Anejo 24

Proyecto de estructuras de acero. Reglas generales.

Reglas adicionales para los aceros inoxidables

Contenido

1 GENERALIDADES 1292

1.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN 1292
1.2 NORMATIVA DE REFERENCIA 1292
1.3 CONSIDERACIONES 1292
1.5 TÉRMINOS Y DEFINICIONES 1292
1.6 SÍMBOLOS 1292

2 MATERIALES 1292

2.1 ACEROS INOXIDABLES ESTRUCTURALES 1292
2.1.1 Generalidades 1292
2.1.2 Propiedades del material para acero inoxidable 1293
2.1.3 Valores de cálculo de los coeficientes del material 1294
2.1.4 Tenacidad de fractura 1294
2.1.5 Propiedades en la dirección del espesor 1295
2.1.6 Tolerancias 1295
2.2 TORNILLOS 1295
2.2.1 Generalidades 1295
2.2.2 Tornillos pretensados 1295
2.2.3 Otros tipos de elementos de fijación mecánicos 1296
2.3 CONSUMIBLES DE SOLDADURA 1296

3 DURABILIDAD 1296

4 ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO 1296

4.1 GENERALIDADES 1296
4.2 CÁLCULO DE FLECHAS 1297

5 ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS 1298

5.1 GENERALIDADES 1298
5.2 CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES 1299
5.2.1 Máximas relaciones anchura-espesor 1299
5.2.2 Clasificación de elementos comprimidos 1299
5.2.3 Anchuras reducidas en secciones clase 4 1302
5.2.4 Efectos del arrastre por cortante 1303
5.3 RESISTENCIA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES 1303
5.3.1 Resistencia a tracción en secciones con agujeros para tornillos 1303
5.4 RESISTENCIA A PANDEO DE ELEMENTOS 1304
5.4.1 Generalidades 1304
5.4.2 Elementos uniformes en compresión 1304
5.4.2.1 Curvas de pandeo 1304
5.4.3 Elementos uniformes sometidos a flexión 1305
5.4.3.1 Curvas de pandeo lateral 1305
5.5 ELEMENTOS UNIFORMES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN 1306
5.6 RESISTENCIA A CORTANTE 1307
5.7 RIGIDIZADORES TRANSVERSALES DE ALMA 1308

6 DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES 1308

6.1 GENERALIDADES 1308
6.2 UNIONES ATORNILLADAS 1308
6.3 DIMENSIONAMIENTO DE SOLDADURAS 1309

7 CÁLCULO ASISTIDO POR ENSAYOS 1309

8 FATIGA 1309

9 RESISTENCIA FRENTE AL FUEGO 1309

APÉNDICE A. RECOMENDACIONES SOBRE DURABILIDAD 1310

A.1 INTRODUCCIÓN 1310
A.2 TIPOS DE CORROSIÓN 1311
A.2.1 Corrosión por picaduras 1311
A.2.2 Corrosión en hendiduras 1311
A.2.3 Corrosión bimetálica 1311
A.2.4 Fisuración por corrosión bajo tensión 1312
A.2.5 Corrosión generalizada 1312
A.2.6 Ataque intergranular y degradación por soldadura 1313
A.3 NIVELES DE RIESGO 1313
A.4 SELECCIÓN DE MATERIALES 1314
A.4.1 Generalidades 1314
A.4.2 Tornillos 1316
A.5 DISEÑO PARA EL CONTROL DE LA CORROSIÓN 1316
A.6 UNIONES 1318
A.6.1 Generalidades 1318
A.6.2 Uniones atornilladas 1318
A.6.3 Uniones soldadas 1319

APÉNDICE B. RECOMENDACIONES PARA EL ACERO INOXIDABLE EN LA CONDICIÓN DE ENDURECIDO MECÁNICO POR TRABAJADO 1320

B.1 GENERALIDADES 1320
B.2 ENDURECIMIENTO POR TRABAJADO POR LAMINADO EN FRÍO 1320
B.3 ENDURECIMIENTO POR TRABAJADO POR FABRICACIÓN 1320

APÉNDICE C. RECOMENDACIONES PARA LA MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL 1321

C.1 GENERALIDADES 1321
C.2 PROPIEDADES DEL MATERIAL 1321

1 Generalidades

1.1 Objeto y campo de aplicación

(1) Este anejo proporciona disposiciones adicionales para el proyecto de edificios y obras de ingeniería civil, que amplían y modifican la aplicación de los Anejos 22, 25 y 26 para los aceros inoxidables austeníticos, austenítico-ferríticos y ferríticos.

NOTA 1: El Apéndice A proporciona información relativa a la durabilidad de los aceros inoxidables.

NOTA 2: La norma UNE-EN 10088 proporciona pautas para tratamientos adicionales, incluyendo los tratamientos térmicos.

NOTA3: La numeración de los apartados de este Anejo en ocasiones no es consecutiva, a semejanza de la estructura de la correspondiente norma de Eurocódigo.

1.2 Normativa de referencia

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

1.3 Consideraciones

(1) Además de las consideraciones generales del Anejo 18 del Código Estructural, son aplicables las recogidas en el Capítulo 21 de este Código.

1.5 Términos y definiciones

(1) Son aplicables los términos y definiciones indicados en el apartado 1.5 del Anejo 18 del Código Estructural.

(2) A menos que se indique lo contrario, es aplicable el vocabulario de los términos sobre tratamientos para productos férreos dados en la Norma UNE-EN ISO 4885.

1.6 Símbolos

Además de los símbolos dados en los Anejos 18, 22, 25 y 26, se utilizan los siguientes:

$f_{u,red}$ valor reducido de la resistencia última del acero para cálculo de la resistencia al aplastamiento

$E_{s,ser}$ módulo secante de elasticidad utilizado para los cálculos en estados límite de servicio

$E_{s,1}$ módulo secante correspondiente a la tensión en el ala traccionada

$E_{s,2}$ módulo secante correspondiente a la tensión en el ala comprimida

$\sigma_{1,Ed,ser}$ tensión de cálculo en servicio

n coeficiente.

2 MATERIALES

2.1 Aceros inoxidables estructurales

2.1.1 Generalidades

(1) Las especificaciones dadas en este anejo deberían aplicarse solamente al proyecto de estructuras con aceros inoxidables austeníticos, austenítico-ferríticos y ferríticos.

(2) Los valores nominales de las propiedades del material dadas en el apartado 2.1.2 deberían

utilizarse como valores característicos en los cálculos del proyecto.

(3) Para más información relativa a las propiedades del material debería hacerse referencia a la serie de normas UNE-EN 10088.

(4) Las especificaciones de cálculo dadas en este anejo son aplicables a materiales con un límite elástico nominal f_y menor o igual a 480 N/mm^2.

NOTA: Las reglas para la utilización de material endurecido con $f_y > 480$ N/mm^2 se presentan en el Apéndice B.

(5) La resistencia más alta de otros materiales (véanse 2.1.2 y el Apéndice B) puede tenerse en cuenta en el cálculo, siempre que ello se justifique mediante ensayos adecuados de acuerdo con el apartado 7.

2.1.2 Propiedades del material para acero inoxidable

(1) Deberían utilizarse los siguientes valores para los cálculos de proyecto, independientemente de la dirección del laminado:

- límite elástico f_y: la tensión nominal (tensión correspondiente a una deformación remanente de 0,2%) especificada en la tabla A24.2.1;
- resistencia última a tracción f_u: la resistencia última a tracción nominal especificada en la tabla A24.2.1.

(2) Los requisitos de ductilidad del apartado 3.2.2 del Anejo 22 del Código Estructural aplican también a aceros inoxidables. Debería considerarse que los aceros que se ajusten a uno de los grados listados en la tabla A24.2.1 cumplen estos requisitos.

(3) Para secciones estructurales huecas, deberían utilizarse los valores de resistencia dados en la tabla A24.2.1 para la forma de producto pertinente del material base (fleje laminado en frío, fleje laminado en caliente o chapa laminada en caliente).

(4) Pueden utilizarse valores superiores de la resistencia en el cálculo, derivados del efecto del trabajado en frío del material base, siempre que se verifiquen mediante ensayos de probetas extraídas de la sección estructural hueca de acuerdo con el apartado 7.

(5) Para el material trabajado en frío, los ensayos de material indicados en el certificado de material, de acuerdo con la norma UNE-EN 1090, deberían plantearse en una dirección tal que los valores de resistencia utilizados en el cálculo sean independientes de la dirección de laminado o de estirado.

Tabla A24.2.1 Valores nominales del límite elástico f_y y de la resistencia última a tracción f_u para aceros inoxidables estructurales según la serie de normas UNE-EN 10088 [1)]

Tipo de acero inoxidable	Grado	Forma de producto							
		Fleje laminado en frío		Fleje laminado en caliente		Chapa laminada en caliente		Barras, alambres y perfiles	
		Espesor nominal t							
		$t \le 6$ mm		$t \le 12$ mm		$t \le 75$ mm		$t \le 250$ mm	
		f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
		N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
Aceros ferríticos	1.4003	280	450	280	450	250[3)]	450[3)]	260[4)]	450[4)]
	1.4016	260	450	240	450	240[3)]	430[3)]	240[4)]	400[4)]
	1.4512	210	380	210	380	–	–	–	–
Aceros austeníticos	1.4306	220	520	200	520	200	500	180	460
	1.4307							175	450
	1.4541							190	500
	1.4301	230	540	210	520	210	520		
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500

	1.4404								
	1.4539							230	530
	1.4571		540		540				
	1.4432	240	550	220	550	220	520	200	500
	1.4435								
	1.4311	290	550	270	550	270	550	270	550
	1.4406	300	580	280	580	280	580	280	580
	1.4439	290		270		270			
	1.4529	300	650	300	650	300	650		
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300	650
	1.4318	350	650	330	650	330	630	–	–
Aceros austenítico-ferríticos	1.4362	420	600	400	600	400	630	400 2)	600 2)
	1.4462	480	660	460	660	460	640	450	650

1) Los valores nominales de f_y y f_u dados en esta tabla pueden utilizarse en el cálculo sin tener en cuenta la anisotropía ni los efectos del endurecimiento por deformación.

2) $t \leq 160$ mm

3) $t \leq 25$ mm

4) $t \leq 100$ mm

2.1.3 Valores de cálculo de los coeficientes del material

(1) Se pueden adoptar los siguientes valores de los coeficientes del material para el análisis global y para determinar la resistencia de los elementos y de las secciones transversales:

- Módulo de elasticidad, E:

  E = 200000 N/mm^2 para los grados austeníticos y austenítico-ferríticos de la tabla A24.2.1, excluyendo los tipos 1.4539, 1.4529 y 1.4547

  E = 195000 N/mm^2 para los grados austeníticos 1.4539, 1.4529 y 1.4547

  E = 220000 N/mm^2 para los grados ferríticos de la tabla A24.2.1

- Módulo de elasticidad transversal, G, donde $G = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$

- Coeficiente de Poisson en régimen elástico, $\nu = 0{,}3$

Como alternativa, para describir el comportamiento del material en la condición de recocido pueden utilizarse las curvas tensión-deformación de acuerdo con el Apéndice C.

(2) Para el cálculo de flechas en elementos aislados, puede utilizarse el modulo secante correspondiente a la tensión en el elemento en estado límite de servicio, véase el punto (5) del apartado 4.2.

2.1.4 Tenacidad de fractura

(1) Puede suponerse que los aceros inoxidables austeníticos y austenítico-ferríticos contemplados en esta norma son suficientemente tenaces y no susceptibles a la rotura frágil para temperaturas en servicio desde – 40 ºC.

NOTA 1: Los aceros inoxidables austeníticos también pueden utilizarse para temperaturas menores de – 40 ºC, pero deberían determinarse los requisitos correspondientes a cada caso particular.

NOTA 2: Véase el punto (3) del apartado A.5 referente a la fragilización debida al contacto con cinc en caso de incendio.

(2) Las directrices para los aceros inoxidables ferríticos se recogen en las reglas dadas en el Anejo 28. Los valores de la temperatura de ensayo y de la resiliencia KV (resiliencia Charpy en V) requeridos pueden determinarse a partir de la tabla A28.2.1 del Anejo 28.

NOTA 1: Los aceros ferríticos no se clasifican en subgrados.

2.1.5 Propiedades en la dirección del espesor

(1) Las directrices sobre la elección de las propiedades en la dirección del espesor se especifican en el Anejo 28.

2.1.6 Tolerancias

(1) Las tolerancias dimensionales y de masa de las secciones de acero laminado, los perfiles estructurales huecos y las chapas, deberían ser conformes a la norma de producto correspondiente, a menos que se especifiquen unas tolerancias más severas.

NOTA: Para obtener información acerca de las tolerancias de los espesores en aceros inoxidables laminados en frío, debería hacerse referencia a la norma UNE-EN ISO 9445-1. Para chapas véase la norma UNE-EN 10029.

(2) Para componentes soldados deberían aplicarse las tolerancias que establece el Anejo 16.

(3) Para el análisis y el cálculo estructural deberían utilizarse los valores nominales de las dimensiones.

2.2 Tornillos

2.2.1 Generalidades

(1) Los tornillos y tuercas de acero inoxidable deberían ser conformes a las partes 1, 2 y 3 de la serie de normas UNE-EN ISO 3506. Las arandelas deberían ser de acero inoxidable y deberían ser conformes a las normas UNE-EN ISO 7089 o UNE-EN ISO 7090, según corresponda. La resistencia a la corrosión de los tornillos debería ser equivalente o superior a la resistencia a la corrosión del material base.

(2) El valor nominal del límite elástico f_{yb} y el valor nominal de la resistencia última a tracción f_{ub} para tornillos de acero inoxidable debería obtenerse de la tabla A24.2.2.

Tabla A24.2.2 Valores nominales de f_{yb} y f_{ub} para tornillos de acero inoxidable

Grupos de material	Clase según la serie de normas UNE-EN ISO 3506	Rango de tamaños	Límite elástico f_{yb} N/mm^2	Resistencia última a tracción f_{ub} N/mm^2
Austeníticos y austenítico-ferríticos	50	≤ M 39	210	500
	70	≤ M 24	450	700
	80	≤ M 24	600	800

(3) En espera de la publicación de una norma europea apropiada, las propiedades especificadas deberían comprobarse mediante un sistema de control de calidad reconocido, con ensayos para cada grupo de tornillos.

2.2.2 Tornillos pretensados

NOTA: No deberían emplearse tornillos de alta resistencia de acero inoxidable como tornillos pretensados, calculados para una resistencia específica al deslizamiento, a menos que su aceptación para una aplicación concreta pueda demostrarse con resultados experimentales.

2.2.3 Otros tipos de elementos de fijación mecánicos

(1) Otros tipos de elementos de fijación mecánicos quedan fuera del ámbito de este Código.

2.3 Consumibles de soldadura

(1) Los requisitos generales para los consumibles de soldadura se especifican en el Anejo 26.

(2) Además de los requisitos establecidos en el Anejo 26, los electrodos de soldadura deberían ser capaces de producir una soldadura con una resistencia a la corrosión adecuada para el ambiente de servicio, siempre que se utilice el procedimiento de soldadura correcto.

(3) Puede suponerse que los electrodos de soldadura son adecuados si la resistencia a la corrosión del material depositado y del metal soldado no es menor que la del material a soldar.

NOTA: Es recomendable solicitar el consejo de profesionales para la elección del procedimiento de soldadura para uniones de acero inoxidable.

3 DURABILIDAD

(1) Se deberían aplicar también los requisitos de durabilidad dados en el apartado 4 del Anejo 22 del Código Estructural a los aceros inoxidables.

(2) Debería seleccionarse el grado adecuado de acero inoxidable, según la resistencia a la corrosión exigida para el ambiente en el que se va a utilizar el elemento estructural.

NOTA: En el Apéndice A se dan directrices para la selección de materiales en función de su resistencia a la corrosión.

(3) En aplicaciones con acabado superficial, deberían tenerse en cuenta también los posibles pequeños cambios en la apariencia de la superficie que podrían tener lugar como resultado de depósitos de suciedad (que en circunstancias adversas pueden crear hendiduras y producir una superficie con micro-picaduras). Debería utilizarse un grado de acero inoxidable con una resistencia a la corrosión adecuada para asegurar que en la superficie solamente tengan lugar ataques superficiales durante la vida útil del componente.

NOTA: Las características del aspecto superficial de chapas laminadas en caliente se describen en la norma UNE-EN 10163.

(4) Si fuera necesario, debería especificarse un régimen de limpieza adecuado para mantener la apariencia de la superficie.

(5) Aunque, bajo condiciones atmosféricas benignas de exposición, la mayoría de los aceros inoxidables pueden cumplir los requisitos dados en el punto (3), si el acero inoxidable va a estar expuesto a ambientes que contengan sustancias químicas, incluyendo atmósferas asociadas a ciertos procesos industriales, en edificios de piscinas, agua salada y espuma salada para el deshielo de carreteras o similar, debería solicitarse información adicional a un experto.

NOTA: El Apéndice A da información adicional sobre proyecto, para el control de la corrosión.

4 ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

4.1 Generalidades

(1) Para aceros inoxidables deberían aplicarse los requisitos en para los estados límite de servicio dados en el apartado 7 del Anejo 22.

(2) Las flechas en los elementos deberían calcularse de acuerdo con el apartado 4.2.

4.2 Cálculo de flechas

(1) En el cálculo de flechas deberían tenerse en cuenta los efectos del comportamiento tensión-deformación no lineal de los aceros inoxidables y la eficacia de la sección transversal.

NOTA: En el Apéndice C se dan directrices para la descripción del comportamiento no lineal de material recocido.

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

NOTA: El Anejo 18 del Código Estructural da las combinaciones de acciones adecuadas a emplear en las siguientes situaciones:

- para el cálculo de flechas bajo acciones permanentes y/o variables;
- cuando deban considerarse deformaciones diferidas (a largo plazo) debidas a retracción, relajación o fluencia;
- si se está considerando la apariencia de la estructura, el confort del usuario o el funcionamiento de máquinas.

(3) La sección transversal reducida puede obtenerse, de manera conservadora, en base a las anchuras reducidas de los elementos comprimidos de las secciones transversales de clase 4, determinadas según el apartado 5.2.3. Como alternativa, puede emplearse el método más preciso del punto (4) del apartado 4.4 del Anejo 25 del Código Estructural.

(4) En el caso de elementos en los que deba considerarse el arrastre por cortante, la sección transversal eficaz puede basarse en las anchuras eficaces determinadas según el apartado 3.2 del Anejo 25 del Código Estructural.

(5) Las flechas deberían determinarse utilizando el módulo secante de elasticidad $E_{s,ser}$ calculado teniendo en cuenta las tensiones en el elemento bajo la combinación de acciones para el pertinente estado límite de servicio y la orientación de la dirección de laminado. Si no se conoce, o no puede asegurarse, la orientación de la dirección de laminado, entonces debería utilizarse el valor de la dirección longitudinal. Como alternativa, pueden emplearse los métodos de elementos finitos dados en el Apéndice C del Anejo 25 del Código Estructural, con la descripción del comportamiento no lineal del material dado en el Apéndice C de este documento.

(6) El valor del módulo secante de elasticidad $E_{s,ser}$ puede obtenerse de:

$$E_{s,ser} = \frac{\left(E_{s,1} + E_{s,2}\right)}{2} \qquad (4.1)$$

donde:

$E_{s,1}$ es el módulo secante correspondiente a la tensión σ_1 en el ala traccionada

$E_{s,2}$ es el módulo secante correspondiente a la tensión σ_2 en el ala comprimida.

(7) Los valores de los módulos secantes $E_{s,1}$ y $E_{s,2}$ para la tensión apropiada de servicio $\sigma_{i,Ed,ser}$ y la dirección de laminado pueden estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$E_{s,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)} \qquad (4.2)$$

Con:

i = 1 o 2

(8) El valor del coeficiente n puede obtenerse de la tabla A24.4.1.

NOTA: El Apéndice C proporciona un método para evaluar *n* para otros grados diferentes a los recogidos en la tabla A24.4.1.

(9) Como simplificación, puede despreciarse la variación de $E_{s,ser}$ a lo largo de la longitud del elemento y puede utilizarse el mínimo valor de $E_{s,ser}$ (correspondiente a los máximos valores de las tensiones $\sigma_{1,Ed,ser}$ y $\sigma_{2,Ed,ser}$ en el elemento) a lo largo de toda su longitud.

Tabla A24.4.1 Valores de *n*

Grado de acero	Coeficiente *n*	
	Dirección longitudinal	Dirección transversal
1.4003	7	11
1.4016	6	14
1.4512	9	16
1.4301 1.4306 1.4307 1.4318 1.4541	6	8
1.4401 1.4404 1.4432 1.4435 1.4539 1.4571	7	9
1.4462 1.4362	5	5

5 ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

5.1 Generalidades

(1) Para aceros inoxidables deberían aplicarse las especificaciones recogidas en los apartados 5 y 6 del Anejo 22 del Código Estructural, excepto cuando queden modificadas o sustituidas por las especificaciones particulares recogidas en esta norma.

(2) En este apartado, los coeficientes parciales γ_M definidos en el apartado 2.4.3 del Anejo 22 del Código Estructural se aplican a los diferentes valores característicos de resistencia, tal como se indica a continuación, véase la tabla A24.5.1.

Tabla A24.5.1 Coeficientes parciales

Resistencia de secciones transversales a plastificación excesiva, incluyendo abolladura	γ_{M0}= 1,10
Resistencia de elementos estructurales a inestabilidad, evaluada mediante comprobaciones de elemento	γ_{M1}= 1,10
Resistencia a rotura de secciones transversales en tracción	γ_{M2}= 1,25
Resistencia de tornillos, roblones, soldaduras, articulaciones y chapas a aplastamiento	γ_{M2}= 1,25

(3) No se dan reglas para análisis global plástico.

NOTA: No debería utilizarse análisis global plástico a menos que exista evidencia experimental suficiente para asegurar que las hipótesis hechas en los cálculos son representativas del comportamiento real de la

estructura. En particular debería comprobarse que las uniones son capaces de resistir el incremento de esfuerzos debido al endurecimiento por deformación.

(4) Las uniones sometidas a fatiga deben satisfacer también los principios establecidos en la el Anejo 27.

(5) Cuando los elementos se vean sometidos a una deformación significativa, puede tenerse en cuenta el aumento de resistencia obtenido a través de las propiedades de endurecimiento por trabajado de los aceros inoxidables austeníticos. Cuando este endurecimiento por trabajado incremente las acciones resistidas por los elementos, las uniones deberían proyectarse de forma coherente con el aumento de la resistencia del elemento, especialmente cuando se requiera un cálculo por capacidad.

5.2 Clasificación de las secciones transversales

5.2.1 Máximas relaciones anchura-espesor

(1) Las especificaciones para proyecto mediante cálculos dadas en este anejo se pueden aplicar a secciones transversales dentro de los límites dimensionales dados en el Anejo 22.

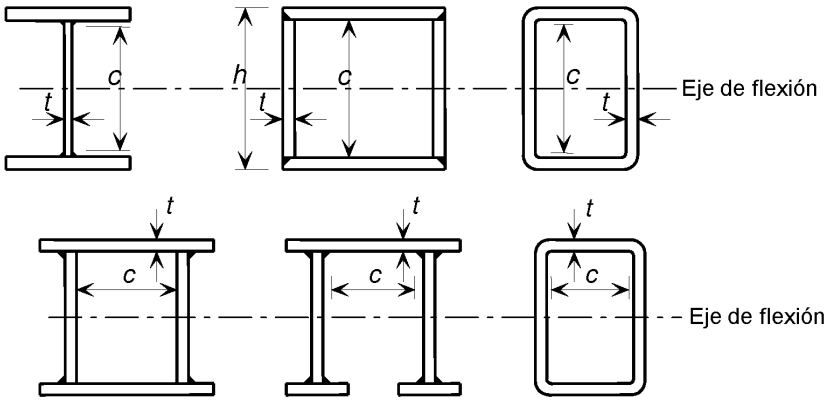
(2) Si la distorsión visual de los elementos planos de la sección transversal es inaceptable bajo cargas de servicio, puede aplicarse un valor límite para la relación anchura total-espesor $b/t \leq 75$.

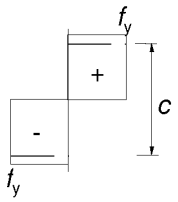
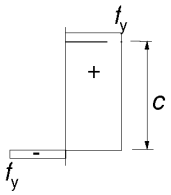
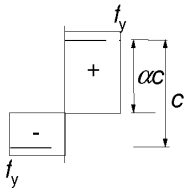
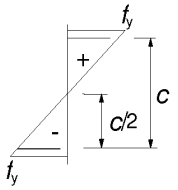
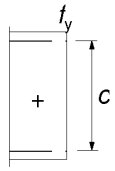
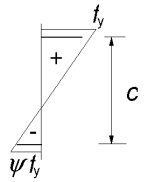
5.2.2 Clasificación de elementos comprimidos

(1) Los elementos comprimidos de las secciones transversales deberían clasificarse como clase 1, 2 o 3 en función de los límites establecidos en la tabla A24.5.2. Aquellos elementos comprimidos que no cumplan los criterios establecidos para la clase 3 deberían clasificarse como elementos de clase 4.

Tabla A24.5.2 (hoja 1 de 3) – Relaciones máximas anchura-espesor para partes comprimidas

Partes internas comprimidas



Clase	Parte sometida a flexión	Parte sometida a compresión	Parte sometida a flexo-compresión
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)			
1	$c/t \le 56{,}0\varepsilon$	$c/t \le 25{,}7\varepsilon$	cuando $\alpha > 0{,}5 : c/t \le \frac{308\varepsilon}{13\alpha - 1}$ cuando $\alpha \le 0{,}5 : c/t \le \frac{28\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \le 58{,}2\varepsilon$	$c/t \le 26{,}7\varepsilon$	cuando $\alpha > 0{,}5 : c/t \le \frac{320\varepsilon}{13\alpha - 1}$ cuando $\alpha \le 0{,}5 : c/t \le \frac{29{,}1\varepsilon}{\alpha}$
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)			
3	$c/t \le 74{,}8\varepsilon$	$c/t \le 30{,}7\varepsilon$	$c/t \le 15{,}3\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ véase Anejo 25

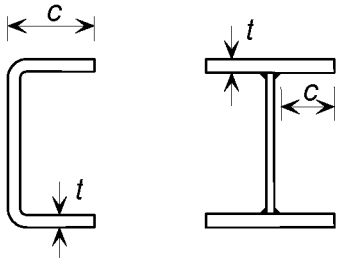
$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5}$$

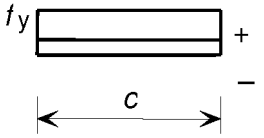
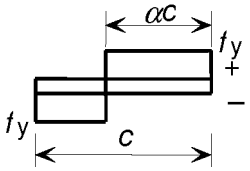
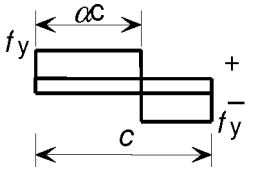
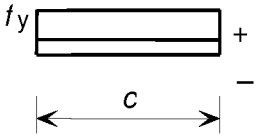
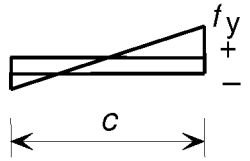
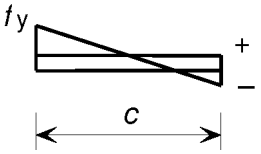
Grado	1.4301	1.4401	1.4462
f_y (N/mm^2)	210	220	460
ε	1,03	1,01	0,698

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

Tabla A24.5.2 (hoja 2 de 3) – Relaciones máximas anchura-espesor para partes comprimidas

Alas voladas

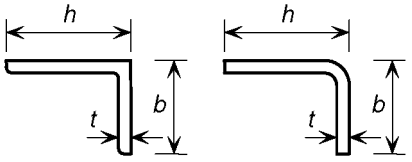


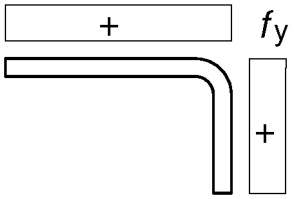
Clase	Tipo de sección	Parte sometida a compresión	Parte sometida a flexo-compresión	
			Extremo comprimido	Extremo traccionado
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)				
1	Conformada en frío	$c/t \le 10\varepsilon$	$c/t \le \dfrac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \dfrac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldada	$c/t \le 9\varepsilon$	$c/t \le \dfrac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \dfrac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Conformada en frío	$c/t \le 10{,}4\varepsilon$	$c/t \le \dfrac{10{,}4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \dfrac{10{,}4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldada	$c/t \le 9{,}4\varepsilon$	$c/t \le \dfrac{9{,}4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \dfrac{9{,}4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)				
3	Conformada en frío	$c/t \le 11{,}9\varepsilon$	$c/t \le 18{,}1\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ véase Anejo 25	
	Soldada	$c/t \le 11\varepsilon$	$c/t \le 16{,}7\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ véase Anejo 25	

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5}$$

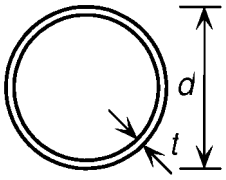
Grado	1.4301	1.4401	1.4462
f_y (N/mm^2)	210	220	460
ε	1,03	1,01	0,698

Tabla A24.5.2 (hoja 3 de 3) – Relaciones máximas anchura-espesor para partes comprimidas

Angulares		
Consultar también "Alas voladas" (hoja 2 de 3)		No aplica a angulares en contacto continuo con otros componentes

Clase	Sección comprimida
Ley de tensiones en la sección (compresión positiva)	
3	$h/t \le 11,9\varepsilon : \dfrac{b+h}{2t} \le 9,1\varepsilon$

Secciones circulares huecas (tubulares)



Clase	Sección traccionada Hasta 240 CHS	Sección comprimida
1	$d/t \le 50\varepsilon^2$	$d/t \le 50\varepsilon^2$
2	$d/t \le 70\varepsilon^2$	$d/t \le 70\varepsilon^2$
3	$d/t \le 280\varepsilon^2$	$d/t \le 90\varepsilon^2$

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5}$$

Grado	1.4301	1.4401	1.4462
f_y (N/mm^2)	210	220	460
ε	1,03	1,01	0,698

5.2.3 Anchuras reducidas en secciones clase 4

En las secciones clase 4 pueden utilizarse las anchuras reducidas para considerar adecuadamente las reducciones en la resistencia debidas a los efectos de la abolladura local, utilizando las expresiones (1) a (5) del apartado 4.4 del Anejo 25 del Código Estructural, excepto que para el factor de reducción ρ deberían usarse los siguientes valores:

Elementos internos conformados en frío o soldados:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ siendo} \le 1 \qquad (5.1)$$

Elementos externos volados conformados en frío:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ siendo} \leq 1 \qquad (5.2)$$

Elementos externos volados soldados:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ siendo} \leq 1 \qquad (5.3)$$

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

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

en donde:

t es el espesor pertinente

k_σ es el coeficiente de abolladura correspondiente a la relación de tensiones ψ y las condiciones de contorno de las tablas A25.4.1 o A25.4.2 en el Anejo 25 del Código Estructural, según corresponda

$\bar{b}$ es la anchura pertinente, tomada como se define a continuación

$\bar{b}$ = *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 internos 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 alas voladas

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

ε es el coeficiente del material definido en la tabla A24.5.2.

5.2.4 Efectos del arrastre por cortante

(1) Los efectos del arrastre por cortante deberían tenerse en cuenta según lo especificado en el apartado 3.3 del Anejo 25 del Código Estructural.

5.3 Resistencia de las secciones transversales

5.3.1 Resistencia a tracción en secciones con agujeros para tornillos

(1) La resistencia a tracción de una sección transversal debería tomarse como el menor valor de la resistencia plástica de la sección transversal bruta $N_{pl,Rd}$ y la resistencia última de la sección transversal neta $N_{u,Rd}$.

(2) La resistencia plástica de la sección transversal bruta debería determinarse utilizando:

$$N_{pl,Rd} = A\, f_y / \gamma_{M0} \qquad (5.4)$$

(3) La resistencia última de la sección transversal neta debería determinarse utilizando:

$$N_{u,Rd} = k_r\, A_{net}\, f_u / \gamma_{M2} \qquad (5.5)$$

con:

$k_r = (1 + 3\, r\, (d_o / u - 0{,}3))$ siendo $k_r \leq 1$

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

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

donde:

A_{net} es el área de la sección transversal neta

d_o es el diámetro nominal del agujero del tornillo

e_2 es la distancia del centro del agujero del tornillo al borde adyacente, en la dirección perpendicular a la dirección de la carga transmitida

p_2 es la distancia entre centros de agujeros de tornillos, medida en la dirección perpendicular a la dirección de la carga transmitida.

5.4 Resistencia a pandeo de elementos

5.4.1 Generalidades

(1) Se deberían aplicar a los aceros inoxidables las especificaciones relativas al pandeo por flexión, el pandeo lateral, el pandeo por torsión, el pandeo por torsión y flexión y el pandeo por distorsión recogidas en el Anejo 22 del Código Estructural, excepto en el caso en que los apartados 5.4.2 o 5.4.3 las modifiquen o complementen.

NOTA: El apartado 6.3.2.3 del Anejo 22 del Código Estructural no es aplicable al acero inoxidable.

(2) Los esfuerzos deberían contemplarse en las fórmulas del Anejo 22 del Código Estructural en valor absoluto. χ_{min} es el menor de los valores entre χ_y, χ_z, χ_T y χ_{TF}, donde χ_y y χ_z se calculan para pandeo por flexión, χ_T se calcula para pandeo por torsión y χ_{TF} se calcula para pandeo por torsión y flexión.

5.4.2 Elementos uniformes en compresión

5.4.2.1 Curvas de pandeo

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

$$\chi = \frac{1}{\phi + \left[\phi^2 - \bar{\lambda}^2\right]^{0,5}} \leq 1 \qquad (5.6)$$

siendo $\phi = 0{,}5\left(1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0\right) + \bar{\lambda}^2\right)$ (5.7)

donde $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$ para secciones transversales de clases 1, 2 y 3 (5.8)

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff}\, f_y}{N_{cr}}}$ para secciones transversales de clase 4 (5.9)

α es un coeficiente de imperfección

N_{cr} es el esfuerzo axil crítico elástico para el modo de pandeo considerado, obtenido en base a las propiedades de la sección transversal bruta

$\bar{\lambda}_0$ esbeltez límite.

(2) Los valores de α y $\bar{\lambda}_0$ para cada una de las curvas de pandeo consideradas deberían obtenerse de la tabla A24.5.3. Las curvas de pandeo de la tabla A24.5.3 no aplican para secciones huecas sometidas a un proceso de recocido después de su fabricación.

(3) Para una esbeltez $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$ o para $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq \bar{\lambda}_0^2$ los efectos del pandeo pueden ignorarse y solo aplican las comprobaciones de la resistencia de la sección transversal.

Tabla A24.5.3 Valores de α y $\bar{\lambda}_0$ para pandeo por flexión, pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión

Modo de pandeo	Tipo de elemento	α	$\bar{\lambda}_0$
Por 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
Por torsión y por torsión y flexión	Todos los elementos	0,34	0,20

5.4.3 Elementos uniformes sometidos a flexión

5.4.3.1 Curvas de pandeo lateral

(1) Para elementos de sección transversal constante sometidos a flexión, el valor de χ_{LT}, para la esbeltez adimensional apropiada, $\bar{\lambda}_{LT}$ debería determinarse mediante:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \qquad (5.10)$$

donde:

$$\phi_{LT} = 0,5\left(1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0,4\right) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right) \qquad (5.11)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \qquad (5.12)$$

α_{LT} es el coeficiente 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.

(2) Para esbelteces $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$ o para $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$ los efectos del pandeo lateral pueden ignorarse y solo aplican las comprobaciones de la resistencia de la sección transversal.

5.5 Elementos uniformes sometidos a compresión y flexión

(1) Los elementos sometidos a compresión y flexión deberían satisfacer:

Compresión y momento flector alrededor del eje fuerte:

Para evitar el pandeo alrededor del eje fuerte:

$$\frac{N_{Ed}}{\left(N_{b,Rd}\right)_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}\, e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y}\ f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \qquad (5.13)$$

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

$$\frac{N_{Ed}}{\left(N_{b,Rd}\right)_{min1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}\, e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \qquad (5.14)$$

Compresión y momento flector alrededor del eje débil:

Para evitar el pandeo alrededor del eje débil:

$$\frac{N_{Ed}}{\left(N_{b,Rd}\right)_{min}} + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed}\, e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z}\ f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \qquad (5.15)$$

Compresión y flexión esviada:

Todos los elementos deberían satisfacer:

$$\frac{N_{Ed}}{\left(N_{b,Rd}\right)_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}\, e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y}\ f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed}\, e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z}\ f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \qquad (5.16)$$

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

$$\frac{N_{Ed}}{\left(N_{b,Rd}\right)_{min1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}\, e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed}\, e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z}\ f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \qquad (5.17)$$

En las expresiones anteriores:

e_{Ny} y e_{Nz} son los desplazamientos de los ejes neutros 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 axil de compresión y de los máximos momentos flectores alrededor de los ejes *y-y* y *z-z*, respectivamente, a lo largo de todo el elemento

$(N_{b,Rd})_{min}$ 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

$(N_{b,Rd})_{min\ 1}$ 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

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

β_W = 1,0 para secciones transversales de clases 1 o 2

β_W = W_{el}/W_{pl} para secciones transversales de clase 3

β_W = W_{eff}/W_{pl} para secciones transversales de clase 4

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

$M_{b,Rd}$ es la resistencia a pandeo lateral

k_y, k_z, k_{LT} son los coeficientes de interacción que adoptan los siguientes valores:

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

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

k_{LT} = 1,0

5.6 Resistencia a cortante

(1) La resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$ debería tomarse como la menor entre la resistencia a la abolladura por cortante $V_{b,Rd}$ de acuerdo con el punto (1) del apartado 5.2 del Anejo 25 del Código Estructural, modificado por los puntos (3) y (4), y la resistencia plástica a cortante $V_{pl,Rd}$ de acuerdo con el punto (2) del apartado 6.2.6 del Anejo 22 del Código Estructural.

(2) Las chapas con h_w/t mayor que $\frac{52}{\eta}\varepsilon$ para almas no rigidizadas o que $\frac{23}{\eta}\varepsilon\sqrt{k_\tau}$ para almas rigidizadas deberían comprobarse frente a la abolladura por cortante y deberían disponerse rigidizadores transversales en las secciones de apoyo.

donde:

h_w es la altura de alma entre alas, véase la figura A25.5.1 del Anejo 25 del Código Estructural

ε se define en la tabla A24.5.2

k_τ se define en el apartado 5.3 del Anejo 25 del Código Estructural

η=1,20

(3) Para almas con rigidizadores transversales únicamente en secciones de apoyo, y para almas con rigidizadores transversales intermedios o con rigidizadores longitudinales o con ambos, el factor χ_w para la contribución del alma a la resistencia a la abolladura por cortante debería obtenerse como sigue:

$$\chi_w = \eta \quad \text{para} \quad \bar{\lambda}_w \le \frac{0,6}{\eta} \qquad (5.18)$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^{\,2}} \quad \text{para} \quad \bar{\lambda}_w > \frac{0,6}{\eta} \qquad (5.19)$$

donde $\bar{\lambda}_w$ se da en los puntos (3), (4) y (5) del apartado 5.3 del Anejo 25 del Código Estructural.

(4) Si la resistencia del ala no se emplea totalmente en resistir el momento flector de cálculo, es decir $M_{Ed} < M_{f,Rd}$, entonces en la resistencia a la abolladura por cortante puede incluirse un coeficiente χ_f que representa la contribución de las alas. El coeficiente χ_f se da en el punto (1) apartado 5.4 del Anejo 25 del Código Estructural, pero con el valor de *c* que se presenta a continuación:

$$c = \left[0{,}17 + \frac{3{,}5\, b_f\, t_f^2\, f_{yf}}{t_w\, h_w^2\, f_{yw}} \right] a \text{ y } \frac{c'}{a} \leq 0{,}65 \qquad (5.20)$$

5.7 Rigidizadores transversales de alma

(1) Las especificaciones del apartado 9.3 del Anejo 25 del Código Estructural aplican, con las indicaciones adicionales de puntos (2) y (3).

(2) La resistencia a pandeo fuera del plano $N_{b,Rd}$ del rigidizador debería determinarse a partir de lo indicado en el apartado 5.4.2, utilizando α = 0,49 y $\bar{\lambda}_0$ = 0,2. La longitud de pandeo *l* del rigidizador debería adecuarse a las condiciones de coacción, siendo no menor que 0,75 h_w, cuando ambos extremos estén fijos lateralmente. Para condiciones que supongan un menor grado de coacción en el extremo deberían tomarse valores de *l* mayores. Si el rigidizador tiene un recorte en el extremo cargado, se debería comprobar su resistencia transversal, en ese extremo cargado, considerando el área neta.

(3) Para la comprobación a pandeo, el área de la sección transversal de un rigidizador debería incluir el propio rigidizador más una anchura de alma de 11 εt_w a cada lado del rigidizador. En los extremos del elemento (o bien en zonas con aberturas en el alma), la anchura de alma a considerar debería ser la menor entre 11 εt_w o la anchura existente.

6 DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES

6.1 Generalidades

(1) Las especificaciones dadas del Anejo 26 del Código Estructural deberían aplicarse para aceros inoxidables, excepto cuando sean modificadas o sustituidas por especificaciones dadas en los apartados 6.2 y 6.3.

NOTA: En el Apéndice A se ofrece información relativa a la durabilidad. La información sobre la fabricación de uniones se da en la norma UNE-EN 1090-2.

6.2 Uniones atornilladas

(1) La resistencia al aplastamiento debería calcularse sustituyendo f_u por un valor reducido $f_{u,red}$, calculado según:

$$f_{u,red} = 0{,}5\, f_y + 0{,}6\, f_u \text{ siendo} \leq f_u \qquad (6.1)$$

(2) Los tornillos de acero inoxidable para las clases 50, 70 y 80 según la serie de normas UNE-EN ISO 3506 trabajando a cortante deberían estudiarse como tornillos de clases 4.6, 5.6 y 8.8.

(3) La resistencia a cortante de un tornillo, $F_{v,Rd}$ debería calcularse mediante la siguiente expresión:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha\, f_{ub}\, A}{\gamma_{M2}} \qquad (6.2)$$

donde:

A es el área de la sección transversal bruta del tornillo (si el plano de cortante no pasa por la zona roscada del tornillo); o el área resistente a tracción del tornillo (si el plano de cortante pasa por la zona roscada del tornillo)

f_{ub} es la resistencia última a tracción del tornillo, véase la tabla A24.2.2

α adopta los siguientes valores:

- si el plano de cortante no pasa por la zona roscada del tornillo, α = 0,6

- si el plano de cortante pasa por la zona roscada del tornillo, α = 0,5.

6.3 Dimensionamiento de soldaduras

(1) Para determinar la resistencia de cálculo de soldaduras de ángulo, el valor del coeficiente de correlación β_W debería tomarse como 1,0 para todas las resistencias nominales de acero inoxidable a menos que pueda justificarse un valor más bajo mediante ensayos de acuerdo con el apartado 7.

7 CÁLCULO ASISTIDO POR ENSAYOS

(1) Para aceros inoxidables se aplica el apartado 5.2, el Apéndice D del Anejo 18 del Código Estructural.

(2) Los prototipos para los ensayos deberían fabricarse de la misma manera que los componentes del producto final, para que reflejen los mismos niveles de endurecimiento por trabajado.

(3) Debido a que el acero inoxidable puede presentar anisotropía, las probetas deberían extraerse de la placa o lámina en la misma orientación (es decir, transversal o paralela a la dirección de laminado) que vaya a utilizarse para la estructura final. Si se desconoce la orientación final o no puede garantizarse, deberían realizarse ensayos para ambas orientaciones y adoptar el resultado menos favorable.

8 FATIGA

(1) Para determinar la resistencia a la fatiga de estructuras de acero inoxidable, debería hacerse referencia al Anejo 27 del Código Estructural.

9 RESISTENCIA FRENTE AL FUEGO

(1) Para el proyecto de estructuras frente a incendio, deberían utilizarse las propiedades del material a temperaturas elevadas del Apéndice C del Anejo 23 del Código Estructural.

APÉNDICE A. Recomendaciones sobre durabilidad

A.1 Introducción

(1) La principal diferencia entre la utilización de aceros inoxidables y aceros al carbono es que:

- para aceros al carbono, la protección frente a los efectos ambientales y, por tanto, la vida útil pueden tratarse separadamente del proyecto estructural;
- para aceros inoxidables la vida útil no viene determinada por los tratamientos de protección posteriores, sino por la selección inicial de los materiales, el proceso de cálculo, los procedimientos de fabricación y por su adecuación a las condiciones ambientales.

(2) Para llevar a cabo una elección bien fundada de un grado apropiado de acero inoxidable, para una aplicación particular o para aplicar correctamente las recomendaciones disponibles de buena práctica constructiva para evitar la corrosión, es importante tener algún conocimiento de los mecanismos de corrosión en acero inoxidable.

(3) Todos los metales estructurales habituales forman películas de óxido en superficie cuando se exponen al aire seco. El óxido formado en la mayoría de los aceros al carbono se descompone fácilmente, y en presencia de humedad no es reparable. Por consiguiente, puede tener lugar una reacción química entre el acero, la humedad y oxígeno para formar óxido. Excepto en aceros resistentes a la corrosión atmosférica, este óxido no protege y no impide el proceso de corrosión.

(4) También se forma un óxido en acero inoxidable. Dicho óxido es rico en cromo y es estable, no poroso y fuertemente adherente al metal. Sin embargo, a diferencia del formado sobre aceros al carbono si éste se estropea (por una rayada o un corte) es capaz de auto repararse inmediatamente en presencia de aire o de un ambiente oxidante. Es también altamente resistente a ataque químico. Por esta razón se conoce como “capa pasivante”. Aunque esta capa es muy delgada (alrededor de 5×10^{-6} mm) le da al acero inoxidable unas propiedades de alta resistencia a la corrosión, impidiendo que el acero reaccione con la atmósfera.

(5) El comportamiento de la capa pasivante depende de la composición del acero, su tratamiento superficial y la naturaleza corrosiva de su ambiente. La estabilidad de la capa aumenta con el contenido de cromo. La mayoría de los aceros inoxidables que se utilizan en construcción contienen alrededor de un 18% de cromo y un 10% de níquel. Algunos aceros inoxidables también contienen molibdeno para mejorar aún más su resistencia a la corrosión.

(6) Este concepto de formación de la capa pasivante es importante porque cualquier situación que impida la formación de la capa, o cause su rotura, llevará también a una pérdida de la resistencia a la corrosión. Por consiguiente, la corrosión del acero inoxidable se produce si la capa pasivante se daña o no se permite que se vuelva a formar.

(7) 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 aleados, lo cual significa que cada grado de acero tiene una respuesta ligeramente diferente cuando se expone a un ambiente corrosivo. Así pues, es necesario seleccionar cuidadosamente el grado de acero inoxidable más apropiado para una determinada aplicación.

(8) Las posibles razones por las que un grado particular de metal inoxidable 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 una contaminación no prevista por iones cloruro);

b) la introducción de un estado no previsto en la valoración inicial, por la forma en que se ha trabajado o tratado el acero inoxidable.

(9) Aunque los aceros inoxidables pueden estar sujetos a decoloración y manchas (a menudo debido a

la contaminación por acero al carbono), presentan excelentes características de durabilidad en edificios. En ambientes agresivos industriales y marinos, los ensayos han mostrado que no hay indicios de reducción en su resistencia, incluso cuando ha aparecido una pequeña cantidad de pérdida de peso. Sin embargo, el usuario puede considerar la aparición de manchas antiestéticas de óxido en superficies externas como un fallo. La experiencia señala que cualquier problema serio de corrosión aparece con mayor probabilidad durante los dos o tres primeros años de servicio.

(10) En ciertos ambientes agresivos, algunos grados de acero inoxidable serán susceptibles a ataques de carácter localizado. En el apartado A.2 se describen seis posibles mecanismos de corrosión, aunque solamente la corrosión por picaduras, la corrosión en hendiduras y la corrosión bimetálica suelen encontrarse en edificación.

A.2 Tipos de corrosión

A.2.1 Corrosión por picaduras

(1) La corrosión por picaduras es un tipo de corrosión localizada que puede producirse en determinados ambientes, especialmente en aquellos que contengan iones cloruro. La corrosión por picaduras se produce porque los iones cloruro penetran la capa pasivante en los puntos más débiles. Esto hace que se forme un elemento local con el área penetrada actuando como ánodo y la capa pasivante que rodea actuando como cátodo. Dado que el área del ánodo es menor que la del cátodo, la densidad llega a ser muy alta y por consiguiente ello hace que sea alta la velocidad de corrosión sobre la superficie del ánodo.

(2) En la mayoría de aplicaciones estructurales, la corrosión por picaduras no es muy grande y puede aceptarse, ya que la reducción de sección en el elemento es prácticamente despreciable. Sin embargo, los productos corrosivos pueden manchar los rasgos arquitectónicos. En estructuras de servicios tales como canalizaciones, tuberías y contenedores la tolerancia respecto a la corrosión por picaduras debería ser menor. Si existe un riesgo conocido de corrosión por picadura debería seleccionarse un grado adecuado de acero inoxidable, que generalmente tendrá un contenido más elevado de aleación que incluya adiciones de molibdeno.

A.2.2 Corrosión en hendiduras

(1) La corrosión en hendiduras es un tipo de corrosión localizada que se inicia a causa de los diferentes niveles de oxígeno entre las hendiduras y las zonas expuestas. No suele ser muy problemática excepto en soluciones estancas en las que puede producirse una concentración de cloruros. La severidad de la corrosión en hendiduras depende, en gran medida, de su geometría: cuanto más estrecha y profunda sea la hendidura más severa será la corrosión.

(2) Las hendiduras suelen producirse habitualmente entre las arandelas y las tuercas o alrededor de la zona roscada o la espiga de un tornillo. También pueden aparecer hendiduras en las soldaduras con falta de penetración y bajo depósitos en la superficie del acero. En principio, la corrosión por picaduras y la corrosión en hendiduras son fenómenos similares, pero los ataques por corrosión empiezan más fácilmente en una hendidura que en una superficie libre.

A.2.3 Corrosión bimetálica

(1) La corrosión bimetálica suele ocurrir cuando hay diferentes metales en contacto eléctrico por medio de un electrolito, incluyendo el agua de lluvia, la condensación etc. Si fluye una corriente eléctrica entre ambos el metal menos noble (el ánodo) corroe a una velocidad más rápida que la que habría ocurrido si los metales no estuvieran en contacto.

(2) La velocidad de corrosión depende también de las áreas relativas de los metales en contacto, de la temperatura y de la composición del electrolito. En particular, cuanto mayor sea el área del cátodo en relación con la del ánodo, mayor es la velocidad del ataque. Las relaciones de área perjudiciales se suelen producir en los elementos de fijación y las uniones.

(3) El empleo de tornillos de acero al carbono en elementos de acero inoxidable debería evitarse ya que la relación entre las áreas de acero inoxidable y de acero al carbono es grande y los tornillos estarán sometidos 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 ambientes similares ya que diferentes metales pueden trabajar a menudo conjuntamente de manera segura bajo condiciones de condensación o humedad ocasional sin efectos adversos, especialmente cuando la conductividad del electrolito es baja.

(4) 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 ignora la presencia de películas superficiales de óxido y los efectos de las relaciones de áreas y las diferencias en la química de los electrolitos. Como resultado de ello, el empleo no bien fundado de estas tablas puede llevar a resultados erróneos. Por consiguiente, dichas tablas deberían utilizarse de manera cuidadosa y solamente para evaluaciones iniciales.

(5) Los aceros inoxidables austeníticos forman generalmente el cátodo en un enlace bimetálico y, por ello, no sufren corrosión. El contacto con cobre es una excepción a lo anterior y debería en general evitarse, excepto en condiciones favorables. El contacto entre aceros inoxidables austeníticos y cinc 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 podría considerarse antiestético.

(6) La corrosión bimetálica puede prevenirse evitando el contacto con el agua en el lugar de contacto entre los dos metales (por ejemplo pintando o poniendo una cinta adhesiva sobre la unión) o, preferentemente, aislando eléctricamente los dos metales (por ejemplo pintando las superficies de contacto de los diferentes metales). Las uniones atornilladas pueden aislarse con plásticos no conductivos o con juntas de goma y arandelas y forros de nilón o de teflón. Este sistema consume tiempo al realizarlo en obra. Además no es normalmente factible estipular el nivel necesario de zonas de inspección para comprobar que todas las arandelas y forros han sido instalados correctamente.

A.2.4 Fisuración por corrosión bajo tensión

(1) El desarrollo de la corrosión bajo tensión requiere la presencia 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 el límite elástico del material. Dichas tensiones podrían ser debidas a cargas o a tensiones residuales de los procesos de fabricación tales como la soldadura o el conformado. Debería prestarse atención al empleo de elementos estructurales de acero inoxidable con tensiones residuales elevadas (como las ocasionadas por el trabajado en frío) en ambientes ricos en cloruros tales como piscinas o estructuras marinas o marítimas, incluyendo plataformas *offshore* (véase punto (10) del apartado A.4.1).

(2) La probabilidad de la fisuración por corrosión bajo tensión aumenta con el incremento de la tensión de tracción y con el incremento de la temperatura. En aceros inoxidables austeníticos cromo-níquel, el níquel es el elemento de aleación que reduce de manera más contundente la sensibilidad a la fisuración por corrosión bajo tensión.

A.2.5 Corrosión generalizada

(1) La corrosión generalizada es mucho menos severa en aceros inoxidables que en otros grados de acero.

(2) Este tipo de corrosión no es un problema en los grados de acero inoxidable utilizados habitualmente en edificación convencional. Pueden consultarse tablas en los prospectos de los fabricantes; como alternativa debería solicitarse consejo a un ingeniero especialista en corrosión, especialmente si el acero inoxidable va a estar en contacto con sustancias químicas.

A.2.6 Ataque intergranular y degradación por soldadura

(1) Cuando los aceros inoxidables se someten a prolongados períodos de calentamiento a temperaturas entre 450 ºC y 850 ºC, el carbono presente en el acero es arrastrado hacia los bordes del grano precipitando como carburo de cromo. Ello hace que el cromo desparezca de la microestructura y produce un bajo contenido en cromo alrededor borde del grano. En estas condiciones se dice que el acero queda “sensitizado”.

(2) Los bordes del grano se convierten en un objetivo preferente en una exposición posterior a un ambiente corrosivo. Cuando este fenómeno se produce en una zona afectada por el calor de una soldadura se conoce como “degradación por soldadura”.

(3) 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 compuestos estables, reduciéndose de este modo el riesgo de formación de carburo de cromo;
- utilizar tratamientos térmicos, sin embargo este método es raramente empleado en la práctica.

(4) Los grados con bajo contenido en carbono (alrededor del 0,03%) no sufren corrosión intergranular en el área soldada después de los procesos de soldadura apropiados.

A.3 Niveles de riesgo

(1) El nivel de riesgo depende de los materiales, la configuración y las condiciones ambientales. Puede distinguirse entre tres niveles de riesgo tal como sigue:

- Nivel 1 de riesgo: Durante una vida útil de 50 años, solamente se produce un ataque al acabado superficial (micro-picaduras). El mantenimiento no es necesario para la integridad estructural, pero podría requerirse para mantener la apariencia original. La mayoría de los aceros inoxidables comunes cumplirán con este requisito para condiciones de corrosión atmosférica suaves o moderadamente agresivas.
- Nivel 2 de riesgo: Riesgo de ataque por corrosión por picaduras o corrosión en hendiduras, causando pérdida de sección o penetración, que podría requerir inspección o reparación por razones de agotamiento estructural o pérdida de estanqueidad durante una vida útil de 50 años. Ello es pertinente para una exposición atmosférica que incluya atmósferas contaminadas químicamente de ambientes marinos y ambientes industriales pesados, o para aquellos edificios interiores asociados con determinados procesos y operaciones.
- Nivel 3 de riesgo: Riesgo de ataque localizado por sustancias agresivas (por ejemplo depósitos de ácido clorhídrico o cinc líquido) que pueden causar pérdida de integridad estructural a través de los mecanismos de fisuración localizada (por ejemplo fisuración por corrosión bajo tensión o corrosión intergranular). La vida de proyecto y las frecuencias de inspección se determinan por la combinación de la selección de los materiales y la severidad y probabilidad de exposición a sustancias agresivas. Ello es pertinente para exposiciones en ambientes específicos tales como los que se encuentran sobre determinadas piscinas cerradas, donde pueden generarse depósitos agresivos con concentraciones altas de cloruros. También se aplica si hay un riesgo de incendio en estructuras que contienen componentes galvanizados o componentes metálicos con baño de cinc. En caso de incendio el cinc líquido no debería gotear sobre el acero inoxidable.

(2) Aunque pueda ofrecerse una guía general sobre la elección de materiales para los niveles de riesgo 1 y 2, en el caso del nivel 3 es esencial buscar el asesoramiento de un experto.

A.4 Selección de materiales

A.4.1 Generalidades

(1) La selección del grado más adecuado de acero inoxidable debería tener en cuenta el ambiente de la aplicación, el proceso de fabricación, la capacidad para trabajar el material, el acabado superficial y el mantenimiento de la estructura. Aunque los aceros inoxidables tienen requisitos de mantenimiento bajos, cuando se seleccione un material para su empleo en un ambiente corrosivo es necesario llevar a cabo un estudio detallado en proyecto para su resistencia a corrosión.

(2) Debería hacerse especial hincapié, a lo largo de la vida útil de la estructura, sobre los siguientes riesgos:

- fisuración por corrosión bajo tensión;
- corrosión en hendiduras;
- corrosión galvánica;
- picaduras;
- manchas;
- pérdida de espesor.

(3) El primer paso es caracterizar el ambiente de servicio. La capacidad de corrosión de un determinado ambiente está gobernada por un número de variables tales como la humedad, la temperatura del aire, la presencia de sustancias químicas y su concentración, el contenido en oxígeno, etc. No puede producirse corrosión si no hay presencia de humedad. Por ejemplo, los edificios climatizados y ventilados pueden clasificarse como secos, y es improbable que la corrosión ocurra en estos ambientes. El riesgo de condensación es mayor en áreas tales como cocinas y lavanderías. Las zonas costeras son muy corrosivas debido a la presencia de altas concentraciones de iones cloruro en el aire, por tanto las estructuras expuestas al aire marino son particularmente propensas al ataque por corrosión.

(4) Una vez caracterizado el ambiente general, es necesario tener en cuenta el efecto de los alrededores inmediatos del acero inoxidable (por ejemplo, elementos y sustancias con los que es probable que entre en contacto el material). La condición de la superficie, la temperatura del acero y la tensión de servicio pueden ser también parámetros importantes.

(5) Deberían considerarse entonces las propiedades mecánicas y la influencia del tipo de carga, incluyendo las cargas de servicio, cargas cíclicas, vibraciones, la acción sísmica y otras. Podría ser necesario cuantificar los efectos de los ciclos de calentamiento y enfriamiento. También es necesario considerar en la selección final la facilidad de fabricación, la disponibilidad de formas de productos, los acabados superficiales y los costes.

(6) Para evaluar la idoneidad de los grados es bueno referirse a la experiencia de aceros inoxidables en aplicaciones y ambientes similares. Para condiciones atmosféricas, la tabla A24.A.1 da pautas para la selección de los grados adecuados desde el punto de vista de la corrosión.

(7) Además de la clasificación de los aceros inoxidables según sus condiciones atmosféricas, tal y como se presenta en la tabla A24.A.1, es también necesario hacer distinción entre:

- aplicaciones con acabado superficial: en las que la principal consideración para la elección del material es mantener la apariencia durante la vida del producto [en este caso es necesario distinguir entre aplicaciones interiores o exteriores];
- aplicaciones estructurales**:** en las que las propiedades mecánicas son la principal consideración.

(8) En el caso de aplicaciones con acabado superficial, es necesario no solo tener en cuenta la

atmósfera ambiental, sino también la ubicación de las piezas y la posibilidad de limpieza natural mediante agentes meteorológicos. Si las piezas están ubicadas bajo cobijo (tal como cubiertas) tienen que limpiarse más a menudo.

(9) En el caso de aplicaciones estructurales en las que las propiedades mecánicas sean esenciales, la mayoría de las atmósferas naturales no tienen efectos perjudiciales sobre los aceros inoxidables.

(10) Ciertos aceros inoxidables son adecuados para muchas aplicaciones en piscinas interiores y exteriores. Para elementos con capacidad portante en atmósferas que contengan cloruros que no puedan limpiarse regularmente (por ejemplo en techos suspendidos sobre piscinas) deberían utilizarse los siguientes grados:

- Agua de piscina con un contenido $\leq$ 250 mg/l de iones cloruro: 1.4539, 1.4529, 1.4547, 1.4565.
- Agua de piscina con un contenido $>$ 250 mg/l de iones cloruro: 1.4529, 1.4547, 1.4565.

NOTA: Pueden utilizarse también otros grados alternativos que muestren tener resistencias equivalentes a la fisuración por corrosión bajo tensión en este tipo de atmósferas.

(11) Debería solicitarse siempre consejo de un experto para aplicaciones más especiales, tales como acero inoxidable en contacto con, o inmerso en, sustancias químicas.

Tabla A24.A.1 Grados recomendados de acero inoxidable para condiciones atmosféricas

Grado de acero según la serie de normas UNE-EN 10088	Tipo de ambiente y categoría de corrosión											
	Rural			Urbano			Industrial			Marino		
	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
1.4003 1.4016	Y[I]	X	X	Y[I]	X	X	X	X	X	X	X	X
1.4301 1.4311 1.4541 1.4318	Y	Y	Y	Y	Y	(Y)	(Y)	(Y)	X	Y	(Y)	X
1.4362 1.4401 1.4404 1.4406 1.4571	O	O	O	O	Y	Y	Y	Y	(Y)	Y	Y	(Y)
1.4439 1.4462 1.4529 1.4539	O	O	O	O	O	O	O	O	Y	O	O	Y

Condiciones de corrosión:

Baja: Condiciones de corrosión mínimas para el tipo de ambiente. Por ejemplo casos atenuados por una baja humedad o por bajas temperaturas.

Media: Condiciones consideradas típicas para el tipo de ambiente.

Alta: Corrosión susceptible de ser superior a la típica para el tipo de ambiente, incrementada, por ejemplo, por una humedad alta persistente, temperaturas elevadas, o agentes contaminantes de aire particularmente agresivos.

Clave:

O Potencialmente sobreestimado desde el punto de vista de resistencia a la corrosión.

Y Probablemente la mejor elección entre resistencia a corrosión y coste.

Y[I] Solamente para aplicaciones interiores. Debería evitarse el empleo de aceros inoxidables ferríticos en aplicaciones con acabado superficial.

X Susceptible de sufrir una corrosión excesiva.

(Y) Se puede considerar siempre que se tomen las precauciones adecuadas (es decir, se especifique una superficie relativamente lisa y se realice regularmente un lavado).

A.4.2 Tornillos

(1) Según la norma UNE-EN ISO 3506-1, para material de tornillos:

- A2 es equivalente en términos de su resistencia a la corrosión a 1.4301;
- A3 es equivalente en términos de su resistencia a la corrosión a 1.4541;
- A4 es equivalente en términos de su resistencia a la corrosión a 1.4401 y 1.4404;
- A5 es equivalente en términos de su resistencia a la corrosión a 1.4571.

El grado A1 es de menor resistencia a la corrosión y no debería utilizarse para tornillos.

(2) En el caso de grados de acero 1.4439, 1.4539, 1.4529 y 1.4462, deberían utilizarse tornillos de uno de estos grados de acero para alcanzar la misma resistencia a la corrosión.

(3) Se debería tener cuidado al utilizar aceros inoxidables para fijaciones no mecanizadas. La adición de sulfuro en la composición de estos aceros (como el grado austenítico 1.4305) les hace más susceptibles a la corrosión, especialmente en ambientes industriales y marinos.

A.5 Diseño para el control de la corrosión

(1) La medida más importante para evitar los problemas de corrosión es seleccionar un grado adecuado de acero inoxidable con los procedimientos de fabricación idóneos para el ambiente previsto. Sin embargo, incluso tras la especificación de un determinado acero, es necesario plantear cuidadosamente los detalles constructivos adecuados para alcanzar toda su potencial resistencia a la corrosión.

(2) En lista de comprobaciones que se presenta a continuación, algunos puntos podrían no dar lugar al mejor detalle constructivo desde el punto de vista de la resistencia estructural, y algunos otros no están concebidos para su uso en todo tipo de ambientes. En particular, muchos de ellos no serían necesarios en ambientes poco corrosivos o en las que se efectúa un mantenimiento con regularidad.

(3) Debería alcanzarse un equilibrio entre el empleo de soldadura y tornillos para asegurar un comportamiento óptimo frente a la corrosión con una distorsión por soldadura mínima. Deberían considerarse los siguientes puntos:

a) Prevención de la acumulación de suciedad, véase la figura A24.A.1:
   - orientando los angulares y los perfiles en U para minimizar la retención de suciedad,
   - proyectando bajantes con un tamaño suficiente para que evite su obturación,
   - evitando superficies horizontales,
   - dando una pequeña pendiente a las cartelas que nominalmente queden en un plano horizontal,
   - empleando secciones circulares huecas (tubulares) y barras [tubos sellados con gas seco o aire cuando hay riesgo de formación de condensaciones perjudiciales],
   - especificando acabados lisos ($R_a \leq 0{,}5$ μm es un valor adecuado para aplicaciones exteriores).

b) Prevención de las hendiduras, véase la figura A24.A.2:
   - empleando uniones soldadas antes que uniones atornilladas,
   - empleando soldaduras de cierre o rellenándolas con material inerte,
   - preferiblemente, perfilando o preparando las soldaduras,
   - prevención de incrustaciones biológicas [se destaca que la cloración del agua puede causar picadura].

c) Reducción de la posibilidad de fisuración por corrosión bajo tensión en aquellos ambientes específicos en los que se pueda producir:

- minimizando las tensiones de fabricación mediante una cuidadosa elección de la secuencia de soldadura,
- *shot peening* [no utilizar granalla de hierro o acero].

d) Las soldaduras deberían limpiarse siempre para restablecer la resistencia a la corrosión. La posibilidad de la corrosión por picaduras se reduce:

- eliminando las salpicaduras de la soldadura,
- limpiando con un cepillo de hilos de acero inoxidable o decapando el acero inoxidable para eliminar los productos de soldadura no deseados [deberían eliminarse los reactivos fuertemente oxidantes con contenidos de cloruros tales como el cloruro férrico. Si no, debería utilizarse un baño o una pasta de decapado conteniendo ambos una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico. Después del decapado debería llevarse a cabo un lavado con agua],
- evitando la captación de partículas de acero al carbono [por ejemplo utilizar áreas de trabajo y herramientas que estén dedicadas al acero inoxidable],
- siguiendo un programa de mantenimiento adecuado.

e) Reducción de la posibilidad de la corrosión bimetálica mediante:

- aislamiento eléctrico;
- empleando pinturas de modo apropiado;
- minimizando los períodos húmedos.

f) Reducción de la posibilidad del ataque por cinc fundido con el fin de evitar la fragilización espontánea.

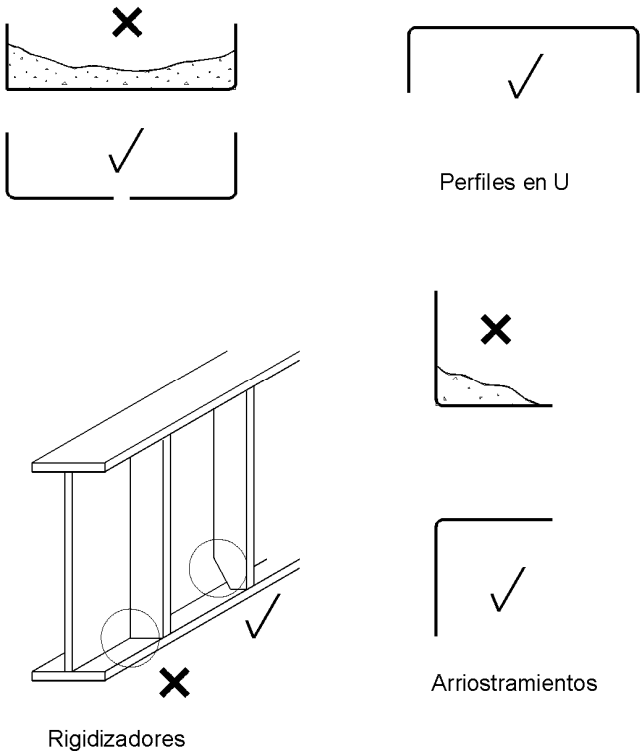


Figura A24.A.1 Prevención de la acumulación de suciedad

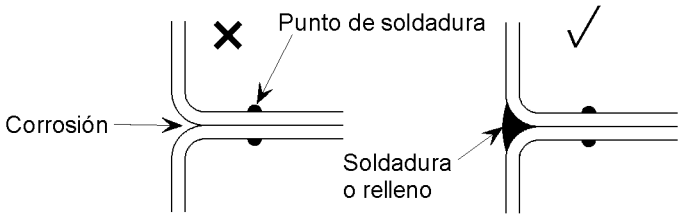


Figura A24.A.2 Prevención de las hendiduras

A.6 Uniones

A.6.1 Generalidades

(1) El dimensionamiento de uniones requiere un cuidado especial para mantener una resistencia a la corrosión óptima.

(2) Esto es especialmente cierto en aquellas uniones que pueden humedecerse por las condiciones meteorológicas, inmersión, condensación o por otras causas. Debería estudiarse la ubicación de las uniones de manera que estuvieran lejos de la fuente de humedad, para evitar o reducir los problemas de corrosión asociados. Como alternativa, 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 dentro de la estructura se sitúe por encima de la temperatura de rocío.

(3) Si no es factible evitar que se humedezca una conexión en la que estén presentes acero al carbono y acero inoxidable, debería considerarse la posibilidad de evitar la corrosión galvánica.

(4) Las cargas y los efectos de la corrosión en condiciones de servicio deberían determinarse y registrarse tan completa y exactamente como sea posible.

A.6.2 Uniones atornilladas

(1) Debería evitarse siempre el empleo de tornillos de acero al carbono con elementos estructurales de acero inoxidable. En uniones atornilladas que pudieran presentar un nivel inaceptable de corrosión, se debería aislar eléctricamente el acero al carbono de los elementos de acero inoxidable. Esto generalmente conlleva el empleo de arandelas aislantes y posiblemente forros no metálicos. En la figura A24.A.3 se presenta un detalle típico adecuado. El material utilizado para el aislamiento debería ser suficientemente robusto para evitar que el acero al carbono y el acero inoxidable entren en contacto en servicio.

(2) Para evitar la corrosión en hendiduras en las uniones atornilladas se debería tener cuidado al seleccionar los materiales adecuados para el ambiente que se prevea.

(3) Los tornillos deberían ser como mínimo tan resistentes a la corrosión a largo plazo en condiciones de servicio como las partes a unir.

(4) Todas las uniones atornilladas deberían ser lisas y sin ningún hueco entre las partes unidas.

(5) Excepto en el caso de uniones en las que intervengan aceros al carbono e inoxidables, deberían evitarse capas intermedias que tengan que transmitir cargas en la unión.

(6) Deberían emplearse arandelas de diámetro mayor que las utilizadas para acero al carbono.

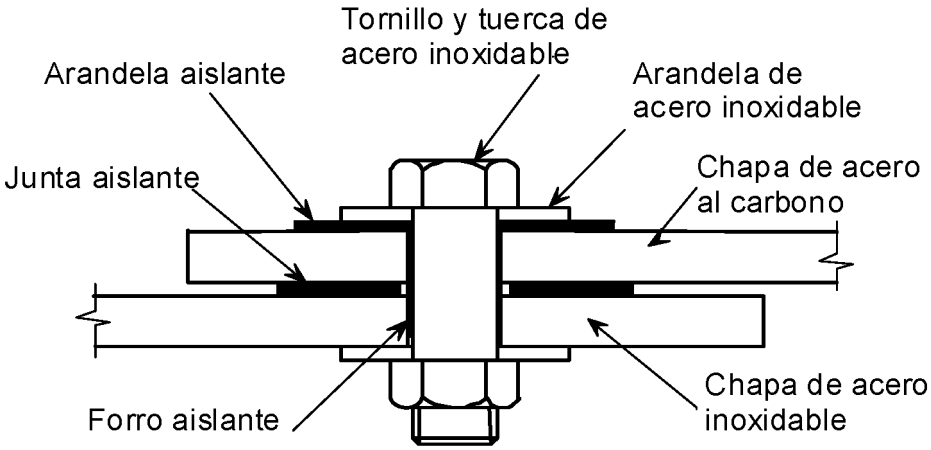


Figura A24.A.3 Prevención de la corrosión galvánica al conectar materiales distintos

A.6.3 Uniones soldadas

(1) Para uniones soldadas en que incluyan aceros al carbono e inoxidables se recomienda, en general, que cualquier sistema de pintura aplicado al acero al carbono se extienda sobre la soldadura y cubra un área del acero inoxidable si la unión está potencialmente sometida a corrosión.

(2) Las propiedades del metal de base podrían alterarse por la soldadura, reduciéndose de este modo la resistencia a la corrosión. Ello es conocido como degradación por soldadura. El ciclo de calentamiento y enfriamiento asociado a la soldadura afecta a la microestructura de todos los aceros inoxidables, aunque algunos se ven más afectados que otros. Esto es particularmente importante para materiales austenítico-ferríticos. Por tanto, es esencial emplear procedimientos de soldadura y consumibles adecuados y que la soldadura se ejecute por soldadores cualificados.

(3) No deberían emplearse soldaduras a tope con penetración parcial en ambientes fuertemente contaminados o en ambientes marinos agresivos. No deberían emplearse soldaduras intermitentes donde se pueda producir corrosión en hendiduras.

APÉNDICE B. Recomendaciones para el acero inoxidable en la condición de endurecido mecánico por trabajado

B.1 Generalidades

(1) Este apéndice proporciona reglas para el empleo del acero inoxidable en la condición de endurecido por trabajado tanto por laminado en frío como por el proceso de fabricación del elemento estructural, o una combinación de ambos.

(2) Las reglas son aplicables solamente si se mantienen las propiedades durante la fabricación y ejecución de la estructura y durante la vida útil de la misma. No deberían realizarse procesos de soldadura o tratamientos térmicos de los productos a menos que pueda demostrarse mediante ensayos, de acuerdo con el apartado 7, que la ejecución de la estructura no reducirá las propiedades mecánicas por debajo de los valores a adoptar.

B.2 Endurecimiento por trabajado por laminado en frío

(1) Para material suministrado en las condiciones de trabajado en frío especificadas en la serie de normas UNE-EN 10088, pueden adoptarse valores nominales más altos del límite elástico f_y y de la resistencia última a tracción f_u. La resistencia última dada en la serie de normas UNE-EN 10088 puede tomarse como la resistencia característica, véase la tabla A24.B.1. El límite elástico en la tabla A24.B.1 puede utilizarse como resistencia característica siempre que esté garantizado por el fabricante.

(2) Las reglas de cálculo dadas en esta norma son aplicables a materiales hasta los grados C700 y CP350. Para grados superiores, el cálculo debería realizarse mediante ensayos según el apartado 7, excepto cuando la resistencia de la sección transversal sin inestabilidad local o global pueda calcularse de acuerdo con el apartado 5 para secciones transversales de clases 1, 2 y 3.

Tabla A24.B.1 Valores nominales del límite elástico *f* y de la resistencia última a tracción f_u para aceros inoxidables estructurales trabajados en frío según la serie de normas UNE-EN 10088

Grado de acero inoxidable	**Límite elástico convencional correspondiente al 0,2% en la condición de trabajado en frío**	**f_y N/mm^2**	**Resistencia a tracción en la condición de trabajado en frío**	**f_u N/mm^2**
Aceros austeníticos	CP350	350	C700	700
	CP500	500	C850	850
	CP700	700	C1000	1000

B.3 Endurecimiento por trabajado por fabricación

(1) El endurecimiento por trabajado durante la fabricación de los componentes estructurales puede utilizarse en el cálculo siempre que el efecto del endurecimiento se haya verificado mediante ensayos a escala real de acuerdo con el apartado 7.

(2) Para el cálculo de uniones que no forman parte de los ensayos a escala real, deberían emplearse los valores nominales de la resistencia.

APÉNDICE C. Recomendaciones para la modelización del comportamiento del material

C.1 Generalidades

(1) Este apéndice proporciona una guía para realizar un modelo del comportamiento del material.

C.2 Propiedades del material

(1) En los cálculos mediante elementos finitos deberían utilizarse los valores característicos de las propiedades del material E, f_y y f_u. Las reglas para el cálculo mediante el método de los elementos finitos se dan en el Apéndice C informativo del Anejo 25 del Código Estructural.

(2) Dependiendo de la precisión requerida y de las deformaciones máximas alcanzadas, pueden utilizarse las siguientes aproximaciones para la modelización del comportamiento del material:

a) curva tensión-deformación con endurecimiento por deformación calculada del modo siguiente:

$$\varepsilon = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{E} + 0,002\left(\dfrac{\sigma}{f_y}\right)^n & \text{para} \quad \sigma \le f_y \\ 0,002 + \dfrac{f_y}{E} + \dfrac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u\left(\dfrac{\sigma - f_y}{f_u - f_y}\right)^m & \text{para} \quad f_y < \sigma \le f_u \end{cases} \qquad \text{(C.1)}$$

donde:

n es un coeficiente definido como $n = \dfrac{\ln(20)}{\ln\left(f_y / R_{p0,01}\right)}$

en el cual $R_{p0,01}$ es la tensión correspondiente a una deformación remanente de 0,01%.

n puede tomarse de la tabla A24.4.1 o puede calcularse a partir de propiedades medidas.

E_y es el módulo tangente de la curva tensión-deformación en el límite elástico definido como:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002n\ E/f_y}$$

ε_u es la deformación última, correspondiente a la resistencia última f_u, donde puede obtenerse mediante la aproximación:

$\varepsilon_u = 1 - \dfrac{f_y}{f_u}$ siendo $\varepsilon_u \le A$ donde A es la elongación después de la rotura, definida en la serie de normas UNE-EN 10088.

m es un coeficiente que puede determinarse como $m = 1 + 3,5\dfrac{f_y}{f_u}$

b) curva tensión-deformación calculada como en el punto a) anterior, a partir de propiedades medidas;

c) curva tensión-deformación real calculada a partir de una curva tensión-deformación medida, del modo siguiente:

$$\sigma_{true} = \sigma(1+\varepsilon) \qquad \text{(C.2)}$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1+\varepsilon)$$