimensionamiento y comprobación para los elementos estructurales de acero inoxidable son los mismos que para acero al carbono. Se recomienda que los esfuerzos que solicitan los elementos estructurales provengan de un análisis global elástico.

Además de la resistencia seccional, ver Sección 4, deberá comprobarse también la resistencia al pandeo global de los elementos, tal y como se indica en esta sección.

Una posible aproximación al dimensionamiento frente a pandeo de elementos estructurales de acero inoxidable se basa en la utilización del módulo tangente correspondiente a la tensión crítica en lugar del módulo de deformación inicial que se utiliza en acero al carbono. Adoptando la hipótesis de que los niveles de tensiones residuales e imperfecciones geométricas de los elementos de acero inoxidable son similares a los de los elementos de acero al carbono, pueden emplearse para el acero inoxidable las reglas ya validadas para el acero al carbono; ello generalmente conduce a resultados satisfactorios. Por consiguiente, puede ser un método aproximado de dimensionamiento útil para el proyectista. Sin embargo, requiere el uso de técnicas de cálculo iterativo y es por ello por lo que se ha omitido en este Manual de Diseño, excepto en los casos en los que se ha utilizado para determinar curvas de dimensionamiento efectivas a emplear con el módulo inicial. En su lugar, se hace énfasis en la calibración con resultados experimentales disponibles.

Los siguientes apartados se aplican a secciones simplemente simétricas, doblemente simétricas o con simetría central. La resistencia de elementos estructurales sin ningún eje de simetría debe verificarse mediante ensayos adecuados.

5.2 Elementos sometidos a tracción

Los elementos sometidos solamente a esfuerzo de tracción no son susceptibles de verse afectados por ningún fenómeno de inestabilidad debida al pandeo. Su dimensionamiento, por tanto, se basa en la resistencia de la sección transversal, ver 4.7.2, y en la resistencia de sus uniones, ver Sección 6.

En el caso de angulares unidos por un lado u otros elementos unidos no simétricamente debe verificarse que:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd} \quad (5.1)$$

donde los términos se han definido en la Sección 4.7.2 y $N_{u,Rd}$ se determina en la Sección 6.2.3, ecuaciones 6.6, 6.7 o 6.8.

5.3 Elementos sometidos a compresión

5.3.1 Aspectos generales

Los elementos estructurales comprimidos son susceptibles de verse afectados por diferentes modos de inestabilidad por pandeo:

- Abolladura (solamente secciones de Clase 4)
- Pandeo por flexión
- Pandeo por torsión
- Pandeo por torsión y flexión

Secciones transversales doblemente simétricas (SHC, SHR, secciones en I etc)

Las secciones transversales doblemente simétricas no necesitan ser comprobadas a pandeo por torsión y flexión, ya que el centro de esfuerzos cortantes coincide con el centro de gravedad de la sección. Sin embargo, el pandeo por torsión puede ser crítico.

Las secciones huecas circulares y cuadradas no agotan por pandeo por torsión.

Para el rango de dimensiones de las secciones huecas rectangulares comúnmente utilizadas en construcción, el pandeo por torsión no será crítico. El pandeo por torsión en secciones huecas rectangulares necesita sólo ser considerado en aquellas secciones con inusuales relaciones h/b altas.

Secciones transversales simplemente simétricas (angulares de lados iguales, secciones en U etc)

Para secciones tales como las de angulares de lados iguales y secciones en U es necesario comprobar el pandeo por torsión y flexión ya que el centro de esfuerzos cortantes no coincide con el centro de gravedad de la sección.

Secciones transversales con simetría central (Secciones en Z, secciones cruciformes etc)

Para este tipo de secciones el pandeo por torsión puede ser el modo de pandeo crítico.

5.3.2 Abolladura

La abolladura en secciones de Clase 4 se considera a través de la utilización de una sección eficaz. Cabe señalar que en secciones de Clase 4 no simétricas debe considerarse el momento adicional causado por el desplazamiento del eje neutro de la sección eficaz con respecto a la sección bruta, de acuerdo con 5.5.

5.3.3 Pandeo por flexión

La resistencia de cálculo al pandeo por flexión debe determinarse mediante la siguiente expresión:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \quad \text{para secciones de Clase 1, 2 y 3} \quad (5.2.a)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (5.2.b)$$

donde:

A_{eff} es el área eficaz de la sección transversal de Clase 4

A es el área bruta

χ es el coeficiente de reducción de pandeo por flexión, dado por:

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (5.3)$$

en el cual:

$$\varphi = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) \quad (5.4)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{para secciones de Clase 1, 2 y 3} \quad (5.5.a)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}}f_y}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E} \frac{A_{\text{eff}}}{A}} \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (5.5.b)$$

donde

○ es el factor de imperfección definido en la Tabla 5.1

N_{cr} es el esfuerzo axial crítico de pandeo del modo correspondiente de pandeo, determinado a partir de las características de la sección bruta

$\bar{\lambda}_0$ es la esbeltez límite adimensional definida en la Tabla 5.1

L_{cr} es la longitud de pandeo en el plano de pandeo considerado determinada teniendo en cuenta las condiciones de contorno

i es el radio de giro alrededor del eje correspondiente, determinado a partir de las características de la sección bruta

En la Figura 5.1 se presentan las curvas de pandeo. Los valores de α y $\bar{\lambda}_0$ incluidos en la Tabla 5.1 no son válidos para secciones tubulares que son recocidas después de su fabricación. Para valores de la esbeltez adimensional $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$ o bien para

$\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{cr}}} \leq \bar{\lambda}_0^2$ los efectos del pandeo pueden despreciarse y sólo deberán llevarse a cabo las comprobaciones de la resistencia de la sección transversal.

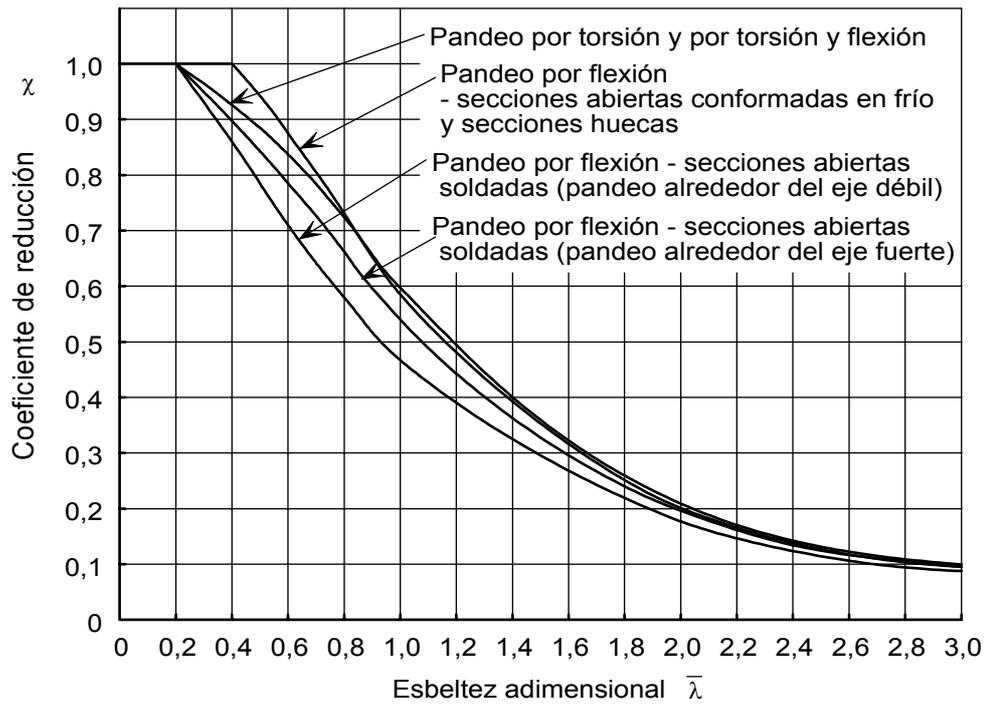


Figura 5.1 Curvas de pandeo para el pandeo por flexión, pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión

La determinación de la longitud de pandeo se llevará a cabo en base a los principios de la mecánica estructural, teniendo en cuenta las condiciones de contorno del elemento.

Tabla 5.1 Valores de α y $\bar{\lambda}_0$ para el pandeo por flexión, pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión

Modo de pandeo	Tipo de elemento	α	$\bar{\lambda}_0$
Flexión	Secciones abiertas conformadas en frío	0,49	0,40
	Secciones huecas (soldadas o sin soldar)	0,49	0,40
	Secciones abiertas soldadas (eje fuerte)	0,49	0,20
	Secciones abiertas soldadas (eje débil)	0,76	0,20
Torsión y torsión y flexión	Todos los elementos estructurales	0,34	0,20

5.3.4 Pandeo por torsión y pandeo torsión y flexión

La resistencia de cálculo frente a ambos tipos de pandeo debe determinarse de acuerdo con 5.3.3, pero sustituyendo $\bar{\lambda}$ por $\bar{\lambda}_T$, dados en 5.6 y 5.7, y tomando $\alpha = 0,34$ y $\bar{\lambda}_0 = 0,2$.

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \text{ para secciones Clase 1, 2 y 3} \quad (5.6a)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff}f_y}{N_{cr}}} \text{ para secciones Clase 4} \quad (5.6b)$$

en las que:

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \text{ y } N_{cr} < N_{cr,T}$$

donde:

$N_{cr,T}$ es el esfuerzo axial crítico de pandeo por torsión

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} \right) \quad (5.7a)$$

$N_{cr,TF}$ es el esfuerzo axial crítico de pandeo por torsión y flexión.

Para secciones simétricas según el eje y-y (es decir, $z_o = 0$)

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left(\frac{y_o}{i_o} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (5.7b)$$

donde

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2$$

i_y e i_z son los radios de giro de la sección bruta alrededor de los ejes y e z respectivamente

y_o y z_o son las coordenadas del centro de esfuerzos cortantes con respecto al centro de gravedad de la sección bruta

G es el módulo de deformación transversal

l_T es la longitud de pandeo por torsión del elemento (ver EN 1993-1-3)

I_T es el módulo de torsión de la sección bruta

I_w es el módulo de alabeo de la sección bruta

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_o}{i_o} \right)^2$$

$N_{cr,y}$ y $N_{cr,z}$ son los esfuerzos axiales críticos de pandeo por flexión alrededor de los ejes y-y y z-z respectivamente.

Para una sección doblemente simétrica, el centro de esfuerzos cortantes coincide con el centro de gravedad, luego $y_o = 0$ y $z_o = 0$ y

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} \text{ siempre que } N_{cr,T} < N_{cr,y} \text{ y } N_{cr,T} < N_{cr,z}.$$

Cabe señalar que para angulares, los ejes y y z anteriores se deben tomar como los ejes u y v respectivamente.

5.4 Elementos sometidos a flexión

5.4.1 Aspectos generales

Un elemento estructural se encuentra sometido a flexión simple bajo cargas que actúan normalmente al eje longitudinal del elemento, si sus condiciones de unión son tales que no existe torsión ni esfuerzos axiales en los extremos del elemento.

Para establecer el momento resistente de una viga deben considerarse los siguientes criterios:

- Plastificación de la sección transversal (ver Sección 4.7)
- Abolladura (solamente en secciones de Clase 4 – ver Sección 4.7)
- Pandeo lateral (ver Sección 5.4.2)
- Abolladura por cortante (ver Sección 5.4.3)
- Resistencia local en los puntos de aplicación de cargas o reacciones (ver Sección 5.4.4).

Cabe señalar que para elementos sometidos a flexión, pueden tener que considerarse en el dimensionamiento los efectos del arrastre por cortante y del curvado del ala, ver Secciones 4.4.2 y 4.4.3.

La flexión esviada se tratará tal como se describe en 5.5.2.

5.4.2 Pandeo lateral

En los siguientes elementos estructurales puede no tenerse en cuenta el pandeo lateral:

- vigas sometidas a flexión sólo alrededor del eje débil
- vigas arriostradas lateralmente a lo largo de su longitud mediante arriostramientos adecuados
- vigas en las que el parámetro de esbeltez adimensional frente a pandeo lateral $\bar{\lambda}_{LT}$ (ver más abajo) $\leq 0,4$ o bien $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$.

Para cualquier otro tipo de elemento estructural, la resistencia de cálculo frente al pandeo lateral se determinará mediante la siguiente expresión:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1} \quad (5.8)$$

donde:

$$W_y = W_{pl,y} \text{ para secciones de Clase 1 ó 2}$$

$$W_y = W_{el,y} \text{ para secciones de Clase 3}$$

$$W_y = W_{eff,y} \text{ para secciones de Clase 4}$$

χ_{LT} es el coeficiente de reducción de pandeo lateral, dado por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}} \leq 1 \quad (5.9)$$

en el cual:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (5.10)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (5.11)$$

α_{LT} es el factor de imperfección

= 0,34 para secciones conformadas en frío y secciones huecas (soldadas o no)

= 0,76 para secciones abiertas soldadas y otro tipo de secciones de las que no se disponga de datos experimentales

M_{cr} es el momento crítico elástico de pandeo lateral (Apéndice B).

Para angulares, los ejes y y z deben tomarse como ejes u y v respectivamente.

Las curvas de pandeo lateral se presentan en la Figura 5.2.

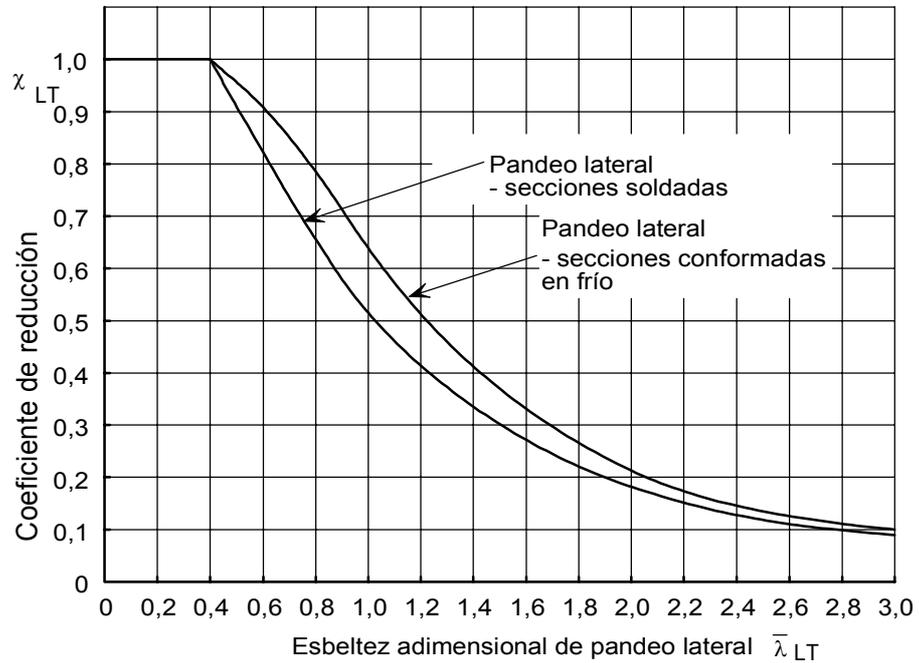


Figura 5.2 Curvas de pandeo para el pandeo lateral

5.4.3 Resistencia a cortante

La resistencia a cortante está limitada por la resistencia plástica a cortante (ver Sección 4.7.5) o por la resistencia a la abolladura por cortante.

La resistencia a la abolladura por cortante deberá comprobarse solamente cuando $h_w/t \geq 52\varepsilon/\eta$ para almas sin rigidizar, o $h_w/t \geq 23\varepsilon\sqrt{k_\tau}/\eta$ en el caso de almas rigidizadas.

La resistencia de cálculo a la abolladura por cortante para una viga se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.12a)$$

en donde la contribución del alma viene dada por:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.12b)$$

donde

h_w es la altura de alma entre alas (Figura 5.3)

ε se define en la Tabla 4.2

k_τ es el coeficiente de abolladura por cortante

- $V_{bw,Rd}$ es la contribución del alma a la resistencia a abolladura por cortante
 $V_{bf,Rd}$ es la contribución de las alas a la resistencia a abolladura por cortante
 f_{yw} es el límite elástico característico del acero del alma
 η ver EN 1993-1-5 (EN 1993-1-4 recomienda tomar $\eta = 1,20$.)

Nota: Deberá tomarse el mismo valor de η para calcular la resistencia plástica de cálculo a cortante y para calcular la resistencia de cálculo a la abolladura por cortante.

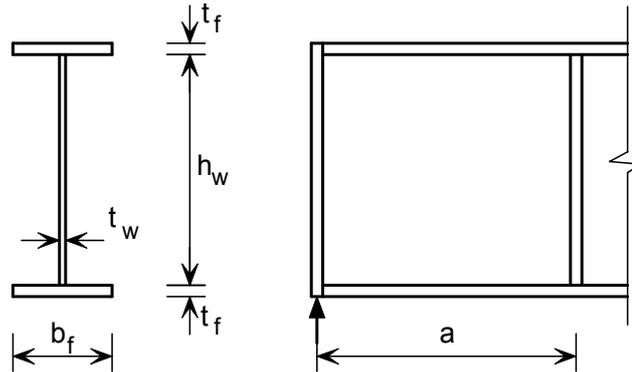


Figura 5.3 Notación para las dimensiones geométricas

Para almas con rigidizadores transversales únicamente en secciones de apoyo, y para almas con rigidizadores transversales intermedios y/o rigidizadores longitudinales, la contribución del alma a la resistencia frente a la abolladura por cortante χ_w viene dada por:

$$\chi_w = \eta \quad \text{para } \bar{\lambda}_w \leq 0,60/\eta \quad (5.13a)$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^2} \quad \text{para } \bar{\lambda}_w > 0,60/\eta \quad (5.13b)$$

Para almas con rigidizadores transversales únicamente en secciones de apoyo, la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_w$ se tomará como:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) \quad (5.14)$$

Para almas con rigidizadores transversales en secciones de apoyo y rigidizadores intermedios transversales y/o rigidizadores longitudinales, $\bar{\lambda}_w$ se tomará como:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) \quad (5.15)$$

donde k_τ el mínimo coeficiente de abolladura del panel de alma. Para paneles de alma con rigidizadores transversales rígidos y sin rigidización longitudinal o bien con más de dos rigidizadores longitudinales, k_τ puede obtenerse del modo que se indica a continuación:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{cuando } a/h_w \geq 1 \quad (5.16a)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{cuando } a/h_w < 1 \quad (5.16b)$$

donde:

$$k_{\text{ast}} = 9(h_w / a)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{\text{sl}}}{t^3 h_w}\right)^3} \text{ siempre mayor que } \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{\text{sl}}}{h_w}}$$

donde:

a es la distancia entre ejes de rigidizadores transversales, ver Figura 5.3.

I_{sl} es la inercia del rigidizador longitudinal alrededor del eje z .

La ecuación 5.16 también es aplicable a chapas con uno o dos rigidizadores longitudinales siempre que su relación de aspecto sea $a/h_w \geq 3$. Para chapas con uno o dos rigidizadores longitudinales y relación de aspecto $a/h_w < 3$, debería hacerse referencia a EN 1993-1-5 Anejo A3.

De forma simplificada, la contribución de las alas χ_f puede despreciarse. De todos modos, si la capacidad de las alas no se emplea totalmente en resistir el momento flector de cálculo ($M_{\text{Ed}} < M_{\text{f,Rd}}$), entonces la contribución de las alas puede obtenerse del siguiente modo:

$$V_{\text{bf,Rd}} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left[\frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{f,Rd}}} \right]^2 \right] \quad (5.17)$$

donde:

b_f y t_f se toman del ala que ofrece menor resistencia a axil, tomando b_f no mayor que $15\epsilon t_f$ a cada lado del alma

$M_{\text{f,Rd}}$ es el momento resistente de cálculo a flexión de la sección transversal considerando únicamente el área eficaz de alas

$$M_{\text{f,Rd}} = \frac{M_{\text{f,k}}}{\gamma_{M0}}$$

$$c = a \left(0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right) \text{ y } \frac{c}{a} \leq 0,65$$

f_{yf} es el límite elástico característico del ala.

Si el elemento se ve sometido además a un esfuerzo axil N_{sd} , el valor de $M_{\text{f,Rd}}$ se reducirá por un factor igual a:

$$\left[1 - \frac{N_{\text{Ed}}}{\frac{(A_{f1} + A_{f2}) f_{yf}}{\gamma_{M0}}} \right] \quad (5.18)$$

donde A_{f1} y A_{f2} son las áreas del ala superior e inferior respectivamente.

La verificación deberá llevarse a cabo del modo que sigue:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.19)$$

donde:

V_{Ed} es el esfuerzo cortante de cálculo incluyendo el cortante inducido por el momento torsor

La verificación de un elemento sometido a flexión biaxial y compresión deberá llevarse a cabo mediante la siguiente expresión:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (5.20)$$

donde:

A_{eff} es el área de la sección eficaz (Sección 4.4.1)

$e_{y,N}$ es el desplazamiento de la posición del eje neutro con respecto al eje y (Sección 4.4.1)

$e_{z,N}$ es el desplazamiento de la posición del eje neutro con respecto al eje z (Sección 4.4.1)

$M_{y,Ed}$ es el momento flector de cálculo alrededor del eje y

$M_{z,Ed}$ es el momento flector de cálculo alrededor del eje z

N_{Ed} es el esfuerzo axial de cálculo

$W_{y,eff}$ es el módulo resistente elástico con respecto al eje y de la sección eficaz (Sección 4.4.1)

$W_{z,eff}$ es el módulo resistente elástico con respecto al eje z de la sección eficaz (Sección 4.4.1).

En los casos en que sea pertinente, M_{Ed} y N_{Ed} deberán incluir los efectos de segundo orden. La verificación de abolladura de un panel deberá llevarse a cabo para el nivel de tensiones existentes a una distancia igual a la menor de las distancias 0,4a o 0,5b del extremo del panel en donde se den mayores niveles de tensión.

En caso que $\bar{\eta}_3$ (ver a continuación) no sea mayor que 0,5, la resistencia de cálculo a flexión y a axial de la sección no necesita reducirse por la presencia del cortante. Si por el contrario $\bar{\eta}_3$ es mayor que 0,5, los efectos combinados de flexión y cortante en el alma de una viga con sección en doble T o sección en cajón deberán verificar:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{para} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (5.21)$$

donde:

$M_{f,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo a flexión de la sección transversal formada únicamente por el área eficaz de las alas

$M_{pl,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo de la sección transversal considerando la sección eficaz de las alas y la sección de alma como totalmente eficaz, con independencia de la clase de sección.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad (5.22)$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad (5.23)$$

Las tensiones se toman como positivas. En los casos en que sea pertinente, M_{Ed} y N_{Ed} deberán incluir los efectos de segundo orden

El criterio dado en la ecuación 5.21 deberá satisfacerse en cada sección transversal, aunque no es necesario comprobarlo a una distancia menor de $h_w/2$ a un apoyo con rigidizadores verticales.

Si existe un esfuerzo axil N_{Ed} , entonces el momento $M_{pl,Rd}$ debe remplazarse por el momento plástico reducido $M_{N,Rd}$ de acuerdo con 6.2.9 de EN 1993-1-1 y $M_{f,Rd}$ debe reducirse de acuerdo con la ecuación 5.18. Si el esfuerzo axil es tan grande que todo el alma se encuentra comprimida, debe hacerse referencia a EN 1993-1-5.

5.4.4 Resistencia del alma a fuerzas puntuales

Siempre que las alas se encuentren arriostradas lateralmente, la resistencia de un alma no rigidizada a cargas puntuales o a reacciones de apoyos, vendrá gobernada por una de las siguientes formas de agotamiento:

- aplastamiento del alma en la zona inmediata al ala, acompañado de deformación plástica del ala,
- abolladura localizada del alma y aplastamiento del alma en la zona inmediata al ala, acompañado de deformación plástica del ala,
- abolladura del alma a lo largo del canto del elemento.

Para el caso de elementos estructurales con secciones conformadas en frío pueden adoptarse las reglas correspondientes al acero al carbono que se presentan en EN 1993-1-3.

Para vigas laminadas y vigas soldadas, se adopta la siguiente aproximación, basada en las reglas de EN 1993-1-5.

Para almas rigidizadas o sin rigidizar, la resistencia de cálculo a abolladura del alma frente a fuerzas transversales se obtiene como:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad (5.24)$$

donde:

t_w es el espesor del alma

f_{yw} es el límite elástico del alma

L_{eff} es la longitud eficaz para la resistencia frente a fuerzas transversales que se obtiene como

$$L_{eff} = \chi_F l_y$$

donde:

l_y es la longitud cargada eficaz, adecuada a la longitud de apoyo rígido s_s

χ_F es el coeficiente de reducción debido a la abolladura local

Además, debe considerarse el efecto de la fuerza transversal sobre la resistencia a flexión del elemento estructural.

Para determinar L_{eff} , deben diferenciarse tres modos de aplicación de la fuerza, tal como se indica a continuación:

- Fuerzas aplicadas a través de un ala y resistidas por esfuerzo cortante en el alma (Figura 5.4a)
- Fuerzas aplicadas a través de un ala y transferidas a través del alma directamente a la otra ala (Figura 5.4b)
- Fuerzas aplicadas a través de un ala próximas a un extremo no rigidizado (Figura 5.4c)

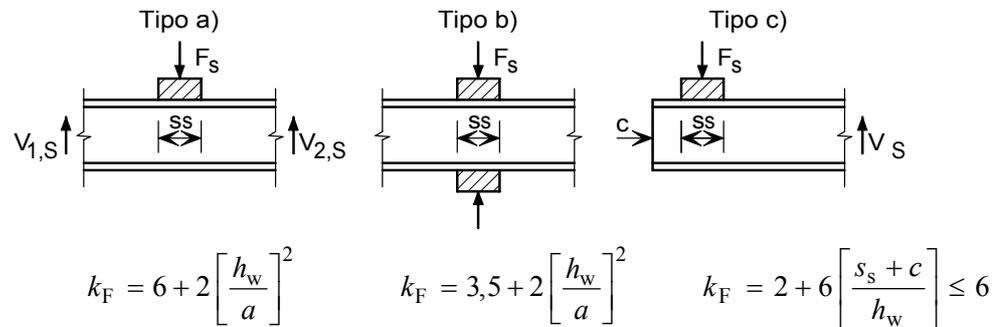


Figura 5.4 Coeficientes de abolladura para diferentes tipos de aplicación de la carga

Longitud de apoyo rígido

La longitud de apoyo rígido, s_s , sobre el ala es la distancia sobre la cual la fuerza aplicada se distribuye de manera efectiva y se puede determinar suponiendo que la carga se reparte a través del material acero sólido con una inclinación de 1:1, ver Figura 5.5. En cualquier caso, s_s no debe tomarse mayor que la altura del alma, h_w .

Si varias fuerzas concentradas están poco separadas, la resistencia debe comprobarse para cada carga individual y para la fuerza total, siendo entonces s_s la distancia entre ejes de aplicación de las fuerzas exteriores.

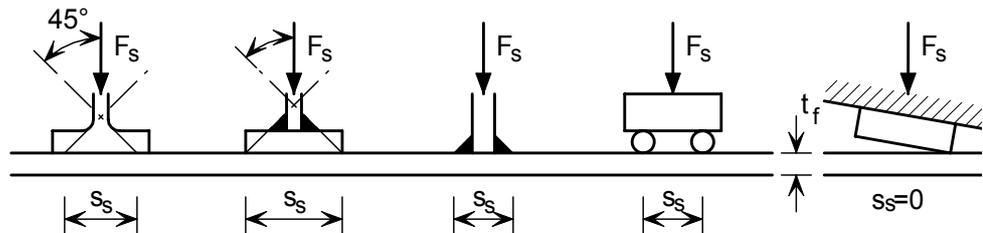


Figura 5.5 Longitud de apoyo rígido

Longitud cargada eficaz

La longitud cargada eficaz l_y debe calcularse utilizando dos parámetros adimensionales m_1 y m_2 que se obtienen de:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (5.25)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{para } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad (5.26a)$$

$$m_2 = 0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (5.26b)$$

En los casos a) y b) de la Figura 5.4, l_y debe obtenerse de:

$$l_y = s_s + 2t_f \left[1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right] \quad (5.27)$$

aunque l_y no debe ser mayor que la distancia entre rigidizadores transversales contiguos.

En el caso c) l_y se obtendrá como el menor de los valores obtenidos de las ecuaciones 5.28 y 5.29. En la ecuación 5.30, s_s debe tomarse igual a cero si la estructura que introduce la fuerza no tiene la misma inclinación que el ala de la viga, ver Figura 5.5.

$$l_y = l_e + t_f \left[\sqrt{\frac{m_1}{2} + \left[\frac{l_e}{t_f} \right]^2} + m_2 \right] \quad (5.28)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (5.29)$$

en donde l_e se obtiene de:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (5.30)$$

Longitud eficaz de resistencia

La longitud eficaz de resistencia se obtiene de:

$$L_{\text{eff}} = \chi_F l_y \quad (5.31)$$

con

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad (5.32)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad (5.33)$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (5.34)$$

donde

k_F es el coeficiente de abolladura para diferentes tipos de aplicación de la fuerza (Figura 5.4)

Cabe comentar que para calcular el coeficiente m_2 , debe asumirse un valor de $\bar{\lambda}_F$. Una vez calculado el valor de $\bar{\lambda}_F$, deberá recalcularse pertinentemente el valor de m_2 .

5.4.5 Rigidizadores transversales

Los rigidizadores transversales en apoyos y en otras posiciones en las que existan cargas aplicadas importantes se dispondrán preferiblemente a ambos lados del alma y simétricamente respecto a su plano medio. Dichos rigidizadores se comprobarán frente a aplastamiento y a pandeo. Los rigidizadores intermedios que no están sometidos a la acción de cargas puntuales deberán comprobarse solamente frente a abolladura.

La sección eficaz que debe utilizarse para comprobar el pandeo debe incluir una parte del alma, tal como se muestra en la Figura 5.6. En el extremo del elemento (o bien en zonas con aberturas en el alma), la anchura de alma incluida en la sección transversal no debe superar la anchura disponible.

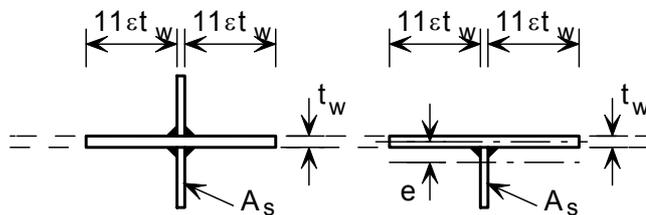


Figura 5.6 Sección eficaz de los rigidizadores frente a pandeo

La resistencia a pandeo fuera del plano $N_{b,Rd}$ del rigidizador debe determinarse a partir de lo indicado en la Sección 5.3.3 utilizando $\alpha = 0,49$ y $\bar{\lambda}_0 = 0,2$. La longitud de pandeo l del rigidizador será función de las condiciones de contorno, pero nunca se tomará menor que $0,75h_w$, que corresponde a la situación con los dos extremos fijos lateralmente. Para condiciones de contorno que supongan un menor grado de coacción deberán tomarse valores mayores de l . En el caso de tener una sección cruciforme deberá verificarse también la resistencia a pandeo por torsión.

Para rigidizadores colocados a un solo lado del alma u otros rigidizadores no simétricos debe considerarse la excentricidad resultante según lo indicado en la Sección 5.5.2.

En apoyos o en posiciones intermedias en las que haya importantes cargas puntuales aplicadas, la resistencia de cálculo a pandeo debe ser mayor que la reacción o la carga aplicada. En otras posiciones intermedias, el esfuerzo axial de cálculo de compresión en el rigidizador N_{Ed} puede obtenerse de:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.35)$$

donde

V_{Ed} es el esfuerzo cortante de cálculo en el elemento.

La expresión anterior debe calcularse suponiendo que el rigidizador en cuestión no existe.

El momento de inercia de un rigidizador intermedio, I_s , debe satisfacer la siguiente condición:

$$a / h_w < \sqrt{2}, \quad I_s \geq 1,5 h_w^3 t_w^3 / a^2 \quad (5.36)$$

$$a / h_w \geq \sqrt{2}, \quad I_s \geq 0,75 h_w t_w^3 \quad (5.37)$$

5.4.6 Cálculo de flechas

Las flechas deben calcularse a partir de la combinación de acciones en estado límite de servicio.

La flecha en vigas elásticas (es decir, aquellas en las que no se forman rótulas plásticas) puede estimarse mediante la teoría clásica de cálculo de estructuras, exceptuando que debe utilizarse el módulo secante en lugar del módulo de Young. El módulo de elasticidad secante varía con el nivel de tensiones de la viga y sus valores pueden encontrarse en el Apéndice C. Este es un método simplificado que es preciso para el cálculo de flechas cuando el módulo secante se obtiene a partir de la máxima tensión en el elemento y dicha tensión máxima no supera el 65% de la resistencia del 0,2%. Para niveles superiores de tensión, el método resulta muy conservador, debiendo utilizar entonces un método más preciso (p.e. un método que utilice la integración a lo largo de toda la longitud del elemento).

En el caso de secciones de Clase 4 y/o en elementos sujetos a la influencia del arrastre por cortante, para el cálculo de flechas se deberá utilizar una sección eficaz. Como primera aproximación, es adecuado utilizar la sección eficaz obtenida con los anchos eficaces establecidos en las Secciones 4.4.1 y/o 4.4.2. Si se quiere refinar dicho valor, es posible emplear una sección eficaz basada en los anchos eficaces de abolladura obtenidos con la tensión real en los elementos, tomando ε en la Sección 4.4.1 (no en la Sección 4.4.2) como

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{\sigma} \frac{E}{210000} \right]^{1/2} \quad (5.38)$$

donde:

σ es la tensión real en el elemento en la sección transversal eficaz correspondiente.

E es el módulo de Young

5.5 Elementos sometidos a esfuerzos combinados de axil y de flexión

5.5.1 Tracción y flexión

Los elementos sometidos a esfuerzos combinados de tracción y flexión deben comprobarse frente a pandeo lateral de acuerdo con la Sección 5.4.2, bajo la acción del momento flector exclusivamente. Además debe comprobarse la capacidad del elemento bajo la acción combinada de los esfuerzos de tracción y flexión en la sección crítica. Deberá satisfacerse la siguiente ecuación:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (5.39)$$

donde:

N_{Ed} es el esfuerzo axil de tracción de cálculo en el elemento en la sección crítica

N_{Rd} es la resistencia de cálculo del elemento a tracción

$M_{y,Ed}$ es el momento flector de cálculo alrededor del eje fuerte en la sección crítica

$M_{z,Ed}$ es el momento flector de cálculo alrededor del eje débil en la sección crítica

$M_{y,Rd}$ es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje fuerte suponiendo que no existe esfuerzo axil, y que incluye cualquier tipo de reducción que deba llevarse a cabo por efecto del cortante (Sección 4.7.4)

$M_{z,Rd}$ es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje débil suponiendo que no existe esfuerzo axil, y que incluye cualquier tipo de reducción que deba llevarse a cabo por efecto del cortante (Sección 4.7.4)

5.5.2 Compresión y flexión

Además de satisfacer los requisitos de la resistencia seccional (ver Sección 4.7.6) en cada punto a lo largo de la longitud del elemento y los requisitos generales para vigas (ver Sección 5.4), deberán considerarse los efectos de la interacción entre los esfuerzos axiales de compresión y los momentos flectores.

Compresión y momento flector alrededor del eje fuerte:

Para evitar el pandeo alrededor del eje fuerte:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.40)$$

Para evitar el pandeo alrededor del eje débil (para elementos sometidos a pandeo lateral):

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \quad (5.41)$$

Compresión y momento flector alrededor del eje débil:

Para evitar el pandeo alrededor del eje débil:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.42)$$

Compresión y flexión esviada:

Todos los elementos estructurales deberán satisfacer:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.43)$$

Los elementos estructurales que puedan verse sometidos a pandeo lateral deberán también satisfacer:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.44)$$

En las ecuaciones anteriores se tiene que:

e_{Ny} y e_{Nz} son las excentricidades del eje neutro cuando la sección transversal está sometida a compresión uniforme

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

$(N_{b,Rd})_{\min}$ es el menor valor de $N_{b,Rd}$ para los siguientes cuatro modos de pandeo: pandeo por flexión alrededor del eje y , pandeo por flexión alrededor del eje z , pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión (ver Secciones 5.3.3 y 5.3.4)

$(N_{b,Rd})_{\min 1}$ es el menor valor de $N_{b,Rd}$ para los siguientes tres modos de pandeo: pandeo por flexión alrededor del eje z , pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión (ver Secciones 5.3.3 y 5.3.4)

$\beta_{W,y}$ y $\beta_{W,z}$ son los valores de β_W calculados para los ejes y y z respectivamente en donde

$$\begin{aligned} \beta_W &= 1 && \text{para secciones transversales de Clase 1 ó 2} \\ &= W_{el}/W_{pl} && \text{para secciones transversales de Clase 3} \\ &= W_{eff}/W_{pl} && \text{para secciones transversales de Clase 4} \end{aligned}$$

$W_{pl,y}$ y $W_{pl,z}$ son los módulos resistentes plásticos para los ejes y y z respectivamente

$M_{b,Rd}$ es la resistencia de cálculo a pandeo lateral (ver Sección 5.4.2).

k_y , k_z , k_{LT} son los coeficientes de interacción

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{siendo} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad \text{siendo} \quad 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}}$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Cabe comentar que los Anejos Nacionales podrán incluir otras fórmulas para los coeficientes de interacción como alternativa a las presentadas en el párrafo anterior.

Para angulares, los ejes y y z deben tomarse como ejes u y v respectivamente.

6 DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES

6.1 Recomendaciones generales

6.1.1 Durabilidad

En el proyecto de uniones, en particular, es necesario prestar la máxima atención para mantener las condiciones óptimas de resistencia a la corrosión.

Ello debe ser así especialmente en aquellas uniones que pueden humedecerse ya sea por las condiciones climáticas, espuma, inmersión o condensación, etc. Las uniones deberían ubicarse en zonas lejanas a posibles fuentes de humedad; con ello se evitan o reducen los posibles problemas de corrosión. Alternativamente, puede ser posible eliminar el origen de la humedad; por ejemplo, en el caso de condensaciones, mediante una ventilación adecuada o asegurando que la temperatura ambiente se sitúe por encima de la temperatura de rocío.

Cuando no es posible evitar una unión con humedad en la que participen acero inoxidable y acero al carbono, deberá prevenirse la corrosión galvánica, ver Sección 3.7.2. Debe evitarse siempre el uso de tornillos de acero al carbono con elementos estructurales de acero inoxidable. En uniones atornilladas que sean susceptibles de verse sometidas a un grado inaceptable de corrosión, se debe tener la precaución de aislar eléctricamente los elementos de acero al carbono y de acero inoxidable. Esto conlleva el empleo de arandelas aislantes y posiblemente cojinetes; en la Figura 6.1 se presenta un detalle típico de la unión. Para estructuras offshore, pueden ser requeridas tales medidas y es por ello por lo que el proyectista debe contactar con la autoridad competente, con el objetivo de establecer los requisitos exactos de proyecto lo antes posible.

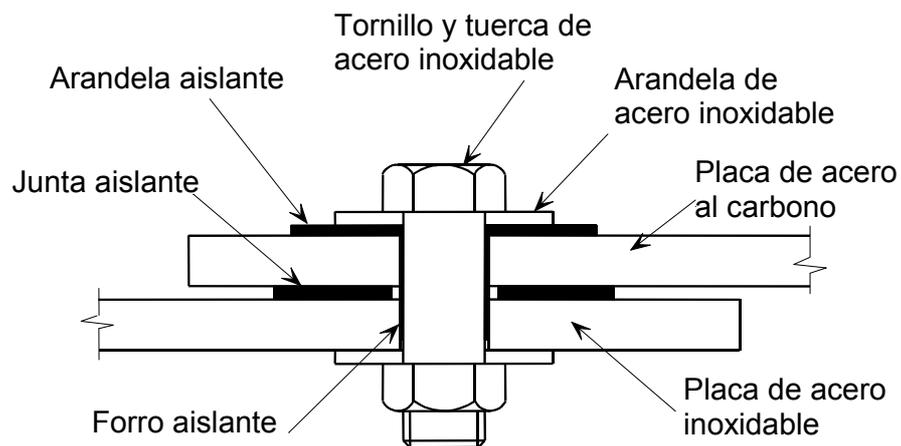


Figura 6.1 *Detalle típico para la conexión de materiales distintos (para evitar la corrosión galvánica)*

Para aquellas uniones soldadas en las que intervengan acero al carbono y acero inoxidable se recomienda, en general, que cualquier sistema de pintura que se aplique al acero al carbono se extienda sobre la soldadura y cubra parcialmente al acero inoxidable.

En las uniones atornilladas se debe tener cuidado al seleccionar los materiales adecuados al ambiente, para evitar la corrosión en hendiduras (ver Sección 3.7.2).

Los ciclos de calentamiento y enfriamiento asociados al proceso de soldadura afectan a la microestructura de todos los aceros inoxidable, aunque a algunos grados, más que a otros, y es particularmente importante en los aceros dúplex. Es esencial utilizar procedimientos de soldeo y consumibles adecuados, y que las personas que realicen el trabajo sean soldadores cualificados. En la Sección 10.4 se da una guía sobre este tema.

6.1.2 Hipótesis de cálculo

Las uniones se pueden calcular distribuyendo los esfuerzos de manera realista, teniendo en cuenta la rigidez relativa de los elementos que componen la unión. Los esfuerzos deben estar en equilibrio con las cargas y momentos aplicados. Cada elemento de la unión debe ser capaz de resistir los esfuerzos transmitidos, asegurando que las deformaciones implícitas se mantengan dentro de su capacidad de deformación.

6.1.3 Intersecciones y empalmes

Aquellos elementos estructurales que concurren en una unión se colocarán normalmente de forma que sus directrices se corten en un punto. Cuando exista excentricidad en la intersección de una unión, los elementos estructurales y las uniones deberán calcularse de modo que sean capaces de absorber los momentos resultantes. En el caso de uniones atornilladas de angulares y simples T con al menos dos tornillos por unión, se puede considerar como directriz la línea de gramil de los tornillos.

Los empalmes de vigas deben colocarse, preferiblemente, tan cerca como sea posible de los puntos de inflexión de la deformada (momento nulo). En el caso de pilares, deben considerarse los momentos adicionales resultantes del efecto P- δ .

6.1.4 Otras consideraciones generales

Cuando una unión esté sometida a impacto, vibración, o a una frecuente inversión de tensiones importantes, la soldadura es el método preferible para dicha unión. Estas uniones deben verificarse frente a fatiga (ver Sección 8).

La facilidad de fabricación y montaje son factores a tener en cuenta en el proyecto de uniones y empalmes. Se deberá prestar especial atención a:

- utilizar detalles estandarizados
- los espacios necesarios para un montaje seguro
- los espacios necesarios para el apriete de tornillos
- la necesidad de acceso para soldar
- los requisitos del procedimiento de soldadura
- los efectos de las tolerancias angulares y longitudinales en el ajuste de piezas.

Cabe señalar que los aceros inoxidable austeníticos presentan distorsiones de soldadura mayores que los aceros al carbono (ver Sección 10.4.4). Debe prestarse especial atención a los requerimientos planteados para la posterior inspección y mantenimiento.

6.2 Uniones atornilladas

6.2.1 Aspectos generales

Las recomendaciones de esta Sección hacen referencia a uniones atornilladas sometidas a cortante, tracción o combinación de esfuerzo cortante y tracción. Es regla de buena práctica el colocar arandelas debajo de la cabeza del tornillo y de la tuerca. En las Secciones 3.1.2 y 10.5 se presenta una guía sobre los materiales adecuados para tornillos y tuercas.

Las fuerzas de cortante (cortadura) se transmiten por contacto entre los tornillos y las partes conectadas de la pieza. No se proporcionan recomendaciones para uniones en las que la cortadura se transmita por rozamiento (ver Sección 6.2.2).

La resistencia de una unión viene determinada por la menor de la resistencia de cada una de las partes conectadas (ver Sección 6.2.3) y de la resistencia de los elementos de unión (ver Sección 6.2.4).

Para restringir la deformación irreversible en uniones atornilladas, las tensiones en los tornillos y en las secciones transversales netas, en los agujeros para tornillos, bajo las combinaciones de acciones características, deberían limitarse al límite elástico.

6.2.2 Tornillos pretensados

Los tornillos de acero inoxidable pueden ser utilizados como tornillos pretensados siempre que se empleen las técnicas de apriete adecuadas. Si los tornillos de acero inoxidable se aprietan demasiado, pueden aparecer problemas de gripado. Cuando se pretensa un tornillo, deben considerarse los efectos de la relajación de la tensión con el tiempo. Las uniones no deben proyectarse como resistentes al deslizamiento ni en estado límite de servicio ni en estado límite último a menos que se pueda demostrar experimentalmente.

6.2.3 Partes unidas

Agujeros

Los agujeros pueden hacerse por taladrado o punzonado. Sin embargo, el trabajo en frío asociado a los procesos de punzonado puede aumentar la susceptibilidad a la corrosión, de modo que los agujeros realizados por punzonado son menos adecuados en ambientes agresivos (p.e. ambientes industriales pesados o marinos).

Las holguras máximas en agujeros estándares son:

- 1 mm para tornillos M12 y M14 (M14 no es tamaño estándar)
- 2 mm para tornillos M16 a M24
- 3 mm para tornillos M27 y mayores

Posición de agujeros

La distancia al borde se define como la distancia desde el centro del agujero al borde lateral más cercano de la unión medida normalmente a la dirección de transmisión de la carga; la distancia al extremo se define de forma similar pero en la dirección de transmisión del esfuerzo.

El valor mínimo de la distancia al extremo, e_1 , o de la distancia al borde, e_2 , (ver Figura 6.2) se tomará igual a $1,2d_0$, siendo d_0 el diámetro del agujero. La distancia al extremo puede necesitar ser mayor que este valor, con objeto de proporcionar una adecuada resistencia a aplastamiento (ver a continuación).

El valor máximo de la distancia al extremo o al borde no superará el valor de $4t + 40$ mm, siendo t el espesor (en mm) de la chapa exterior más delgada.

La separación mínima entre centros de tornillos es $2,2d_0$ en la dirección de la transferencia de esfuerzos, p_1 , (ver Figura 6.2). La correspondiente separación mínima en dirección perpendicular a la transferencia de esfuerzos, p_2 , es $2,4d_0$.

La separación máxima entre tornillos en cualquier dirección viene determinada por la consideración de la abolladura en las chapas, ver EN 1993-1-8.

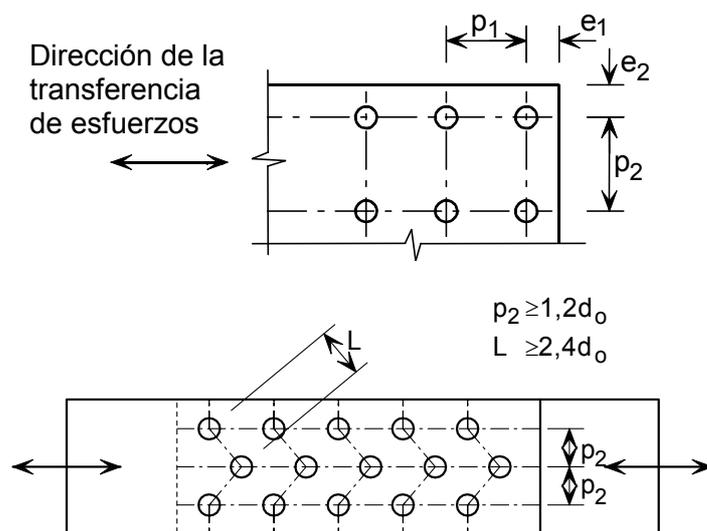


Figura 6.2 Definición de la posición de los agujeros

Para tornillos dispuestos al tresbolillo, puede adoptarse una separación mínima entre filas de $p_2=1,2d_0$, si la distancia mínima, L , entre dos elementos de unión es mayor o igual a $2,4d_0$, ver Figura 6.2.

Resistencia al aplastamiento

La resistencia útil de una unión atornillada en acero inoxidable viene generalmente gobernada por criterios de servicio según los cuales la elongación del agujero está limitada bajo cargas de servicio. Con tal de evitar la realización de una comprobación separada para servicio, se recomienda establecer un límite para la elongación del agujero en estado límite último mediante la utilización de un valor reducido de la resistencia última a tracción $f_{u,red}$ donde:

$$f_{u,red} = 0.5f_y + 0.6f_u \text{ siendo } \leq f_u \quad (6.1)$$

El valor de $F_{b,Rd}$ se obtiene de:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{u,red} d t}{\gamma_{M2}} \quad (6.2)$$

siendo α_b el menor de:

- α_d
- $f_{ub} / f_{u,red}$
- 1.0

donde:

d es el diámetro del tornillo

t es el espesor de la chapa

f_{ub} es la resistencia última a tracción característica de la chapa (normalmente se toma el valor mínimo especificado de la resistencia última a tracción, ver Tabla 3.1).

$\alpha_d = e_1 / 3d_0$ para tornillos extremos en la dirección de transferencia de la carga

$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ para tornillos interiores en la dirección de transferencia de la carga

k_1 es el menor valor de $2,8 \frac{e_2}{d_o} - 1,7$ o $2,5$ para tornillos extremos, en dirección perpendicular a la dirección de transferencia de la carga

k_1 es el menor valor de $1,4 \frac{p_2}{d_o} - 1,7$ o $2,5$ para tornillos interiores, en dirección perpendicular a la dirección de transferencia de la carga.

En el caso de uniones a solape simple de elementos planos con una sola línea de tornillos, los tornillos deben suministrarse con una arandela debajo de la cabeza y de la tuerca del tornillo y la resistencia al aplastamiento de cada tornillo se limitará a:

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 f_{u,red} d t}{\gamma_{M2}} \quad (6.3)$$

La resistencia de un grupo de tornillos puede determinarse como la suma de las resistencias a aplastamiento de cada tornillo $F_{b,Rd}$ por separado siempre que la resistencia de cálculo a cortadura $F_{v,Rd}$ de cada tornillo sea mayor o igual que la resistencia de cálculo a aplastamiento $F_{b,Rd}$. De otra manera, la resistencia de un grupo de tornillos podría determinarse considerando la menor resistencia de un tornillo multiplicada por el número de tornillos.

Resistencia a tracción

La resistencia a tracción de los elementos conectados vendrá determinada por el menor de:

a) la resistencia plástica de la sección transversal bruta

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

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

$$N_{u,Rd} = \frac{k_t A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.5)$$

estando los términos de estas expresiones definidos en la Sección 4.7.2.

Debe señalarse que la expresión para la resistencia última de la sección neta debería utilizarse solamente para un plano de cortadura cuando existan arandelas bajo las cabezas de los tornillos y las tuercas.

Si se requiere un comportamiento dúctil, entonces la resistencia plástica de la sección bruta debe ser menor que la resistencia última de la sección neta. Las exigencias de ductilidad y capacidad de rotación se presentan en EN 1993-1-8. Las exigencias para diseño sísmico se dan en EN 1998.

Resistencia de cálculo a desgarro del alma

Puede aplicarse lo recogido en EN 1993-1-8.

Angulares unidos por un ala y elementos estructurales en tracción unidos no simétricamente

En el caso de elementos estructurales no simétricos o unidos no simétricamente tales como angulares unidos por un ala, al determinar su resistencia última de cálculo se tendrá en cuenta la excentricidad de los tornillos en las uniones de extremo y los efectos de la separación entre tornillos y sus distancias a los bordes.

Los angulares unidos por una única fila de tornillos en un ala pueden tratarse como elementos cargados concéntricamente y la resistencia última de cálculo de la sección neta se puede determinar como sigue:

$$\text{Con 1 tornillo} \quad N_{u,Rd} = \frac{2,0 (e_2 - 0,5d_0) t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.6)$$

$$\text{Con 2 tornillos} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

$$\text{Con tres o más tornillos:} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.8)$$

donde:

β_2 y β_3 son los coeficientes de reducción dependientes de la separación p_1 , presentados en la Tabla 6.1. Para valores intermedios de p_1 , el valor de β se puede determinar por interpolación lineal.

A_{net} es el área neta del angular. Para un angular de lados desiguales unido por el ala menor, A_{net} será igual al área de la sección neta de un angular equivalente de lados iguales con un tamaño de ala igual al del ala menor.

Tabla 6.1 Coeficientes de reducción β_2 y β_3

Unión	Coeficiente	Separación, p_1	
		$\leq 2,5d_0$	$\geq 5,0d_0$
2 tornillos	β_2	0,4	0,7
3 o más tornillos	β_3	0,5	0,7

6.2.4 Elementos de unión

Áreas netas

Para el cálculo de tornillos traccionados deberá utilizarse el área resistente a tracción, tal y como se defina en la norma apropiada para dicho producto.

Para tornillos trabajando a cortadura, puede utilizarse el área mayor de la espiga del tornillo siempre que se garantice que la zona roscada queda fuera del plano de cortadura; deberá tenerse en cuenta que los tornillos pueden estar solicitados en cualquier dirección. En caso de no poder asegurar dicha condición, deberá utilizarse el área resistente a tracción.

Resistencia a cortadura

La resistencia a cortadura de una unión atornillada depende del número de planos de cortadura y de su posición a lo largo del eje del tornillo. Para cada plano de cortadura, la resistencia a cortadura en ausencia de tracción puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (6.9)$$

donde:

A es la sección transversal bruta del tornillo (si el plano de cortadura no interesa a la zona roscada del tornillo), o el área resistente a tracción del tornillo (si el plano de cortadura interesa a la zona roscada del tornillo)

f_{ub} es la resistencia última a tracción del tornillo.

El valor de α puede definirse en el Anejo Nacional. Los valores recomendados son:

- si el plano de cortadura no interesa a la zona roscada del tornillo, $\alpha = 0,6$
- si el plano de cortadura interesa a la zona roscada del tornillo, $\alpha = 0,5$.

Resistencia a tracción

La resistencia a tracción de un tornillo viene dada por $F_{t,Rd}$:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.10)$$

donde:

$k_2 = 0,63$ para tornillos avellanados, en otros casos $k_2 = 0,9$.

Cuando se dispongan elementos de unión, como tornillos, para resistir una fuerza axial de tracción, dichos elementos deberán ser capaces de resistir las fuerzas adicionales de palanca, cuando este efecto pueda aparecer. En EN 1993-1-8 se presenta la metodología a seguir para considerar las fuerzas de palanca.

Efecto combinado de tracción y cortadura

Cuando un tornillo está sometido simultáneamente a esfuerzo de cortadura, $F_{v,Ed}$, y a esfuerzo de tracción (incluidos los efectos de palanca), $F_{t,Ed}$, debe considerarse la interacción entre los mismos. Ello puede tenerse en cuenta satisfaciendo la siguiente relación:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.11)$$

en donde $F_{v,Rd}$ y $F_{t,Rd}$ son las resistencias presentadas anteriormente. Nótese que la fuerza de tracción de cálculo (incluyendo cualquier fuerza debida al efecto de palanca) debe también ser menor que la resistencia a tracción.

Uniones largas y longitudes grandes de agarre

Para empalmes de longitud inusual (es decir 500 mm o superiores a 15 diámetros de tornillo) o cuando la longitud de agarre (es decir, el espesor total de las chapas conectadas) supera 5 diámetros de tornillo, deberá reducirse la resistencia a cortadura. En ausencia de datos existentes para acero inoxidable, se recomienda, en estas situaciones, consultar las reglas para acero al carbono en EN 1993-1-8.

6.3 Elementos de unión mecánicos para estructuras ligeras

El dimensionamiento de uniones para chapas de acero inoxidable mediante tornillos rosca-chapa puede llevarse a cabo de acuerdo con EN 1993-1-3, excepto que la resistencia al arrancamiento debería determinarse mediante ensayos. Con el objetivo de eliminar el agarrotamiento del tornillo o el desgarro de la rosca, la capacidad de dicho tornillo para taladrar y formar roscas en acero inoxidable debería demostrarse mediante ensayos, a menos que se disponga de suficiente experiencia. El valor reducido para la resistencia a tracción, $f_{u,red}$, debería utilizarse en lugar de f_u .

6.4 Uniones soldadas

6.4.1 Aspectos generales

Es esencial que las soldaduras sean realizadas por soldadores cualificados convenientemente, y utilizando los procedimientos correctos y los materiales de aportación compatibles (ver Sección 10.4). Ello es importante, no sólo para asegurar la capacidad resistente de la soldadura y conseguir un perfil de soldadura bien definido, sino también para mantener la resistencia a la corrosión de la soldadura y del material adyacente.

Las siguientes recomendaciones se aplican a la soldaduras a tope con penetración completa y parcial y a las soldaduras de ángulo realizadas mediante procedimiento de soldadura por arco eléctrico tales como:

Procedimiento número	Procedimiento nombre
111	Soldadura por arco con electrodo metálico revestido (soldadura por arco manual)
121	Soldadura por arco sumergido con hilo/alambre
122	Soldadura por arco sumergido con varillas/electrodos desnudos
131	Soldadura por arco en atmósfera inerte con varilla metálica (soldadura MIG)
135	Soldadura por arco en atmósfera activa con varilla metálica (soldadura MAG)

- 137 Soldadura por arco con hilo tubular, con protección de gas inerte
- 141 Soldadura por arco en atmósfera inerte con electrodo de tungsteno (soldadura TIG)
- 15 Soldadura por arco con chorro plasmático

(Los números de los procedimientos son los definidos en EN ISO 4063.)

Deben utilizarse consumibles compatibles, de modo que el límite elástico y la resistencia última de la soldadura superen los del material base. (Para consumibles en los que las propiedades mecánicas sean inferiores a las del metal base, ver Sección 6.4.4.) La Tabla 6.2 los consumibles para soldeo adecuados para diferentes grados y la Tabla 6.3 muestra las propiedades mecánicas de dichos consumibles.

Tabla 6.2 Grados de acero aplicables y consumibles para soldeo

Material base	Consumibles para soldeo			
	Número	Electrodos revestidos EN 1600	Alambres y barras EN 12072	Electrodos de hilo tubular EN 12073
	1.4301	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
	1.4306	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
	1.4307	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
	1.4318	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
	1.4541	E 19 9 Nb	G 19 9 Nb	T 19 9 Nb
	1.4401	E 19 12 2	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
	1.4404	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
	1.4571	E 19 12 3 Nb	G 19 12 3 Nb	T 19 12 3 Nb
	1.4362	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
	1.4462	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L

Tabla 6.3 Propiedades mecánicas de los consumibles para soldeo según EN 1600, EN 12072 y EN 12073

Material de soldadura	Límite elástico N/mm ²	Resistencia última N/mm ²
E 19 9	350	550
E/G/T 19 9 L	320	510
E/G/T 19 9 Nb	350	550
E 19 12 2	350	550
E/G/T 19 12 3 L	320	510
E/G/T 19 12 3 Nb	350	550
E 25 7 2 N L	500	700
G 25 7 2 L	500	700
T 22 9 3 N L	450	550

Debe prestarse especial atención al caso en el que se utilice para el cálculo un valor experimental de la resistencia del 0,2% (es decir, el dimensionamiento según la Sección 3.2.4(ii)). Los fabricantes de acero inoxidable y de consumibles pueden ayudar a la hora de seleccionar el material de aportación más adecuado. El metal de aportación debe ser al menos tan noble como el metal base.

Para reducir la posibilidad de corrosión, es mejor evitar las soldaduras de ángulo intermitentes y las soldaduras a tope con penetración parcial intermitente en todos los ambientes, excepto en los poco agresivos. Además, las soldaduras a tope intermitentes deberían utilizarse con cuidado en ambientes marinos o en ambientes

onshore altamente contaminados, en particular cuando aparezca flujo inducido por tensión superficial.

6.4.2 Soldaduras de ángulo

Aplicación

Las soldaduras de ángulo pueden utilizarse para conectar elementos cuyas caras a unir formen ángulos comprendidos entre 60° y 120° . Para ángulos más pequeños que 60° , pueden disponerse soldaduras en ángulo, pero éstas deberían ser consideradas, a efectos de proyecto, como soldaduras a tope con penetración parcial. Para ángulos mayores que 120° , las soldadura de ángulo no se tendrán en cuenta para la transmisión de esfuerzos.

No se realizará un único cordón de soldadura para resistir momentos flectores actuando alrededor del eje longitudinal del cordón, especialmente cuando dicho flector provoca tensiones de tracción en la raíz del cordón de soldadura.

Longitud eficaz y espesor de garganta

La longitud eficaz de un cordón de soldadura de ángulo será la longitud total del cordón. Sin embargo, si la longitud eficaz del cordón de soldadura es menor que 40 mm o 6 veces el espesor de garganta, no se tendrá en cuenta en la transmisión de fuerzas.

El espesor de garganta eficaz, a , de un cordón de soldadura de ángulo debe tomarse como la altura del mayor triángulo (de lados iguales o desiguales) que puede inscribirse dentro de las caras de fusión y la superficie del cordón, medida perpendicularmente a la cara exterior de este triángulo, ver Figura 6.3. Para determinar la resistencia de un cordón de soldadura de ángulo con penetración profunda, se puede tener en cuenta el espesor adicional de garganta, ver Figura 6.4, siempre que las pruebas de procedimiento muestren que se puede conseguir la penetración requerida de forma sistemática.

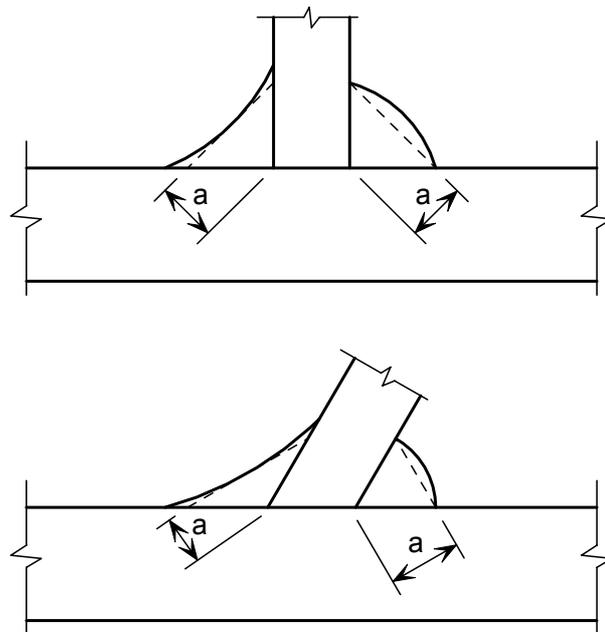


Figura 6.3 *Espesor de garganta en soldaduras de ángulo*

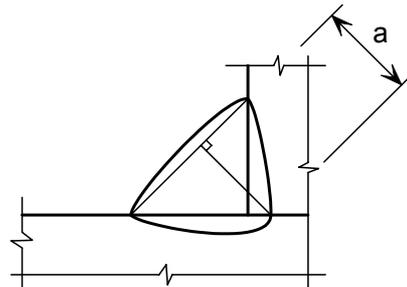


Figura 6.4 *Espesor de garganta en soldaduras de ángulo con penetración profunda*

Tensión de cálculo y resistencia a cortante de cálculo

La tensión de cálculo viene determinada por el vector suma de las tensiones debidas a todos los esfuerzos y momentos transmitidos por el cordón de soldadura. La tensión de cálculo se calcula para la longitud eficaz y el espesor de garganta (definidos anteriormente). La tensión de cálculo no debe sobrepasar la resistencia a cortante de cálculo.

La resistencia de cálculo del cordón de soldadura en ángulo será adecuada si se cumplen las siguientes condiciones:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (6.12a)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.12b)$$

donde:

- σ_{\perp} es la tensión normal perpendicular al espesor de garganta
- τ_{\perp} es la tensión tangencial (en el plano de garganta) perpendicular al eje de soldadura
- τ_{\parallel} es la tensión tangencial (en el plano de garganta) paralela al eje de soldadura
- f_u es la resistencia nominal última a tracción de la parte unida más débil
- β_w se toma como 1,0 para todas las resistencias nominales de acero inoxidable a menos que se pueda justificar un valor más bajo mediante ensayos.

Alternativamente, para calcular la resistencia de cálculo de un cordón de soldadura de ángulo puede utilizarse el método simplificado recogido en 4.5.3.3 de EN 1993-1-8.

6.4.3 Soldaduras a tope

Soldaduras a tope con penetración completa

La resistencia de cálculo de un cordón de soldadura a tope con penetración completa será igual a la resistencia de cálculo de la más débil de las piezas a unir, siempre que el cordón de soldadura satisfaga las recomendaciones de la Sección 6.3.1.

Soldaduras a tope con penetración parcial

Las soldaduras a tope con penetración parcial pueden utilizarse para transmitir esfuerzos de cortante. No son recomendables para situaciones en las que pudieran estar sometidas a tracción.

La resistencia de un cordón de soldadura a tope con penetración parcial se calculará como los cordones de soldadura de ángulo con penetración profunda. El espesor de garganta de un cordón de soldadura a tope con penetración parcial será la profundidad de aquella penetración que se puede conseguir de forma estable, tal como esté determinado en las pruebas de procedimiento. En ausencia de éstas, el espesor de garganta puede adoptarse igual a la profundidad de preparación menos 3 mm.

6.4.4 Soldaduras en acero inoxidable conformado en frío

Para las soldaduras en elementos de acero inoxidable conformado en frío pueden aplicarse los mismos principios que para los elementos recocidos siempre que:

- La unión soldada está sometida a axil.
- El nivel de resistencia del trabajado en frío del acero inoxidable no supera CP500 o C850.
- Los consumibles para soldadura se escogen de acuerdo con la Tabla 6.2.
- La resistencia del material base en las zonas afectadas por el calor se basa en la resistencia a tracción del material base en estado recocido.

El metal de aportación puede presentar una resistencia más baja que la del material base. Para electrodos en los que las propiedades mecánicas sean inferiores a las del metal base, la resistencia de cálculo de los cordones de soldadura a tope y de ángulo deberían basarse en la resistencia última del metal de aportación (ver Tabla 6.3) con β_w igual a 1,0.

7 DIMENSIONAMIENTO FRENTE A FUEGO

7.1 Aspectos generales

En este apartado se indican los criterios de dimensionamiento frente a fuego que las estructuras de acero inoxidable, por razones de seguridad, deberán satisfacer, evitando el colapso prematuro de la estructura cuando ésta esté expuesta a la acción del fuego. Las recomendaciones que se dan corresponden únicamente a medidas pasivas de protección frente a fuego, que son aplicables a los grados de acero inoxidable y a las estructuras de acero inoxidable que hayan sido dimensionadas siguiendo las especificaciones de las Secciones 1 a 6 de este documento.

Los aceros inoxidables austeníticos mantienen una mayor proporción de su resistencia a temperatura en condiciones normales que los aceros al carbono por encima de 550°C, y mantienen también una mayor proporción de su rigidez.

EN 1991-1-2 define las acciones térmicas y mecánicas que actúan sobre una estructura expuesta al fuego. El fuego se define como una situación accidental de diseño en los Eurocódigos. En EN 1990 se presentan las combinaciones de acciones para situaciones accidentales de diseño, y recomienda tomar un valor para los coeficientes parciales de seguridad para las acciones de 1,0. Del mismo modo, EN 1993-1-2 recomienda tomar el valor de 1,0 para el coeficiente parcial de seguridad del material $\gamma_{M,fi}$, en situación de incendio.

Las prestaciones requeridas a una estructura de acero inoxidable que pudiera estar sometida a la acción accidental de fuego son exactamente las mismas que las requeridas a una estructura de acero al carbono, y éstas son:

- En aquellos casos en los que se requiera capacidad portante en caso de incendio, la estructura deberá proyectarse de modo que mantenga su capacidad portante durante el tiempo característico de exposición al fuego.
- Se deberán considerar criterios de deformabilidad cuando los medios de protección frente a fuego o bien cuando los criterios de diseño para elementos separadores, requieran la consideración de la deformación de la estructura. De todos modos, no es necesario considerar la deformación de la estructura si la resistencia frente a fuego de los diferentes elementos separadores se basa en la curva estándar de fuego.

7.2 Propiedades mecánicas a temperaturas elevadas

En la Tabla 7.1 se presentan los factores de reducción de resistencia y rigidez, relativos al valor correspondiente a una temperatura de 20°C, para la curva tensión-deformación y el parámetro $g_{2,\theta}$, para grados de acero inoxidable, a temperaturas elevadas. Los diferentes factores se definen a continuación:

$k_{0,2\text{proof},\theta}$ es el valor de la resistencia del 0,2% a temperatura θ , relativo al valor de la resistencia del 0,2% a 20°C (límite elástico a 20°C), es decir, el factor de reducción $f_{0,2\text{proof},\theta}/f_y$

$g_{2,\theta}$ es un parámetro utilizado para calcular $f_{2,\theta}$, la tensión para una deformación total del 2% a una temperatura θ , empleando la siguiente expresión: $f_{2,\theta} = f_{0,2\text{proof},\theta} + g_{2,\theta}(f_{u,\theta} - f_{0,2\text{proof},\theta})$ (7.1)

$k_{u,\theta}$ es la resistencia última a temperatura θ , relativa a la resistencia última a 20°C, es decir, el factor de reducción $f_{u,\theta}/f_u$

$k_{E,\theta}$ es la pendiente de la rama lineal elástica a una temperatura θ , relativa a dicha pendiente a 20°C, es decir, el factor de reducción E_θ/E

donde:

E es el módulo de Young a 20°C (= 200 000 N/mm²)

f_y es el límite elástico característico del material a 20°C, tal y como se define en la Sección 3.2.4

f_u es la resistencia última a tracción característica a 20°C, tal y como se define en la Sección 3.2.4.

Para determinar la resistencia estructural frente a fuego de elementos de acero inoxidable, se utilizan las siguientes resistencias características:

Pilares	$f_{0,2\text{proof},\theta}$	(todas las Clases de sección)
Vigas arriostradas	$f_{2,\theta}$	(secciones Clase 1-3)
	$f_{0,2\text{proof},\theta}$	(secciones Clase 4)
Vigas no arriostradas	$f_{0,2\text{proof},\theta}$	(todas las Clases de sección)
Elementos traccionados	$f_{2,\theta}$	(todas las Clases de sección).

Para el caso de vigas arriostradas de Clase 1-3 y elementos traccionados, en aquellas situaciones que requieran la consideración del criterio de deformabilidad, se recomienda utilizar como base para todos los cálculos el valor de la tensión correspondiente a una deformación total del 1%, $f_{1,\theta}$, en lugar de $f_{2,\theta}$. El valor $f_{1,\theta}$ se obtendrá a partir de la siguiente expresión:

$$f_{1,\theta} = f_{0,2\text{proof},\theta} + 0,5g_{2,\theta}(f_{u,\theta} - f_{0,2\text{proof},\theta}) \quad (7.2)$$

Los valores de $f_{0,2\text{proof},\theta}$ se presentan relativos al valor del límite elástico a 20°C, mediante el factor $k_{0,2\text{proof},\theta}$, en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Factores de reducción del límite elástico, de la resistencia última, del módulo de Young y del parámetro $g_{2,\theta}$ a temperaturas elevadas

Temperatura θ (°C)	Factor de reducción $k_{0,2\text{proof},2}$	Parámetro $g_{2,\theta}$	Factor de reducción $k_{u,\theta}$	Factor de reducción $k_{E,\theta}$
Grado 1.4301				
20	1,00	0,26	1,00	1,00
100	0,82	0,24	0,87	0,96
200	0,68	0,19	0,77	0,92
300	0,64	0,19	0,73	0,88
400	0,60	0,19	0,72	0,84
500	0,54	0,19	0,67	0,80
600	0,49	0,22	0,58	0,76
700	0,40	0,26	0,43	0,71
800	0,27	0,35	0,27	0,63
900	0,14	0,38	0,15	0,45
1000	0,06	0,40	0,07	0,20
1100	0,03	0,40	0,03	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
Grado 1.4401				
20	1,00	0,24	1,00	1,00
100	0,88	0,24	0,93	0,96
200	0,76	0,24	0,87	0,92
300	0,71	0,24	0,84	0,88
400	0,66	0,21	0,83	0,84
500	0,63	0,20	0,79	0,80
600	0,61	0,19	0,72	0,76
700	0,51	0,24	0,55	0,71
800	0,40	0,35	0,34	0,63
900	0,19	0,38	0,18	0,45
1000	0,10	0,40	0,09	0,20
1100	0,055	0,40	0,04	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
Grado 1.4571				
20	1,00	0,25	1,00	1,00
100	0,89	0,25	0,88	0,96
200	0,83	0,25	0,81	0,92
300	0,77	0,24	0,80	0,88
400	0,72	0,22	0,80	0,84
500	0,69	0,21	0,77	0,80
600	0,66	0,21	0,71	0,76
700	0,59	0,25	0,57	0,71
800	0,50	0,35	0,38	0,63
900	0,28	0,38	0,22	0,45
1000	0,15	0,40	0,11	0,20
1100	0,075	0,40	0,055	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
Grado 1.4462				
20	1,00	0,35	1,00	1,00
100	0,91	0,35	0,93	0,96
200	0,80	0,32	0,85	0,92
300	0,75	0,30	0,83	0,88
400	0,72	0,28	0,82	0,84
500	0,65	0,30	0,71	0,80
600	0,56	0,33	0,57	0,76
700	0,37	0,40	0,38	0,71
800	0,26	0,41	0,29	0,63
900	0,10	0,45	0,12	0,45
1000	0,03	0,47	0,04	0,20
1100	0,015	0,47	0,02	0,10
1200	0,00	0,47	0,00	0,00

Tabla 7.1 (continuación) *Factores de reducción del límite elástico, de la resistencia última, del módulo de Young y del parámetro $g_{2,\theta}$ a temperaturas elevadas*

Temperatura θ (°C)	Factor de reducción $k_{0,2\text{proof},2}$	Parámetro $g_{2,\theta}$	Factor de reducción $k_{u,\theta}$	Factor de reducción $k_{E,\theta}$
Grade 1.4318				
20	1.00	0.25	1.00	1.00
100	0.78	0.25	0.74	0.96
200	0.65	0.25	0.73	0.92
300	0.57	0.25	0.64	0.88
400	0.51	0.25	0.60	0.84
500	0.48	0.25	0.55	0.80
600	0.46	0.27	0.52	0.76
700	0.40	0.27	0.40	0.71
800	0.27	0.26	0.26	0.63
Grade 1.4318 C850				
20	1.00	0.21	1.00	1.00
100	0.86	0.24	0.71	0.91
200	0.77	0.25	0.61	0.88
300	0.69	0.24	0.60	0.84
400	0.68	0.24	0.57	0.80
500	0.65	0.25	0.53	0.76
600	0.54	0.25	0.45	0.72
700	0.40	0.26	0.34	0.67
800	0.23	0.25	0.24	0.52
900	0.11	0.25	0.10	0.35
Grade 1.4571 C850				
20	1.00	0.36	1.00	1.00
100	0.96	0.36	0.94	0.96
200	0.95	0.36	0.88	0.92
300	0.92	0.36	0.84	0.88
400	0.89	0.36	0.82	0.84
500	0.83	0.36	0.79	0.80
600	0.81	0.36	0.72	0.76
700	0.60	0.37	0.53	0.71
800	0.35	0.39	0.38	0.63
900	0.10	0.40	0.20	0.45

7.3 Propiedades térmicas a temperaturas elevadas

7.3.1 Elongación térmica

La elongación térmica del acero inoxidable austenítico $\Delta l/l$ puede determinarse a partir de la expresión siguiente:

$$\Delta l/l = (16 + 4,79 \times 10^{-3} \theta_a - 1,243 \times 10^{-6} \theta_a^2) \times (\theta_a - 20) 10^{-6} \quad (7.3)$$

donde:

l es la longitud del elemento a 20°C

Δl es el valor de la dilatación por aumento de la temperatura

θ_a es la temperatura del acero [°C]

7.3.2 Calor específico

El calor específico del acero inoxidable c_a puede determinarse a partir de la siguiente expresión:

$$c_a = 450 + 0,280 \times \theta_a - 2,91 \times 10^{-4} \theta_a^2 + 1,34 \times 10^{-7} \theta_a^3 \text{ J/kgK} \quad (7.4)$$

donde:

θ_a es la temperatura del acero [$^{\circ}\text{C}$]

7.3.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica del acero inoxidable λ_a puede determinarse a partir de la siguiente expresión:

$$\lambda_a = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK} \quad (7.5)$$

donde:

θ_a es la temperatura del acero [$^{\circ}\text{C}$]

7.4 Determinación de la capacidad estructural frente a fuego

La resistencia frente a fuego de una estructura puede determinarse mediante uno o varios de los siguientes métodos:

- Método simplificado de cálculo aplicado a los elementos estructurales individuales
- Método avanzado de cálculo
- Ensayos.

El método simplificado de cálculo se basa en hipótesis conservadoras. Los métodos avanzados de cálculo son métodos de dimensionamiento en los que los principios ingenieriles se aplican, de manera realista, a problemáticas específicas. En aquellos casos en los que no se realice un método simplificado de cálculo será necesario utilizar métodos de dimensionamiento basados en modelos de cálculo avanzado o bien métodos basados en resultados de ensayos experimentales.

Los métodos avanzados de cálculo se tratan en los Comentarios a estas Recomendaciones (ver Presentación).

7.4.1 Clasificación de las secciones transversales

En dimensionamiento frente a fuego, se aplicará el método de clasificación de las secciones descrito en la Sección 4 de este documento utilizando las propiedades de dimensionamiento a 20°C .

7.4.2 Elementos sometidos a tracción

La resistencia de cálculo $N_{fi,\theta,Rd}$ de un elemento sometido a tracción a temperatura uniforme θ_a se determina a partir de la siguiente expresión:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] \quad (7.6)$$

donde:

$k_{2,\theta} = f_{2,\theta} / f_y$, es decir el factor de reducción a una tensión correspondiente a un 2% de deformación total a temperatura θ_a

N_{Rd} es la resistencia de cálculo a tracción de una sección, que se toma igual a $N_{pl,Rd}$ para una temperatura normal de cálculo, de acuerdo con lo indicado en la Sección 4.7.2.

γ_{M0} y $\gamma_{M,fi}$ son los coeficientes parciales, ver Tabla 2.1

En aquellos casos en los que la temperatura no es uniforme en el elemento, la resistencia de cálculo viene dada por la siguiente expresión:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{2,\theta,i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (7.7)$$

donde:

A_i es un área elemental de la sección transversal

θ_i es la temperatura en el área A_i

$k_{2,\theta,i}$ es el factor de reducción para una tensión correspondiente a un 2% de deformación total a una temperatura θ_i (ver Sección 7.2)

De modo alternativo, la resistencia de cálculo $N_{fi,t,Rd}$ a tiempo t de un elemento traccionado con distribución no uniforme de temperatura puede tomarse, de forma conservadora, igual a la resistencia de cálculo $N_{fi,\theta,Rd}$ de un elemento traccionado con una temperatura uniforme θ_a igual a la temperatura máxima $\theta_{a,max}$ alcanzada a dicho tiempo t .

7.4.3 Elementos sometidos a compresión

Las siguientes recomendaciones se aplican a elementos comprimidos con secciones de Clase 1, 2, 3 o 4 que sean:

- conformadas en frío, secciones abiertas (no soldadas), *p.e.* secciones en U o angulares, o bien
- secciones huecas conformadas en frío (soldadas o no), *p.e.* secciones huecas circulares o rectangulares

La resistencia a pandeo de cálculo $N_{b,fi,t,Rd}$ de un elemento comprimido a tiempo t sometido a una temperatura uniforme θ_a viene dada por las siguientes expresiones:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{para secciones de Clase 1, 2 o 3} \quad (7.8)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A_{eff} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (7.9)$$

donde:

$k_{0,2proof,\theta}$ es el factor de reducción de la resistencia del 0,2% a temperatura θ_a (ver Sección 7.2)

χ_{fi} es el coeficiente de reducción para pandeo por flexión considerando fuego, definido como:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad \text{siendo } \chi_{fi} \leq 1 \quad (7.10)$$

$$\text{donde: } \varphi_{\theta} = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right) \quad (7.11)$$

en donde α y $\bar{\lambda}_0$ son los coeficientes a temperatura ambiente de la Tabla 5.1.

La esbeltez adimensional modificada $\bar{\lambda}_\theta$ a temperatura θ viene dada por la siguiente expresión:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{0,2\text{proof},\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{para todas las Clases de sección} \quad (7.12)$$

donde:

$k_{E,\theta}$ es el factor de reducción para la pendiente de la rama lineal elástica a una temperatura θ_a (ver Sección 7.2)

En aquellos casos en los que la temperatura no sea uniforme en el elemento, la resistencia de cálculo a compresión puede estimarse, de manera conservadora, adoptando una temperatura uniforme cuyo valor es igual al valor de la temperatura máxima en el elemento.

La longitud de pandeo l_{fi} de un pilar sometido a la acción del fuego deberá determinarse del mismo modo que se determina en situación de temperatura normal. Sin embargo, en un pórtico arriostrado intraslacional, la longitud de pandeo l_{fi} puede determinarse considerando el elemento comprimido empotrado en los extremos correspondientes a otro sector de incendio. Esta hipótesis puede hacerse sólo en el caso que la resistencia frente a fuego de los elementos constructivos que separan estos sectores de incendio no sea menor que la resistencia frente a fuego de los pilares en cuestión.

En el caso de un pórtico arriostrado intraslacional en el que cada planta comprende un sector de incendio con suficiente resistencia frente a fuego, la longitud de pandeo de un pilar en una planta intermedia puede ser igual a $l_{fi} = 0,5L$, mientras que en la última planta, la longitud de pandeo será igual a $l_{fi} = 0,7L$, donde L es la longitud del sistema en la planta de estudio, ver Figura 7.1

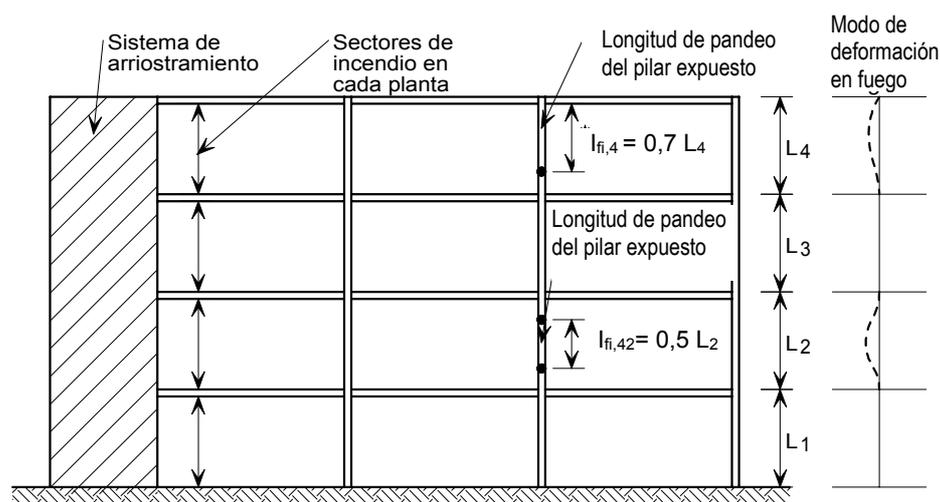


Figura 7.1 Longitudes de pandeo l_{fi} de pilares en pórticos arriostrados intraslacionales

7.4.4 Vigas arriostradas lateralmente

La resistencia de cálculo a flexión $M_{fi,\theta,Rd}$ de una sección transversal sometida a una temperatura uniforme θ_a se determinará a partir de las siguientes expresiones:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad \text{para secciones de Clase 1, 2 o 3} \quad (7.13)$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{0,2proof,\theta} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (7.14)$$

donde:

M_{Rd} es el momento resistente plástico de la sección bruta $M_{pl,Rd}$ (en secciones transversales de Clase 1 o 2), el momento resistente elástico de la sección bruta $M_{el,Rd}$ (en secciones transversales de Clase 3) o el momento resistente elástico eficaz de la sección transversal eficaz $M_{eff,Rd}$ (en secciones transversales de Clase 4) para el dimensionamiento a temperatura normal

$k_{2,\theta}$ y $k_{0,2proof,\theta}$ están definidos ya en la Sección 7.4.3.

Cuando sea necesario considerar los efectos del cortante, deberá utilizarse la resistencia a flexión reducida para una temperatura de cálculo normal, de acuerdo con la Sección 4.7.6.

La resistencia de cálculo a flexión $M_{fi,t,Rd}$ a tiempo t de una sección transversal perteneciente a un elemento estructural con distribución no uniforme de temperatura puede determinarse, de modo conservador, a partir de la siguiente expresión:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / \kappa_1 \kappa_2 \quad (7.15)$$

donde:

$M_{fi,\theta,Rd}$ es la resistencia de cálculo a flexión de la sección transversal (o de la sección eficaz para secciones de Clase 4) a una temperatura uniforme θ_a de valor igual a la temperatura máxima en la sección transversal

κ_1 es un factor de adaptación para distribuciones no uniformes de temperatura a través de la sección transversal, ver Tabla 7.2

κ_2 es un factor de adaptación para distribuciones no uniformes de temperatura a lo largo del elemento estructural, ver Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Factores de adaptación

Tipo de exposición	κ_1
para una viga expuesta a fuego en sus cuatro caras	1,0
para una viga no protegida expuesta a fuego en tres caras, con una losa de hormigón o mixta en su cuarta cara	0,70
para una viga protegida expuesta a fuego en tres caras, con una losa de hormigón o mixta en su cuarta cara	0,85
	κ_2
en secciones de apoyos de vigas continuas	0,85
en el resto de casos	1,0

La resistencia de cálculo a cortante $V_{fi,t,Rd}$ a tiempo t de una sección transversal con una distribución no uniforme de temperatura se determinará a partir de las siguientes expresiones:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{2,\theta,web} V_{Rd} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] \quad \text{para secciones de Clase 1, 2 o 3} \quad (7.16)$$

$$V_{fi,t,Rd} = k_{0,2proof,\theta,web} V_{Rd} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (7.17)$$

donde:

V_{Rd} es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal bruta a temperatura normal de acuerdo con la Sección 4.7.5 (para temperaturas por encima de 400°C, η debe tomarse como 1,0).

θ_{web} es la temperatura en el alma de la sección transversal

7.4.5 Vigas no arriostradas lateralmente

La resistencia de cálculo frente a pandeo lateral $M_{b,fi,t,Rd}$ a tiempo t de una viga no arriostrada lateralmente se determinará a partir de las siguientes expresiones:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{para secciones de Clase 1 y 2} \quad (7.18)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{para secciones de Clase 3} \quad (7.19)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{para secciones de Clase 4} \quad (7.20)$$

donde:

$\chi_{LT,fi}$ es el coeficiente de reducción para pandeo lateral en estructuras sometidas a fuego, que viene dado por la siguiente expresión:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT,\theta} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad \text{siendo } \chi_{LT,fi} \leq 1 \quad (7.21)$$

$$\text{y } \varphi_{LT,\theta} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right) \quad (7.22)$$

en donde α_{LT} es el factor de imperfección a temperatura ambiente definido en la Sección 5.4.2.

$k_{0,2proof,\theta}$ es el factor de reducción definido en la Sección 7.4.3 correspondiente a la máxima temperatura θ alcanzada en cualquier punto de la sección.

La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ a temperatura θ viene dada por la siguiente expresión

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[\frac{k_{0,2proof,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{para todas las Clases de sección} \quad (7.23)$$

donde

$k_{E,\theta}$ es el factor de reducción definido en la Sección 7.4.3 a temperatura θ

7.4.6 Elementos sometidos a compresión y flexión

Con el fin de evitar el posible pandeo por flexión alrededor del eje fuerte y del eje débil y el pandeo lateral, ocasionado por el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de los momentos flectores, deberán llevarse a cabo las siguientes comprobaciones:

a) Para secciones de Clase 1, 2 o 3

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.24)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min 1,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.25)$$

donde:

$N_{fi,Ed}$, $M_{y,fi,Ed}$ y $M_{z,fi,Ed}$ son el esfuerzo axial y los momentos flectores de cálculo para la situación de fuego

$M_{y,fi,\theta,Rd}$ y $M_{z,fi,\theta,Rd}$ están definidos en la Sección 7.4.4

$k_{0,2proof,\theta}$ es el factor de reducción a temperatura θ , definido en la Sección 7.4.3

$\chi_{\min,fi}$ es el menor de los coeficientes de reducción para el pandeo por flexión, pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión a temperatura θ , definidos en la Sección 7.4.3

$\chi_{\min 1,fi}$ es el menor de los coeficientes de reducción para el pandeo por flexión alrededor del eje z, pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión a temperatura θ , definidos en la Sección 7.4.3

$\chi_{LT,fi}$ es el coeficiente de reducción para el pandeo lateral a temperatura θ , definido en la Sección 7.4.5.

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (7.26)$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (7.27)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (7.28)$$

$$\mu_y = (1,2 \beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8 \quad (7.29)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (7.30)$$

$$\mu_z = (2 \beta_{M,z} - 5) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44 \beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \quad \text{y} \quad \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1 \quad (7.31)$$

β_M es el coeficiente del momento uniforme equivalente, que viene dado en la Tabla 7.3.

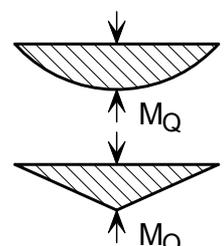
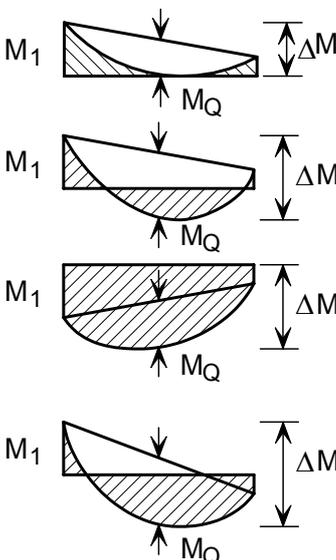
b) Para secciones de Clase 4:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} A_{eff} k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.32)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min 1,fi} A_{\text{eff}} k_{0,2\text{proof},\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.33)$$

donde todos los términos están definidos en el punto (a) anterior, exceptuando el hecho de que para el cálculo de los factores k_y , k_z y k_{LT} , el área A deberá replazarse por A_{eff} .

Tabla 7.3 Coeficientes del momento uniforme equivalente β_M

Ley de momentos flectores	Coefficiente del momento uniforme equivalente β_M
Momentos en extremos  $-1 \leq \psi \leq 1$	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
Momentos debidos a cargas transversales 	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
Momentos debidos a cargas transversales y momentos en los extremos 	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ $M_Q = \text{máx. } M \text{ debido únicamente a cargas transversales}$ Para leyes de momentos sin cambio de signo: $\Delta M = \text{máx. } M $ Para leyes de momentos con cambio de signo: $\Delta M = \text{máx. } M + \text{mín. } M $

7.4.7 Cálculo del incremento de temperatura en acero inoxidable

El método para calcular el incremento de temperatura en acero al carbono puede aplicarse también al acero inoxidable.

El incremento de temperatura de una sección transversal de un elemento estructural no protegido de acero inoxidable calentado uniformemente durante un intervalo de tiempo t viene dado por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (7.34)$$

donde:

c_a es el calor específico del acero inoxidable, (J/kgK), definido en la Sección 7.3.2

ρ_a es la densidad del acero inoxidable (kg/m^3), que viene especificada en la Tabla 3.6 (normalmente se considera independiente de la temperatura)

A_m/V es el factor de forma de la sección para elementos no protegidos de acero

A_m es el área de la superficie del elemento por unidad de longitud

V es el volumen del elemento por unidad de longitud

$\dot{h}_{net,d}$ es el valor de cálculo del flujo neto de calor por unidad de área

$$= \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (7.35)$$

en donde :

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (7.36)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \varepsilon_{res} 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (7.37)$$

α_c es el coeficiente de transmisión de calor por convección (se suele adoptar un valor de $25 \text{W/m}^2\text{K}$)

θ_g es la temperatura del gas del ambiente de un elemento expuesto a fuego ($^{\circ}\text{C}$), dada por la curva nominal de temperatura-tiempo

θ_a es la temperatura de la sección transversal de acero ($^{\circ}\text{C}$), que se supone uniforme para un instante de tiempo t

ϕ es el factor de configuración

ε_{res} es la emisividad resultante

El parámetro ε_{res} representa la radiación transmitida entre el fuego y la superficie de acero inoxidable y su magnitud depende del grado de exposición directa al fuego del elemento. Aquellos elementos que estén parcialmente protegidos de los efectos de la radiación de calor presentarán un valor menor de ε_{res} . Para acero inoxidable, puede tomarse un valor de ε_{res} igual a 0,2.

Si se conoce la variación de la temperatura de incendio con el tiempo, la ecuación anterior para el incremento de temperatura puede utilizarse para determinar la temperatura del acero mediante integración numérica. La curva nominal de temperatura-tiempo para el incendio estándar viene dada en EN 1991-1-2 como:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (7.38)$$

donde

t es el tiempo transcurrido desde el inicio del incendio expresado en minutos

8 FATIGA

La fatiga del metal deberá considerarse en aquellas estructuras o partes de estructuras sometidas a ciclos tensionales de valor significativo. Normalmente no es necesaria la consideración de la fatiga en el dimensionamiento de estructuras de edificación, excepto en aquellos elementos estructurales que soporten mecanismos de elevación, cargas móviles de rodadura o máquinas vibratorias, y en elementos estructurales sometidos a oscilaciones producidas por la acción del viento.

Al igual que sucede en las estructuras de acero al carbono, las zonas próximas a las soldaduras, debido a la existencia combinada de concentraciones de tensión y de defectos de ejecución, son las zonas más sensibles a los efectos de la fatiga. Las recomendaciones para la determinación de la resistencia a la fatiga de estructuras de acero al carbono son aplicables también al acero inoxidable (ver EN 1993-1-9).

Adoptar buenos criterios prácticos de diseño y construcción reduce la susceptibilidad de una estructura frente a fatiga. Ello implica una selección juiciosa del esquema estructural global y una elección cuidadosa de los detalles constructivos para que éstos presenten un buen comportamiento frente a la fatiga. La clave para obtener un diseño resistente a fatiga reside en la consideración de los aspectos relacionados con este fenómeno desde el comienzo de la fase de proyecto. La valoración del comportamiento a fatiga llevada a cabo solamente después de haber satisfecho otros criterios de proyecto conduce a un diseño estructural inadecuado, o por lo menos, no económico. Las necesidades del fabricante y del montador son también un aspecto importante a considerar. Es por ello que se recomienda consultar con éstos desde el inicio para señalar las zonas de la estructura que serán más sensibles a la fisuración por fatiga, establecer medidas de precaución especiales y finalmente, estar atentos a posibles problemas de fabricación y montaje. En particular, el empleo de agujeros o accesorios de elevación para facilitar la fabricación o el montaje deberían considerarse en la evaluación de la fatiga.

Es posible eliminar los potenciales problemas de fatiga prestando la debida atención a los detalles constructivos y evitando:

- cambios bruscos de sección transversal y concentraciones de tensiones en general
- desalineaciones y excentricidades
- pequeñas discontinuidades tales como rayas y marcas de lijado o amolado
- soldaduras innecesarias de accesorios secundarios, p.e. orejetas para el izado
- soldaduras de penetración parcial, soldaduras en ángulo, soldadura discontinua y placas de respaldo.
- arco errático.

A pesar de que las técnicas de mejora de soldadura, tales como el control del perfil de soldadura, el amolado del reborde de la soldadura y el chorreo con granalla y martillado, pueden aumentar la resistencia a la fatiga de una unión, no existen datos

suficientes como para poder cuantificar los posibles beneficios para el acero inoxidable estructural. Debe señalarse que estas técnicas conllevan un trabajo laborioso y requieren de la habilidad y la experiencia del operario para alcanzar el máximo beneficio. Excepto para casos especiales, tales técnicas no deberían entenderse como medidas a considerar en el dimensionamiento frente a fatiga.

9 ENSAYOS

9.1 Aspectos generales

Existen diversas razones por las cuales puede ser necesario el ensayo de materiales y elementos de acero inoxidable:

- si el dimensionamiento se va a basar en datos reales del material (ver Sección 3.2.4).
- si quiere aprovecharse el aumento de resistencia en las esquinas de los perfiles conformados en frío (ver Secciones 3.2.2 y 4.7.1).
- si la geometría del elemento es tal que se encuentra fuera de los límites de aplicación (tales como los dados en la Sección 4.2).
- si un número determinado de estructuras o componentes estructurales va a basarse en ensayos de prototipo
- si es necesaria la confirmación de la consistencia de la producción.

Las precauciones habituales y requisitos para los procedimientos de ensayos y evaluación de resultados relativos a los ensayos de acero al carbono son también aplicables a los ensayos de acero inoxidable. Por lo tanto, generalmente se recomienda que dichos requisitos sean consultados, p.e. véase la Sección 5.2 y el Anejo D de EN 1990 y la Sección 9 y el Anejo A de EN 1993-1-3. De todos modos, hay aspectos particulares del comportamiento de los aceros inoxidables que necesitan ser analizados con mayor profundidad que la que se requeriría para el caso del acero al carbono. A continuación se dan algunas pautas.

9.2 Determinación de la curva tensión-deformación

La Norma Europea aplicable para el ensayo de materiales es BS EN 10002-1 *Tensile testing of metallic materials. Method of test at ambient temperature*. Esta norma no da todos los detalles de las probetas a ensayar, aunque los esquemas sugieren que los extremos estarían amordazados. Sin embargo, se recomienda que la carga se introduzca mediante elementos pasadores a través de los extremos de la probeta, los cuales tendrán un área suficiente para resistir el esfuerzo cortante. De este modo se asegura que la probeta esté cargada axialmente, obteniéndose así la forma real de la curva tensión-deformación sin que ésta esté falseada por ningún efecto causado por la plastificación prematura debida a la excentricidad de la carga. La introducción axial de la carga en la probeta puede confirmarse mediante ensayos elásticos con un extensómetro dispuesto según varias orientaciones sobre la probeta.

Se tendrán en cuenta los efectos de la velocidad de deformación, ver Sección 3.2.2.

9.3 Ensayos de elementos estructurales

Se recomienda que los ensayos sobre elementos estructurales sean a escala real o bien a una escala lo más próxima posible a ésta, dependiendo de las posibilidades del ensayo, y que las probetas deberían ser fabricadas siguiendo los mismos procesos de fabricación que se emplearán para la estructura final. Si los diferentes componentes se sueldan, el prototipo debería soldarse del mismo modo.

Dado que el acero inoxidable puede presentar anisotropía, se recomienda que las probetas sean extraídas de la placa o lámina en la misma dirección (es decir, transversal o paralela a la dirección de laminado) con la que se vaya a utilizar para la estructura final. Si se desconoce la orientación final o bien no puede garantizarse, puede ser necesario realizar ensayos para ambas direcciones y tomar el conjunto menos favorable de resultados.

El acero inoxidable muestra una mayor ductilidad y mayor endurecimiento por deformación que el acero al carbono. Debido a ello, puede ser necesaria una mayor capacidad de los dispositivos de ensayo en el caso del acero inoxidable de la que se requeriría para un acero al carbono con un límite elástico equivalente. Esto no sólo hace referencia a la capacidad de carga del sistema, sino también a la capacidad de éste de permitir mayores deformaciones.

Debe señalarse que a mayores cargas aplicadas, los efectos de la fluencia se ponen más de manifiesto y ello puede suponer que las lecturas de deformación o desplazamiento no se estabilicen en un tiempo razonable.

Para materiales endurecidos, deberían determinarse las resistencias a tracción y compresión en la dirección en cuestión. La evaluación de los resultados de los ensayos deberá llevarse a cabo tomando como referencia la resistencia que sea pertinente.

10 ASPECTOS DE FABRICACIÓN

10.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es remarcar los aspectos más relevantes de la fabricación del acero inoxidable para el ingeniero proyectista, incluyendo recomendaciones de buena práctica. También permite una valoración preliminar acerca de la idoneidad de un fabricante para la realización del trabajo.

El acero inoxidable no es un material difícil con el que trabajar. De todos modos, en algunos aspectos es un material diferente del acero al carbono y debe tratarse, en consecuencia, de acuerdo con sus propias características. Muchos de los procesos de fabricación y unión son similares a los del acero al carbono, pero las diferentes características del acero inoxidable requieren una especial atención en algunas áreas de aplicación. Es muy importante que ya desde el inicio del proyecto se establezca una comunicación eficaz entre el proyectista y el fabricante con tal de asegurar que se puedan plantear, y que de hecho se adopten, las prácticas y procesos de fabricación adecuados.

El objetivo predominante es mantener la resistencia a corrosión del material. Es esencial tomar precauciones en todas las etapas de almacenamiento, manipulación y conformado para minimizar los efectos que puedan poner en peligro la formación de la capa pasivante. Debe tenerse especial cuidado para restablecer toda la resistencia a la corrosión en las zonas de soldadura. Aunque esenciales, las precauciones son simples y, en general, se trata de cuestiones de buena práctica ingenieril.

Es importante preservar la buena apariencia superficial del acero inoxidable durante la fabricación. Los defectos superficiales no son sólo antiestéticos, sino que normalmente son inaceptables y su corrección requiere mucho tiempo y un elevado coste económico. Mientras que en estructuras de acero al carbono los defectos superficiales se ocultan normalmente mediante pintura, en acero inoxidable esta práctica no es común.

La forma estructural puede venir condicionada por la disponibilidad de materiales. Debe reconocerse que la gama de perfiles laminados en caliente disponibles en acero inoxidable es más limitada que para el acero al carbono. Este hecho conduce a un mayor uso de elementos conformados en frío y soldados de lo habitual. Además, a causa de la limitación de longitud de las prensas, sólo se fabrican piezas de longitudes relativamente cortas, que conducen a un mayor número de empalmes. En el detalle de uniones, se debe prestar atención a los espacios para tornillos cerca de la zona de doblado y a los problemas potenciales derivados de la distorsión por soldadura.

La guía sobre fabricación y montaje está de acuerdo con ENV 1090-6 *Execution of steel structures. Supplementary rules for stainless steel*. Esta norma se está actualmente convirtiendo en EN 1090 *Execution of steel structures and aluminium structures*. EN 1090-1 dará reglas sobre el marcado CE en estructuras de acero. EN 1090-2 incluirá las clases de ejecución, dependientes del tipo de estructura de acero. Los requisitos de fabricación y montaje se corresponderán con las diferentes clases de ejecución. Se espera que EN 1090-2 se envíe para voto final a principios de 2007.

La norma a aplicar para soldadura de aceros inoxidable es la EN 1011-3 *Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Arc welding of stainless steels.*

10.2 Almacenamiento y manipulación

Generalmente se requiere un mayor cuidado para el almacenamiento y manipulación del acero inoxidable que para el acero al carbono, con el objetivo de evitar dañar el acabado superficial (especialmente para el caso de acabados brillantes o pulidos) y evitar también la contaminación por acero al carbono y hierro. Los procedimientos de almacenamiento y manipulación deben acordarse por adelantado entre las partes implicadas en el contrato de cualquier fabricación y con suficiente detalle para poder incorporar cualquier requisito especial. Por ejemplo, los procedimientos deberían considerar los siguientes aspectos:

- El acero debe ser inspeccionado inmediatamente después de su entrega, con relación a cualquier daño en su superficie.
- El acero puede estar protegido por un plástico o por cualquier otro tipo de revestimiento. Debe mantenerse el mayor tiempo posible, quitándolo justo antes del montaje final. El recubrimiento o capa de protección debe ser solicitado en el documento de adquisición en caso que fuera necesario (p.e. para acabados brillantes).
- Debe evitarse el almacenamiento del acero inoxidable en ambientes húmedos con un elevado contenido en sales. Los estantes de almacenamiento no deben tener superficies de fricción de acero al carbono y por lo tanto, deben estar recubiertos por listones o forros de madera, goma o bien plástico. Las láminas y las chapas deberán almacenarse preferiblemente en posición vertical; si son apiladas horizontalmente, pueden pisarse con el riesgo de que se contaminen por hierro o de que su superficie se dañe.
- Deben evitarse los aparejos de elevación y transporte de acero al carbono, p.e. cadenas, ganchos y mordazas. De nuevo, el empleo de materiales aislantes o de ventosas prevendrá la contaminación por hierro. Las palas de las carretillas de elevación también deben protegerse.
- Debe evitarse el contacto del acero con productos químicos que incluyan cantidades excesivas de aceites y grasas; tales productos pueden manchar algunos acabados.
- Es sumamente adecuado disponer zonas de fabricación separadas para el acero al carbono y el acero inoxidable. Solamente deben utilizarse herramientas destinadas al acero inoxidable (en particular ruedas para esmerilado y amoldadura y cepillos de alambre). Hay que tener en cuenta que los cepillos de alambre y la lana de alambre deben ser de acero inoxidable y, en general, de grado equivalente en términos de resistencia a la corrosión (p.e. no deben emplearse cepillos de acero inoxidable ferrítico sobre aceros inoxidables austeníticos).
- Como medida preventiva durante la fabricación y montaje, debe asegurarse la eliminación de todas las rebabas formadas durante las operaciones de corte.
- Debe considerarse cualquier tipo de requisito necesario para proteger el producto final acabado durante el transporte.

10.3 Operaciones de conformado

Los aceros inoxidable austeníticos endurecen de manera significativa durante el trabajado en frío. Ello puede ser, por una parte, una propiedad útil, permitiendo un endurecimiento durante el estirado sin riesgo de una factura prematura y, por otra parte, una desventaja, especialmente durante la manipulación con máquina cuando se requiere especial atención para el control del proceso. La velocidad de endurecimiento es diferente para cada grado de acero, por ejemplo, el grado 1.4318 endurece a una velocidad mayor que otros grados empleados en aplicaciones de construcción.

10.3.1 Corte

El acero inoxidable es un material relativamente caro comparado con otros metales; por ello, es preciso marcar con cuidado las láminas y chapas para evitar el desperdicio de material en el corte. Hay que tener en cuenta que el desperdicio de material puede ser mayor si éste tiene un acabado pulido (o un diseño unidireccional) el cual tiene que mantenerse en la fabricación. Algunos lápices o tizas de marcado pueden resultar difíciles de eliminar si se usan directamente sobre la superficie, pudiendo dejar manchas (a no ser que se emplee una película protectora); deben hacerse las comprobaciones pertinentes para verificar que los marcadores sean adecuados.

El acero inoxidable puede cortarse utilizando los métodos habituales, p.e. corte y aserrado, pero la capacidad requerida será mayor que la necesaria para cortar un espesor similar de acero al carbono debido al endurecimiento por deformación del material. Si es posible, el corte (y acabado a máquina, en general) debe llevarse a cabo cuando el material se encuentra en estado recocido con el fin de limitar la influencia del endurecimiento por deformación y de dañar las herramientas.

Para el corte en línea recta se utiliza ampliamente la guillotina. Utilizando guillotinas con los extremos abiertos puede alcanzarse una longitud de corte continuo mayor que utilizando cuchillas de corte, aunque existe el riesgo de introducir pequeñas huellas en la superficie de corte.

Las técnicas de arco por plasma también se emplean, y son especialmente útiles para el corte de chapas gruesas y perfiles y en donde los bordes de corte van a ser mecanizados, p.e. para la preparación para la soldadura. El corte con oxiacetileno no es adecuado para el acero inoxidable, a no ser que se emplee una técnica de protección con flux en polvo.

10.3.2 Conformado en frío

Las técnicas habituales de conformado en frío del acero inoxidable son el doblado, torneado, prensado y estirado. Para aplicaciones estructurales el doblado en plegadora es la técnica más relevante aunque, para un volumen alto de productos de poco espesor, el conformado con rodillo puede resultar más económico.

De nuevo, la capacidad necesaria para el doblado del acero inoxidable es mayor que para el acero al carbono debido al endurecimiento por deformación (alrededor de un 50% en el caso de aceros inoxidable austeníticos o más en el caso de aceros dúplex). Además, el acero inoxidable tiene que ser doblado a un grado ligeramente mayor que el acero al carbono para contrarrestar los efectos de la recuperación elástica. Para secciones transversales complejas resulta beneficioso implicar al fabricante en el proyecto tan pronto como sea posible.

La alta ductilidad de los aceros inoxidable permite conformar piezas con pequeños radios, que pueden llegar a ser hasta del orden de la mitad del espesor en materiales

recocidos. En general se recomienda adoptar los siguientes valores mínimos para el radio interno:

$2t$ para los grados austeníticos

$2,5t$ para los grados dúplex

donde t es el espesor del material.

Para el doblado de tubos se recomienda:

- la relación entre el diámetro exterior y el espesor no debe ser mayor que 15 (para evitar el empleo de equipos especiales).
- el radio de curvatura (a la línea central del tubo) no debe ser menor que $2,5d$, siendo d el diámetro exterior .
- cualquier soldadura debe situarse próxima al eje neutro para reducir así las tensiones de flexión en ésta.

10.3.3 Agujeros

Los agujeros pueden ser taladrados o punzonados. En el taladrado, debe mantenerse un corte positivo para evitar el endurecimiento local y por ello se requiere brocas afiladas con los ángulos correctos de inclinación y las velocidades de corte adecuadas. No se recomienda el uso de un punzón con la punta central redondeada puesto que produce el endurecimiento de la superficie. Debe emplearse un taladro central o bien, si se va a emplear un punzón central, éste deberá ser de punta triangular. Los agujeros punzonados pueden hacerse en aceros inoxidable austeníticos hasta un espesor de 20 mm; la mayor resistencia de los grados dúplex conduce a un valor menor de este espesor límite. El diámetro mínimo de un agujero por punzonado es 2 mm mayor que el espesor de la chapa. Los agujeros punzonados deben evitarse en ambientes corrosivos debido a la aparición de endurecimiento en los bordes.

10.4 Soldadura

10.4.1 Introducción

La soldadura de aceros inoxidable austeníticos y dúplex se realiza ampliamente y con éxito, empleando los procedimientos habituales, siempre que se empleen los consumibles adecuados. La limpieza general y la ausencia de contaminación son muy importantes para conseguir una buena calidad de soldadura. Los aceites o otros hidrocarburos y los marcadores de cera deben eliminarse para evitar su descomposición y el riesgo de captación de carbono. La soldadura no debe contener zinc, incluyendo el procedente de productos galvanizados, ni cobre ni ninguna de sus aleaciones (hay que tener especial cuidado cuando se empleen placas de respaldo de cobre; debería hacerse una ranura en la placa, inmediatamente adyacente a la zona de fusión).

Reducir los puntos donde se pueda iniciar la corrosión en hendiduras (ver Sección 3.7.2) es mucho más importante en acero inoxidable que en acero al carbono. Los defectos en la soldadura tales como mordeduras, falta de penetración, salpicaduras de soldadura, escorias y dispersión de arco eléctrico son todos puntos potenciales de inicio de corrosión en hendiduras, por lo que deben minimizarse. La dispersión de arco eléctrico o la formación de arco en operaciones sin conexión a tierra también dañan la capa pasivante, y posiblemente aumentan la probabilidad de corrosión preferencial, arruinando entonces la apariencia del producto fabricado.

En aquellas zonas en donde la apariencia de la soldadura sea importante, el ingeniero deberá especificar el perfil de soldadura y la condición de superficie requeridos. Estos aspectos pueden influir en la elección del proceso de soldadura o en el tratamiento a aplicar posteriormente. Además, debe tenerse en cuenta la situación de la soldadura para ver si es posible aplicar el tratamiento post soldadura apropiado.

La aportación de calor y la temperatura entre pasadas deben controlarse para minimizar la distorsión (ver Sección 10.4.4) y evitar posibles problemas metalúrgicos (ver Sección 10.4.5).

La soldadura debe realizarse de acuerdo con un procedimiento de soldadura establecido en alguna normativa tal como la EN ISO 15609-1 *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure specification. Arc welding*. Los soldadores deben ser aprobados de acuerdo con la EN 287-1 *Qualification test of welders. Fusion welding. Steels*. Los procedimientos de soldadura deben contener los siguientes puntos:

- verificación del método de soldadura detallando lo que se obtiene de dicho método y ensayos del procedimiento de soldadura
- la cualificación de los soldadores
- el control de las operaciones de soldadura durante la preparación, la soldadura en sí y el tratamiento posterior
- el nivel de inspección y las técnicas de ensayos no destructivos a aplicar
- los criterios de aceptación para el nivel permitido de defectos de soldadura.

Siempre que se sigan los procedimientos adecuados, no deben surgir problemas en la soldadura. De todos modos, el ingeniero debe estar alerta ante el hecho que la distorsión debida a la soldadura es generalmente mayor en acero inoxidable que en acero al carbono, ver Sección 10.4.4.

El bloqueo de la tuerca respecto al tornillo mediante soldadura no se permite, puesto que los materiales son formulados a través de su resistencia en general y no a través de su soldadura por fusión.

10.4.2 Procedimientos

Tal como se ha mencionado anteriormente, para el acero inoxidable pueden emplearse los métodos de soldadura por fusión habituales. La Tabla 10.1 muestra la idoneidad de los diferentes procedimientos en función del rango de espesor, etc. En soldaduras MIG o TIG el gas protector no debe contener dióxido de carbono puesto que existe la posibilidad de que se descomponga y, como consecuencia, exista una captación de carbono. En el caso de aceros inoxidables dúplex debe evitarse también la presencia de nitrógeno.

Tabla 10.1 *Procedimientos de soldadura y su idoneidad*

Procedimiento de soldadura (EN ISO 4063)	Formas adecuadas de los productos	Tipos de unión soldada	Rango de espesor del material (mm)	Posición de la soldadura	Condiciones adecuadas de situación
111 Soldadura por arco con electrodo metálico revestido (soldadura por arco manual)	Todas excepto láminas	Todos	3 mm ⁽¹⁾ o mayor	Todas	Todas
131 Soldadura por arco en atmósfera inerte con varilla metálica (soldadura MIG)	Todas	Todos	2 mm ⁽¹⁾ o mayor	Todas	Todas ⁽²⁾
141 Soldadura por arco en atmósfera inerte con electrodo de tungsteno (soldadura TIG)	Todas	Todos	Hasta un max. de 10 mm	Todas	Todas ⁽²⁾
121/122 Soldadura por arco sumergido	Todas excepto láminas	Todos	3 mm ⁽¹⁾ o mayor	Sólo posiciones horizontales	Todas
2 Soldadura por resistencia	Sólo láminas	Todos	3 mm max. aprox.	Todas	Todas

Notas:

1) Depende del tipo de unión soldada empleada

2) Más sensible a las condiciones climatológicas que otros procesos; se requiere una mejor protección ambiental

10.4.3 Consumibles

Los consumibles comerciales han sido formulados para ofrecer una soldadura con una resistencia y resistencia a la corrosión equivalentes a las del metal base y minimizar, de este modo, el riesgo de fisuración al solidificar. Para aplicaciones especiales, como puede ser un ambiente inusualmente agresivo o donde se requieran propiedades no magnéticas, debe solicitarse el asesoramiento técnico de los productores de acero y de los fabricantes de consumibles. Todos los consumibles deben mantenerse libres de contaminantes y deben almacenarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Todos los consumibles de soldadura deben cumplir los requisitos establecidos en ENV 1090 (que será sustituida por EN 1090-2). Es importante remarcar que todos los consumibles deben mantenerse libres de contaminantes y deben ser almacenados de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

10.4.4 Distorsión por soldadura

Tal y como sucede en otros metales, el acero inoxidable se ve afectado por la distorsión inducida por la soldadura. Los diferentes tipos de distorsión (angular, curvatura, retracción, etc.) son de naturaleza muy similar a los que se dan en estructuras de acero al carbono. Sin embargo, la distorsión en estructuras de acero inoxidable, y en particular para los grados austeníticos, es mayor que en las estructuras de acero al carbono debido a los más altos coeficientes de dilatación térmica y a las más bajas conductividades térmicas, que conducen a mayores gradientes de temperatura, ver Sección 3.3.

La distorsión debida a la soldadura no puede eliminarse, sólo controlarse. El proyectista y el fabricante pueden realizar las siguientes actuaciones:

Actuaciones del proyectista

- Eliminar la necesidad de soldar.
- Reducir la extensión de soldadura.
- Reducir el área de la soldadura. Por ejemplo en secciones gruesas, especificar preparaciones en doble V, U o doble U, frente a preparaciones en V simple.
- Proyectar uniones simétricas.
- Proyectar para que puedan ser acomodadas mayores tolerancias dimensionales.

Actuaciones del fabricante

- Utilizar plantillas de sujeción eficaces. Si fuera posible, la plantilla debería incorporar barras de cobre o aluminio para ayudar a conducir el calor fuera del área de soldadura.
- Cuando no sea posible soldar con plantillas de fijación de un modo eficaz, deberán emplearse puntos de soldadura cercanos dispuestos en una secuencia equilibrada.
- Asegurar, antes de soldar, que existe un buen ajuste y alineación entre las piezas a unir.
- Emplear la aportación mínima de calor asociado al procedimiento de soldadura elegido.
- Llevar a cabo un procedimiento de soldadura equilibrado, y con las secuencias apropiadas (p.e. retroceso y secuencias en bloque).

10.4.5 Consideraciones metalúrgicas

Resulta imposible tratar en este manual todos los aspectos relacionados con la metalurgia del acero inoxidable, por lo que se presentan aquí los factores más significativos.

Formación de precipitados en los grados austeníticos

En los aceros inoxidables austeníticos, la zona afectada por el calor es relativamente tolerante al crecimiento de grano y a la precipitación de fases frágiles e intermetálicas. Normalmente, los procedimientos de soldadura están diseñados para controlar el tiempo invertido en el rango de la temperatura crítica para los efectos de precipitación (450-900°C). Una excesiva reparación de la soldadura aumenta, naturalmente, el tiempo invertido, y por lo tanto se restringe el proceso a tres reparaciones principales.

La formación de precipitados de carburo de cromo y la consiguiente pérdida de resistencia frente a la corrosión es analizada en la Sección 3.7.2 *Corrosión Intergranular*, donde se subraya que ésta no es una problemática común en los grados de acero inoxidable austeníticos con bajo contenido en carbono (es decir, 1.4307 y 1.4404). No obstante, los efectos de deterioro de la soldadura pueden manifestarse en las categorías de acero inoxidable con contenido estándar de carbono en construcción soldada con espesores de chapa superiores a los 10 mm.

Fisuración por solidificación en categorías austeníticas

La fisuración por solidificación de las soldaduras se evita cuando la estructura de la soldadura contiene aproximadamente un 5% de ferrita. Los productores de acero

equilibran la composición y el tratamiento térmico de los grados más habituales de aceros austeníticos para asegurar que prácticamente no contengan ferrita cuando se suministran pero que, sin embargo, se forme suficiente ferrita en una soldadura autógena (p.e. una soldadura sin material de aportación). A pesar de esto, para reducir la posibilidad de fisuración, es adecuado reducir las aportaciones de calor, los intercambios de temperatura y las coacciones cuando se lleven a cabo soldaduras autógenas. En elementos de mayor espesor se añade el metal de aportación y, una vez más, el empleo de un consumible de buena calidad asegurará la formación de la cantidad de ferrita necesaria. Normalmente no es preciso medir la cantidad exacta de ferrita que se forma; procedimientos de soldadura y consumibles adecuados asegurarán que no se produzca la fisuración por solidificación.

Fragilización de los grados dúplex

Los aceros inoxidable dúplex son sensibles a 475°C y a la fase σ de fragilización. Lo primero ocurre cuando el acero se sitúa o es enfriado lentamente hasta una temperatura en el rango de 550°C a 400°C, hecho que produce un incremento de la resistencia a tracción y de la dureza, con una disminución de la ductilidad en tracción y de la resistencia al impacto. Lo último puede ocurrir después de una exposición prolongada a una temperatura alrededor de los 565°C a 900°C, sin embargo puede ocurrir en un período tan corto como media hora si se dan las condiciones apropiadas (en función de la composición y del estado termo-mecánico del acero). Los efectos de la fase σ de fragilización son mayores a temperatura ambiente. Ambos modos de fragilización tienen un efecto negativo sobre la resistencia a la corrosión y la tenacidad.

Adoptando los procedimientos de soldadura adecuados pueden ser controlados tanto la temperatura de 475°C como la fase σ de fragilización; se recomienda un intercambio máximo de temperatura de 200°C. En el caso de soldadura de secciones pesadas debe prestarse un cuidado especial.

Se recomienda evitar exposiciones prolongadas a temperaturas superiores a los 300°C para evitar la fragilización.

10.4.6 Tratamiento post-soldadura

Tanto desde el punto de vista técnico como del comercial, construir estructuras mediante soldadura suele ser la mejor opción. Tal como se expondrá en este apartado, el tratamiento post-soldadura resulta generalmente necesario, especialmente en aquellos casos en los que se hayan llevado a cabo procesos de soldadura por arco. Es importante definir el tratamiento post-soldadura requerido en cada caso para evitar costes excesivos y un posible pobre comportamiento en servicio. Las técnicas de acabado habituales para todos los tipos de fabricación se presentan en la Sección 10.6.

Los procedimientos comúnmente empleados para el acabado de la soldadura son el cepillado con alambre y el amolado. El fabricante debe minimizar las actuaciones para el acabado de la soldadura y, a ser posible, debe limitarse al cepillado con alambre ya que el calor producido durante el amolado puede afectar a la resistencia a la corrosión del material. Cabe comentar que los cepillos deben ser de acero inoxidable (ver Sección 10.2).

Es una buena práctica eliminar todas las trazas de la coloración térmica. Sin embargo, la coloración amarilla puede resultar satisfactoria cuando el acero inoxidable presenta un buen margen de resistencia para un ambiente en particular. Cuando no se de este caso o bien la coloración no sea aceptable por razones

estéticas, el tinte puede eliminarse mediante un decapado o un chorreado. El decapado puede llevarse a cabo mediante la inmersión en un baño químico, (ver Sección 10.6) o bien utilizando pastas, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

El martillado de la superficie de una soldadura es un tratamiento post-soldadura que resulta beneficioso. De este modo, se introducen tensiones de compresión en la superficie que mejoran la resistencia frente a la fatiga y a la fisuración por corrosión bajo tensión, además de mejorar el aspecto estético. En cualquier caso, el martillado de la superficie no puede emplearse para justificar un cambio en la evaluación de la fatiga.

La acción de eliminar metal sólido durante el mecanizado del material da lugar a la relajación de las tensiones y por consiguiente a la distorsión del producto así soldado. En aquellos casos en los que la distorsión es tal que las tolerancias dimensionales no pueden cumplirse, se requiere un tratamiento térmico. Generalmente, ésta es una opción para elementos de dimensiones reducidas y sólo para grados que resistan la sensibilización (ver Sección 3.7.2), tales como los grados con bajo contenido en carbono 1.4307 y 1.4404 o bien los grados estabilizados 1.4541 y 1.4571.

10.4.7 Inspección de soldaduras

La Tabla 10.2 muestra los métodos de inspección de soldaduras comúnmente empleados en acero inoxidable y en acero al carbono.

Los diferentes métodos empleados resultan necesarios en función del grado de integridad estructural y frente a la corrosión requeridos para el ambiente considerado. De todos modos, debe llevarse a cabo una inspección visual durante todas las etapas del proceso de soldadura con el fin de evitar muchos problemas que pueden resultar dificultosos al contaminar la fabricación. En acero inoxidable, la inspección de la superficie es más importante que en acero al carbono, puesto que el acero inoxidable se emplea prioritariamente para combatir la corrosión e incluso un pequeño defecto en la superficie puede hacer al material susceptible de ser atacado por corrosión.

Tabla 10.2 *Métodos de inspección de soldaduras*

Tipo de Ensayo No Destructivo (END)	Acero inoxidable austenítico	Acero inoxidable dúplex	Acero al carbono
Superficial	Visual ILP	Visual ILP IPM	Visual ILP IPM
Volumétrico	Rayos X Gamma	Rayos X Gamma	Rayos X Gamma Ultrasonidos

ILP – Inspección con líquidos penetrantes
IPM – Inspección con partículas magnéticas

La inspección con partículas magnéticas no es una opción a aplicar en aceros inoxidables austeníticos puesto que éstos son no magnéticos. Los métodos de ultrasonido son de uso limitado en soldaduras ya que la interpretación de sus resultados es difícil; no obstante, pueden emplearse para el material base. Por último, cabe comentar que la radiografía mediante rayos gamma no es adecuada para la detección de fisuras o de falta de fusión en materiales de acero inoxidable de espesor inferior a 10 mm.

10.5 Gripado y agarrotamiento

En aquellas superficies que se encuentran bajo carga y sometidas a un cierto movimiento, puede producirse un cierto gripado, resultado de la adhesión local y la ruptura de las superficies. En algunos casos puede darse también el agarrotamiento. A continuación se presentan algunos métodos para evitar problemas de gripado:

- Emplear grados estándares de acero inoxidable diferentes (grados que difieran en composición, tasa de endurecimiento por deformación y dureza). Por ejemplo, utilizar grados A2-C2, A4-C4 o bien A2-A4 para combinaciones tornillo-tuerca de EN ISO 3506,
- En casos severos, emplear una aleación de acero inoxidable de un elevado endurecimiento por deformación para uno de los componentes o bien aplicar un recubrimiento superficial duro,
- Emplear agentes anti-gripado.

Cabe comentar que si se emplean aceros diferentes o recubrimientos, hay que asegurarse que se obtiene el nivel de resistencia frente a la corrosión requerido. El engrasado de los tornillos resulta beneficioso aunque puede conducir a la contaminación por suciedad y puede presentar problemas para el almacenamiento.

Se recomienda que el material para el atornillado sea trabajado en frío, siendo, como mínimo de clase 70 (ver Tabla 3.3). Los materiales para los tornillos no deben utilizarse en condiciones de reblandecimiento puesto que presentan tendencia al gripado. Dicha tendencia puede reducirse mediante el empleo de roscas laminadas en vez de mecanizadas y evitando el empleo de roscas finas.

10.6 Acabado

La superficie de acabado del acero inoxidable es un criterio importante de diseño y debe especificarse claramente de acuerdo con los requisitos arquitectónicos y funcionales. Cuanto mejor es el acabado, mayor es el coste. Es por ello que cualquier precaución en cuanto a manipulación y soldadura tomada desde un principio economizará el proceso. Una planificación inicial es importante para reducir costes. Por ejemplo, si una soldadura tubo a tubo en un pasamanos o barandilla se oculta dentro de un montante, se conseguirá un coste reducido del acabado, además de una mejora significativa en el aspecto final del pasamanos o de la barandilla.

La superficie del acero debe recuperar su condición de resistente a la corrosión eliminando cualquier incrustación o contaminación. El decapado mediante inmersión en un baño ácido despegará cualquier incrustación, permitiendo que ésta sea eliminada mediante el cepillado con un cepillo de cerdas, y a su vez también disolverá cualquier partícula embebida de hierro o acero al carbono.

Los tratamientos superficiales tales como amolado, esmerilado, fresado, pulido y abrillantado producen acabados unidireccionales y, por tanto, la combinación de las soldaduras sobre láminas/placas con superficies laminadas normales puede resultar difícil. Es necesario un cierto grado de experiencia para determinar con detalle los procedimientos necesarios para conseguir un acabado adecuado.

El pulido electrolítico elimina una capa superficial delgada. Se puede conseguir un amplio rango de acabados, desde el mate a un lustre brillante, dependiendo, en gran medida, de las condiciones iniciales de la superficie del material.

Existen otros procedimientos de acabado (electrochapado, coloreado y sombreado superficial) pero raramente se emplean para acero inoxidable estructural y por ello no se describen en este documento.

Es importante remarcar una vez más que la superficie debe estar libre de contaminantes en la estructura montada. Debe prestarse especial atención a la posibilidad de que exista contaminación proveniente de trabajos adyacentes en acero al carbono, especialmente del polvo resultante del amolado. Tanto si el acero inoxidable se protege mediante una capa de plástico como si se limpia una vez completada la estructura, ello debe especificarse en los documentos del contrato.

APÉNDICE A CORRESPONDENCIA ENTRE DESIGNACIONES DE ACERO INOXIDABLE

En la Tabla A.1 se presentan las correspondencias entre las designaciones utilizadas en EN 10088, Alemania, Reino Unido, Francia, Italia, Suecia, España y Estados Unidos.

Tabla A.1 Designaciones de acero inoxidable – correspondencia entre Normas Europeas y nacionales

Grado de acero en EN 10088		Alemania (DIN)		Reino Unido	Francia	Italia	Suecia	España	Estados Unidos	
Nombre	No.	Nombre	No.	BSI	AFNOR	UNI	SIS	UNE	AISI	UNS
X5CrNi18-10	1.4301	X5 CrNi 18 10	1.4301	304 S 15 304 S 16 304 S 31	Z 6 CN 18-09	X5 CrNi 18 10	2332 2333	3504	304	S 30400
X2CrNi19-11	1.4306	X2 CrNi 19 11	1.4306	304 S 11	Z 2 CN 18-10	X2 CrNi 18 11	2352	3503	304 L	S 30403
X2CrNi18-9	1.4307	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X6CrNiTi18-10	1.4541	X6 CrNiTi 18 10	1.4541	321 S 31	Z 6 CNT 18-10	X6 CrNiTi 18 11	2337	3523	321	S 32100
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	X5CrNiMo 17 12 2	1.4401	316 S 31	Z 6 CND 17-11	X5 CrNiMo 17 12	2347	3534	316	S 31600
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	X2CrNiMo 17 13 2	1.4404	316 S 11	Z 2 CND 17-12	X2 CrNiMo 17 12	2348	3533	316L	S 31603
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	X2 CrNiMo 18 14 3	1.4435	316 S 13	Z 2 CND 17-13	X2 CrNiMo 17 13	2353	3533	316 L	S 31603
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	X1 NiCrMoCuN 25 20 5	1.4539	-	Z 1 CNDU 25-20	-	2562	-	904 L	N 08904
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	X6 CrNiMoTi 17 12 2	1.4571	320 S 31	Z 6 CNDT 17-12	X6 CrNiMoTi 17 12	2350	3535	316 Ti	S 31635
X2CrNi18-10	1.4311	X2 CrNiN 18 10	1.4311	304 S 61	Z 2 CN 18-10 Az	-	2371	-	304 LN	S 30453
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	X2 CrNiMoN 17 12 2	1.4406	316 S 62	Z 2 CND 17-12 Az	-	-	-	316 LN	S 31653
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	X2 CrNiMoN 17 13 5	1.4439	-	-	-	-	-	317 LMN	S 31726
X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	X1 NiCrMoCuN 25 20 6	1.4529	-	-	-	-	-	-	-
X2CrNi18-7	1.4318	X2 CrNiN 18 7	1.4318	-	-	-	-	-	301 LN (302 LN)	-
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	X2 CrNiMoN 22 5 3	1.4462	Dúplex 2205	Z 2 CND 22-5 Az	-	2377	-	-	S 31803

APÉNDICE B PANDEO LATERAL

B.1 Caso general

El momento crítico elástico de pandeo lateral, M_{cr} , para una viga con sección transversal uniforme viene dado por:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right)$$

donde:

C_1 , C_2 y C_3 son coeficientes que dependen de las condiciones de carga y de las coacciones en los extremos, ver Tablas B.1 y B.2.

I_t es el módulo de torsión

I_w es el módulo de alabeo

I_z es el momento de inercia de la sección respecto al eje menor

k_z y k_w son coeficientes de longitud eficaz

L es la longitud de la viga entre puntos que tengan coacción lateral

$z_g = z_a - z_s$

z_a es la coordenada del punto de aplicación de la carga

z_s es la coordenada del centro de esfuerzos cortantes

$$z_j = z_s - \frac{\int z (y^2 + z^2) dA}{2 I_y}$$

Para determinar z_j , se adopta que z es negativa 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 momento máximo. Nótese que $z_j = 0$ para cualquier sección de alas iguales, incluidos los perfiles en U y en Z.

Para cargas gravitatorias z_g es negativa para las cargas aplicadas por encima del centro de esfuerzos cortantes. En el caso general, z_g es negativa para las cargas que actúan en dirección al centro de esfuerzos cortantes desde su punto de aplicación. Cuando el efecto de la carga no sea ni desestabilizador ni estabilizador, se tomará $z_g = 0$.

Los coeficientes de longitud eficaz k_z y k_w varían desde 0,5 para empotramiento perfecto en ambos extremos a 1,0 para empotramiento nulo, con un valor de 0,7 para el caso de un extremo empotrado y otro no empotrado. Para las condiciones normales de vinculación en cada extremo:

$$k_z = k_w = 1,0$$

-coaccionado frente a movimiento lateral, con libertad de giro en el plano

-coaccionado a giro alrededor del eje longitudinal de la viga, con el alabeo permitido

El coeficiente k_z se refiere al giro del extremo en su plano. Es análogo a la relación l/L para un elemento estructural sometido a compresión. El coeficiente k_w se refiere al alabeo en el extremo. Salvo en el caso de que se adopten medidas especiales para la coacción al alabeo, k_w deberá tomarse igual a 1,0.

Tabla B.1 Valores de los coeficientes C_1 y C_3 correspondientes a valores del coeficiente de longitud eficaz k_z : Momentos en extremos de barra

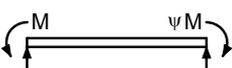
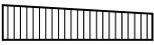
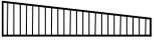
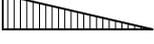
Momentos en extremos y condiciones de apoyo	Diagrama de momentos flectores	Valor de k_z	Valores de coeficientes			
			C_1	C_3		
				$\psi_f \leq 0$	$\psi_f > 0$	
	 $\psi = +1$	1,0 0,5	1,00 1,05	1,000 1,019		
	 $\psi = +3/4$	1,0 0,5	1,14 1,19	1,000 1,017		
	 $\psi = +1/2$	1,0 0,5	1,31 1,37	1,000 1,000		
	 $\psi = +1/4$	1,0 0,5	1,52 1,60	1,000 1,000		
	 $\psi = 0$	1,0 0,5	1,77 1,86	1,000 1,000		
	 $\psi = -1/4$	1,0 0,5	2,06 2,15	1,000 1,000	0,850 0,650	
	 $\psi = -1/2$	1,0 0,5	2,35 2,42	1,000 0,950	$1,3 - 1,2\psi_f$ $0,77 - \psi_f$	
	 $\psi = -3/4$	1,0 0,5	2,60 2,57	1,000 0,850	$0,55 - \psi_f$ $0,35 - \psi_f$	
	 $\psi = -1$	1,0 0,5	2,60 2,45	$-\psi_f$ $0,125 - 0,7\psi_f$	$-\psi_f$ $-0,125 - 0,7\psi_f$	

Tabla B.2 Valores de los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 correspondientes a valores del coeficiente de longitud eficaz k_z : Cargas transversales

Cargas transversales y condiciones de apoyo	Diagrama de momentos flectores	Valor de k_z	Valores de coeficientes		
			C_1	C_2	C_3
		1,0	1,12	0,45	0,525
		0,5	0,97	0,36	0,478
		1,0	1,35	0,59	0,411
		0,5	1,05	0,48	0,338
		1,0	1,04	0,42	0,562
		0,5	0,95	0,31	0,539

Nótese que las Tablas B.1 y B.2 pueden utilizarse solamente para el caso de perfiles en I simplemente simétricos en los que $-0,9 \leq \psi_f \leq 0,9$

donde:

$$\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}}$$

siendo:

I_{fc} el momento de inercia del ala comprimida alrededor del eje débil de la sección transversal

I_{ft} el momento de inercia del ala traccionada alrededor del eje débil de la sección transversal

$\psi_f = 0$ para secciones doblemente simétricas

$\psi_f > 0$ para secciones transversales simplemente simétricas en las que el ala mayor está comprimida

$\psi_f < 0$ para secciones transversales simplemente simétricas en las que el ala menor está comprimida

Puede emplearse la siguiente aproximación de z_j :

$$z_j = 0,8\psi_f \frac{h_s}{2} \quad \text{cuando } \psi_f \geq 0$$

$$z_j = \psi_f \frac{h_s}{2} \quad \text{cuando } \psi_f < 0$$

donde

h_s es la distancia entre centros de esfuerzos cortantes de las alas.

B.2 Casos concretos

B.2.1 Secciones doblemente simétricas

El momento crítico elástico de pandeo lateral de una viga de sección transversal uniforme simétrica ($z_j=0$) con alas iguales es:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - C_2 z_g \right)$$

Para momentos en extremos de barra y para cargas transversales aplicadas en el centro de esfuerzos cortantes $C_2 z_g = 0$. En estos casos:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{1/2}$$

Para condiciones normales de vinculación en cada extremo, $k_z = k_w = 1, 0$:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \left[\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{1/2}$$

APÉNDICE C DATOS DEL MATERIAL PARA EL CÁLCULO DE FLECHAS

El módulo de elasticidad secante, E_S , que debe utilizarse en el cálculo de flechas (ver Sección 5.4.6) debería determinarse en función de la dirección de laminado. Si no se conoce la orientación, o no se puede asegurar, entonces deberá usarse el valor correspondiente a la dirección longitudinal.

El valor del módulo de elasticidad secante puede obtenerse como:

$$E_S = (E_{S1} + E_{S2})/2$$

donde:

E_{S1} es el módulo de elasticidad secante correspondiente a la tensión en el ala traccionada

E_{S2} es el módulo de elasticidad secante correspondiente a la tensión en el ala comprimida

Los valores de los módulos secantes E_{S1} y E_{S2} para la dirección apropiada y para los niveles de tensión en servicio pueden estimarse a partir de la siguiente expresión, utilizando las constantes dadas en la Tabla C.1. Alternativamente, los valores correspondientes a los grados 1.4301, 1.4401 y 1.4462 pueden tomarse de la Tabla C.2, mediante interpolación lineal si es necesario.

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad y \quad i = 1,2$$

En esta expresión se tiene que:

$\sigma_{i,Ed,ser}$ es la tensión de cálculo bajo cargas de servicio en el ala comprimida o traccionada

$$E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

Como simplificación, puede despreciarse la variación de E_S a lo largo de la longitud del elemento y utilizar el mínimo valor de E_S (correspondiente a los máximos valores de las tensiones σ_1 y σ_2 en el elemento) a lo largo de toda su longitud.

Tabla C.1 Valores de las constantes para la determinación del módulo secante

Grado	f_y N/mm ²	n	
		Dirección longitudinal	Dirección transversal
1.4301	210		
1.4307	200		
1.4541	200	6,0	8,0
1.4318	330		
1.4401	220		
1.4404	220	7,0	9,0
1.4571	220		
1.4362	400		
1.4462	460	5,0	5,0

Tabla C.2 Módulo secante para cálculo de flechas para los grados 1.4301, 1.4401 y 1.4462

Relación de tensiones (σ/f_y)	Módulo secante (kN/mm ²)				
	Grado 1.4301		Grado 1.4401		Grado 1.4462
	Dirección longitudinal	Dirección transversal	Dirección longitudinal	Dirección transversal	Cualquier dirección
0,00	200	200	200	200	200
0,20	200	200	200	200	200
0,25	200	200	200	200	199
0,30	199	200	200	200	199
0,35	199	200	199	200	197
0,40	198	200	199	200	196
0,42	197	199	198	200	195
0,44	196	199	197	199	194
0,46	195	199	197	199	193
0,48	194	198	196	199	191
0,50	192	198	194	199	190
0,52	190	197	193	198	188
0,54	188	196	191	197	186
0,56	185	195	189	197	184
0,58	183	194	187	195	182
0,60	179	192	184	194	180
0,62	176	190	181	192	177
0,64	172	187	178	190	175
0,66	168	184	174	188	172
0,68	163	181	170	185	169
0,70	158	177	165	181	165
0,72	152	172	160	177	162
0,74	147	167	154	172	159
0,76	141	161	148	166	155

PARTE II – EJEMPLOS DE DIMENSIONAMIENTO

Esta sección presenta trece ejemplos que ilustran la aplicación de las reglas de dimensionamiento. Los ejemplos son:

Ejemplo de dimensionamiento 1

Sección hueca circular sometida a compresión.

Ejemplo de dimensionamiento 2

Viga soldada en I con sección de Clase 4 sometida a compresión y a flexión.

Ejemplo de dimensionamiento 3

Panel trapecoidal de cubierta con sección de Clase 4 sometido a flexión.

Ejemplo de dimensionamiento 4

Unión soldada en sección hueca frente a fatiga.

Ejemplo de dimensionamiento 5

Unión soldada.

Ejemplo de dimensionamiento 6

Unión atornillada.

Ejemplo de dimensionamiento 7

Viga armada con sección de Clase 4 sometida a flexión. La abolladura por cortante es crítica.

Ejemplo de dimensionamiento 8

Viga armada con sección de Clase 4 sometida a flexión. La resistencia a cargas transversales es crítica.

Ejemplo de dimensionamiento 9

Viga en U conformada en frío sometida a flexión con arriostramientos laterales intermedios en el ala comprimida. El pandeo lateral entre puntos de arriostramiento es crítico.

Ejemplo de dimensionamiento 10

Sección hueca rectangular sometida a compresión y a flexión con una resistencia a fuego de 30 minutos.

Ejemplo de dimensionamiento 11

Panel trapecoidal de cubierta con sección transversal Clase 4 sometida a flexión – una comparación de dimensionamiento con material trabajado en frío y con material recocido.

Ejemplo de dimensionamiento 12

Sección en canal rigidizada con labios de material trabajado en frío en un forjado expuesto sometida a flexión.

Ejemplo de dimensionamiento 13

Viga en celosía de acero inoxidable de material trabajado en frío sometida a acciones combinadas de compresión y flexión y con una resistencia a fuego de 30 minutos.

Las vigas armadas de los ejemplos 7 y 8 son de grado dúplex 1.4462. Los elementos estructurales de los otros ejemplos son de grados austeníticos 1.4301 o 1.4401.

Las referencias al margen de los ejemplos de dimensionamiento se hacen a los apartados o secciones del texto y a las expresiones/ecuaciones de este manual, a no ser que se especifique otra cosa.