Anejo 25.

Proyecto de estructuras de acero. Placas planas cargadas en su plano

1 INTRODUCCIÓN 1326

1.1 ALCANCE 1326
1.2 NORMATIVA DE REFERENCIA 1326
1.3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES 1326
1.3.1 Tensión crítica elástica 1326
1.3.2 Tensión de membrana 1326
1.3.3 Sección bruta 1326
1.3.4 Sección transversal eficaz y ancho eficaz 1327
1.3.5 Estructura de chapas 1327
1.3.6 Rigidizador 1327
1.3.7 Chapa rigidizada 1327
1.3.8 Subpanel 1327
1.3.9 Viga híbrida 1327
1.3.10 Convenio de signos 1327
1.4 NOTACIONES 1327

2 BASES DE CÁLCULO Y MODELIZACIÓN 1328

2.1 GENERALIDADES 1328
2.2 MODELOS DE ANCHO EFICAZ PARA EL ANÁLISIS GLOBAL 1328
2.3 EFECTOS DE ABOLLADURA EN CHAPAS EN ELEMENTOS UNIFORMES 1329
2.4 MÉTODO DE LA TENSIÓN REDUCIDA 1329
2.5 ELEMENTOS NO UNIFORMES 1329
2.6 ELEMENTOS CON ALMAS CORRUGADAS 1329

3 EFECTOS DEL ARRASTRE POR CORTANTE EN EL CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES 1330

3.1 GENERALIDADES 1330
3.2 ANCHO EFICAZ^{S} DE ARRASTRE POR CORTANTE BAJO CONDICIONES ELÁSTICAS 1330
3.2.1 Ancho eficaz^{S} 1330
3.2.2 Distribución de tensiones debido al arrastre por cortante 1331
3.2.3 Efectos de cargas contenidas en su propio plano 1332
3.3 ARRASTRE POR CORTANTE EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO 1333

4 EFECTOS DE LA ABOLLADURA DE CHAPA DEBIDA A TENSIONES NORMALES EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO 1334

4.1 GENERALIDADES 1334
4.2 RESISTENCIA A TENSIONES NORMALES 1334
4.3 SECCIÓN TRANSVERSAL EFICAZ 1334
4.4 ELEMENTOS DE CHAPA SIN RIGIDIZADORES LONGITUDINALES 1336
4.5 ELEMENTOS DE CHAPA RIGIDIZADOS CON RIGIDIZADORES LONGITUDINALES 1340
4.5.1 Generalidades 1340
4.5.2 Comportamiento tipo chapa 1342
4.5.3 Comportamiento del pandeo tipo columna 1342
4.5.4 Interacción entre abolladura de chapa y pandeo tipo columna 1343
4.6 COMPROBACIÓN 1344

5 RESISTENCIA A CORTANTE 1344

5.1 GENERALIDADES 1344

5.2 RESISTENCIA DE CÁLCULO 1345
5.3 CONTRIBUCIÓN DEL ALMA 1345
5.4 CONTRIBUCIÓN DE LAS ALAS 1348
5.5 COMPROBACIÓN 1348

6 RESISTENCIA A CARGAS CONCENTRADAS TRANSVERSALES 1348

6.1 GENERALIDADES 1348
6.2 RESISTENCIA DE CÁLCULO 1349
6.3 LONGITUD DE APOYO RÍGIDO 1349
6.4 COEFICIENTE DE REDUCCIÓN χ_F DE LA LONGITUD EFECTIVA PARA LA RESISTENCIA 1350
6.5 LONGITUD EFECTIVA DE CARGA 1350
6.6 COMPROBACIÓN 1351

7 INTERACCIÓN 1351

7.1 INTERACCIÓN ENTRE CORTANTE, MOMENTO FLECTOR Y AXIL 1351
7.2 INTERACCIÓN ENTRE CARGA CONCENTRADA TRANSVERSAL, MOMENTO FLECTOR Y AXIL 1352

8 ABOLLADURA DEL ALMA INDUCIDA POR EL ALA COMPRIMIDA 1352

9 RIGIDIZADORES 1353

9.1 GENERALIDADES 1353
9.2 TENSIONES NORMALES 1353
9.2.1 Requisitos mínimos para los rigidizadores transversales 1354
9.2.2 Requisitos mínimos para los rigidizadores longitudinales 1355
9.2.3 Chapas soldadas 1356
9.2.4 Cortes en los rigidizadores 1356
9.3 CORTANTE 1357
9.3.1 Extremo rígido 1357
9.3.2 Rigidizadores actuando como extremos no rígidos 1358
9.3.3 Rigidizadores transversales intermedios 1358
9.3.4 Rigidizadores longitudinales 1358
9.3.5 Soldaduras 1359
9.4 CARGAS TRANSVERSALES CONCENTRADAS 1359

10 MÉTODO DE LAS TENSIONES REDUCIDAS 1359

APÉNDICE A– RECOMENDACIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE REDUCCIÓN PARA CHAPAS RIGIDIZADAS 1362

A.1 CHAPA ORTÓTROPA EQUIVALENTE 1362
A.2 ABOLLADURA CRÍTICA EN CHAPAS CON UNO O DOS RIGIDIZADORES EN LA ZONA COMPRIMIDA 1364
A.2.1 Procedimiento general 1364
A.2.2 Modelo simplificado de columna ficticia coaccionada por la chapa 1365

APÉNDICE B – RECOMENDACIONES PARA LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES NO UNIFORMES 1367

B.1 GENERALIDADES 1367
B.2 INTERACCIÓN ENTRE ABOLLADURA DE CHAPA Y PANDEO LATERAL DE TORSIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES 1367

APÉNDICE C– RECOMENDACIONES PARA EL CÁLCULO POR MÉTODOS DE LOS ELEMENTOS FINITOS (EF) 1369

C.1 GENERALIDADES 1369
C.2 USO 1369
C.3 MODELIZACIÓN 1369
C.4 ELECCIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO Y LA DOCUMENTACIÓN 1370
C.5 USO DE LAS IMPERFECCIONES 1370
C.6 PROPIEDADES DEL MATERIAL 1372
C.7 CARGAS 1372
C.8 CRITERIO DE ESTADO LÍMITE 1372
C.9 COEFICIENTES PARCIALES 1373

APÉNDICE D – RECOMENDACIONES PARA LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES CON ALMAS CORRUGADAS 1374

D.1 GENERALIDADES 1374
D.2 ESTADO LÍMITE ÚLTIMO 1374
D.2.1 Resistencia a flexión 1374
D.2.2 Resistencia a cortante 1375
D.2.3 Requisitos para los extremos con rigidizadores 1376

APÉNDICE E–MÉTODOS ALTERNATIVOS RECOMENDADOS PARA DETERMINAR LAS SECCIONES EFICACES 1377

E.1 ÁREAS EFICACES PARA NIVELES DE TENSIÓN POR DEBAJO DEL LÍMITE ELÁSTICO 1377
E.2 ÁREAS EFICACES PARA RIGIDEZ 1377

1 Introducción

1.1 Alcance

(1) Este anejo define los criterios de cálculo necesarios para el diseño de chapas rigidizadas y no rigidizadas cargadas en su propio plano.

(2) Estos criterios incluyen los efectos de arrastre por cortante, los efectos de cargas en su propio plano y los efectos producidos por la abolladura en chapas de vigas de sección en I y de tipo cajón. Están incluidas las chapas sometidas a cargas en su propio plano. No se incluyen los efectos de las cargas que actúan fuera del plano de las chapas.

NOTA1: Los requisitos de este apartado complementan las directrices aplicadas a las secciones de Clase 1, 2, 3 y 4. Véase Anejo 22 del Código Estructural.

NOTA 2: En el caso de chapas esbeltas sometidas a una tensión repetitiva normal y/o tangencial y también a fatiga debida a la flexión fuera del plano de la chapa, véase el Anejo 29 del Código Estructural.

NOTA 3: Para los efectos producidos por las cargas aplicadas fuera del plano de la chapa y para los casos que resultan de la combinación de los efectos producidos por las cargas aplicadas dentro y fuera de dicho plano, véase el Anejo 29 del Código Estructural.

NOTA 4: Las chapas aisladas serán consideradas como planas cuando el radio de curvatura r cumple:

$$r \geq \frac{a^2}{t} \qquad (1.1)$$

donde:

a es el ancho del panel

t es el espesor de la chapa

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 Términos y definiciones

Dentro del ámbito de esta norma, se aplican los siguientes términos y definiciones:

1.3.1 Tensión crítica elástica

Tensión en un elemento a la cual éste llega a ser inestable cuando sufre una pequeña deformación, según la teoría de la elasticidad de una estructura ideal.

1.3.2 Tensión de membrana

Tensión en el plano medio de la chapa.

1.3.3 Sección bruta

Área total de la sección transversal de un elemento estructural, excluyendo los rigidizadores longitudinales discontinuos.

1.3.4 Sección transversal eficaz y ancho eficaz

Sección reducida o ancho reducido por los efectos de la abolladura de la chapa y/o arrastre por cortante. A fin de distinguir entre los efectos de abolladura, arrastre por cortante y la combinación de ambas, el significado de "eficaz" es el siguiente:

"eficaz^{p}" para los efectos de abolladura de la chapa,

"eficaz^{s}" para los efectos del arrastre por cortante,

"eficaz" para los efectos combinados de abolladura de la chapa y de arrastre por cortante.

1.3.5 Estructura de chapas

Estructura confeccionada a partir de chapas planas ensambladas; las chapas pueden estar o no rigidizadas.

1.3.6 Rigidizador

Chapa o perfil conectado a otra chapa con el propósito de prevenir la abolladura de la misma o reforzarla. Un rigidizador puede ser:

Longitudinal si su dirección es paralela a la del elemento a reforzar;

Transversal si su dirección es perpendicular a la del elemento a reforzar.

1.3.7 Chapa rigidizada

Chapa con rigidizadores longitudinales transversales, o ambos.

1.3.8 Subpanel

Porción de chapa no rigidizada delimitada por alas y/o rigidizadores.

1.3.9 Viga híbrida

Viga armada con alas y almas de diferentes tipos de acero; esta norma supone aceros de mayor calidad en las alas que en las almas.

1.3.10 Convenio de signos

Salvo indicación en contra, la compresión se toma como positiva.

1.4 Notaciones

(1) Además de lo indicado en otros anejos, se emplearán las siguientes notaciones:

$A_{s\ell}$ área total de todos los rigidizadores longitudinales de la chapa rigidizada

A_{st} área de la sección bruta de un rigidizador transversal

A_{eff} área de la sección eficaz

$A_{c,eff}$ área de la sección eficaz^{p}

$A_{c,eff,loc}$ área de la sección eficaz^{p} en caso de abolladura local

a longitud de una chapa rigidizada o no rigidizada

b ancho de una chapa rigidizada o no rigidizada

b_w ancho libre entre soldaduras en secciones soldadas o entre los extremos del radio de perfiles laminados

b_{eff}	ancho eficaz[s] en caso de arrastre por cortante elástico
F_{Ed}	carga transversal de cálculo
h_w	altura interior del alma entre alas
L_{eff}	longitud eficaz frente a las cargas transversales, véase el apartado 6
$M_{f,Rd}$	momento plástico resistente de cálculo de una sección transversal constituida solamente por alas
$M_{pl,Rd}$	momento plástico resistente de cálculo de una sección transversal (independientemente de la Clase de sección)
M_{Ed}	momento flector de cálculo
N_{Ed}	axil de cálculo
t	espesor de la chapa
V_{Ed}	cortante de cálculo incluyendo los cortantes causados por torsión
W_{eff}	módulo resistente elástico de la sección eficaz
β	coeficiente de ancho eficaz[s] de arrastre por cortante elástico

(2) Las notaciones adicionales se definen donde aparezcan por primera vez.

2 Bases de cálculo y modelización

2.1 Generalidades

(1) Deberá tenerse en cuenta los efectos debidos al arrastre por cortante y a la abolladura de chapa en los estados límite último, de servicio o de fatiga.

NOTA: Los Anejos 22 a 29 del Código Estructural establecen los coeficientes parciales γ_{M0} y γ_{M1}empleados en esta parte.

2.2 Modelos de ancho eficaz para el análisis global

(1) Deberán considerarse en el análisis global los efectos del arrastre por cortante y de la abolladura de la chapa en la rigidez de los elementos y en las uniones.

(2) El empleo de un ancho eficaz[s] en un análisis global puede tenerse en cuenta para considerar los efectos del arrastre por cortante en las alas. Por simplicidad, este ancho eficaz[s] puede considerarse uniforme a lo largo de todo el vano.

(3) Para cada vano de un elemento, el ancho eficaz[s] de las alas debe tomarse como el menor valor de todo el ancho completo y $L/8$ a cada lado del alma, donde L es la luz o dos veces la distancia desde el apoyo hasta el extremo del voladizo.

(4) Los efectos de abolladura de la chapa en un análisis elástico global, pueden tenerse en cuenta mediante áreas de las secciones eficaces[p] de los elementos sometidos a compresión, véase el apartado 4.3.

(5) Para un análisis global, el efecto de la abolladura de chapa en la rigidez podrá despreciarse cuando el área eficaz[p] de un elemento comprimido es mayor que $\rho_{lim} = 0,5$ veces el área de la sección bruta de dicho elemento.

NOTA: Para determinar la rigidez en caso de no cumplirse (5), véase el Apéndice E.

2.3 Efectos de abolladura en chapas en elementos uniformes

(1) Los modelos de ancho eficaz^{p} para tensiones normales, los modelos de resistencia para abolladura por cortante y los de abolladura debido a cargas transversales, así como las interacciones entre dichos modelos para determinar la resistencia de los elementos uniformes en estado límite último, pueden emplearse cuando satisfagan las siguientes condiciones:

- los paneles serán rectangulares y las alas paralelas,
- el diámetro de cualquier taladro o corte sin rigidizar no superará $0,05b$, donde b es el ancho del panel.

NOTA: Estas reglas pueden aplicarse para paneles no rectangulares siempre que el ángulo α_{lim}, (véase la figura A25.2.1) no sea mayor de 10 grados. Si α_{lim} es mayor de 10, los paneles pueden suponerse como un panel rectangular de dimensiones b_1 y b_2.

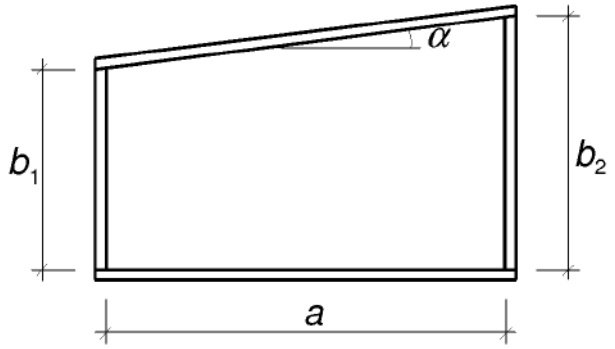


Figura A25.2.1 Definición del ángulo α

(2) Para el cálculo de las tensiones en el estado límite de servicio y fatiga, el área eficaz^{s} puede emplearse si cumple la condición descrita en el apartado 2.2(5). Para los estados límite último el área eficaz, de acuerdo con el apartado 3.3, debe emplearse con β_{ult} en lugar de β.

2.4 Método de la tensión reducida

(1) Como alternativa al empleo de los modelos de ancho eficaz^{p} para tensiones normales descritos en los apartados 4 al 7, se pueden considerar las secciones de Clase 3 siempre que las tensiones en cada panel no superen los límites especificados en el apartado 10.

NOTA: El método de la tensión reducida es equivalente al método del ancho eficaz^{p} (véase el apartado 2.3) para chapas aisladas. Sin embargo, la comprobación de las limitaciones tensionales se ha supuesto la no transmisión de cargas entre las chapas de la sección transversal.

2.5 Elementos no uniformes

(1) Los elementos no uniformes (por ejemplo, vigas acarteladas, paneles no rectangulares) o elementos con huecos grandes regulares o irregulares, podrán analizarse por medio de modelos basados en el método de elementos finitos (EF).

NOTA 1: Para elementos no uniformes, véase el Apéndice B.

NOTA 2: Para cálculos basados en el método de EF, véase el Apéndice C.

2.6 Elementos con almas corrugadas

(1) Para elementos con almas corrugadas, la rigidez a flexión debe determinarse considerando únicamente la contribución de las alas, mientras que el alma se considerará únicamente para transmitir los esfuerzos tangenciales y las cargas transversales.

NOTA: Para la resistencia a la abolladura de las alas comprimidas y la resistencia a cortante del alma véase el Apéndice D.

3 Efectos del arrastre por cortante en el cálculo de los elementos estructurales

3.1 Generalidades

(1) El arrastre por cortante en las alas puede despreciarse en caso de que $b_0 < L_e/50$, dónde b_0 es el ancho del ala o la mitad del ancho de un elemento interno y L_e es la longitud entre los puntos con momento flector nulo, véase el apartado 3.2.1(2).

(2) Cuando se supera el límite anterior para b_0, el efecto de arrastre por cortante en las alas debe considerarse en la comprobación de la capacidad de estado límite de servicio y de fatiga mediante el uso de un ancho eficaz[s] de acuerdo con el apartado 3.2.1 y con una distribución de tensiones acorde con el apartado 3.2.2. Para los estados límite último, puede emplearse un área eficaz de acuerdo con el apartado 3.3.

(3) Las tensiones bajo cargas concentradas aplicadas en el alma al nivel del ala, deben determinarse según el apartado 3.2.3.

3.2 Ancho eficaz[s] de arrastre por cortante bajo condiciones elásticas

3.2.1 Ancho eficaz[s]

(1) El ancho eficaz[s] b_{eff} en caso de arrastre por cortante bajo condiciones elásticas debe determinarse a partir de:

$$b_{eff} = \beta\, b_0 \qquad (3.1)$$

donde los valores del coeficiente eficaz[s] β se dan en la tabla A25.3.1.

Este ancho eficaz[s] puede ser significativo en estado límite de servicio y fatiga.

(2) Siempre que las luces de los vanos adyacentes que se muestran a continuación, no difieran en más del 50% y que la longitud de cualquier vano en voladizo no sea mayor a la mitad del vano adyacente, las longitudes eficaces L_e pueden determinarse a partir de la figura A25.3.1. En otros casos L_e debe tomarse como la distancia entre los puntos adyacentes con momento flector nulo.

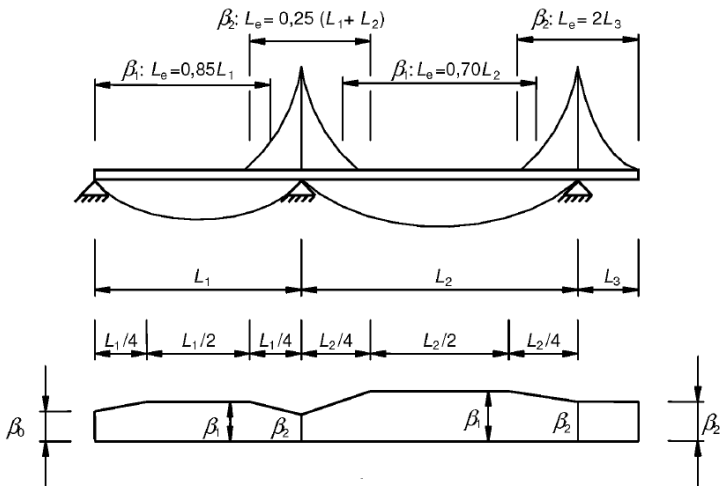
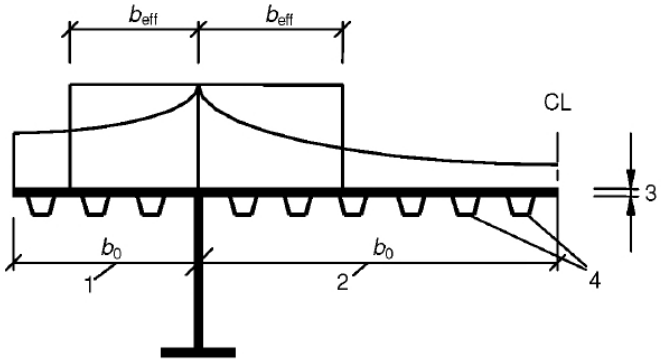


Figura A25.3.1 Longitud eficaz L_e en vigas continuas y distribución del ancho eficaz[s]



Leyenda

1 Elemento volado
2 Elemento interior
3 Espesor de chapa t
4 Rigidizadores con $A_{s\ell} = \sum A_{s\ell i}$

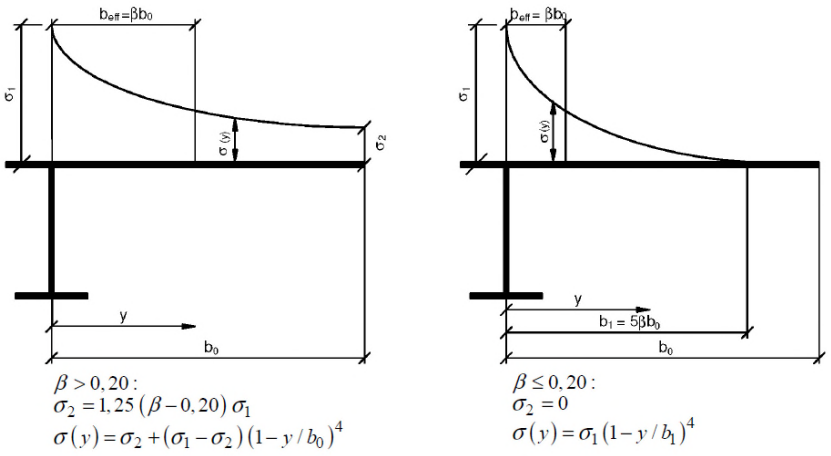
Figura A25.3.2 Notaciones empleadas para el arrastre por cortante

Tabla A25.3.1 Coeficiente β de ancho eficaz[s]

κ	Comprobación	Valor de β
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	Momento flector positivo	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2}$
	Momento flector negativo	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0\left(\kappa - \frac{1}{2500\kappa}\right) + 1,6\kappa^2}$
$> 0,70$	momentos positivos	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9\kappa}$
	momentos negativos	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6\kappa}$
todos los valores de κ	extremo del apoyo	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa)\beta_1$, si $\beta_0 < \beta_1$
todos los valores de κ	voladizo	$\beta = \beta_2$ en el apoyo y en el extremo
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$ con $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{s\ell}}{b_0 t}}$ donde $A_{s\ell}$ es el área de todos los rigidizadores longitudinales contenidos en el ancho b_0 y otras notaciones están definidas en la figura A25.3.1 y en la figura A25.3.2.		

3.2.2 Distribución de tensiones debido al arrastre por cortante

(1) La distribución de las tensiones longitudinales a lo largo del ala debido al arrastre por cortante debe obtenerse a partir de la figura A25.3.3.



σ_1 se calcula con el ancho eficaz^s del ala b_{eff}

Figura A25.3.3 Distribución de tensiones debido al arrastre por cortante

3.2.3 Efectos de cargas contenidas en su propio plano

(1) La distribución de las tensiones elásticas en chapas rigidizadas o no rigidizadas debido a la acción de cargas en su propio plano (véase la figura A25.3.4), debe determinarse a partir de:

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{Ed}}{b_{eff}(t_w + a_{st,1})} \tag{3.2}$$

con: $$b_{eff} = s_e \sqrt{1 + \left(\frac{z}{s_e n}\right)^2}$$

$$n = 0,636 \sqrt{1 + \frac{0,878\, a_{st,1}}{t_w}}$$

$$s_e = s_s + 2t_f$$

donde:

$a_{st,1}$ es el área de la sección transversal bruta de los rigidizadores con cargas normales distribuidas en la longitud s_e. Esto puede tomarse conservadoramente como el área de los rigidizadores dividida entre la distancia s_{st}

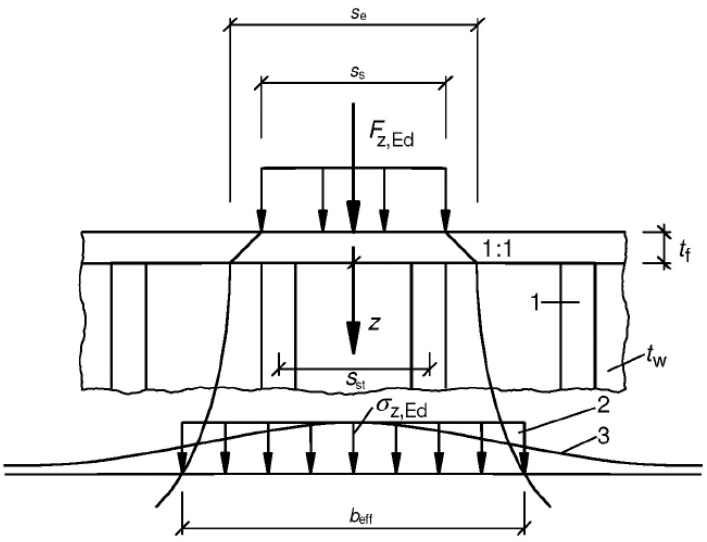
t_w es el espesor del alma

z es la distancia al ala

s_e es la longitud del apoyo rigidizado

s_{st} es la distancia entre rigidizadores.

NOTA: La ecuación (3.2) es válida cuando $s_{st}/s_e \leq 0,5$; por otra parte, la contribución de los rigidizadores debe ser despreciada.



Leyenda
1 Rigidizador
2 Distribución de tensiones simplificada
3 Distribución de tensiones real

Figura A25.3.4 Presentación de cargas en plano

NOTA: La anterior distribución de tensiones puede ser empleada para la comprobación a fatiga.

3.3 Arrastre por cortante en estado límite último

(1) Los efectos del arrastre por cortante en el estado límite último pueden ser determinados como sigue:

a) contemplando los efectos del arrastre por cortante elástico, como se plantea para los estados límites de servicio y de fatiga,

b) combinando los efectos de arrastre por cortante y de abolladura de chapa,

c) contemplando los efectos de arrastre por cortante en régimen elasto-plástico, teniendo en cuenta cierta deformación plástica.

Para la comprobación en estado límite último en secciones transversales de clase 4, se deberá tener en cuenta el efecto conjunto del arrastre por cortante y de la abolladura por tensiones normales, en cuyo caso se aplicará lo establecido en la NOTA 2.

En el caso de alas comprimidas de secciones transversales de clase 3, y también para la comprobación en estado límite último, el coeficiente de arrastre por cortante β_{ult} será igual al coeficiente β, obtenido en el apartado 3.2.1, de acuerdo con criterios elásticos.

En el caso de alas traccionadas y alas comprimidas de secciones transversales de clase 1 o 2, en estado límite último, se adoptará $\beta_{ult} = \beta^k$, conforme a lo indicado en la NOTA 3.

NOTA 2: Los efectos combinados debidos a la abolladura de la chapa y al arrastre por cortante deben tenerse en cuenta empleando A_{eff} dado por la siguiente fórmula:

$$A_{eff} = A_{c,eff}\beta_{ult} \qquad (3.3)$$

donde:

$A_{c,eff}$ es el área eficaz^p del ala comprimida debido a la abolladura de la chapa (véanse los apartados 4.4 y 4.5)

β_{ult} es el coeficiente de ancho eficaz[s] para considerar el efecto de arrastre por cortante en estado límite último, que se tomará de los valores de β de la tabla A25.3.1, reemplazando α_0 por:

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{c,eff}}{b_0 t_f}} \quad (3.4)$$

t_f es el espesor del ala.

NOTA 3: Los efectos de arrastre por cortante en régimen elasto-plástico teniendo en cuenta cierta deformación plástica deben considerarse determinando A_{eff} dado por la siguiente expresión:

$$A_{eff} = A_{c,eff}\beta^{\kappa} \geq A_{c,eff}\beta \quad (3.5)$$

donde β y κ se obtienen de la tabla A25.3.1.

Las expresiones descritas en la NOTA 2 y la NOTA 3 pueden ser aplicadas también para las alas traccionadas, en cuyo caso $A_{c,eff}$ debe ser reemplazado por el área bruta del ala a tracción.

4 Efectos de la abolladura de chapa debida a tensiones normales en estado límite último

4.1 Generalidades

(1) Este apartado da las directrices para explicar los efectos provocados por la abolladura de chapa debidos a tensiones normales en estado límite último cuando se cumplan las siguientes condiciones:

a) Los paneles son rectangulares y las alas paralelas o cuasi-paralelas, véase el apartado 2.3.

b) En caso de estar previstos rigidizadores, éstos se disponen en la dirección longitudinal y/o transversal.

c) Si existen taladros o cortes, estos son pequeños (véase el apartado 2.3).

d) Los elementos estructurales considerados son de sección transversal uniforme.

e) No se produce abolladura del alma inducida por el ala.

NOTA 1: Para abolladura del ala comprimida en el plano del alma, véase el apartado 8.

NOTA 2: Para rigidizadores y elementos de chapa sometidos a abolladura, véase el apartado 9.

4.2 Resistencia a tensiones normales

(1) La resistencia de una chapa puede determinarse empleando las áreas eficaces[p] de las chapas comprimidas para secciones de Clase 4, empleando para el cálculo los datos de $(A_{eff}, I_{eff}, W_{eff})$ para la comprobación de la resistencia de la sección o del elemento a pandeo o a pandeo debido a torsión lateral de acuerdo con el Anejo 22 del Código Estructural.

(2) Las áreas eficaces[p] pueden determinarse basándose en la distribución lineal de deformaciones una vez alcanzado el límite elástico en el plano medio de la chapa del ala comprimida.

4.3 Sección transversal eficaz

(1) En el cálculo de las tensiones longitudinales, se debe tener en cuenta los efectos combinados debidos al arrastre por cortante y a la abolladura de chapa empleando las áreas eficaces proporcionadas en el apartado 3.3.

(2) Las propiedades de la sección transversal eficaz de los elementos, deben basarse en las áreas eficaces de los elementos comprimidos y en el área eficaz[s] de los elementos traccionados por el arrastre por cortante.

(3) El área efectiva A_{eff}, debe determinarse suponiendo que la sección transversal está sometida exclusivamente a las tensiones originadas por compresión axial uniforme. Para las secciones asimétricas, el posible desplazamiento e_N del centro de dicha área eficaz A_{eff} respecto del centro de gravedad de la sección transversal bruta, véase la figura A25.4.1, genera un momento adicional que debe tenerse en cuenta en la comprobación de dicha sección transversal, empleado en el apartado 4.6.

(4) El módulo resistente de elasticidad de la sección eficaz W_{eff} debe determinarse suponiendo que la sección transversal estará sometida únicamente a tensiones por flexión, véase la figura A25.4.2. Para el módulo resistente de una sección sometida a una flexión esviada, debe determinarse según ambos ejes principales.

NOTA: Como alternativa a los puntos 4.3(3) y (4), puede determinarse una única sección eficaz para el estado tensional resultante de actuar simultáneamente N_{Ed} y M_{Ed}. Los efectos de e_N, deben tenerse en cuenta como se describe en el apartado 4.3(3). Esto requiere un proceso iterativo.

(5) La tensión en un ala debe calcularse empleando el módulo de elasticidad de la sección referida al plano medio de dicho ala.

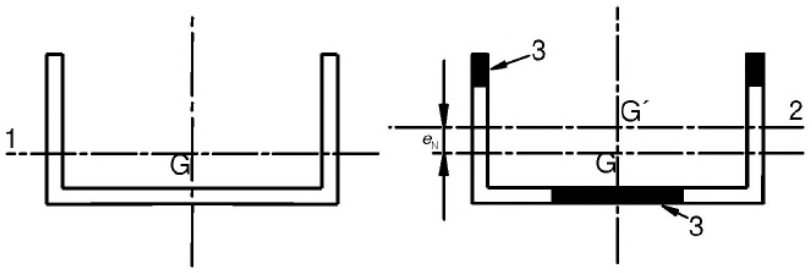
(6) Las vigas híbridas pueden tener alas constituidas por un material con un límite elástico f_{yf} hasta alcanzar un valor $\phi_h f_{yw}$, siendo $\phi_h = 2,0$, de tal forma que:

a) el incremento de la tensión en el ala causado por la plastificación del alma se tiene en cuenta limitando la tensión en el alma a f_{yw}.

b) f_{yf} se emplea para determinar el área eficaz del alma.

(7) El incremento de las deformaciones y de las tensiones en estado límite de servicio y de fatiga puede despreciarse para las vigas híbridas de acuerdo con el apartado 4.3(6).

(8) Para vigas híbridas que cumplan con el apartado 4.3(6) el límite del rango de tensiones definido en Anejo 27 del Código Estructural se puede tomar como $1,5\ f_{yf}$.

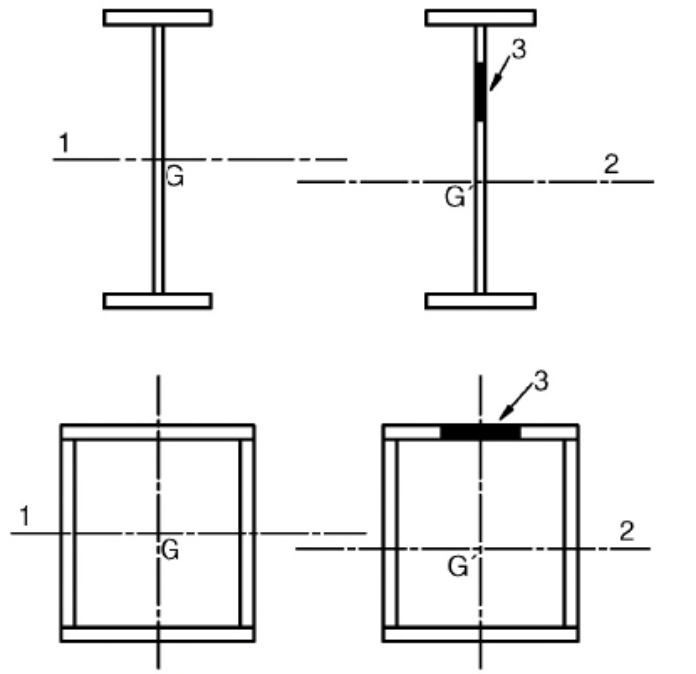


Sección transversal bruta Sección transversal reducida eficaz

Leyenda

G Centro de gravedad de la sección bruta
G' Centro de gravedad de la sección reducida eficaz
1 Eje baricéntrico de la sección bruta
2 Eje baricéntrico de la sección reducida eficaz
3 Área no efectiva

Figura A25.4.1 Secciones transversales de Clase 4–esfuerzo axil



Sección transversal bruta Sección transversal reducida eficaz

Leyenda

G Centro de gravedad de la sección bruta
G' Centro de gravedad de la sección reducida eficaz
1 Eje baricéntrico de la sección bruta
2 Eje baricéntrico de la sección reducida eficaz
3 Área no efectiva

Figura A25.4.2 Secciones transversales de Clase 4–momento flector

4.4 Elementos de chapa sin rigidizadores longitudinales

(1) Las áreas eficaces[p] de las chapas planas comprimidas deben obtenerse empleando la tabla A25.4.1 para los elementos interiores y la tabla A25.4.2 para los exteriores. El área eficaz[p] de la zona comprimida de una chapa con un área bruta A_c que debe obtenerse a partir de:

$$A_{c,eff} = \rho A_c \qquad (4.1)$$

donde ρ es el coeficiente de reducción por abolladura de chapas.

(2) El coeficiente de reducción ρ, puede tomarse como sigue:

- elementos interiores comprimidos:

$$\rho = 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_p \le 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\Psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\Psi)}{\bar{\lambda}_p{}^2} \le 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\Psi} \qquad (4.2)$$

- elementos externos comprimidos:

$$\rho = 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_p \le 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \le 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_p > 0,748 \qquad (4.3)$$

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

Ψ es la relación de tensiones determinada de acuerdo con los apartados 4.4(3) y 4.4(4)

$\bar{b}$ es el ancho obtenido de entre los siguientes (para las definiciones, véase la tabla A22.5.2 del Anejo 22 del Código Estructural)

- b_w para almas
- b para elementos internos del ala (excepto en secciones huecas rectangulares)
- $b - 3t$ para alas de secciones huecas rectangulares
- c para alas exteriores
- h para angulares de lados iguales
- h para angulares de lados no iguales

k_σ es el coeficiente de abolladura correspondiente a la relación de tensiones Ψ y condiciones de contorno. Para chapas alargadas, k_σ se obtiene de la tabla A25.4.1 o de la tabla A25.4.2, según corresponda

t es el espesor

σ_{cr} es la tensión crítica elástica de abolladura de la chapa, véase la ecuación (A.1) en el Apéndice A.1(2) y en la tabla A25.4.1 y en la tabla A25.4.2.

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

(3) En el caso de alas en secciones en I y en cajón, la relación de tensiones Ψ empleada en la tabla A25.4.1 o en la tabla A25.4.2, debe basarse en las propiedades de la sección bruta debido al arrastre por cortante en las alas, en caso de que sea relevante. En el caso de los elementos del alma, la relación de tensiones Ψ empleada en la tabla A25.4.1 debe obtenerse con una distribución de tensiones calculada con el área eficaz del ala comprimida y de la sección bruta del alma.

NOTA: Si la distribución de tensiones resulta de diferentes etapas de construcción, (como por ejemplo en un puente mixto), las tensiones de las diferentes etapas pueden calcularse en primer lugar con las propiedades de la sección formada por las áreas eficaces de ala y área bruta de alma y la suma de las tensiones de ambas zonas. Esta resultante de distribución de tensiones determina la sección eficaz de alma que puede ser empleada en todas las etapas para calcular la distribución final.

(4) A excepción de lo comentado en el apartado 4.4(5), la esbeltez de una chapa $\bar{\lambda}_p$ de un elemento puede ser sustituido por:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}} \qquad (4.4)$$

donde:

$\sigma_{com,Ed}$ es la máxima tensión de compresión de cálculo en el elemento correspondiente, empleando el área eficaz^p de la sección debido a todas las acciones simultáneas.

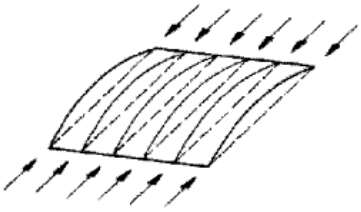
NOTA 1: El procedimiento descrito anteriormente es conservador y requiere un cálculo iterativo en el cual la relación de tensiones Ψ (véase la tabla A25.4.1 y la tabla A25.4.2) se determina para cada etapa a partir de las tensiones calculadas con la sección eficaz^p definida al final de la etapa anterior.

NOTA 2: Véase también en el procedimiento alternativo en el Apéndice E.

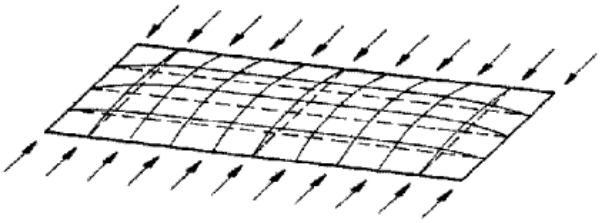
(5) Para la comprobación de la resistencia de cálculo a la abolladura en las secciones de Clase 4 empleando los apartados 6.3.1, 6.3.2 o 6.3.4 del Anejo 22, debe emplearse tanto la esbeltez de chapa $\bar{\lambda}_p$ como $\bar{\lambda}_{p,red}$ y con $\sigma_{com,Ed}$ obtenido en un análisis de segundo orden con imperfecciones globales.

(6) Para relaciones de forma $a/b < 1$ puede producirse un pandeo tipo columna. La comprobación debe realizarse de acuerdo con el apartado 4.5.4 empleando el coeficiente de reducción ρ_c.

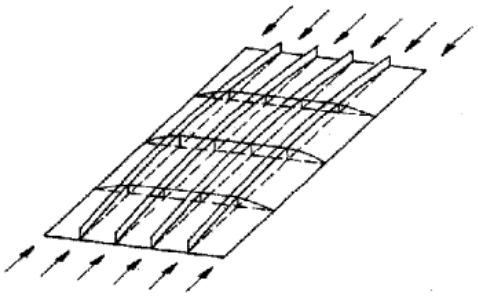
NOTA: Este caso se aplica, por ejemplo, en elementos planos entre rigidizadores transversales donde la abolladura de la chapa podría ser de tipo columna y que requiere un coeficiente de reducción ρ_c parecido a χ_c como el que se emplea para el pandeo de columna, véase la figura A25.4.3 a) y b). Para chapas con rigidizadores longitudinales puede ocurrir un pandeo tipo columna cuando $a/b \geq 1$, véase la figura A25.4.3 c).



a) Comportamiento tipo columna de chapas no rigidizadas longitudinalmente



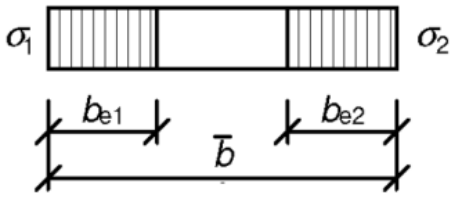
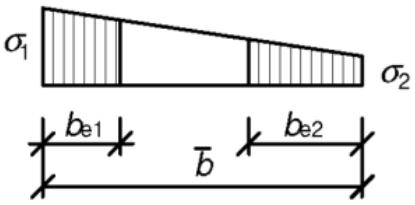
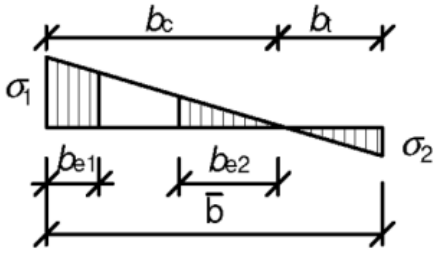
b) Comportamiento tipo columna de chapas no rigidizadas con pequeña relación de aspecto α del panel



c) Comportamiento tipo columna, de chapas rigidizadas longitudinalmente con relación de aspecto α del panel

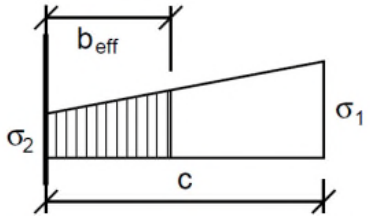
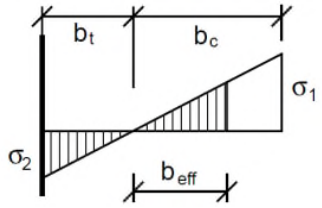
Figura A25.4.3 Comportamiento tipo columna

Tabla A25.4.1 Elementos interiores comprimidos

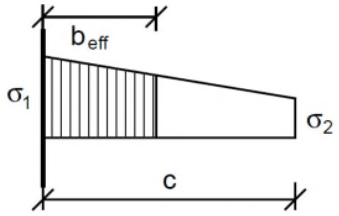
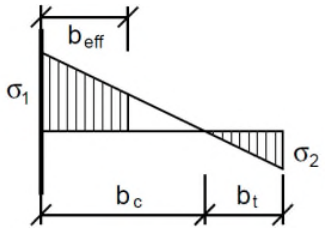
Distribución de tensiones (compresión positiva)	Ancho eficaz^{p} b_{eff}
	$\underline{\Psi = 1}$: $b_{eff} = \rho\, \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5\, b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5\, b_{eff}$
	$\underline{1 > \Psi \geq 0}$: $b_{eff} = \rho\, \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\Psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\underline{\Psi < 0}$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, \bar{b}/(1-\Psi)$ $b_{e1} = 0,4\, b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6\, b_{eff}$

$\Psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \Psi > 0$	0	$0 > \Psi > -1$	-1	$-1 > \Psi \geq -3$
Coeficiente 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 A25.4.2 Elementos externos comprimidos

Distribución de tensiones (compresión positiva)	Ancho eficaz^p b_{eff}
	$\underline{1 > \Psi \geq 0}$ $b_{eff} = \rho\, c$
	$\underline{\Psi < 0:}$ $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c/(1-\Psi)$

$\Psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \Psi \geq -3$
Coeficiente de abolladurak_σ	0, 43	0, 57	0, 85	$0,57 - 0,21\Psi + 0,07\Psi^2$

Distribución de tensiones (compresión positiva)	Ancho eficaz^p b_{eff}
	$\underline{1 > \Psi \geq 0}$ $b_{eff} = \rho\, c$
	$\underline{\Psi < 0:}$ $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c/(1-\Psi)$

$\Psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \Psi > 0$	0	$0 > \Psi > -1$	-1
Coeficiente de abolladurak_σ	0, 43	$0,578/(\Psi + 0,34)$	1, 70	$1,7 - 5\Psi + 17,1\Psi^2$	23, 8

4.5 Elementos de chapa rigidizados con rigidizadores longitudinales

4.5.1 Generalidades

(1) En el caso de elementos de chapa con rigidizadores longitudinales, deben tenerse en cuenta las áreas eficaces^p debidas a la abolladura local de los subpaneles comprendidos entre los rigidizadores y las áreas eficaces^p procedentes de la abolladura global del panel rigidizado.

(2) El área de la sección eficaz^p de cada subpanel debe determinarse por medio de un coeficiente de reducción, de acuerdo con el apartado 4.4, para tener en cuenta la abolladura local de la chapa. La chapa rigidizada, teniendo en cuenta las áreas de la sección eficaz^p de los rigidizadores, debe

comprobarse frente a la abolladura global de la chapa, (por ejemplo, asimilándola a una chapa ortótropa equivalente), determinándose un coeficiente de reducción ρ_c para la abolladura global de chapa.

(3) El área de la sección eficazᵖ de la zona comprimida de la chapa rigidizada debe tomarse como sigue:

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t \qquad (4.5)$$

donde $A_{c,eff,loc}$ es el área de la sección eficazᵖ de todos los rigidizadores y subpaneles que se encuentran totalmente o parcialmente en la zona comprimida excepto las partes eficaces soportadas por una chapa adyacente con un ancho $b_{edge,eff}$, véase el ejemplo mostrado en la figura A25.4.4.

(4) El área $A_{c,eff,loc}$ debe obtenerse mediante:

$$A_{c,eff,loc} = A_{s\ell,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc}\, t \qquad (4.6)$$

donde:

$\sum_c$ se aplica a la parte del ancho del panel rigidizado comprimido excepto las partes correspondientes de los bordes $b_{edge,eff}$, véase la figura A25.4.4

$A_{s\ell,eff}$ es la suma de las secciones eficacesᵖ de acuerdo con 4.4 de todos los rigidizadores longitudinales con el área bruta $A_{s\ell}$, localizada en la zona comprimida

$b_{c,loc}$ es el ancho de la parte comprimida de cada subpanel

ρ_{loc} es el coeficiente de reducción definido en el apartado 4.4(2) de cada subpanel.

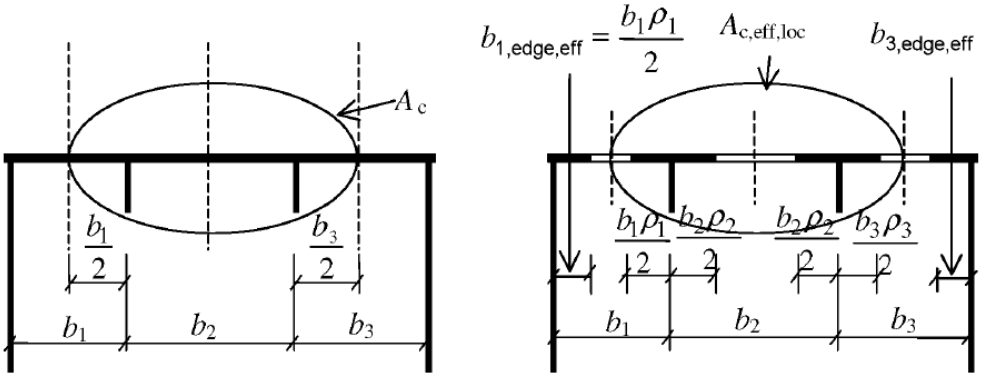


Figura A25.4.4 Chapa rigidizada bajo compresión uniforme

NOTA: En caso de compresión no uniforme, véase la figura A25.A.1.

(5) Para determinar el coeficiente de reducción ρ_c para todos los tipos de abolladura, debe considerarse el coeficiente de reducción de pandeo tipo columna, que es más severo que el coeficiente de reducción de abolladura de chapa.

(6) Para determinar ρ_c se podrá realizar una interpolación, de acuerdo con lo dispuesto en 4.5.4(1), entre el coeficiente de reducción ρ relativo a la abolladura de chapa y un coeficiente de reducción χ_c relativo al pandeo tipo columna. Véase el apartado 4.5.4.

(7) La reducción del área comprimida $A_{c,eff,loc}$ por medio de ρ_c puede tomarse como una reducción uniforme a lo largo de la sección bruta.

(8) En aquellos casos en que el arrastre por cortante sea significativo (véase el apartado 3.3) el área de la sección eficaz $A_{c,eff}$ de la zona comprimida de una chapa rigidizada, debe tomarse como $A^*_{c,eff}$ no solo para los efectos de la abolladura local sino también para los efectos del arrastre por cortante.

(9) El área de la sección eficaz de la zona traccionada de un elemento de chapa rigidizada, debe tomarse como el área bruta de la zona traccionada reducida por el arrastre por cortante, en el caso de ser significativo, véase el apartado 3.3.

(10) El módulo resistente de la sección eficaz W_{eff}, debe tomarse como el cociente entre el momento de inercia de la sección transversal eficaz y la distancia desde el centro de gravedad a la mitad del canto del ala.

4.5.2 Comportamiento tipo chapa

(1) La esbeltez relativa $\bar{\lambda}_p$de la chapa equivalente, se define como sigue:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}} \qquad (4.7)$$

siendo $\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$

donde:

A_c es el área bruta de la zona comprimida de la chapa rigidizada excepto las partes de los subpaneles soportados por una chapa adyacente, véase la figura A25.4.4 (se multiplica por el coeficiente de arrastre por cortante si éste es significativo, véase el apartado 3.3)

$A_{c,eff,loc}$ es el área eficaz de la misma parte de la chapa (incluyendo los efectos del arrastre por cortante, en caso de ser significativo) con la tolerancia de la posible abolladura de chapa de los subpaneles y/o los rigidizadores.

$\sigma_{cr,p}$ es la tensión crítica elástica de abolladura de chapa, calculada sin tener en cuenta la rigidez torsional de los rigidizadores de sección cerrada.

(2) El coeficiente de reducción ρ para una chapa ortótropa equivalente se obtiene a partir de 4.4(2) siempre que $\bar{\lambda}_p$ se calcule a partir de la ecuación (4.7).

NOTA: Para el cálculo de $\sigma_{cr,p}$, véase el Apéndice A.

4.5.3 Comportamiento del pandeo tipo columna

(1) La tensión crítica elástica de pandeo tipo columna $\sigma_{cr,c}$ de una chapa no rigidizada (véase el apartado 4.4) o rigidizada (véase el apartado 4.5) debe tomarse como la tensión de pandeo considerando los apoyos eliminados a lo largo de los bordes longitudinales.

(2) La tensión crítica elástica de pandeo tipo columna $\sigma_{cr,c}$ de una chapa no rigidizada puede obtenerse a partir de:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)a^2} \qquad (4.8)$$

(3) Para una chapa rigidizada, $\sigma_{cr,c}$ podrá determinarse a partir de la tensión crítica elástica de pandeo tipo columna $\sigma_{cr,sl}$ del rigidizador más cercano al borde del panel sometido a la mayor tensión de compresión, como sigue a continuación:

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 E I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1} a^2} \qquad (4.9)$$

donde:

$I_{s\ell,1}$ es el momento de inercia del área de la sección bruta del rigidizador y de las partes adyacentes de la chapa, relativo a la flexión fuera de su plano

$A_{s\ell,1}$ es el área de la sección bruta del rigidizador y de las partes adyacentes de la chapa de acuerdo con la figura A25.A.1.

NOTA: $\sigma_{cr,c}$ puede obtenerse de $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell} \frac{b_c}{b_{s\ell,1}}$, donde $\sigma_{cr,c}$ es la tensión relativa al borde comprimido de la chapa y $b_{s\ell,1}$ y b_c son valores geométricos procedentes de la distribución de tensiones empleada para la extrapolación, véase la figura A25.A.1.

(4) La esbeltez relativa de la columna $\bar{\lambda}_c$ se define como sigue:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \text{para chapas no rigidizadas} \qquad (4.10)$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \text{para chapas rigidizadas} \qquad (4.11)$$

siendo $\beta_{A,c} = \frac{A_{s\ell,1,eff}}{A_{s\ell,1}}$

donde:

$A_{s\ell,1}$ se define en el apartado 4.5.3(3)

$A_{s\ell,1,eff}$ es el área de la sección eficaz del rigidizador y de las partes adyacentes de la chapa debido a la abolladura de chapa, véase la figura A25.A.1.

(5) El coeficiente de reducción χ_c debe obtenerse a partir del apartado 6.3.1.2. del Anejo 22 del Código Estructural. Para chapas no rigidizadas, debe emplearse un valor $\alpha = 0,21$ correspondiente a la curva de pandeo a. Para chapas rigidizadas α debe mayorarse y reemplazarse por α_e:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \qquad (4.12)$$

con $i = \sqrt{\frac{I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1}}}$

$e =$ $max\,(e_1, e_2)$ es la mayor distancia de los centros de gravedad respectivos de la chapa y un rigidizador de borde (o de los centros degravedad de cualquier conjunto de rigidizadores cuando se encuentran a ambos lados de la chapa) a la fibra neutra de la columna eficaz, véase la figura A25.A.1

α $= 0,34$ (curva b) para rigidizadores de sección cerrada

α $= 0,49$ (curva c) para rigidizadores de sección abierta.

4.5.4 Interacción entre abolladura de chapa y pandeo tipo columna

(1) El coeficiente final de reducción global ρ_c se debe obtener por interpolación entre los coeficientes χ_c y ρ mediante la siguiente expresión:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c)\xi(2 - \xi) + \chi_c \qquad (4.13)$$

donde $\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1$ con $0 \le \xi \le 1$

$\sigma_{cr,p}$ es la tensión crítica elástica de abolladura de la chapa, véase el Apéndice A.1(2)

$\sigma_{cr,c}$ es la tensión crítica elástica de pandeo tipo columna de acuerdo con el apartado 4.5.3(2) y (3), respectivamente

χ_c es el coeficiente de reducción debido al pandeo tipo columna

ρ es el coeficiente de reducción debido a la abolladura de chapa, véase 4.4(1).

4.6 Comprobación

(1) La comprobación de un elemento estructural sometido a compresión y flexión uniaxial debe llevase a cabo como sigue:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed}+N_{Ed}e_N}{\frac{f_y W_{eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0 \qquad (4.14)$$

donde:

A_{eff} es el área de la sección eficaz de acuerdo con el apartado 4.3(3)

e_N es la excentricidad de la posición de la fibra neutra, véase el apartado 4.3(3)

M_{Ed} es el momento flector de cálculo

N_{Ed} es el esfuerzo axil de cálculo

W_{eff} es el módulo resistente de la sección eficaz, véase el apartado 4.3(4)

γ_{M0} es un coeficiente parcial, véase el Anejo 29 del Código Estructural.

NOTA: Para los elementos sometidos a compresión y a flexión esviada, la ecuación (4.14) tendrá que modificarse de la siguiente manera:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed}+N_{Ed}e_{y,N}}{\frac{f_y W_{y,eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed}+N_{Ed}e_{z,N}}{\frac{f_y W_{z,eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0 \qquad (4.15)$$

$M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$ son los momentos flectores de cálculo con respecto a los ejes $y-y$ y $z-z$ respectivamente

$e_{y,N}, e_{z,N}$ son las excentricidades con respecto a la fibra neutra.

(2) Los esfuerzos M_{Ed} y N_{Ed} deben incluir los efectos de segundo orden cuando sean significativos.

(3) La comprobación de la abolladura de la chapa se llevará a cabo para las resultantes de las tensiones existentes a la distancia de $0,4a$ o $0,5b$ (la que sea menor de las dos), a partir del borde del panel donde las tensiones sean mayores. En este caso, debe realizarse la comprobación de resistencia de la sección bruta en el extremo final del panel.

5 Resistencia a cortante

5.1 Generalidades

(1) Este apartado describe las reglas para obtener la resistencia a cortante de chapas considerando la abolladura ocasionada por las tensiones tangenciales en estado límite último, cuando se cumplen los siguientes criterios:

a) los paneles son rectangulares, dentro del ángulo límite definido en el apartado 2.3;

b) los rigidizadores, en caso de estar previstos, se disponen en la dirección longitudinal y/o transversal;

c) todos los taladros o cortes son pequeños (véase el apartado 2.3);

d) los elementos estructurales tienen sección constante.

(2) Las chapas con h_w/t mayor que $\frac{72}{\eta}\varepsilon$, para almas sin rigidizar, o $\frac{31}{\eta}\varepsilon\sqrt{k_t}$ para almas rigidizadas. Debe comprobarse frente a abolladura y deben disponer de rigidizadores transversales en las secciones de apoyo.

donde:

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

$\eta = 1,20$ para aceros de tipo hasta S460, y $\eta = 1$ para aceros de tipo superior.

NOTA 1: Para el valor de h_w véase la figura A25.5.1 y para k_τ, véase el apartado 5.3(3).

5.2 Resistencia de cálculo

(1) Para almas rigidizadas o no rigidizadas la resistencia de cálculo a cortante debe tomarse como:

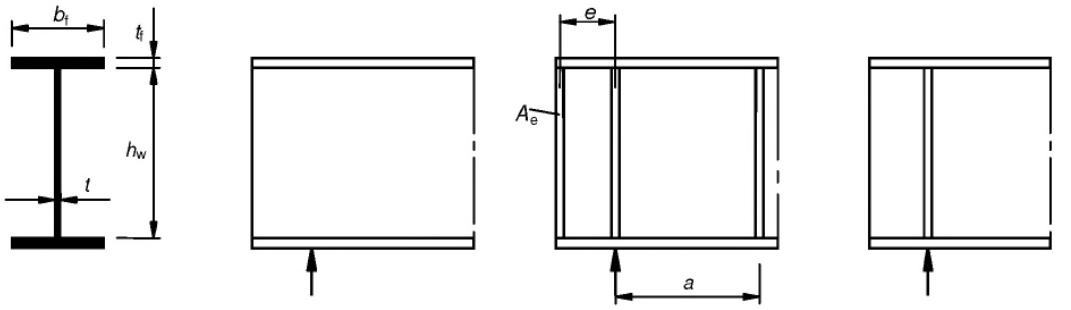
$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw}\, h_w\, t}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \qquad (5.1)$$

en la cual la contribución del alma viene dada por:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw}\, h_w\, t}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \qquad (5.2)$$

y la contribución debida a las alas $V_{bf,Rd}$ será de acuerdo con el apartado 5.4.

(2) Los rigidizadores y las soldaduras deben cumplir con los requisitos establecidos en los apartados 9.3 y 9.3.5 respectivamente.



Notación de la sección transversal | a) Panel sin rigidizador extremo | b) Panel extremo rígido | c) Panel extremo no rígido

Figura A25.5.1 Apoyos extremos

5.3 Contribución del alma

(1) Para las almas con rigidizadores transversales únicamente en las secciones de apoyo y para almas con otros rigidizadores transversales o longitudinales intermedios, o ambos, el coeficiente de contribución del alma χ_w a la resistencia frente a la abolladura por cortante debe obtenerse de la tabla A25.5.1 o de la figura A25.5.2.

Tabla A25.5.1 Coeficiente χ_w para la contribución del alma frente a abolladura por cortante

	Extremo rígido	Extremo no rígido
$\bar{\lambda_w} < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda_w} < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda_w}$	$0,83/\bar{\lambda_w}$
$\bar{\lambda_w} \geq 1,08$	$1,37/(0,7+\bar{\lambda_w})$	$0,83/\bar{\lambda_w}$

NOTA: Véase el apartado 6.2.6 en Anejo 22 del Código Estructural.

(2) La figura A25.5.1 muestra diferentes casos de apoyos extremos en vigas:

a) Panel sin rigidizador extremo, véase el apartado 6.1 (2), tipo c);

b) Panel extremo rígido, véase el apartado 9.3.1, este caso es también aplicable en paneles situados en un apoyo intermedio de una viga continua;

c) Panel extremo no rígido, véase el apartado 9.3.2.

(3) La esbeltez modificada $\bar{\lambda_w}$ de la tabla A25.5.1 y de la figura A25.5.2 puede tomarse como:

$$\bar{\lambda_w} = 0,76\sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} \qquad (5.3)$$

donde:

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E \qquad (5.4)$$

NOTA 1: Los valores de σ_E y k_t pueden tomarse del Apéndice A.

NOTA 2: La esbeltez modificada $\bar{\lambda_w}$ puede tomarse como sigue:

a) rigidizadores transversales únicamente en los apoyos:

$$\bar{\lambda_w} = \frac{h_w}{86,4t\varepsilon} \qquad (5.5)$$

b) rigidizadores transversales en los apoyos y con rigidizadores transversales o longitudinales intermedios, o ambos:

$$\bar{\lambda_w} = \frac{h_w}{37,4t\varepsilon\sqrt{k_\tau}} \qquad (5.6)$$

En dónde k_τ es el mínimo coeficiente de abolladura por cortante para el panel del alma.

NOTA 3: Cuando además de los rigidizadores transversales rígidos se utilizan rigidizadores transversales no rígidos, k_τ debe tomarse como el menor de los valores del alma entre dos rigidizadores transversales cualesquiera (por ejemplo, $a_2 x h_w$ y $a_3 x h_w$) y los paneles con el alma comprendida entre dos rigidizadores transversales rígidos que contengan rigidizadores transversales no rígidos ($a_4 x h_w$).

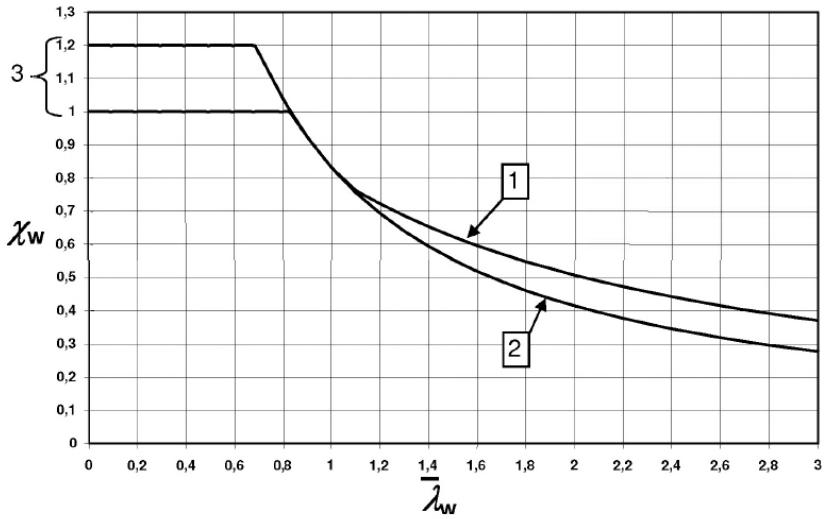
NOTA 4: Puede suponerse condiciones de contorno rígidas para paneles limitados por alas y los rigidizadores transversales rígidos. El análisis de la abolladura del alma se realiza sobre los paneles existentes entre dos rigidizadores transversales adyacentes (por ejemplo $a_1 x h_{wi}$ de la figura A25.5.3).

NOTA 5: Para rigidizadores transversales no rígidos, el valor mínimo de k_τ, puede tomarse a partir de los siguientes análisis de abolladura:

1. Considerando dos paneles de alma adyacentes con un rigidizador transversal flexible.
2. Considerando tres paneles de alma adyacentes con dos rigidizadores transversales flexibles.

Para el cálculo de k_τ, véase el Apéndice A.3.

(4) El momento de inercia de los rigidizadores longitudinales debe reducirse a 1/3 de su valor real para el cálculo de k_τ. Las formulaciones para k_τ, teniendo en cuenta esta reducción, pueden ser empleadas de acuerdo con el Apéndice A.3.



Leyenda

1 Panel extremo rígido
2 Panel extremo no rígido
3 Rango de valores recomendados de η

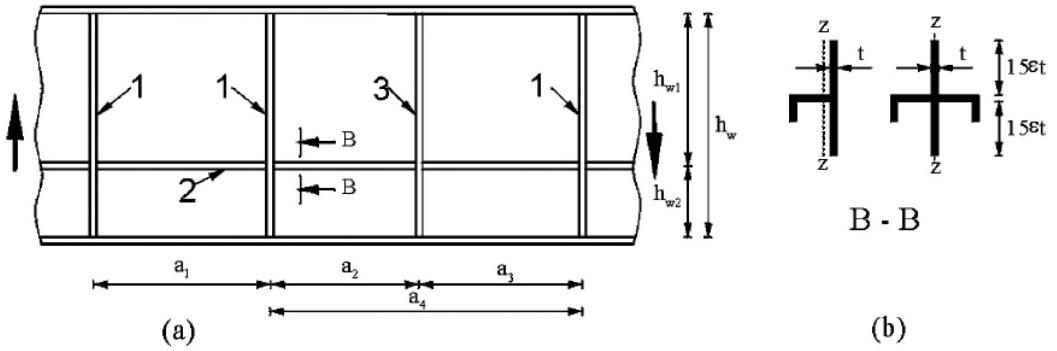
Figura A25.5.2 Coeficiente de abolladura por cortante χ_w

(5) Para almas con rigidizadores longitudinales, la esbeltez modificada $\bar{\lambda}_w$ en el punto (3) no debe ser menor que:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}}{37{,}4t\varepsilon\sqrt{k_{\tau i}}} \qquad (5.7)$$

donde h_{wi} y $k_{\tau i}$ se refieren al subpanel con mayor valor del parámetro de esbeltez $\bar{\lambda}_w$ de todos los subpaneles dentro del panel de dicha alma.

NOTA: Para calcular k_τ, se puede emplear la expresión dada en el apéndice A.3, considerando $k_{\tau st} = 0$.



Leyenda

1 Rigidizador transversal rígido
2 Rigidizador longitudinal
3 Rigidizador transversal no rígido

Figura A25.5.3 Alma con rigidizadores transversales y longitudinales

5.4 Contribución de las alas

(1) Si la resistencia del ala no se emplea completamente para soportar el momento flector $(M_{Ed} < M_{f,Rd})$, la contribución de las alas puede obtenerse como sigue:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f\, t_f^2\, f_{yf}}{c\gamma_{M1}}\left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}}\right)^2\right) \qquad (5.8)$$

b_f y t_f se toman del ala que proporciona la menor resistencia axil

b_f viene a ser un valor no mayor de $15\varepsilon t_f$ a cada lado del alma

$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}}$ es el momento resistente de cálculo de la sección formada únicamente por el área eficaz de las alas.

$$c = a\left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t\, h_w^2 f_{yw}}\right)$$

(2) Cuando el elemento se ve sometido a un axil N_{Ed}, entonces el valor de $M_{f,Rd}$ debe reducirse multiplicándolo por el siguiente coeficiente:

$$\left(1 - \frac{N_{Ed}}{\frac{(A_{f1}+A_{f2})f_{yf}}{\gamma_{M0}}}\right) \qquad (5.9)$$

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

5.5 Comprobación

(1) La comprobación debe llevarse a cabo como sigue:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \qquad (5.10)$$

donde V_{Ed} es el cortante de cálculo incluyendo el cortante producido por torsión.

6 Resistencia a cargas concentradas transversales

6.1 Generalidades

(1) La resistencia de cálculo del alma de las vigas laminadas y de las vigas soldadas, puede determinarse de acuerdo con el apartado 6.2, siempre que las alas comprimidas se encuentren coaccionadas en la dirección lateral.

(2) Se consideran tres modos de aplicación de las cargas:

a) Carga aplicada a través del ala y resistida por esfuerzos cortantes en el alma, véase figura A25.6.1 (a);

b) Carga aplicada en un ala y transmitida a través del alma directamente a la otra ala, véase la figura A25.6.1 (b).

c) Carga aplicada a través de un ala próxima a un extremo no rigidizado, véase la figura A25.6.1 (c).

(3) Para el caso de secciones de vigas en cajón con almas inclinadas debe comprobarse la resistencia tanto del alma como del ala. Los esfuerzos se toman teniendo en cuenta los componentes de la carga externa en el plano del alma y del ala respectivamente.

(4) La interacción de las cargas concentradas transversales, el momento flector y el esfuerzo axil debe comprobarse siguiendo el apartado 7.2.

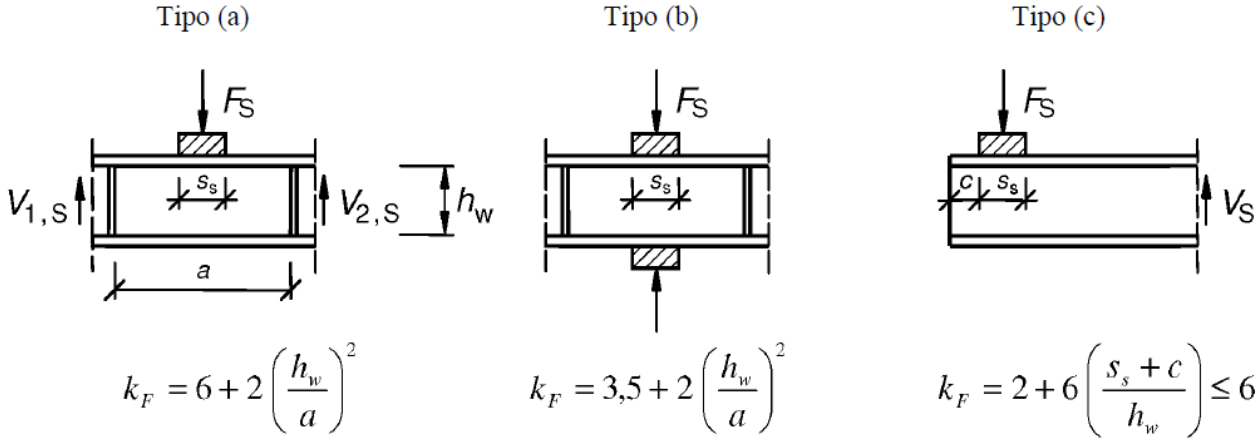


Figura A25.6.1 Coeficientes de abolladura para diferentes modos de aplicación de la carga

6.2 Resistencia de cálculo

(1) Para almas rigidizadas o no rigidizadas, la resistencia de cálculo frente a la abolladura local bajo cargas concentradas transversales debe obtenerse como sigue:

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}} \qquad (6.1)$$

donde:

t_w es el espesor del alma

f_{yw} es el límite elástico del alma

L_{eff} es la longitud efectiva para el cálculo frente a cargas concentradas transversales, que se determinan mediante la siguiente expresión:

$$L_{eff} = \chi_F \ell_y \qquad (6.2)$$

donde:

ℓ_y es la longitud efectiva de carga, véase el apartado 6.5, correspondiente a la longitud del apoyo rígido s_s, véase el apartado 6.3

χ_F es el coeficiente de reducción de abolladura local frente a cargas concentradas, véase el apartado 6.4(1).

6.3 Longitud de apoyo rígido

(1) La longitud de apoyo rígido s_s sobre el ala debe tomarse como la distancia sobre la cual la carga aplicada se considera perfectamente distribuida asumiendo una difusión de la carga a través del acero con una inclinación de 1:1, véase la figura A25.6.2. Sin embargo, s_s no debe tomarse mayor que h_w.

(2) Si se aplican varias cargas concentradas con poca separación entre sí, la resistencia debe comprobarse para cada carga por separado, así como la carga total, considerando s_s como la distancia entre los puntos de aplicación de las cargas de los extremos.

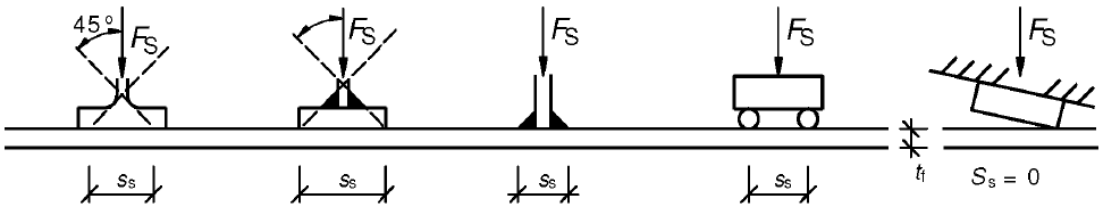


Figura A25.6.2 Longitud de apoyo rígido

(3) Si la superficie de apoyo de la carga aplicada forma un ángulo respecto a la superficie del ala, véase la figura A25.6.2, s_s debe tomarse como cero.

6.4 Coeficiente de reducción χ_F de la longitud efectiva para la resistencia

(1) El coeficiente de reducción χ_F se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\chi_F = \frac{0{,}5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1{,}0 \qquad (6.3)$$

donde:

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \qquad (6.4)$$

$$F_{cr} = 0{,}9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \qquad (6.5)$$

(2) Para almas sin rigidizadores longitudinales, el coeficiente k_F debe obtenerse a partir de las siguientes disposiciones:

Para almas con rigidizadores longitudinales k_F debe tomarse como:

$$k_F = 6 + 2\left[\frac{h_w}{a}\right]^2 + \left[5{,}44\frac{b_1}{a} - 0{,}21\right]\sqrt{\gamma_s} \qquad (6.6)$$

donde b_1 es la profundidad del subpanel cargado que se toma como la distancia libre entre el ala cargada y el rigidizador longitudinal.

$$\gamma_s = 10{,}9\frac{I_{s\ell,1}}{h_w t_w^3} \leq 13\left[\frac{a}{h_w}\right]^3 + 210\left[0{,}3 - \frac{b_1}{a}\right] \qquad (6.7)$$

donde $I_{s\ell,1}$, es la inercia del rigidizador longitudinal más cercano al ala cargada, considerando la contribución de las partes del alma, como se señala en la figura A25.9.1.

La ecuación (6.6) solo es válida para $0{,}05 \leq \frac{b_1}{a} \leq 0{,}3$ y $\frac{b_1}{h_w} \leq 0{,}3$ y para la carga tipo a) de la figura A25.6.1.

(3) ℓ_y debe obtenerse del apartado 6.5.

6.5 Longitud efectiva de carga

(1) La longitud efectiva de carga ℓ_y debe calcularse empleando dos parámetros dimensionales m_1 y m_2, obtenidos a partir de:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \qquad (6.8)$$

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

$$m_2 = 0 \quad \text{si } \bar{\lambda}_F \leq 0{,}5 \qquad (6.9)$$

Para secciones en cajón, el valor de b_f en la ecuación (6.8) debe limitarse a $15\varepsilon t_f$ a cada lado del alma.

(2) Para los casos a) y b) de la Figura A25.6.1, ℓ_y se obtiene empleando:

$$\ell_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}), \text{ siendo } \ell_y \leq \text{la distancia entre los rigidizadores transversales adyacentes} \quad (6.10)$$

(3) Para el caso c) ℓ_y debe tomarse como el menor de los valores obtenidos de las ecuaciones dadas por (6.10), (6.11) y (6.12).

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{\ell_e}{t_f}\right)^2 + m_2} \quad (6.11)$$

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (6.12)$$

donde:

$$\ell_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (6.13)$$

6.6 Comprobación

(1) La comprobación debe llevarse a cabo como se indica a continuación:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{\frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (6.14)$$

donde:

F_{Ed} es la carga concentrada transversal de cálculo

L_{eff} es la longitud eficaz para la resistencia a cargas concentradas transversales, véase el apartado 6.2(1)

t_w es el espesor de la chapa.

7 Interacción

7.1 Interacción entre cortante, momento flector y axil

(1) Siempre que el valor de $\bar{\eta}_3$ (véase más adelante) no exceda de 0,5, la resistencia de cálculo al momento flector y al axil no será necesario reducirla para permitir los cortantes. Si $\bar{\eta}_3$ es mayor que 0,5 la combinación de los efectos de flexión y cortante en el alma de una sección en I o una sección de viga en cajón debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right)(2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{para } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (7.1)$$

donde:

$M_{f,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo de la sección a flexión considerando exclusivamente la sección reducida de las alas.

$M_{pl,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo de la sección a flexión considerando la sección reducida de las alas y la totalidad del alma, con independencia de la clase de sección de esta.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

para $V_{bw,Rd}$ véase la expresión (5.2)

Adicionalmente debe cumplirse lo establecido en los apartados 4.6 y 5.5.

La evaluación de los efectos de las acciones debe incluir los efectos de segundo orden cuando ello sea pertinente.

(2) El criterio definido en el punto (1) debe comprobarse para todas las secciones que se encuentren a una distancia menor que $h_w/2$ de la sección de apoyo con rigidizador vertical.

(3) La resistencia al momento plástico $M_{f,Rd}$, puede tomarse como el producto del límite elástico del acero por el valor del área eficaz más pequeña del ala y por la distancia entre los centros de gravedad de las alas.

(4) Si se aplicase un esfuerzo axil N_{Ed}, el $M_{f,Rd}$ debe ser reemplazado por la resistencia del momento plástico reducido $M_{N,Rd}$ de acuerdo con el apartado 6.2.9 del Anejo 22 del Código Estructural y $M_{f,Rd}$ debe reducirse según el apartado 5.4(2). Si el axil fuese tan grande que se encuentre toda el alma comprimida, debe aplicarse el apartado 7.1(5).

(5) Debe comprobarse el ala de una sección de viga en cajón empleando el apartado 7.1(1) tomando $M_{f,Rd} = 0$ y τ_{Ed} como el valor promedio de las tensiones tangenciales concentradas en el ala, el cual no debe ser menor que la mitad de la máxima tensión tangencial en el ala y $\bar{\eta}_1$ se toma como η_1 de acuerdo con el apartado 4.6(1). Adicionalmente, los subpaneles deben ser comprobados empleando el valor promedio de las tensiones tangenciales contenidas en el subpanel, además de determinar χ_w para la abolladura por cortante del subpanel acorde con el apartado 5.3, suponiendo como rígidos los rigidizadores longitudinales.

7.2 Interacción entre carga concentrada transversal, momento flector y axil

(1) Si la viga se encuentra sometida a una carga concentrada transversal actuando en el ala comprimida en combinación con un momento flector y un axil, la resistencia debe comprobarse empleando los apartados 4.6, 6.6 y con la siguiente expresión de interacción:

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4 \qquad (7.2)$$

(2) Si la carga concentrada actúa en el ala traccionada, la resistencia debe comprobarse de acuerdo con el apartado 6. Adicionalmente, debe comprobarse que cumple también con lo establecido en el apartado 6.2.1(5) del Anejo 22 del Código Estructural.

8 Abolladura del alma inducida por el ala comprimida

(1) Para prevenir la posibilidad de abolladura del alma por efecto de las tensiones tangenciales concentradas que transmite el ala comprimida por efecto de la propia deformación por flexión, la esbeltez del alma h_w/t_w debe satisfacer el siguiente criterio:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k\frac{E}{f_{yf}}\sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \qquad (8.1)$$

donde:

A_w es el área del alma

A_{fc} área eficaz del ala comprimida

h_w es el canto del alma

t_w es el espesor del alma.

El valor del coeficiente k se toma:

- cuando se utilice la capacidad de giro plástico $k = 0,3$
- cuando se utilice la resistencia al momento plástico $k = 0,4$
- cuando se utilice la resistencia elástica al momento elástico $k = 0,55$

(2) En presencia de vigas curvas en alzado, con el ala comprimida en el lado cóncavo, la condición a cumplir será:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{k\frac{E}{f_{yf}}\sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}}{\sqrt{1+\frac{h_w E}{3rf_{yf}}}} \qquad (8.2)$$

siendo r el radio de curvatura del ala comprimida.

9 Rigidizadores

9.1 Generalidades

(1) En este apartado se dan los criterios para la comprobación de elementos rigidizadores en estructuras de chapa, como complemento a los criterios para la abolladura de chapa de los apartados 4 al 7.

(2) Cuando se verifica la resistencia frente a pandeo, la sección eficaz de un rigidizador puede tomarse como el área bruta del rigidizador más una porción de chapa de ancho igual a $15\varepsilon t$ o no mayor que el ancho real disponible a ambos lados del rigidizador sin solaparse con el ancho colaborante de los rigidizadores adyacentes, véase la figura A25.9.1

(3) En general, la carga axil actuante en un rigidizador transversal debe obtenerse como la suma de la carga resultante del esfuerzo cortante (véase el apartado 9.3.3(3)) y de las cargas externas aplicadas sobre el mismo.

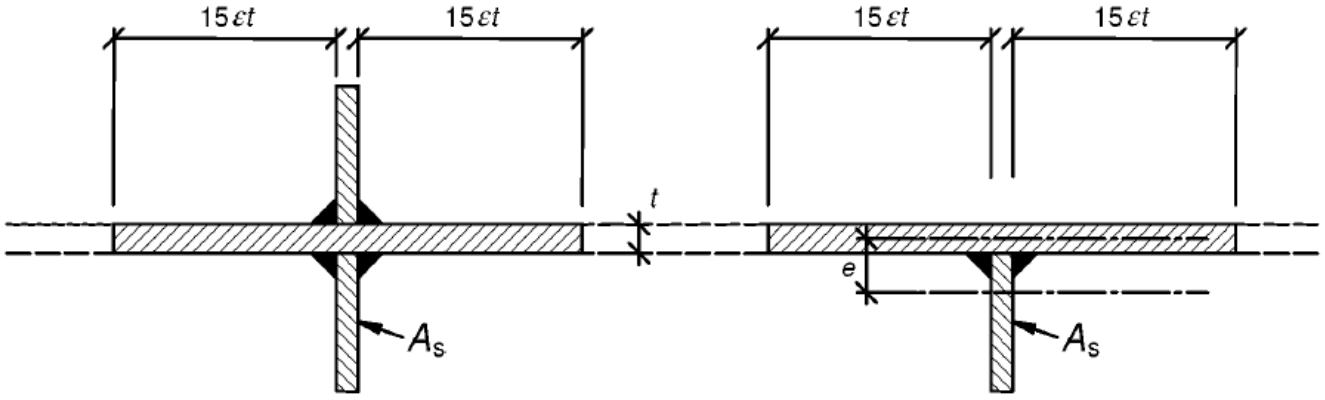


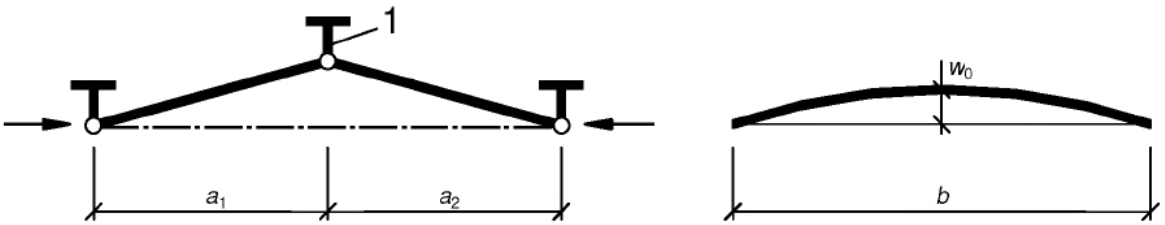
Figura A25.9.1 Sección transversal eficaz de un rigidizador

9.2 Tensiones normales

9.2.1 Requisitos mínimos para los rigidizadores transversales

(1) Con el fin de conseguir un soporte rígido para una chapa con o sin rigidizadores longitudinales, los rigidizadores transversales intermedios deben satisfacer los requisitos mínimos (de rigidez y de resistencia) que se indican a continuación.

(2) El rigidizador transversal debe ser tratado como un elemento simplemente apoyado con una imperfección inicial sinusoidal w_0 igual a $s/300$, siendo s la menor de las dimensiones a_1, a_2 o b, véase la figura A25.9.2. Donde a_1 y a_2 son las longitudes de los paneles adyacentes al rigidizador transversal considerado y b es la altura del rigidizador transversal entre los centros de gravedad de las alas o luz del propio rigidizador. Las excentricidades deben tenerse en cuenta correctamente.



Leyenda

1 Rigidizador transversal

Figura A25.9.2 Rigidizador transversal

(3) El rigidizador transversal debe soportar las fuerzas de desvío procedentes de los paneles comprimidos adyacentes bajo la hipótesis de que los dos rigidizadores transversales adyacentes son rígidos y se mantienen rectos bajo la acción conjunta de cualquier carga externa y con esfuerzo axil de acuerdo con la NOTA del apartado 9.3.3(3). Los paneles de chapa comprimidos y los rigidizadores longitudinales se consideran simplemente apoyados en los rigidizadores transversales.

(4) Debe comprobarse en estado límite último con un análisis elástico de segundo orden, que se satisfacen los dos criterios siguientes:

- la tensión máxima en el rigidizador no debe sobrepasar f_y/γ_{M1}
- la flecha adicional no debe ser superior a $b/300$.

(5) En ausencia de una fuerza axil en el rigidizador transversal, puede asumirse que ambos criterios asumidos en el punto (4) son correctos siempre que la inercia de los rigidizadores transversales I_{st} no sea inferior a:

$$I_{st} = \frac{\sigma_m}{E}\left(\frac{b}{\pi}\right)^4 \left(1 + w_0 \frac{300}{b} u\right) \qquad (9.1)$$

donde:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \frac{N_{Ed}}{b}\left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right)$$

$$u = \frac{\pi^2 E e_{max}}{\frac{f_y 300 b}{\gamma_{M1}}} \geq 1,0$$

e_{max} máxima distancia de la fibra extrema del rigidizador al centro de gravedad de éste

N_{Ed} máximo esfuerzo de compresión de los paneles adyacentes al rigidizador, no siendo menor que el producto de la tensión máxima de compresión por la mitad del área eficaz[p] de compresión del panel, incluyendo los rigidizadores

$\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ se definen en el apartado 4.5.3 y en el Apéndice A.

NOTA: Cuando una carga se aplica fuera del plano de los rigidizadores transversales, se remite al Anejo 29 del Código Estructural.

(6) Si el rigidizador se ve sometido a esfuerzo axil de compresión, debe incrementarse este en un valor $\Delta N_{st} = \sigma_m b^2/\pi^2$ con el propósito de tener en cuenta las fuerzas de desvío. Los criterios definidos en el punto (4) se aplican en caso de no ser necesario considerar ΔN_{st} en el cálculo de las tensiones uniformes a partir del axil en el rigidizador.

(7) De forma simplificada los requisitos establecidos en el punto (4) pueden comprobarse, en ausencia de axiles, empleando un análisis elástico de primer orden teniendo en cuenta la carga adicional equivalente lateral y distribuida de manera uniforme q actuando sobre la longitud b (9.2):

$$q = \frac{\pi}{4}\sigma_m(w_0 + w_{el}) \qquad (9.2)$$

donde:

σ_m se define anteriormente en el punto (5)

w_0 se define en la figura A25.9.2

w_{el} es la deformación elástica, que puede determinarse iterativamente o bien tomándose igual al máximo valor de la flecha adicional $b/300$.

(8) A menos de que se lleve a cabo un método más avanzado de análisis con el fin de prevenir el pandeo por torsión de los rigidizadores transversales de una sección abierta, debe satisfacerse el siguiente criterio:

$$\frac{I_T}{I_P} \leq 5,3\frac{f_y}{E} \qquad (9.3)$$

donde:

I_P es la inercia polar del rigidizador, considerado aisladamente, alrededor del borde fijado a la chapa rigidizada

I_T es la constante torsional de St. Venant (módulo de torsión uniforme) del rigidizador considerado aislado.

(9) Cuando se considere la rigidez de alabeo, los rigidizadores deben cumplir con el punto (8) o con el siguiente criterio:

$$\sigma_{cr} \geq \theta f_y \qquad (9.4)$$

donde:

σ_{cr} es la tensión crítica elástica para pandeo por torsión sin considerar las coacciones al giro de la chapa

θ es un parámetro para asegurar el comportamiento de la sección de Clase 3. Para su utilización se empleará el valor $\theta = 6$.

9.2.2 Requisitos mínimos para los rigidizadores longitudinales

(1) Los requisitos relacionados con el pandeo por torsión indicados en los puntos 9.2.1(8) y (9) son también aplicables a los rigidizadores longitudinales.

(2) Los rigidizadores longitudinales discontinuos que no atraviesan los rigidizadores transversales a través de aperturas realizadas en éstos, o que no están conectados a ambos lados del rigidizador transversal, deben:

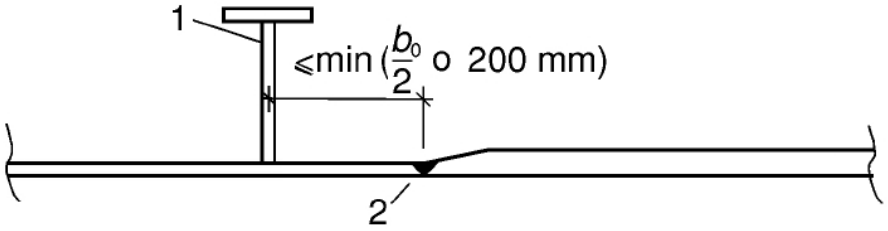
- emplearse únicamente en paneles de alma (es decir, no se debe disponer en las alas),
- no considerarse en el análisis global,

- no considerarse en el cálculo de tensiones,
- considerarse en el cálculo de los anchos eficaces[p] de subpaneles de alma,
- considerarse en el cálculo de las tensiones críticas elásticas empleadas en la respiración del alma.

(3) La comprobación resistente de estos rigidizadores se llevará a cabo acorde con lo establecido en los apartados 4.5.3 a 4.6.

9.2.3 Chapas soldadas

(1) Las soldaduras de los empalmes transversales de las chapas que presenten cambios en su espesor, deben estar próximas a un rigidizador transversal, véase la figura A25.9.3. Los efectos de la excentricidad no tienen que tenerse en cuenta, a no ser que la distancia del rigidizador a la unión soldada sea superior al menor de los valores de $\left(\frac{b_o}{2}\right)$ o de $200\ mm$, donde b_o es el ancho de una chapa entre rigidizadores longitudinales.



Leyenda

1 Rigidizador transversal.
2 Soldadura transversal.

Figura A25.9.3 Chapas soldadas

9.2.4 Cortes en los rigidizadores

(1) Las dimensiones de los agujeros en los rigidizadores longitudinales no deben superar los valores definidos en la figura A25.9.4.

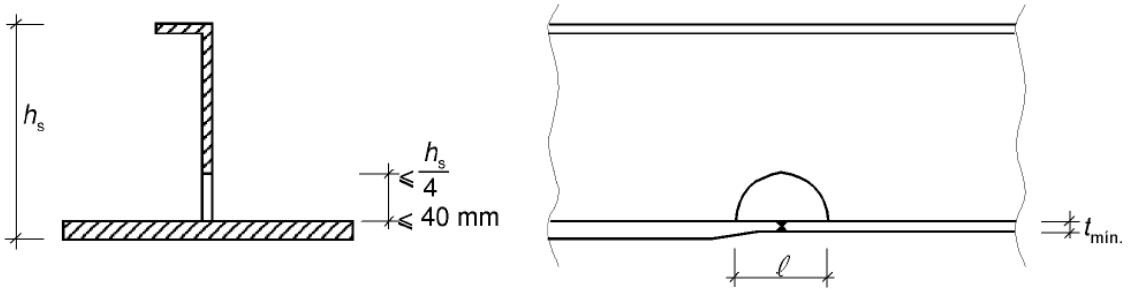


Figura A25.9.4 Cortes en rigidizadores longitudinales

(2) Los máximos valores para ℓ son:

$\ell \leq 6t_{min}$ para rigidizadores planos comprimidos

$\ell \leq 8t_{min}$ para cualquier otro tipo de rigidizadores comprimidos

$\ell \leq 15t_{min}$ para rigidizadores no comprimidos

donde t_{min} es el menor de los espesores de las chapas que se unen.

(3) Los valores límite de ℓ en el punto (2) para rigidizadores comprimidos pueden incrementarse con $\sqrt{\frac{\sigma_{x,Rd}}{\sigma_{x,Ed}}}$ cuando $\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}$ y no se supere el valor de $\ell \leq 15\mathrm{t}_{\min}$.

$\sigma_{x,Ed}$ es la tensión de compresión en el corte.

(4) En los rigidizadores transversales, los cortes no deben superar los valores definidos por la figura A25.9.5.

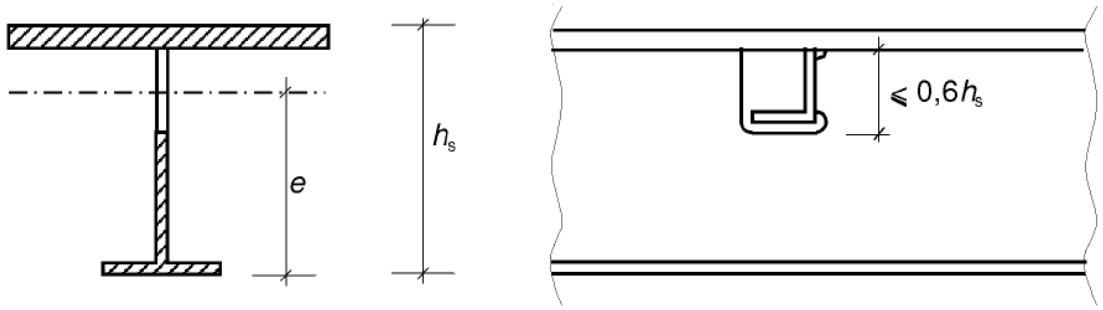


Figura A25.9.5 Cortes en rigidizadores transversales

(5) La sección bruta del alma adyacente al corte debe resistir un cortante V_{Ed}, donde

$$V_{Ed} = \frac{I_{net}}{e}\frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}\frac{\pi}{b_G} \qquad (9.5)$$

donde:

I_{net} es el momento de inercia de la sección neta del rigidizador transversal

e la máxima distancia desde eje neutro de la sección neta a la cara inferior del ala, véase la figura A25.9.5

b_G es la longitud del rigidizador transversal comprendido entre las alas.

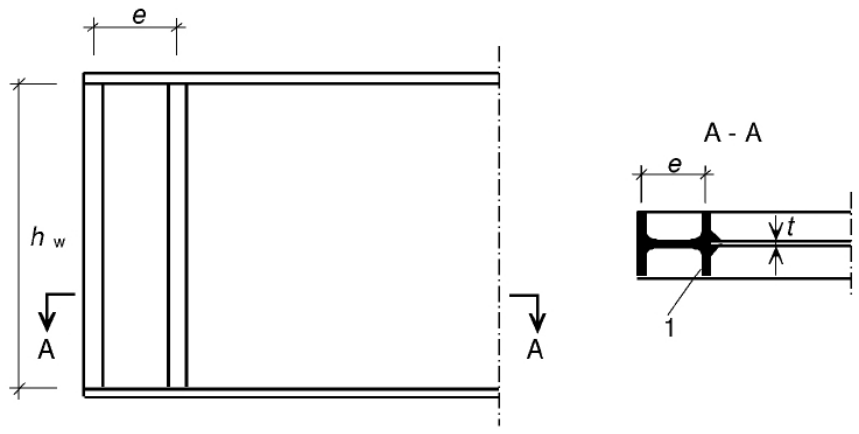
9.3 Cortante

9.3.1 Extremo rígido

(1) El extremo rígido (véase la figura A25.5.1) debe actuar como un rigidizador de apoyo resistiendo la reacción de los apoyos (véase el apartado 9.4) y como si se tratara de una viga corta resistiendo las tensiones longitudinales de membrana en el plano del alma.

NOTA: Para excentricidades debidas a desplazamientos de apoyos, véase el Anejo 29 del Código Estructural.

(2) Un extremo rígido puede estar compuesto por dos rigidizadores transversales dobles a ambos lados del alma que forman las alas de una viga corta de longitud h_w, véase la figura A25.5.1 (b). El panel del alma comprendido entre los rigidizadores constituye el alma de esta viga corta. De modo alternativo, el panel extremo rígido puede resolverse con la introducción de un perfil laminado, unido al extremo del panel del alma, tal y como se muestra en la figura A25.9.6.



Leyenda

1 Perfil insertado

Figura A25.9.6 Perfil laminado formando un extremo rígido

(3) Cada uno de los rigidizadores transversales dobles compuestos por chapas deben tener un área transversal de, al menos $4h_w t^2/e$, donde e es la distancia entre los centros de los rigidizadores, debiendo ser $e > 0,1h_w$, véase la figura A25.5.1 (b). Cuando un extremo rígido se resuelva con un perfil laminado en vez de elementos de chapas, su módulo resistente a flexión alrededor de un eje perpendicular al alma será como mínimo $4h_w t^2$.

(4) Como alternativa el extremo de una viga puede materializarse con un único rigidizador doble y con un rigidizador vertical próximo al apoyo, de tal forma que el subpanel resista el cortante máximo cuando sea proyectado con un extremo no rígido.

9.3.2 Rigidizadores actuando como extremos no rígidos

(1) Un extremo no rígido puede materializarse mediante un único rigidizador a ambos lados del alma, tal y como se muestra en la figura A25.5.1 (c). Éste podrá actuar como un rigidizador de apoyo resistiendo la reacción en el apoyo de la viga (véase el apartado 9.4).

9.3.3 Rigidizadores transversales intermedios

(1) Los rigidizadores intermedios que trabajan como soportes rígidos para los paneles interiores del alma deben comprobarse por resistencia y rigidez.

(2) Cuando se utilicen rigidizadores transversales intermedios flexibles, su rigidez se tendrá en cuenta en el cálculo de k_τ definido en el apartado 5.3(5).

(3) La sección eficaz de los rigidizadores intermedios que trabajan como soportes rígidos para paneles del alma deben tener una inercia mínima I_{st}:

si $a/h_w < \sqrt{2}$: $I_{st} \geq 1,5h_w^3\, t^3/a^2$ (9.6)

si $a/h_w \geq \sqrt{2}$: $I_{st} \geq 0,75h_w t^3$

NOTA: Los rigidizadores intermedios pueden calcularse a partir de un axil igual a $\left(\mathrm{V_{Ed}} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w{}^2}\mathrm{f_{yw}h_w t}/\left(\sqrt{3}\gamma_{M1}\right)\right)$ de acuerdo con el apartado 9.2.1(3). En el caso de cortantes variables la comprobación puede realizarse para un cortante a una distancia de $0,5\ \mathrm{h_w}$ del borde de la chapa sometida a mayor cortante.

9.3.4 Rigidizadores longitudinales

(1) Se debe comprobar la resistencia frente a tensiones normales de aquellos rigidizadores que se hayan considerado en el cálculo tensional de la sección transversal.

9.3.5 Soldaduras

(1) Las soldaduras ala-alma pueden ser calculadas para un flujo de cortante nominal V_{Ed}/h_w siempre que el valor de V_{Ed} no exceda de $\chi_w f_{yw} h_w t/\left(\sqrt{3}\gamma_{M1}\right)$. Para valores del esfuerzo cortante de cálculo que sean superiores a este límite, la soldadura entre almas y alas podrá dimensionarse para un flujo de cortante $\eta f_{yw} t/\sqrt{3}\,\gamma_{M1}$.

(2) En todos los otros casos, las soldaduras deben calcularse para transmitir los pertinentes esfuerzos perpendiculares y paralelos a los cordones entre los componentes a unir, teniendo en cuenta el método de análisis (elasto-plástico), los efectos de segundo orden y cualquier falta de unión entre las chapas.

9.4 Cargas transversales concentradas

(1) Si la resistencia de cálculo de un alma no rigidizada frente a cargas transversales concentradas resulta insuficiente, se debe disponer de rigidizadores transversales.

(2) La resistencia a pandeo fuera del plano de un rigidizador transversal sometido a una carga transversal concentrada y a cortante (véase 9.3.3(3)) debe determinarse según lo definido por el apartado 6.3.3 o por 6.3.4 del Anejo 22 del Código Estructural, empleando la curva c de pandeo. Cuando ambos extremos se suponen coaccionados lateralmente, debe emplearse una longitud de pandeo ℓ no menor que 0, 75 h_w. En los casos en que las condiciones de contorno ofrezcan una menor coacción lateral, debe emplearse un valor mayor de la longitud de pandeo ℓ. Si los rigidizadores tienen cortes en su extremo más cargado, la comprobación de su resistencia se llevará a cabo con las secciones próximas a dicho extremo.

(3) En aquellos casos en los que se emplee un rigidizador a un solo lado del alma u otros rigidizadores no simétricos, la excentricidad resultante se tendrá en cuenta al aplicar lo establecido en el apartado 6.3.3 o 6.3.4 del Anejo 22 del Código Estructural. Si se supone que los rigidizadores proporcionan arriostramiento lateral al ala comprimida, éstos deben cumplir los criterios de resistencia y rigidez establecidos para la comprobación frente a pandeo por torsión lateral.

10 Método de las tensiones reducidas

(1) El siguiente método puede emplearse para determinar el límite tensional en chapas rigidizadas y no rigidizadas.

NOTA 1: Este es un método alternativo al método del ancho eficaz especificado de los apartados 4 al 7, el cual tiene en cuenta lo siguiente:

- $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ y τ_{Ed} se consideran actuando simultáneamente,
- la limitación tensional de la parte más débil de la sección puede condicionar la resistencia de la sección completa.

NOTA 2: La tensión límite puede emplearse también para determinar las áreas eficaces equivalentes.

(2) En el caso de paneles rigidizados y no rigidizados sometidos a tensiones combinadas $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ y τ_{Ed} podrá asumirse las propiedades de una sección de Clase 3, cuando

$$\frac{\rho \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1 \qquad (10.1)$$

donde:

$\alpha_{ult,k}$ es el coeficiente mínimo de amplificación para que con las cargas de cálculo se alcanza el valor característico de la resistencia en el punto más crítico de la chapa, véase el punto (4)

ρ es el coeficiente de reducción que depende de la esbeltez $\bar{\lambda}_P$ de la chapa para tener en cuenta la abolladura, véase el punto (5)

γ_{M1} es el coeficiente parcial aplicado en este método.

(3) La esbeltez adimensional de la chapa $\bar{\lambda}_P$, debe tomarse de:

$$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \qquad (10.2)$$

donde:

α_{cr} es el coeficiente de amplificación mínimo de las cargas de cálculo para las cuales se alcanza el límite elástico de la chapa bajo un campo de tensión completa, véase el punto (6).

NOTA 1: Para el cálculo de α_{cr} en chapas rigidizadas sometidas a un campo completo de tensiones, la chapa rigidizada puede modelizarse empleando las directrices de los apartados 4 y 5, sin embargo, no hay reducción de la inercia de los rigidizadores longitudinales como se especifica en el apartado 5.3(4).

NOTA 2: Cuando no puede determinarse α_{cr} para una chapa y sus subpaneles como un todo, puede aplicarse comprobaciones por separado para los subpaneles y para la chapa completa.

(4) Para determinar $\alpha_{ult,k}$ puede emplearse el siguiente criterio de plastificación para la resistencia:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 \qquad (10.3)$$

donde $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ y τ_{Ed} son los componentes del campo de tensiones en estado límite último.

NOTA: La ecuación (10.3) se asume que el límite de resistencia se alcanza cuando se produce la plastificación sin considerar fenómenos de inestabilidad (abolladura o pandeo).

(5) El coeficiente de reducción ρ puede determinarse a partir de los siguientes métodos:

a) como el mínimo valor de los coeficientes siguientes:

ρ_x para tensiones longitudinales, indicado en el apartado 4.5.4(1), teniendo en cuenta un comportamiento tipo columna cuando proceda

ρ_z para tensiones transversales indicado en el apartado 4.5.4(1), teniendo en cuenta un comportamiento tipo columna cuando proceda

χ_w para tensiones tangenciales indicado en el apartado 5.3(1).

La esbeltez $\bar{\lambda}_P$ en cada caso se calculará de acuerdo con la ecuación (10.2)

NOTA: Este método conduce a la siguiente comprobación:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M1}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M1}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 \leq \rho^2 \qquad (10.4)$$

NOTA: Para el cálculo de ρ_z correspondiente a tensiones transversales, deben aplicarse las reglas definidas por el apartado 4 para tensiones normales σ_x pero en la dirección z de σ_z. Por razones de coherencia, no se debe aplicar el apartado 6.

b) un valor interpolado entre los valores ρ_x, ρ_z y χ_w determinados en a) mediante el empleo de la fórmula para $\alpha_{ult,k}$ como función de interpolación.

NOTA: Este método conduce a la siguiente comprobación:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y/\gamma_{M1}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y/\gamma_{M1}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 \leq 1 \qquad (10.5)$$

c) en el caso de chapas sometidas a compresión biaxial, se debe usar la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 - V \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y/\gamma_{M1}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y/\gamma_{M1}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w f_y/\gamma_{M1}}\right)^2 \leq 1 \quad (10.5a)$$

donde:

$V=\rho_x \cdot \rho_z$ cuando $\sigma_{x,Ed}$ y $\sigma_{z,Ed}$, son ambas compresiones, entonces V = 1.

NOTA 1: La verificación de las fórmulas (10.3), (10.4), (10.5) y (10.5a) incluyen una interacción tipo placa entre los esfuerzos cortantes, momentos flectores, axiles y fuerzas transversales concentradas, por lo que el apartado 7 no debe aplicarse.

NOTA 2: En caso de chapas con tracción y compresión se utilizarán las ecuaciones (10.4) y (10.5) únicamente para las partes comprimidas.

(6) Cuando los valores de α_{cr} para un campo completo de tensiones no estén disponibles y puede emplearse el valor de $\alpha_{cr,i}$ para varios componentes del campo de tensiones $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ y τ_{Ed}, el valor de α_{cr} puede calcularse como sigue:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1+\Psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\Psi_z}{4\alpha_{cr,z}} + \left[\left(\frac{1+\Psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\Psi_z}{4\alpha_{cr,z}}\right)^2 + \frac{1-\Psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1-\Psi_z}{2\alpha_{cr,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2}\right]^{1/2} \quad (10.6)$$

donde: $\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}}$

$\alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}}$

$\alpha_{cr} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}}$

y $\sigma_{cr,x}$, $\sigma_{cr,z}$ y τ_{cr}, Ψ_x y Ψ_z se calculan a partir de los apartados 4 al 6.

(7) La rigidización y las disposiciones constructivas de los paneles de chapa deben calcularse de acuerdo con el apartado 9.

Apéndice A. Recomendaciones para el cálculo de los coeficientes de reducción para chapas rigidizadas

A.1 Chapa ortótropa equivalente

(1) Las chapas con más de dos rigidizadores longitudinales pueden tratarse como chapas ortótropas.

(2) La tensión crítica de abolladura elástica de la chapa ortótropa equivalente puede obtenerse:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p}\sigma_E \qquad \text{(A.1)}$$

donde:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)b^2} = 190.000\left(\frac{t}{b}\right)^2 \text{ en [N/mm}^2\text{]}$$

$k_{\sigma,p}$ es el coeficiente de abolladura de acuerdo con la teoría de chapa ortótropa, considerando los rigidizadores longitudinales distribuidos de manera uniforme sobre la chapa

b se define en la figura A25.A.1

t es el espesor de la chapa.

NOTA 1: El coeficiente de abolladura $k_{\sigma,p}$ se obtiene a partir de diagramas apropiados para la rigidización distribuida, o mediante simulaciones numéricas. Alternativamente se pueden emplear los diagramas para rigidizadores ubicados de manera discreta siempre y cuando se pueda ignorar la abolladura local de los subpaneles y se estudie de manera separada.

NOTA 2: $\sigma_{cr,p}$ es la tensión crítica de abolladura elástica de la chapa en el borde del panel donde aparece la máxima tensión de compresión, véase la figura A25.A.1.

NOTA 3: En el caso de comprobación de un panel del alma, el ancho b en las ecuaciones (A.1) y (A.2) podrá reemplazarse por el canto del alma h_w.

NOTA 4: Para chapas rigidizadas con al menos tres rigidizadores longitudinales con la misma separación, el coeficiente $k_{\sigma,p}$ de abolladura de chapa (abolladura global de la chapa rigidizada) puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2\left(\left(1+\alpha^2\right)^2+\gamma-1\right)}{\alpha^2(\Psi+1)(1+\delta)} \quad \text{si} \quad \alpha \le \sqrt[4]{\gamma} \qquad \text{(A.2)}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4(1+\sqrt{\gamma})}{(\Psi+1)(1+\delta)} \quad \text{si} \quad \alpha > \sqrt[4]{\gamma}$$

con:

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \ge 0,5$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p}$$

$$\delta = \frac{A_{sl}}{A_p}$$

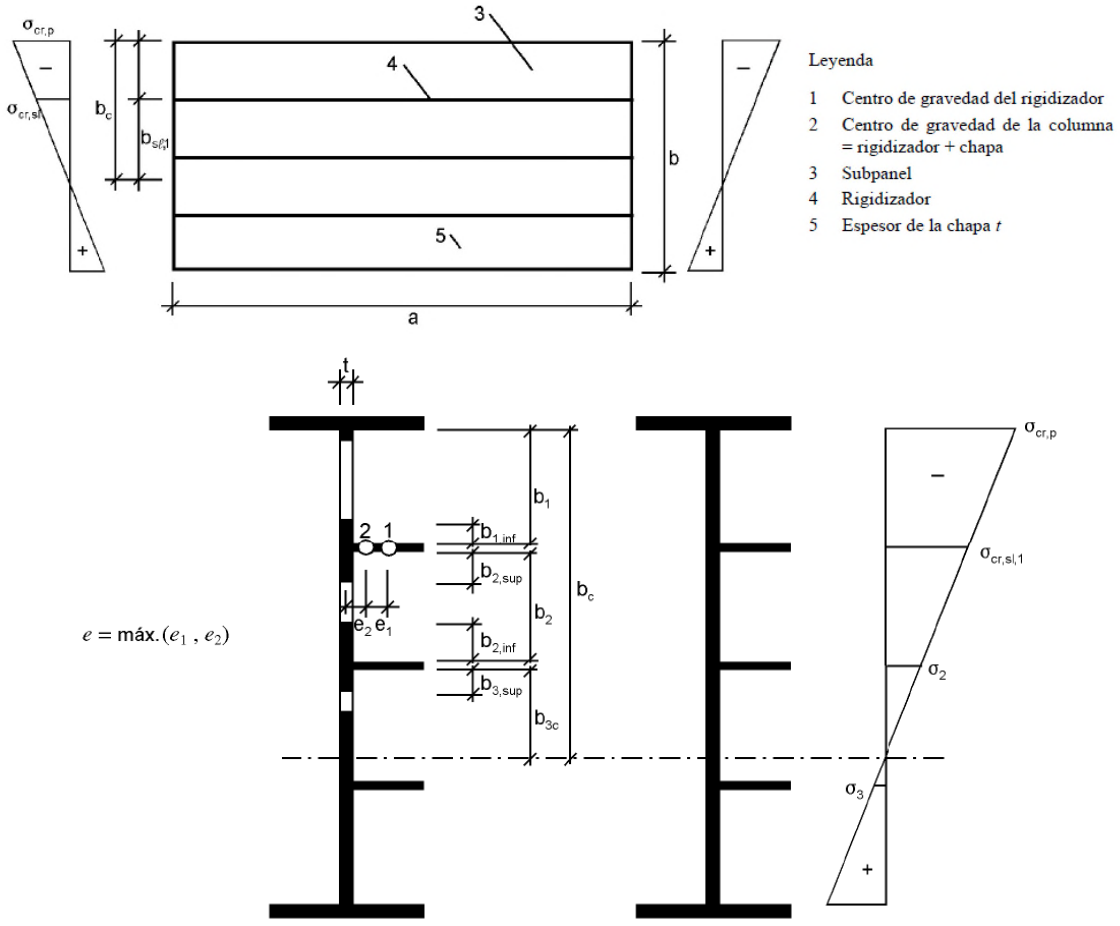
$$\alpha = \frac{a}{b} \ge 0,5$$

donde:

I_{sl} es el momento de inercia de la chapa rigidizada considerada como un todo

I_p es el momento de inercia de una chapa$= \frac{bt^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{bt^3}{10,92}$

A_{sl}	es el sumatorio de las áreas brutas de todos los rigidizadores longitudinales considerados individualmente
A_p	es el área bruta de la chapa $= bt$
σ_1	es el valor máximo de la tensión en el extremo de un panel
σ_2	es el valor mínimo de la tensión en el otro extremo del panel
a, b y t	están definidos en la figura A25.A.1.



	Ancho para el área bruta	Ancho para el área eficaz de acuerdo con la tabla A25.4.1	Condición para Ψ_i
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\Psi_1}{5-\Psi_1}b_1$	$\frac{3-\Psi_1}{5-\Psi_1}b_{1,eff}$	$\Psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\Psi_2}b_2$	$\frac{2}{5-\Psi_2}b_{2,eff}$	$\Psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\Psi_2}{5-\Psi_2}b_2$	$\frac{3-\Psi_2}{5-\Psi_2}b_{2,eff}$	$\Psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4b_{3c}$	$0,4b_{3c,eff}$	$\Psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

Figura A25.A.1 Notación empleada para chapas longitudinalmente rigidizadas

A.2 Abolladura crítica en chapas con uno o dos rigidizadores en la zona comprimida

A.2.1 Procedimiento general

(1) Si la chapa rigidizada tiene solamente un único rigidizador longitudinal en la zona comprimida, el procedimiento descrito en el apartado A.1 puede simplificarse considerando que el estudio de una columna sobre lecho elástico refleja el efecto placa en la dirección perpendicular a la columna. La tensión crítica elástica de pandeo de la columna equivalente puede obtenerse siguiendo lo indicado en el apartado A.2.2.

(2) Para el cálculo de $A_{sl,1}$ e $I_{sl,1}$ la sección bruta de la columna debe tomarse igual a la sección bruta del rigidizador considerando los tramos adyacentes de la chapa del modo que se describe a continuación. En caso de que el subpanel se encuentre totalmente en la zona comprimida, se tomará un porcentaje de $(3-\Psi)/(5-\Psi)$ de su ancho b_1 en el borde del panel con menor tensión y un porcentaje de $2/(5-\Psi)$ para el borde con mayor tensión. En caso de producirse un cambio de signo en la distribución de tensiones (cambio de compresión a tracción) dentro del mismo subpanel, se tomará como parte de la columna un porcentaje del $0,4$ del ancho b_c de la parte comprimida de este subpanel, véase la figura A25.A.2 y también la tabla A25.4.1, donde Ψ es la relación de tensiones relativa al subpanel considerado.

(3) El área eficazᵖ de la sección transversal $A_{sl,1,eff}$ de la columna ficticia debe tomarse como el área eficazᵖ de la sección transversal del rigidizador $A_{s\ell,eff}$ y de las partes efectivasᵖ de la chapa, véase la figura A25.A.2. La esbeltez del elemento de chapa en la columna ficticia puede determinarse de acuerdo con el apartado 4.4(4), con $\sigma_{com,Ed}$ calculado para la sección transversal bruta de la chapa.

(4) Si $\rho_c f_{yd}/\gamma_{M1}$, con ρ_c de acuerdo con el apartado 4.5.4(1), es mayor que la tensión media en la columna ficticia $\sigma_{com,Ed}$, no debe realizarse la reducción del área eficazᵖ de dicha columna. Por otra parte, la reducción de acuerdo con la ecuación (4.6) se sustituye por:

$$A_{c,eff,loc} = \frac{\rho_c f_y A_{s\ell,1}}{\sigma_{com,Ed}\gamma_{M1}} \qquad \text{(A.3)}$$

(5) La reducción mencionada en el apartado A.2.1(4) debe aplicarse únicamente al área de la columna ficticia. No será necesario aplicar la reducción a otras partes comprimidas de la chapa, pero sí debe tenerse en cuenta la reducción por abolladura en los subpaneles.

(6) Como alternativa a emplear un área eficazᵖ de acuerdo con el apartado A.2.1(4), la resistencia de la columna puede determinarse acorde con los apartados A.2.1(5) a (7) y comprobarse si excede el valor ponderado de la tensión $\sigma_{com,Ed}$.

NOTA: Este enfoque puede emplearse también en el caso de rigidizadores múltiples en los cuales pueden despreciarse la coacción de la chapa, en este caso la columna ficticia se considera libre de pandear fuera del plano del alma.

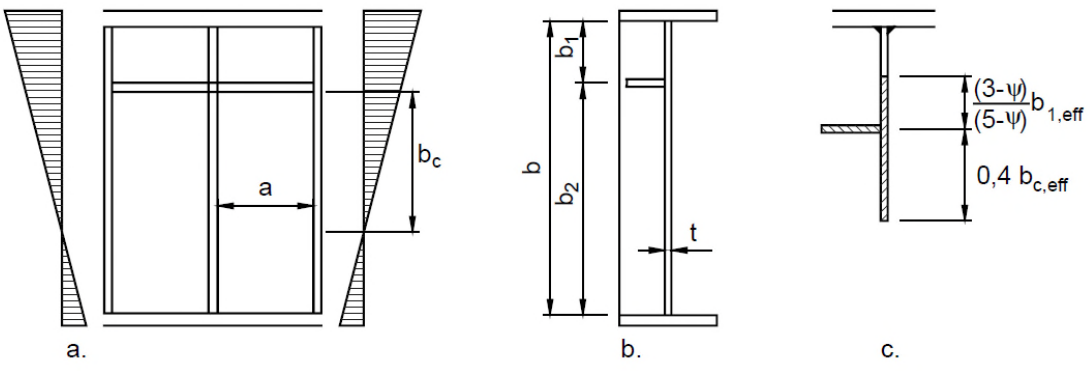


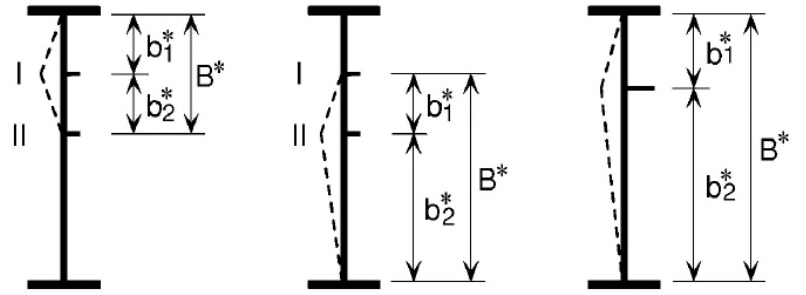
Figura A25.A.2 Notación empleada para chapas con un único rigidizador en la zona comprimida

(7) Si la chapa rigidizada tiene dos rigidizadores longitudinales en la zona comprimida, puede aplicarse el procedimiento de un único rigidizador descrito en el apartado A.2.1(1), véase la figura A25.A.3. En primer lugar, se asume que cada uno de los rigidizadores pandea mientras que el otro actúa como soporte rígido. Posteriormente debe comprobarse el pandeo simultáneo de ambos rigidizadores, para ello se contempla un único rigidizador que agrupa el efecto de ambos de la siguiente manera:

a) la suma de las respectivas áreas y momentos de inercia $I_{s\ell}$ para un rigidizador individual.

b) Estará localizada en la línea de aplicación de la resultante de las respectivas fuerzas de cada uno de los rigidizadores individuales.

Para cada una de estas situaciones ilustradas en la figura A25.A.3 se calcula el valor apropiado de $\sigma_{cr,p}$, véase el apartado A.2.2(1), con $b_1 = b_1^*$, $b_2 = b_2^*$, y $B^* = b_1^* + b_2^*$, véase la figura A25.A.3.



	Rigidizador I	Rigidizador II	Rigidizador agrupado
Área	$A_{s\ell,\mathrm{I}}$	$A_{s\ell,\mathrm{II}}$	$A_{s\ell,\mathrm{I}} + A_{s\ell,\mathrm{II}}$
Momento de inercia	$I_{s\ell,\mathrm{I}}$	$I_{s\ell,\mathrm{II}}$	$I_{s\ell,\mathrm{I}} + I_{s\ell,\mathrm{II}}$

Figura A25.A.3 Notación aplicada para chapa con dos rigidizadores en la zona comprimida

A.2.2 Modelo simplificado de columna ficticia coaccionada por la chapa

(1) En el caso de una chapa rigidizada con un rigidizador longitudinal localizado en la zona comprimida, la tensión crítica elástica de pandeo del rigidizador puede calcularse como sigue, sin tener en cuenta los rigidizadores en la zona de tracción:

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{1{,}05\,E}{A_{s\ell,1}}\frac{\sqrt{I_{s\ell,1}t^3\,b}}{b_1 b_2} \quad \text{si } a \geq a_c$$

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 E\, I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1}a^2} + \frac{E\,t^3 b\,a^2}{4\,\pi^2(1-\nu^2)A_{s\ell,1}b_1^2 b_2^2} \quad \text{si } a < a_c \qquad \text{(A.4)}$$

Con $a_c = 4{,}33\sqrt[4]{\frac{I_{s\ell,1}\,b_1^2 b_2^2}{t^3\,b}}$

donde:

$A_{sl,1}$ es el área bruta de la columna ficticia obtenida del apartado A.2.1(2)

$I_{sl,1}$ es el momento de inercia de la sección transversal bruta de la columna ficticia definida en el apartado A.2.1(2) alrededor de un eje que pase por su centro de gravedad y paralelo al plano de la chapa

b_1, b_2 son las distancias de los bordes longitudinales del alma a los rigidizadores $b_1 + b_2 = b$.

(2) En el caso de una chapa rigidizada con dos rigidizadores longitudinales localizados en la zona de compresión, el límite elástico por abolladura crítica de la chapa es el valor más bajo de los tres cálculos

anteriores empleando la ecuación (A.4) con $b_1 = b_1^*$, $b_2 = b_2^*$, y $b = B^*$. Los rigidizadores en la zona de tracción se ignoran en el cálculo.

A.3 Coeficientes de abolladura por cortante

(1) Para chapas con rigidizadores transversales rígidos y sin rigidizadores longitudinales o con más de dos rigidizadores longitudinales, el coeficiente de abolladura por cortante k_τ puede obtenerse como sigue:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00(h_w/a)^2 + k_{\tau s\ell} \qquad \text{para } a/h_w \geq 1 \qquad \text{(A.5)}$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34(h_w/a)^2 + k_{\tau s\ell} \qquad \text{para } a/h_w < 1$$

donde: $k_{\tau sl} = 9\left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{s\ell}}{t^3 h_w}\right)^3}$ siendo no menor que $\frac{2,1}{t}\sqrt[3]{\frac{I_{s\ell}}{h_w}}$

a es la distancia entre rigidizadores transversales (véase la figura A25.5.3)

$I_{s\ell}$ es el momento de inercia del rigidizador longitudinal respecto al eje z, véase la figura A25.5.3(b). Para almas con dos o más rigidizadores longitudinales, no necesariamente equidistantes, $I_{s\ell}$ es la suma de la rigidez de cada rigidizador.

NOTA: No se considera en la ecuación (A.5) los rigidizadores transversales no rígidos intermedios.

(2) La ecuación (A.5) puede aplicarse a chapas con uno o dos rigidizadores longitudinales, únicamente si la relación de aspecto $\alpha = \frac{a}{h_w}$ cumple que $\alpha \geq 3$. Para chapas con un o dos rigidizadores longitudinales y con una relación de aspecto $\alpha < 3$ el coeficiente de abolladura por cortante debe tomarse de la siguiente fórmula:

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3+0,18\frac{I_{s\ell}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2\sqrt[3]{\frac{I_{s\ell}}{t^3 h_w}} \qquad \text{(A.6)}$$

Apéndice B. Recomendaciones para los elementos estructurales no uniformes

B.1 Generalidades

(1) Las reglas del apartado 10 son aplicables a las almas de elementos estructurales con alas no paralelas como ocurre en vigas acarteladas y las almas con aperturas regulares e irregulares y con los rigidizadores no ortogonales.

(2) Para determinar α_{ult} y α_{crit}, pueden calcularse aplicando el método de los elementos finitos, véase el Apéndice C.

(3) Los coeficientes de reducción ρ_x, ρ_z y χ_w para la esbeltez $\bar{\lambda}_P$ pueden obtenerse a partir de la curva apropiada de abolladura de chapa, véanse los apartados 4 y 5.

NOTA: Los coeficientes de reducción ρ_x, ρ_z y χ_w también pueden determinarse como sigue:

$$\rho = \frac{1}{\phi_P + \sqrt{\phi_P^2 - \bar{\lambda}_P}} \qquad \text{(B.1)}$$

donde $\phi_P = \frac{1}{2}\left(1 + \alpha_P\left(\bar{\lambda}_P - \bar{\lambda}_{P0}\right) + \bar{\lambda}_P\right)$

y $\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}}$

Los valores de $\bar{\lambda}_{P0}$ yα_p se muestran a continuación en la tabla A25.B.1. Los valores en la tabla A25.B.1 han sido calibrados con las curvas de abolladura de los apartados 4 y 5. Proporcionan una correlación directa con la imperfección geométrica equivalente mediante la fórmula:

$$e_0 = \alpha_P\left(\bar{\lambda}_P - \bar{\lambda}_{P0}\right)\frac{t}{6}\frac{1 - \frac{\rho\bar{\lambda}_P}{\gamma_{M1}}}{1 - \rho\bar{\lambda}_P} \qquad \text{(B.2)}$$

Tabla A25.B.1 Valores de $\bar{\lambda}_{P0}$ y α_p

Producto	Modo de inestabilidad predominante	α_p	$\bar{\lambda}_{P0}$
Laminado en caliente	tensión normal longitudinal para $\Psi \geq 0$	0, 13	0, 70
	tensión normal longitudinal para $\Psi < 0$ cortante tensión transversal		0, 80
Soldado o conformado en frío	tensión normal longitudinal para $\Psi \geq 0$	0, 34	0, 70
	tensión normal longitudinal para $\Psi < 0$ cortante tensión transversal		0, 80

B.2 Interacción entre abolladura de chapa y pandeo lateral de torsión de los elementos estructurales

(1) El método descrito en el apartado B.1 puede extenderse para comprobar la combinación de la abolladura de una chapa con el pandeo lateral por torsión de una viga, calculando los valores de α_{ult} y α_{cr} como sigue a continuación:

α_{ult} es el mínimo factor de amplificación de carga para que las acciones de cálculo alcancen el valor característico de la resistencia de la sección transversal más crítica, sin considerar la abolladura de chapa o el pandeo lateral por torsión

α_{cr} es el mínimo factor de amplificación de carga para que las acciones de cálculo para alcancen la carga crítica elástica de una viga, considerando la abolladura de chapa y los modos de pandeo lateral por torsión.

(2) En el caso de que α_{cr} contenga modos de pandeo lateral por torsión, el coeficiente de reducción ρ empleado debe ser el menor de los siguientes valores: el coeficiente de reducción descrito con el apartado B.1(3) y el valor de χ_{LT} para el pandeo lateral por torsión acorde con el apartado 6.3.3 del Anejo 22 del Código Estructural.

Apéndice C. Recomendaciones para el cálculo por métodos de los elementos finitos (EF)

C.1 Generalidades

(1) El siguiente apéndice recoge recomendaciones para el empleo del método de los elementos finitos (EF) para la comprobación de los estados límite último, de servicio o fatiga de las estructuras formadas por chapas.

NOTA 2: Estas recomendaciones están dirigidas a ingenieros con experiencia en el empleo de métodos de elementos finitos.

(2) La elección del método de los elementos finitos dependerá del problema a analizar. La elección puede basarse en las siguientes hipótesis:

Tabla A25.C.1 Hipótesis relativa al método de los EF

Nº	Comportamiento del material	Comportamiento geométrico	Imperfecciones, véase el apartado C.5	Ejemplos de uso
1	lineal	lineal	no	Efectos de arrastre por cortante elástico, resistencia elástica
2	no lineal	lineal	no	Resistencia plástica en ELU
3	lineal	no lineal	no	Carga crítica de abolladura de chapa
4	lineal	no lineal	si	Resistencia elástica a la abolladura de chapa
5	no lineal	no lineal	si	Resistencia elasto-plástica en ELU

C.2 Uso

(1) Al emplear el método de EF en los cálculos estructurales se debe tener especial cuidado en:

- la modelización del componente estructural y de sus condiciones de contorno,
- la elección del programa de cálculo adecuado y su documentación,
- el uso de imperfecciones,
- la modelización de las propiedades del material,
- la modelización de las cargas,
- la modelización del criterio de estado límite,
- los coeficientes parciales a aplicar.

Los modelos de elementos finitos que se usen para analizar el comportamiento de chapas delgadas estarán contrastados con ejemplos de referencia.

C.3 Modelización

(1) La elección del modelo de EF (modelos definidos por elementos tipo lámina o elementos sólidos) y el tamaño de la malla propuesta debe ser conforme con la precisión requerida en los resultados. En caso de duda en la aplicación de la malla o el tipo de método de EF a emplear, debe verificarse con un análisis más sensible con su sucesivo refinado de la malla.

(2) La modelización por métodos de EF se realiza ya sea para:

- un elemento estructural completo,

- o parte de un elemento estructural.

NOTA: Un ejemplo de elemento completo podría ser el alma y/o la chapa inferior de una viga continua con sección en cajón en la región del apoyo intermedio donde la chapa inferior trabaje a compresión. Un ejemplo de subestructura podría ser un subpanel de una chapa inferior bajo una carga plana en 2D.

(3) Las condiciones de contorno en los apoyos, las interfaces y los detalles para introducir las cargas deben ser elegidos para obtener resultados del lado de la seguridad.

(4) Debe tomarse para las propiedades geométricas los valores nominales.

(5) Cuando se consideren las imperfecciones, estas se basarán en las formas y amplitudes dadas por el apartado C.5.

(6) Las propiedades de los materiales deben basarse en las reglas descritas en el apartado C.6(2).

C.4 Elección del programa de cálculo y la documentación

(1) El programa de cálculo elegido debe ser adecuado para el análisis a realizar y su fiabilidad ha de ser contrastable.

NOTA: La fiabilidad del producto podrá ser comprobado por un banco normalizado de pruebas adecuadas.

(2) El tamaño de la malla, las cargas aplicadas, las condiciones de contorno y otros datos a introducir en el modelo, así como los resultados deben de documentarse de forma que puedan ser comprobados por terceros.

C.5 Uso de las imperfecciones

(1) Cuando las imperfecciones deben incluirse en un modelo de EF, deben tenerse en cuenta tanto las imperfecciones geométricas como las estructurales.

(2) A menos que se realice un análisis más exhaustivo de las imperfecciones geométricas y estructurales, se podrán emplear imperfecciones geométricas equivalentes. De cara a su utilización, se empleará un valor del 80% de las tolerancias geométricas de fabricación.

NOTA 2: Las imperfecciones estructurales relativas a las tensiones residuales pueden ser representadas por el patrón de tensión procedente de los procesos de fabricación con amplitudes equivalentes de los valores medios (o esperados).

(3) Debe comprobarse la apropiada dirección de imperfección para obtener la resistencia más baja.

(4) Pueden emplearse las hipótesis a asumir para las imperfecciones geométricas equivalentes acordes con la tabla A25.C.2 y la figura A25.C.1.

Tabla A25.C.2 Imperfecciones geométricas equivalentes

Tipo de imperfección	Componente	Forma	Magnitud
Global	Elemento estructural con longitud ℓ	Arco	Véase Anejo 22 del Código Estructural, Tabla A22.5.1
Global	Rigidizador longitudinal con longitud a	Arco	Mínimo entre $(a/400, b/400)$
Local	Panel o subpanel de lados$a$ o b	Modo propio de abolladura	Mínimo entre $(a/200, b/200)$
Local	Rigidizador o ala sometido a torsión	Torsión en arco	$1/50$

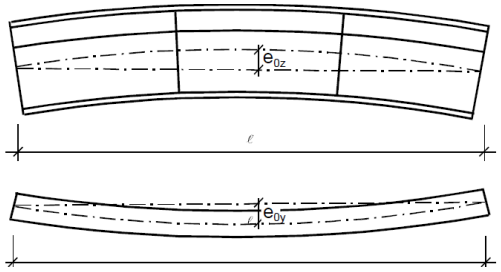
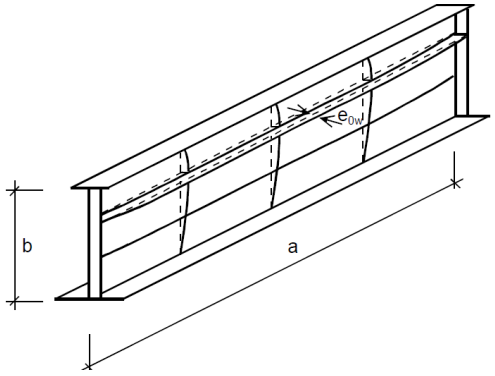
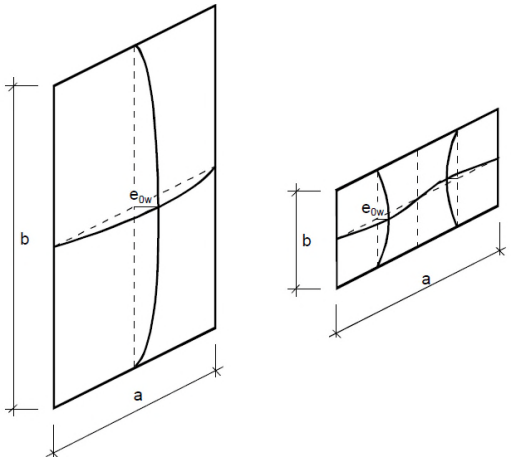
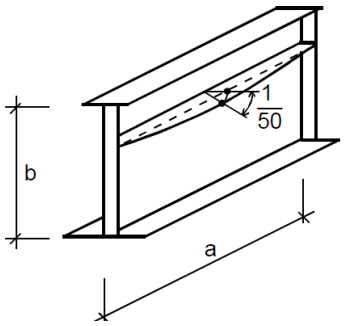
Tipo de imperfección	Componente
Elemento de longitud ℓ Imperfección global	
Rigidizador longitudinal de longitud a Imperfección global	
Panel local o subpanel Imperfección local	
Rigidizador local o ala sometida a giro por torsión Imperfección local	

Figura A25.C.1 Modelización de las imperfecciones geométricas equivalentes

(5) Cuando se combinen estas imperfecciones, debe elegirse una imperfección principal y las imperfecciones que la acompañan pueden reducirse al 70%.

NOTA 1: Cualquier tipo de imperfección puede tomarse como imperfección principal, las otras pueden tomarse como imperfecciones que acompañan.

NOTA 2: Pueden aplicarse las imperfecciones geométricas equivalentes como fuerzas equivalentes que actúan sobre los elementos estructurales.

C.6 Propiedades del material

(1) Deben tomarse las propiedades de los materiales con sus valores característicos.

(2) Dependiendo de la precisión requerida y de las deformaciones máximas alcanzadas pueden emplearse los siguientes enfoques para el comportamiento del material, véase la figura A25.C.2:

a) elasto-plástico sin endurecimiento,

b) elasto-plástico con pseudo-endurecimiento (por razones numéricas),

c) elasto-plástico con endurecimiento lineal,

d) curva real de tensión-deformación calculada a partir del diagrama tensión-deformación medida como sigue a continuación:

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

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

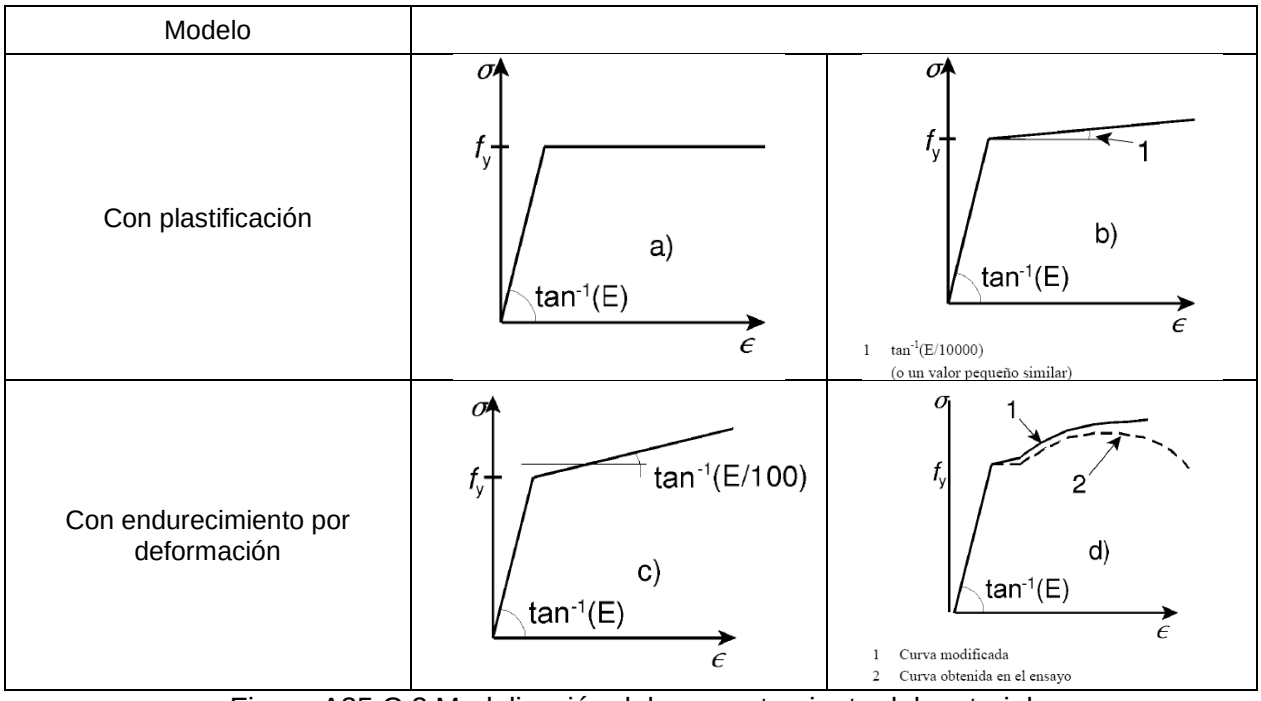


Figura A25.C.2 Modelización del comportamiento del material

NOTA: El módulo elástico E se corresponde con su valor nominal.

C.7 Cargas

(1) Las cargas aplicadas en estructuras deben incluir los correspondientes coeficientes de amplificación de carga y de combinación. Por simplificación, puede emplearse un único coeficiente de amplificación α.

C.8 Criterio de estado límite

(1) Pueden emplearse los siguientes criterios de estado límite:

1. para estructuras sensibles a fenómenos de inestabilidad:

   obtención de la carga máxima.

2. para regiones sometidas a tensiones de tracción:

   obtención del valor límite de deformación de membrana principal, tomando un valor límite del 5% para las dichas deformaciones.

NOTA 2: Puede emplearse como alternativa otros criterios en estado límite, tales como el criterio de plastificación o de la limitación de la zona de plastificación.

C.9 Coeficientes parciales

(1) El coeficiente de amplificación de carga α_u en estado límite último debe ser suficiente para asegurar la fiabilidad requerida.

(2) El coeficiente de amplificación requerido para la fiabilidad, depende de otros dos coeficientes:

1. α_1 para cubrir la incertidumbre relativa al modelo de EF empleado. Debe obtenerse a partir de calibraciones de ensayos experimentales, véase el Apéndice D del Anejo 18 del Código Estructural.
2. α_2 para cubrir la dispersión relativa a los modelos de resistencia y a las cargas. Debe tomarse como γ_{M1} si gobierna la inestabilidad y γ_{M2} si gobierna la fractura.

(3) Debe verificar que:

$$\alpha_u > \alpha_1 \alpha_2 \qquad \text{(C.2)}$$

Se utilizarán los valores de γ_{M1} y γ_{M2} establecidos en el Anejo 22 del Código Estructural.

Apéndice D. Recomendaciones para los elementos estructurales con almas corrugadas

D.1 Generalidades

(1) Las reglas descritas en este Apéndice D son válidas para vigas armadas en I con almas corrugadas trapezoidales o sinusoidales, acordes con la figura A25.D.1.

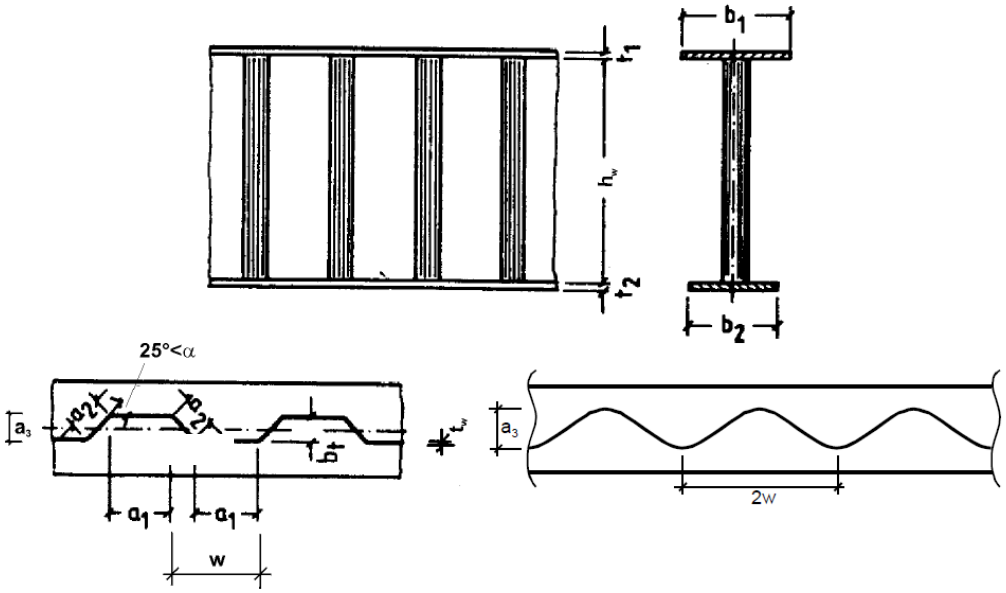


Figura A25.D.1 Nomenclatura

D.2 Estado límite último

D.2.1 Resistencia a flexión

(1) El momento resistente a flexión $M_{y,Rd}$ debe tomarse como el mínimo valor de:

$$M_{y,Rd} = min\left\{\underbrace{\frac{b_2 t_2 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}}\left(h_w + \frac{t_1+t_2}{2}\right)}_{tracción\ del\ ala}; \underbrace{\frac{b_1 t_1 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}}\left(h_w + \frac{t_1+t_2}{2}\right)}_{comp.del\ ala}; \underbrace{\frac{b_1 t_1\, \chi\, f_{yf}}{\gamma_{M1}}\left(h_w + \frac{t_1+t_2}{2}\right)}_{comp.del\ ala}\right\} \qquad (D.1)$$

donde:

$f_{yf,r}$ es el valor del límite elástico reducido debido a los momentos flectores transversales que actúan en las alas

$$f_{yf,r} = f_{yf} f_T$$

$$f_T = 1 - 0,4\sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{\frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}}}$$

$\sigma_x(M_z)$ es la tensión debida al momento flector transversal en el ala

χ es el coeficiente de reducción por pandeo lateral, de acuerdo con el apartado 6.3 del Anejo 22 del Código Estructural.

NOTA1: El momento flector transversal M_z, resulta del flujo de cortantes a través de las alas, como indica la figura A25.D.2.

NOTA 2: Para el caso de almas corrugadas sinusoidales, f_T se toma igual a 1,0.

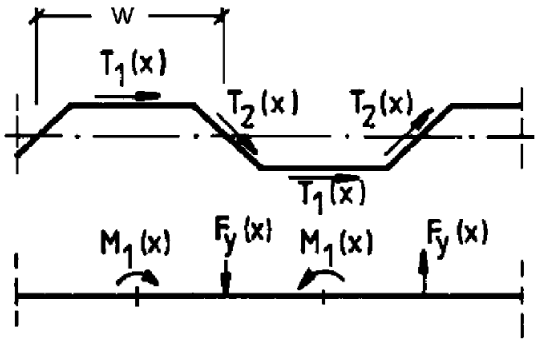


Figura A25.D.2 Momentos transversales M_z debido a la introducción de cortantes dentro del ala

(2) El área eficazp del ala comprimida debe determinarse de acuerdo con el apartado 4.4(1) empleando el valor más alto del parámetro de esbeltez $\bar{\lambda}_P$ definido en el apartado 4.4(2). El coeficiente de abolladura k_σ debe tomarse como el mayor valor de a) y b):

a) $k_\sigma = 0,43 + \left(\frac{b}{a}\right)^2$ (D.2)

donde b es el ancho máximo del ala exterior medida desde el pie de la soldadura hasta el borde libre.

$$a = a_1 + 2a_4$$

b) $k_\sigma = 0,60$ (D.3)

D.2.2 Resistencia a cortante

(1) La resistencia al cortante $V_{bw,Rd}$ puede tomarse como:

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}\sqrt{3}} h_w t_w \quad \text{(D.4)}$$

donde χ_c es el menor de los coeficientes de reducción para la abolladura local $\chi_{c,\ell}$ y para la abolladura global $\chi_{c,g}$, como se define en los puntos (2) y (3).

(2) El coeficiente de reducción $\chi_{c,\ell}$ para la abolladura local puede calcularse a partir de:

$$\chi_{c,\ell} = \frac{1,15}{0,9+\bar{\lambda}_{c,l}} \leq 1,0 \quad \text{(D.5)}$$

donde:

$$\bar{\lambda}_{c,\ell} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,\ell}\sqrt{3}}} \quad \text{(D.6)}$$

$$\tau_{cr,\ell} = \left(5,34 + \frac{a_3 s}{h_w t_w}\right) \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left[\frac{t_w}{s}\right]^2 \quad \text{(D.7)}$$

donde:

w es la longitud de una semionda, véase la figura A25.D.1

s es la longitud desarrollada de una semionda, véase la figura A25.D.1.

(3) El coeficiente de reducción $\chi_{c,g}$ para la abolladura global debe tomarse como:

$$\chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5+\bar{\lambda}_{c,g}^{\ 2}} \leq 1,0 \quad \text{(D.8)}$$

donde:

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g}\sqrt{3}}} \qquad \text{(D.9)}$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32{,}4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x D_z^3} \qquad \text{(D.10)}$$

$$D_x = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} \frac{w}{s}$$

$$D_z = \frac{E I_z}{w}$$

I_z momento de inercia del área de una corruga de longitud w, véase la figura A25.D.1.

NOTA 1: s e I_z están calculadas a partir de la forma real de la corruga.

NOTA 2: La ecuación (D.10) se aplica a chapas con bordes que puedan considerarse articulados.

D.2.3 Requisitos para los extremos con rigidizadores

(1) Los rigidizadores de los extremos estructurales deben calcularse de acuerdo con el apartado 9.

Apéndice E. Métodos alternativos recomendados para determinar las secciones eficaces

E.1 Áreas eficaces para niveles de tensión por debajo del límite elástico

(1) Puede aplicarse la siguiente formulación, como alternativa al método descrito en el apartado 4.4(2), para determinar las áreas eficaces para niveles de tensión por debajo del límite elástico:

a) para elementos interiores comprimidos:

$$\rho = \frac{1-0{,}055(3+\Psi)/\bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0{,}18\frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0{,}6)} \qquad \text{si } \rho \leq 1{,}0 \qquad \text{(E.1)}$$

b) para elementos exteriores comprimidos:

$$\rho = \frac{1-0{,}188/\bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0{,}18\frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0{,}6)} \qquad \text{si } \rho \leq 1{,}0 \qquad \text{(E.2)}$$

Para las notaciones véanse los apartados 4.4(2) y 4.4(4). Aplicar el apartado 4.4(5) para el cálculo de la resistencia de abolladura global.

E.2 Áreas eficaces para rigidez

(1) Para el cálculo de las áreas eficaces para rigideces, las esbelteces $\bar{\lambda}_{p,ser}$ en estado límite de servicio pueden calcularse a partir de:

$$\bar{\lambda}_{p,ser} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,ser}}{f_y}} \qquad \text{(E.3)}$$

donde:

$\sigma_{com,Ed,ser}$ se define como la tensión de compresión máxima (calculada en base a la sección eficaz) en el elemento correspondiente bajo las cargas en estado límite de servicio.

(2) El momento de inercia puede calcularse a partir de la interpolación entre la sección bruta y la sección eficaz para la correspondiente combinación de carga, empleando la siguiente expresión:

$$I_{eff} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{\sigma_{com,Ed,ser}}\left(I_{gr} - I_{eff}\left(\sigma_{com,Ed,ser}\right)\right) \qquad \text{(E.4)}$$

donde:

I_{gr} es el momento de inercia de la sección bruta

σ_{gr} es la tensión máxima de flexión en estado límite de servicio calculada con la sección bruta

$I_{eff}\left(\sigma_{com,Ed,ser}\right)$ es el momento de inercia de la sección eficaz teniendo en cuenta la abolladura de acuerdo con el apartado E.1, calculado para la tensión máxima $\sigma_{com,Ed,ser} \geq \sigma_{gr}$ dentro de la luz de vano considerada.

(3) El momento de inercia eficaz I_{eff}, puede tomarse variable a lo largo del vano considerado los puntos más desfavorables. Alternativamente, puede emplearse un valor uniforme basado en el máximo momento positivo absoluto bajo cargas de servicio.

(4) Estos cálculos requieren iteraciones, pero puede llevarse a cabo una aproximación conservadora con un único cálculo basado en un nivel tensional igual o mayor que $\sigma_{com,Ed,ser}$.