

## Estructuras de acero Cálculo plástico de secciones

	<i>Página</i>
1. <b>Criterio de plastificación de Von Mises</b> .....	1
2. <b>Resistencia de las secciones</b> .....	1
3. <b>Secciones de cálculo</b> .....	2
4. <b>Comprobación de secciones</b> .....	3
4.1. Secciones sometidas a tracción .....	3
4.2. Secciones sometidas a compresión.....	3
4.3. Secciones sometidas a esfuerzo cortante.....	4
4.4. Secciones sometidas a flexión .....	6
4.5. Secciones sometidas a torsión.....	7
4.6. Secciones sometidas a flexión y cortante .....	7
4.7. Secciones sometidas a flexión compuesta sin cortante.....	8
4.8. Secciones sometidas a flexión, axil y cortante.....	8
4.9. Secciones sometidas a cortante y torsión .....	9
4.10. Secciones sometidas a flexión y torsión .....	9
5. <b>Comprobación de barras</b> .....	9
5.1. Barras solicitadas a tracción.....	9
5.2. Barras solicitadas a compresión. Pandeo .....	10
5.2.1. Barras rectas de sección constante y axil constante.....	10
5.2.2. Esfuerzos axiles variables.....	14
5.2.3. Barras de sección variable .....	14
5.2.4. Elementos triangulados.....	15
5.2.5. Pilares de edificios .....	16
5.2.6. Barras de sección compuesta.....	18
5.3. Barras solicitadas a flexión.....	19
5.3.1. Pandeo lateral .....	20
5.3.2. Abolladura del alma por cortante .....	23
5.3.3. Cargas concentradas .....	25
5.4. Barras solicitadas a flexión y tracción .....	28
5.5. Barras solicitadas a flexión y compresión .....	28



## Estructuras de acero

### Cálculo plástico de secciones

#### 1. Criterio de plastificación de Von Mises

Aunque en el caso de las clases 1 y 2 es una opción holgadamente segura, es admisible utilizar en cualquier caso criterios de comprobación basados en distribuciones elásticas de tensiones, siempre que en ningún punto de la sección, (y en clase 4 considerando sólo la eficaz), las tensiones de cálculo, combinadas conforme el criterio de plastificación de Von Mises, superen la resistencia de cálculo.

En un punto de una chapa sometido a un estado plano de tensión, será:

$$\sqrt{\sigma_{xd}^2 + \sigma_{zd}^2 - \sigma_{xd} \cdot \sigma_{zd} + 3 \cdot \tau_{xzd}^2} \leq f_{yd} \quad [1]$$

El valor del límite elástico  $f_{yd}$  utilizado será el correspondiente al material base. No se considerará el efecto de endurecimiento derivado del conformado en frío o cualquier otra operación.

#### 2. Resistencia de las secciones

La capacidad resistente de las secciones corresponde a posiciones alejadas de extremos de barra o singularidades, sea por cambios bruscos de forma o por aplicación de cargas puntuales o reacciones.

La capacidad resistente para cualquier clase de esfuerzo o combinación de esfuerzos se obtendrá a partir de la distribución de tensiones que optimice el valor de la resistencia, que equilibre el esfuerzo o la combinación de esfuerzos actuante sobre la sección y que en ningún punto sobrepase el criterio de plastificación.

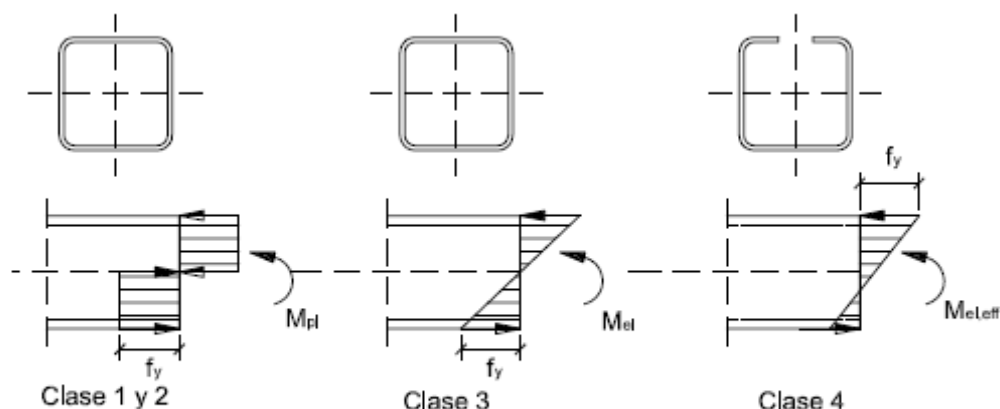


Figura 6.1 Modelos admitidos de distribución de tensiones: caso de flexión pura

La capacidad resistente de las secciones depende de su clase. Para secciones de clase 1 y 2 la distribución de tensiones se escogerá atendiendo a criterios plásticos. Para las secciones de clase 3 la distribución seguirá un criterio elástico y para las secciones de clase 4 este mismo criterio se establecerá sobre la sección eficaz (figura 6.1).

### 3. Secciones de cálculo

Como sección de cálculo  $A$ , para las clases 1, 2, y 3, se tomará la total y para la clase 4, la neta o eficaz.

En el cálculo de las características de la sección no se considerará ningún tipo de recubrimiento, aunque sea metálico (tratamientos de galvanizado).

El área neta  $A_{neta}$  de una sección es la que se obtiene descontando de la nominal el área de los agujeros y rebajes. Cuando los agujeros se dispongan a tresbolillo el área a descontar será el mayor de:

- La de agujeros y rebajes que coincidan con la sección recta
- La de todos los agujeros situados en cualquier línea quebrada, restando el producto  $\frac{s^2 \cdot t}{4 \cdot p}$  por cada espacio entre agujeros (figura 6.2), donde  $t$  es el espesor de la chapa agujereada.

En el caso de agujeros en angulares, el espaciado  $p$  entre agujeros se mide según indica la figura 6.2.

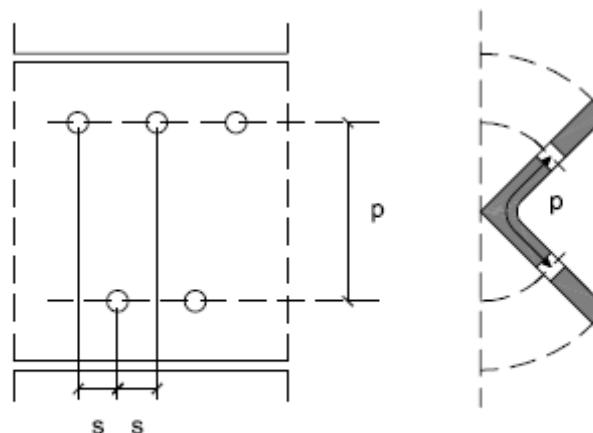


Figura 6.2

## 4. Comprobación de secciones

### 4.1. Secciones sometidas a tracción

El esfuerzo debido a la tracción  $N_{Ed}$  no podrá superar la resistencia de la sección a tracción  $N_{t,Rd}$ , tal y como se recoge en [2].

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} \quad [2]$$

Como resistencia de las secciones a tracción  $N_{t,Rd}$  puede emplearse la resistencia plástica de la sección bruta  $N_{pl,Rd}$  [3], sin superar la resistencia última de la sección neta  $N_{u,Rd}$  [4].

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_{yd} \quad [3]$$

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{neta} \cdot f_{ud} \quad [4]$$

Matemáticamente, esta condición se puede expresar:

$$N_{t,Rd} = \text{mín}[N_{pl,Rd}, N_{u,Rd}] \quad [5]$$

La resistencia de cálculo  $f_{yd}$  es el cociente entre la tensión de límite elástico  $f_y$  y el coeficiente de seguridad del material  $\gamma_M$  (aptdo. 2.3.3 DB SE-A).

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_M} \quad [6]$$

La resistencia última de cálculo del material  $f_{ud}$  es el cociente entre la resistencia última del material  $f_u$  y el coeficiente de seguridad para resistencia última  $\gamma_{M2}$  ( $\gamma_{M2}=1,25$ ).

$$f_{ud} = \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad [7]$$

La condición de agotamiento dúctil del acero se cumple cuando:

$$N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd} \quad [8]$$

O sea, cuando la fluencia de la sección bruta precede a la rotura de la sección neta.

### 4.2. Secciones sometidas a compresión

El esfuerzo debido a la compresión  $N_{Ed}$  no podrá superar la resistencia de la sección a compresión  $N_{c,Rd}$ , tal y como indica la condición [9].

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \quad [9]$$

La resistencia de las secciones a compresión  $N_{c,Rd}$  será la menor de:

- a) La resistencia plástica de la sección bruta  $N_{pl,Rd}$  (para las secciones de clase 1 a 3).

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_{yd} \quad [10]$$

- b) La resistencia de la sección eficaz para las secciones de clase 4.

$$N_{u,Rd} = A_{ef} \cdot f_{yd} \quad [11]$$

Se descontará el área de los agujeros cuando no se dispongan los correspondientes tornillos o cuando se trate de agujeros rasgados o sobredimensionados.

#### 4.3. Secciones sometidas a esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante de cálculo  $V_{Ed}$  será menor que la resistencia de las secciones a cortante  $V_{c,Rd}$ , que en ausencia de torsión, será igual a la resistencia plástica  $V_{pl,Rd}$ :

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} \quad [12]$$

La resistencia plástica de la sección a cortante viene definida por la expresión:

$$V_{pl,Rd} = A_V \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad [13]$$

donde el término relativo al área a cortante  $A_V$  tiene los siguientes valores:

Perfiles en I o H cargados paralelamente al alma  $A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \quad [14]$

(como simplificación)  $A_V = h \cdot t_w \quad [15]$

Perfiles en U cargados paralelamente al alma  $A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r_1) \cdot t_f \quad [16]$

(como simplificación)  $A_V = h \cdot t_w$

Perfiles en I, H o U cargados perpendicularmente al alma  $A_V = A - d \cdot t_w \quad [17]$

Secciones armadas cargadas paralelamente a las almas  $A_V = \sum d \cdot t \quad [18]$

Secciones armadas cargadas perpendicularmente a las almas

$$A_v = A - \sum d \cdot t \quad [19]$$

Secciones circulares huecas

$$A_v = 2 \cdot \frac{A}{\pi} \quad [20]$$

Secciones macizas

$$A_v = A \quad [21]$$

siendo  $A$  la sección total y  $d$ ,  $t_f$ ,  $t_w$ ,  $r$  y  $r_1$  según significados de la figura B.1

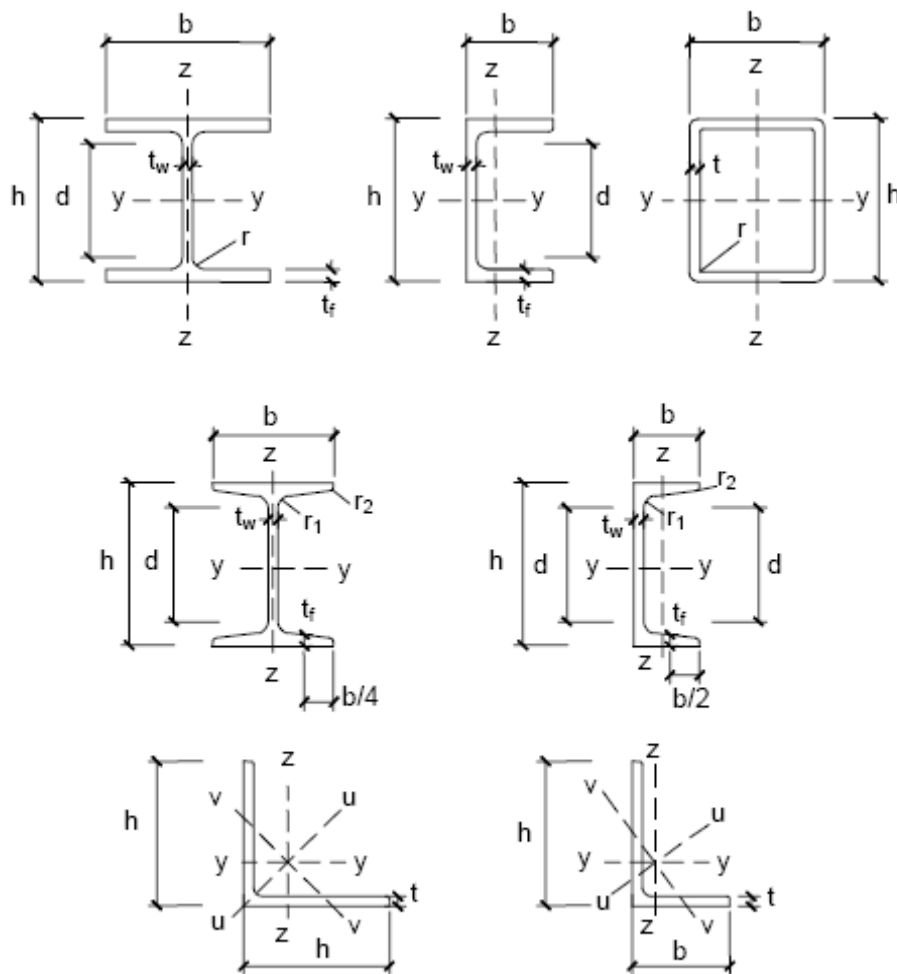


Figura B.1 Dimensiones y ejes de las secciones

Se descontarán los agujeros únicamente cuando la sección última sea inferior a la plástica:

$$0,9 \cdot A_{v,neto} \cdot \frac{f_{ud}}{\sqrt{3}} \leq A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad [22]$$

#### 4.4. Secciones sometidas a flexión

El momento flector que actúa sobre la sección  $M_{Ed}$  no podrá superar la resistencia a flexión de la sección  $M_{c,Rd}$  :

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad [23]$$

Esta resistencia a flexión varía con el tipo de sección. Así:

- Secciones de clase 1 y 2

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd} \quad [24]$$

siendo  $W_{pl}$  el módulo resistente plástico correspondiente a la fibra de mayor tensión. En secciones simétricas,  $W_{pl}=2 \cdot S$ , siendo  $S$  el momento estático de la mitad del perfil respecto al eje que pasa por su centro de gravedad.

- Secciones de clase 3

$$M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_{yd} \quad [25]$$

siendo  $W_{el}$  el módulo resistente elástico correspondiente a la fibra de mayor tensión.

- Secciones de clase 4

La resistencia a abolladura para las secciones de clase 4 es:

$$M_{0,Rd} = W_{eff} \cdot f_{yd} \quad [26]$$

siendo  $W_{eff}$  el módulo elástico de la sección eficaz (correspondiente a la fibra de mayor tensión).

La existencia de agujeros se considerará según su situación:

- Sólo se descontará el área de los agujeros situados en la zona comprimida, cuando no se dispongan los correspondientes tornillos o cuando se trate de agujeros rasgados o sobredimensionados.
- Si los agujeros se sitúan en la zona traccionada se descontarán únicamente cuando la resistencia última de la zona traccionada es inferior a la plástica:

$$0,9 \cdot A_{neta,t} \cdot f_{ud} \leq A_t \cdot f_{yd} \quad [27]$$

#### 4.5. Secciones sometidas a torsión

El esfuerzo torsor  $T_{Ed}$  de cualquier sección puede dividirse en dos componentes,  $T_{t,Ed}$  componente correspondiente a la torsión uniforme de Saint Vénant, y  $T_{w,Ed}$  componente correspondiente a la torsión de alabeo.

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed} \quad [28]$$

En las piezas de sección hueca cerrada delgada puede despreciarse la componente de torsión de alabeo. Análogamente, en las piezas formadas por un perfil en doble te puede despreciarse la componente de torsión uniforme.

Deberán considerarse los estados tensionales derivados de la torsión, y en particular las tensiones tangenciales debidas al torsor uniforme  $\tau_{t,Ed}$ , así como las tensiones normales  $\sigma_{w,Ed}$  y tangenciales  $\tau_{w,Ed}$  debidas al bimomento y al esfuerzo torsor de torsión de alabeo.

La comprobación de resistencia puede realizarse con criterios elásticos de acuerdo a la expresión [1].

#### 4.6. Secciones sometidas a flexión y cortante

Si  $V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$  puede despreciarse la reducción del momento plástico resistido por la sección debido al esfuerzo cortante, y la comprobación se realizará como se indica en el Apéndice 4.4.

Por el contrario, si  $V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$  no puede despreciarse el esfuerzo cortante, y la comprobación se realiza como sigue:

Se calcula el momento plástico resistido por la sección concomitante con el esfuerzo cortante,  $M_{V,Rd}$ :

- En secciones I o H

$$M_{V,Rd} = \left( W_{pl} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{4 \cdot t_w} \right) \cdot f_{yd} \quad [29]$$

- En el resto de los casos

$$M_{V,Rd} = W_{pl} \cdot (1 - \rho) \cdot f_{yd} \quad [30]$$

siendo

$$\rho = \left( 2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad [31]$$

En ningún caso podrá ser  $M_{V,Rd} > M_{0,Rd}$

En el caso de perfiles en doble te (I o H) el efecto de la interacción puede despreciarse cuando se consideren únicamente las alas en el cálculo de la resistencia a flexión y el alma en el cálculo de la resistencia a cortante.

#### 4.7. Secciones sometidas a flexión compuesta sin cortante

- Para secciones de clase 1 y 2

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rdy}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rdz}} \leq 1 \quad [32]$$

- Para secciones de clase 3

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{el,Rdy}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,Rdz}} \leq 1 \quad [33]$$

- Para secciones de clase 4

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{M_{0,Rdy}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{SEd} \cdot e_{Nz}}{M_{0,Rdz}} \leq 1 \quad [34]$$

siendo  $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$ , siendo  $\gamma_{M0}=1,05$ .

En el caso de perfiles laminados en doble te el efecto del axil puede despreciarse si no llega a la mitad de la resistencia a tracción del alma.

La misma formulación puede ser aplicada en el caso de **flexión esviada**.

#### 4.8. Secciones sometidas a flexión, axil y cortante

- Si  $V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$ , se emplearán las expresiones dadas en el Apéndice 4.7.
- Si, por el contrario,  $V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$ , la resistencia de cálculo de la sección para el conjunto de esfuerzos se determinará utilizando para el área de

cortante un valor reducido del límite elástico (o alternativamente del espesor) conforme al factor  $(1-\rho)$ , viniendo  $\rho$  dado por la expresión [31].

#### 4.9. Secciones sometidas a cortante y torsión

En las comprobaciones en que intervenga la resistencia a cortante se empleará la resistencia plástica a cortante reducida por la existencia de tensiones tangenciales de torsión uniforme:

$$V_{c,Rd} \leq V_{pl,T,Rd} \quad [35]$$

siendo, en secciones huecas cerradas:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right] \cdot V_{pl,Rd} \quad [36]$$

#### 4.10. Secciones sometidas a flexión y torsión

En las comprobaciones en que intervenga la resistencia a flexión se empleará la resistencia a flexión reducida por la existencia de tensiones normales de torsión de alabeo:

$$M_{c,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\sigma_{w,Ed}}{f_{yd}} \right] \cdot M_{c,Rd} \quad [37]$$

Expresión en que la tensión normal máxima  $\sigma_{w,Ed}$  se determina mediante las expresiones de la teoría de torsión no uniforme.

### 5. Comprobación de barras

#### 5.1. Barras solicitadas a tracción

Se calcularán a tracción pura las barras con esfuerzo axial centrado. A estos efectos es admisible despreciar los momentos flectores:

- Debidos al peso propio de las barras de longitudes inferiores a 6 m;
- Debidos al viento en las barras de vigas trianguladas;
- Debidos a la excentricidad en las barras de arriostramiento cuando su directriz no esté en el plano de la unión.

La esbeltez reducida (concepto definido en el apéndice 5.2 por la expresión [39]) de las barras en tracción de la estructura principal no superará el valor 3,0, pudiendo admitirse valores de hasta 4,0 en las barras de arriostramiento.

La resistencia a tracción pura de la barra  $N_{t,Rd}$  será la resistencia plástica de la sección bruta  $N_{pl,Rd}$ , calculada mediante la expresión [3].

## 5.2. Barras solicitadas a compresión. Pandeo

El CTE utiliza un procedimiento de cálculo propuesto por la Convención Europea de la Construcción Metálica (European Convention for Constructional Steelworks, ECCS) basado en un criterio de agotamiento plástico de la sección, analizando el comportamiento real de la columna, en base a imperfecciones geométricas y estructurales.

La resistencia de las barras a compresión  $N_{c,Rd}$  no superará la resistencia plástica de la sección bruta  $N_{pl,Rd}$  calculada por la expresión [10], y será menor que la resistencia última de la barra a pandeo  $N_{b,Rd}$ , definida en este Apéndice.

En general será necesario comprobar la resistencia a pandeo en cada posible plano que pueda flexionar la pieza.

Como capacidad a pandeo por flexión de una barra de sección constante, en compresión centrada, puede tomarse:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} \quad [38]$$

siendo

A Área de la sección transversal en clases 1, 2 y 3, o área eficaz  $A_{eff}$  en secciones de clase 4.

$f_{yd}$  Resistencia de cálculo del acero, tomando  $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$  <sup>(1)</sup>.

$\chi$  Coeficiente de reducción por pandeo, cuyo valor puede obtenerse en función de la esbeltez reducida y de la curva de pandeo adecuada, como se verá a continuación.

### 5.2.1. Barras rectas de sección constante y axil constante

Se denomina esbeltez reducida  $\bar{\lambda}_k$  a la relación entre la resistencia plástica de la sección de cálculo<sup>(2)</sup> y la compresión crítica por pandeo  $N_{cr}$ <sup>(3)</sup>, de valor:

<sup>(1)</sup> En el apartado 6.3.2 del DB SE-A se dice que  $\gamma_{M1} = 1,1$ , cuando en el apartado 2.3.3 había sido definido con el valor 1,05.

<sup>(2)</sup> En la expresión [39] es la resistencia plástica característica de la sección, no la de cálculo.

<sup>(3)</sup> Expresión que representa la carga crítica de Euler.

$$\bar{\lambda}_k = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad [39]$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} \quad [40]$$

siendo

E Módulo de elasticidad.

I Momento de inercia del área de la sección para flexión en el plano considerado.

$L_k$  Longitud de pandeo de la pieza, equivalente a la distancia entre puntos de inflexión de la deformación de pandeo que la tenga mayor. Para los casos canónicos se define en la tabla 6.1 en función de la longitud de la pieza. Para condiciones diferentes para la carga axial o la sección se define en apartados posteriores.

Tabla 6.1 Longitud de pandeo de barras canónicas

Condiciones de extremo	biarticulada	biempotrada	empotrada articulada	biempotrada desplazable	en ménsula
Longitud $L_k$	1,0 L	0,5 L	0,7 L	1,0 L	2,0 L

El coeficiente de  $\chi$  reducción por pandeo, cuando  $\bar{\lambda}_k \leq 0,2$  vale la unidad. Para valores de esbeltez reducida  $\bar{\lambda}_k \geq 0,2$ , se obtiene de

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - (\bar{\lambda}_k)^2}} \leq 1 \quad [41]$$

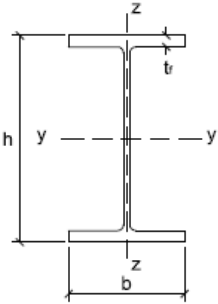
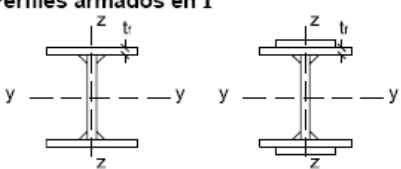

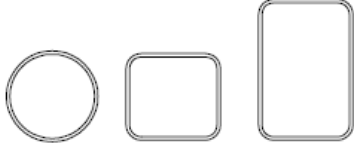
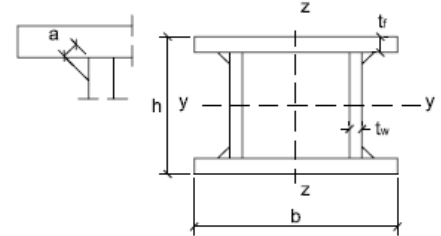
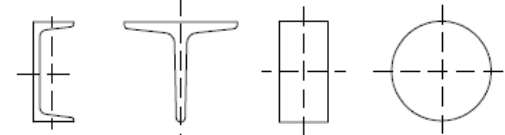
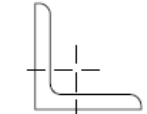
donde

$$\phi = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_k - 0,2) + (\bar{\lambda}_k)^2 \right] \quad [42]$$

$\alpha$  Es el coeficiente de imperfección elástica, que adopta los valores de la tabla 6.3 en función de la curva de pandeo (tabla 6.2). Ésta representa la sensibilidad al fenómeno dependiendo del tipo de sección, plano de pandeo y tipo de acero, de acuerdo con la tabla 6.2.

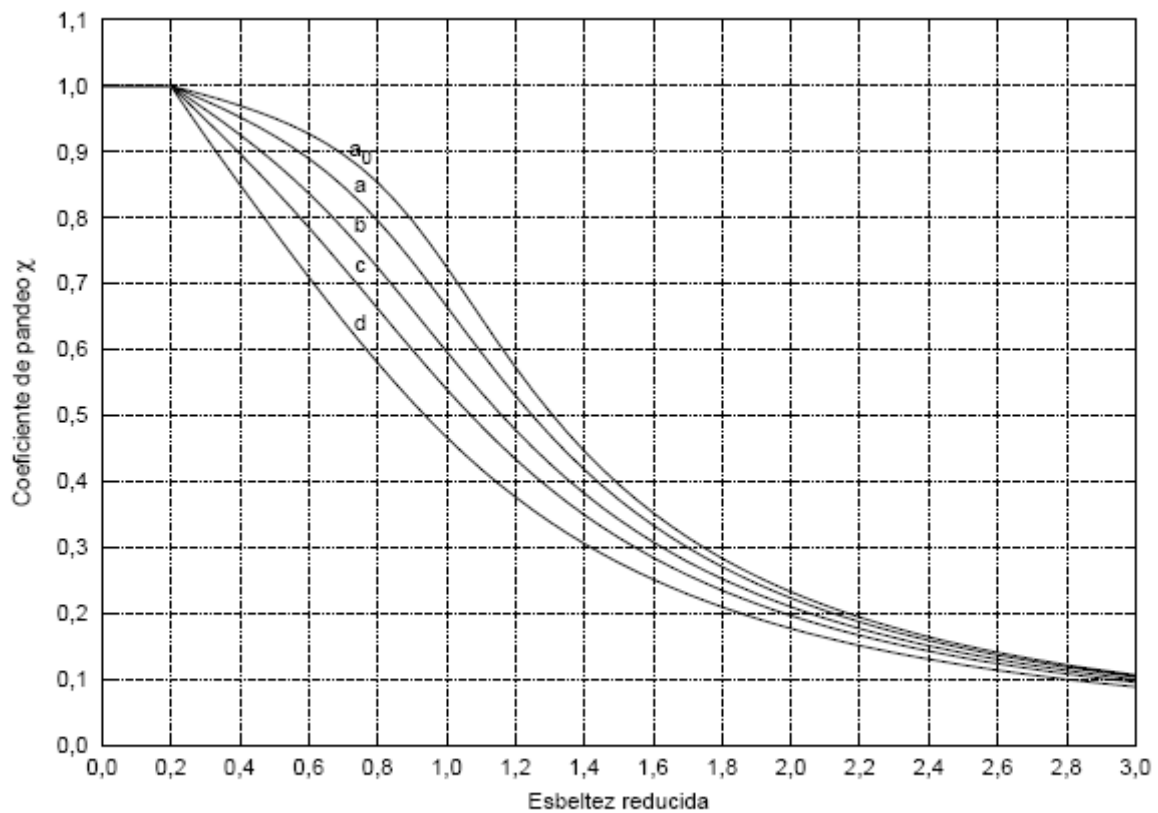
Los valores del coeficiente  $\chi$  se pueden obtener directamente de la figura 6.3 o de la tabla 6.3 en función del coeficiente de imperfección y de la esbeltez reducida.

Tabla 6.2 Curva de pandeo en función de la sección transversal

Tipo de sección	Tipo de acero		S235 a S355		S450	
	Eje de pandeo <sup>(1)</sup>		y	z	y	z
<b>Perfiles laminados en I</b> 	$h/b > 1,2$	$t \leq 40 \text{ mm}$	a	b	$a_0$	$a_0$
		$40 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$	b	c	a	a
	$h/b \leq 1,2$	$t \leq 100 \text{ mm}$	b	c	a	a
		$t > 100 \text{ mm}$	d	d	c	c
<b>Perfiles armados en I</b> 		$t \leq 40 \text{ mm}$	b	c	b	c
		$t > 40 \text{ mm}$	c	d	c	d
<b>Agrupación de perfiles laminados soldados</b> 			c	c	c	c
<b>Tubos de chapa simples o agrupados</b> 		laminados en caliente	a	a	$a_0$	$a_0$
		conformados en frío	c	c	c	c
<b>Perfiles armados en cajón <sup>(2)</sup></b> 	soldadura gruesa: $a/t > 0,5$ $b/t < 30$ $h/t_w < 30$		c	c	c	c
	en otro caso		b	b	b	b
<b>Perfiles simples U, T, chapa, redondo macizo</b> 			c	c	c	c
<b>Perfiles L</b> 			b	b	b	b

<sup>(1)</sup> Para el significado del eje de pandeo, y los términos h, b, t,  $t_w$  véase anejo B

<sup>(2)</sup> La variable a se refiere al ancho de garganta de la soldadura



**Figura 6.3 Curvas de pandeo**

**Tabla 6.3 Valores del coeficiente de pandeo ( $\chi$ )**

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	$a_0$	a	b	c	d
<b>Coefficiente (<math>\alpha</math>) de imperfección</b>	<b>0,13</b>	<b>0,21</b>	<b>0,34</b>	<b>0,49</b>	<b>0,76</b>
$\leq 0,20$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,30	0,99	0,98	0,96	0,95	0,92
0,40	0,97	0,95	0,93	0,90	0,85
0,50	0,95	0,92	0,88	0,84	0,78
0,60	0,93	0,89	0,84	0,79	0,71
0,70	0,90	0,85	0,78	0,72	0,64
0,80	0,85	0,80	0,72	0,66	0,58
0,90	0,80	0,73	0,66	0,60	0,52
1,00	0,73	0,67	0,60	0,54	0,47
1,10	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
1,20	0,57	0,53	0,48	0,43	0,38
1,30	0,51	0,47	0,43	0,39	0,34
1,40	0,45	0,42	0,38	0,35	0,31
1,50	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,60	0,35	0,32	0,31	0,28	0,25
1,80	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21
2,00 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

<sup>(1)</sup> esbeltez intolerable en los elementos principales

<sup>(2)</sup> esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostramiento

### 5.2.2. Esfuerzos axiles variables

Las barras de sección constante solicitadas por esfuerzos axiles que varían de forma lineal o parabólica a lo largo del eje podrán calcularse como sometidas a un esfuerzo axial constante de valor igual al máximo axial actuante y con la longitud de pandeo igual a:

$$L_k = L \cdot \sqrt{\frac{1 + a \cdot \frac{N_{\min}}{N_{\max}}}{b}} \quad [43]$$

en la que los parámetros  $a$  y  $b$  tienen los valores:

		<b>a</b>	<b>b</b>
Variación lineal, máximo en el centro	Doblemente articulada	2,18	3,18
	Doblemente empotrada	0,93	7,72
Variación parabólica, máximo en el centro	Doblemente articulada	1,09	2,09
	Doblemente empotrada	0,35	5,40
Ménsula con máximo en el empotramiento	Variación lineal	2,18	3,18
	Variación parabólica	1,09	2,09
Variación lineal, máximo en un extremo	Doblemente articulada	0,88	1,88
	Doblemente empotrada	0,93	7,72
	Articulada en el mínimo y empotrada en el máximo	1,65	5,42
	Articulada en el máximo y empotrada en el mínimo	0,51	3,09

### 5.2.3. Barras de sección variable

Las barras comprimidas doblemente articuladas de sección ligeramente variable cuyo momento de inercia varíe entre un mínimo  $I_{\min}$  y un máximo  $I_{\max}$  se comprobarán con un momento de inercia medio ponderado  $I_k$ , de valor

$$I_k = C \cdot I_{\max} \quad [44]$$

y el área  $A_{med}$  a lo largo de la barra. El valor  $C$  se obtiene de la tabla 6.4 entrando con el parámetro:

$$v = \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}} \quad [45]$$

y con la fracción de luz de inercia máxima  $a$  especificada en la propia figura incluida en la tabla. La esbeltez mecánica de cálculo es:

$$\lambda_k = L \cdot \sqrt{\frac{A_{med}}{I_k}} \quad [46]$$

**Tabla 6.4 Coeficiente C en piezas de sección variable**

Variación de la sección	v a	Coeficiente c siendo $v = \sqrt{I_{min}/I_{max}}$									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	0,0	0,121	0,220	0,316	0,412	0,509	0,606	0,703	0,801	0,900	1,000
	0,1	0,140	0,247	0,348	0,447	0,542	0,636	0,729	0,820	0,911	1,000
	0,2	0,166	0,284	0,391	0,490	0,585	0,675	0,761	0,844	0,923	1,000
	0,3	0,203	0,333	0,446	0,547	0,639	0,722	0,800	0,871	0,938	1,000
	0,4	0,257	0,403	0,521	0,620	0,705	0,779	0,844	0,902	0,953	1,000
	0,5	0,340	0,502	0,620	0,711	0,784	0,843	0,892	0,933	0,969	1,000
	0,6	0,477	0,641	0,745	0,815	0,867	0,906	0,936	0,961	0,982	1,000
	0,7	0,697	0,814	0,875	0,913	0,938	0,957	0,971	0,983	0,992	1,000
	0,8	0,922	0,951	0,966	0,976	0,983	0,988	0,992	0,995	0,998	1,000
	≥0,9	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	0,0	0,259	0,389	0,493	0,583	0,665	0,740	0,810	0,877	0,940	1,000
	0,1	0,308	0,448	0,555	0,643	0,719	0,786	0,846	0,902	0,953	1,000
	0,2	0,371	0,520	0,625	0,707	0,775	0,832	0,881	0,925	0,965	1,000
	0,3	0,453	0,605	0,703	0,775	0,830	0,867	0,914	0,947	0,975	1,000
	0,4	0,558	0,702	0,784	0,841	0,883	0,915	0,942	0,965	0,984	1,000
	0,5	0,686	0,801	0,861	0,900	0,927	0,948	0,965	0,979	0,990	1,000
	0,6	0,819	0,890	0,925	0,946	0,962	0,973	0,982	0,989	0,995	1,000
	0,7	0,925	0,954	0,968	0,978	0,984	0,989	0,992	0,996	0,998	1,000
	0,8	0,982	0,988	0,992	0,994	0,996	0,997	0,998	0,999	0,999	1,000
	≥0,9	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	-	0,273	0,402	0,506	0,595	0,676	0,749	0,817	0,882	0,942	1,000
		-	0,536	0,652	0,728	0,786	0,834	0,875	0,911	0,943	0,973
		0,9	0,221	0,626	0,846	0,924	0,958	0,976	0,986	0,993	0,997
	0,8	0,060	0,220	0,421	0,605	0,743	0,837	0,902	0,946	0,977	1,000
	0,7	0,027	0,105	0,221	0,395	0,502	0,635	0,753	0,852	0,933	1,000
	0,6	0,016	0,061	0,134	0,231	0,345	0,472	0,606	0,741	0,873	1,000
	0,5	0,010	0,040	0,090	0,160	0,250	0,360	0,490	0,640	0,810	1,000

### 5.2.4. Elementos triangulados

En celosías espaciales formadas por perfiles huecos atornillados en sus extremos se tomará como longitud de pandeo la distancia entre ejes de nudos para cualquier barra.

En vigas planas trianguladas se tomará como longitud de pandeo:

- para los cordones, pandeo en el plano de la viga, la distancia entre ejes de nudos;
- para los cordones, pandeo fuera del plano, la longitud teórica de la barra medida entre puntos fijos por existir arriostramiento; en caso de no existir puntos fijos, se tratará como una pieza de compresión variable.
- para los montantes y diagonales, pandeo en el plano de la viga, la longitud libre entre barras;

- para los montantes y diagonales, pandeo fuera del plano, la longitud entre ejes de nudos.

En vigas planas trianguladas formadas por perfiles huecos de cordones continuos y diagonales y montantes soldados de forma continua en todo el perímetro, se podrán tomar como longitudes de pandeo las definidas en el apartado anterior, aplicando el factor 0,9 a los cordones, y 0,75 a los montantes y diagonales.

### 5.2.5. Pilares de edificios

La longitud de pandeo  $L_k$  de un tramo de pilar de longitud  $L$  unido rígidamente a las demás piezas de un pórtico intranslacional o de un pórtico translacional en cuyo análisis se haya empleado un método de segundo orden que no considere las imperfecciones de los propios pilares, o el método de mayoración de acciones horizontales descrito en el apartado 5.3.1 del DB SE-A, puede obtenerse del cociente:

$$\beta = \frac{L_k}{L} = \frac{1 + 0,145 \cdot (\eta_1 + \eta_2) - 0,265 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{2 - 0,364 \cdot (\eta_1 + \eta_2) - 0,247 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \leq 1 \quad [47]$$

La longitud de pandeo de un tramo de pilar unido rígidamente a las demás piezas de un pórtico translacional en cuyo análisis no se hayan contemplado los efectos de segundo orden puede obtenerse del cociente:

$$\beta = \frac{L_k}{L} = \frac{1 - 0,2 \cdot (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{1 - 0,8 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \geq 1 \quad [48]$$

Como alternativa, los coeficientes  $\beta$  pueden obtenerse en la figura 6.4.

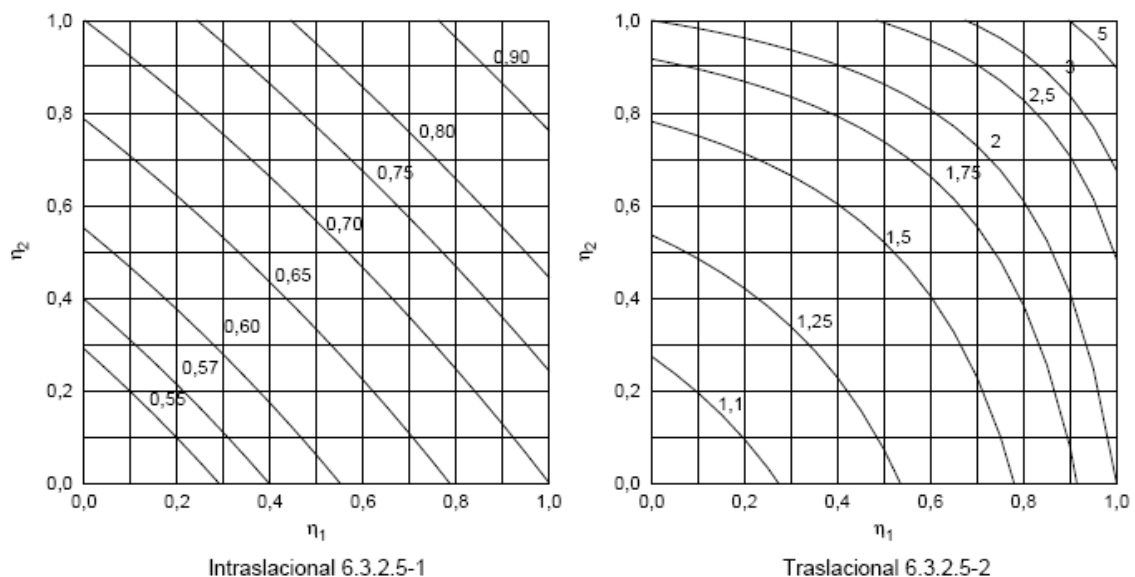


Figura 6.4 Cocientes de longitud de pandeo a longitud de barra

Los coeficientes de distribución  $\eta_1$  y  $\eta_2$  anteriores se obtienen de:

$$\eta_1 = \frac{K_c + K_1}{K_c + K_1 + K_{11} + K_{12}} \quad [49]$$

$$\eta_2 = \frac{K_c + K_2}{K_c + K_2 + K_{21} + K_{22}}$$

siendo

$K_c$  Coeficiente de rigidez  $E \cdot I/L$  del tramo del pilar analizado

$K_i$  Coeficiente de rigidez  $E \cdot I/L$  del siguiente tramo del pilar en el nudo  $i$ , nulo en caso de no existir

$K_{ij}$  Coeficiente de rigidez eficaz de la viga en el nudo  $i$  y posición  $j$

Si los tramos sucesivos tienen diferente relación  $N/N_{cri}$ , la aproximación de  $\beta$  obtenida, y por tanto de la misma  $N_{cri}$ , están del lado de la seguridad.

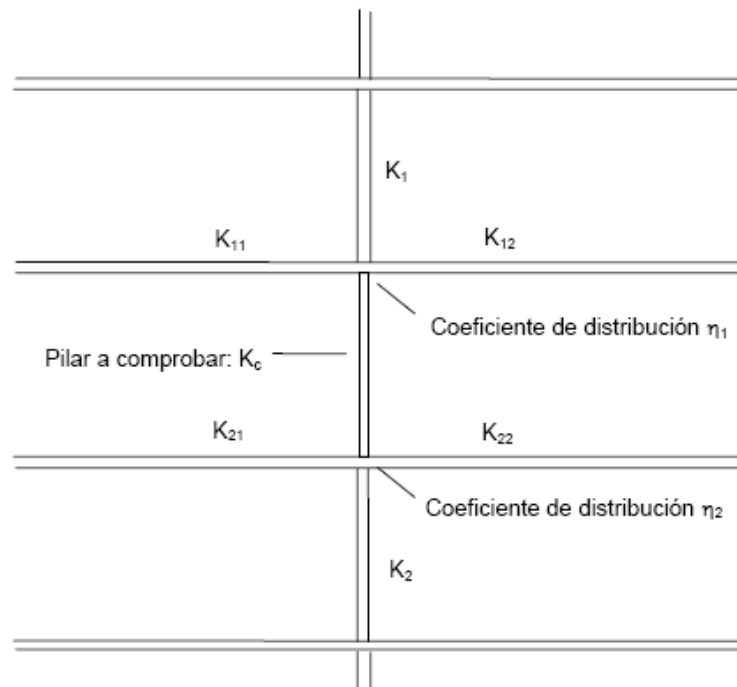


Figura 6.5 Coeficientes de distribución

Los coeficientes de rigidez eficaz de las vigas pueden determinarse de acuerdo con la tabla 6.5, siempre que permanezcan elásticas bajo los momentos de cálculo.

Tabla 6.5 Coeficiente de rigidez eficaz para una viga en comportamiento elástico

Condiciones de coacción al giro en la viga en el extremo contrario al considerado.	Coeficiente de rigidez eficaz K de la viga	
	sin compresión relevante	con compresión <sup>(1)</sup>
empotrado	1,0 EI/L	1,0 EI/L (1-0,4 N/N <sub>cri</sub> )
articulado	0,75 EI/L	0,75 EI/L (1 - 1,0 N/N <sub>cri</sub> )
giro igual y de igual signo	1,5 EI/L	1,5 EI/L (1-0,2 N/N <sub>cri</sub> )
giro igual y de signo opuesto	0,5 EI/L	0,5 EI/L (1-1,0 N/N <sub>cri</sub> )
giro $\theta_a$ en el nudo considerado y giro $\theta_b$ en el otro	$(1 + 0,5 \theta_b / \theta_a)$ EI/L	-

<sup>(1)</sup> N<sub>cri</sub> se refiere al valor crítico a compresión de la viga considerada. El caso general (-) no está contemplado

Cuando por la situación de dimensionado considerada, el momento de cálculo en cualquiera de las vigas supera a  $W_{el} \cdot f_{yd}$  debe suponerse que la viga está articulada en el punto o puntos correspondientes.

#### 5.2.6. Barras de sección compuesta

Se denominan así a las piezas formadas por dos o más perfiles, enlazados mediante presillas o mediante una celosía triangular, de trazo regular y disposición simétrica.

El número de tramos en que queda dividida la barra de sección compuesta por los elementos de enlace será igual o superior a 4, existiendo siempre un elemento de enlace al principio y al final de la barra.

Se denomina eje de inercia material al que pasa por el centro de gravedad de las secciones de todos los perfiles simples que forman la pieza y eje de inercia libre al que no cumple esa condición.

En el plano perpendicular al eje de inercia material el pandeo se comprueba como si se tratase de una barra simple.

En el plano perpendicular a un eje de inercia libre se adoptará una imperfección inicial de valor  $L/500$ , del lado desfavorable, que será ampliada por un factor  $1/(1-r)$ , siendo  $r$  la relación de la compresión de cálculo a la compresión crítica. Para obtener esta compresión crítica, la inercia equivalente podrá obtenerse mediante un análisis de deformación frente a acción lateral uniforme en un modelo que incluya individualizadamente los elementos secundarios, presillas o triangulaciones de la pieza.

Obtenidos los esfuerzos de cada cordón, a partir de los de la pieza completa y la excentricidad citada, se comprobará cada tramo de cordón entre elementos secundarios suponiendo para éste una imperfección inicial igual a la definida en la

tabla 5.8, ampliada a partir de la relación entre la carga del cordón y la carga crítica local de éste, suponiendo articulaciones en los extremos del tramo.

Tabla 5.8 Imperfecciones locales de barra,  $e_0/L$

Curva de pandeo (según figura 6.3)	$a_0$	a	b	c	d
Análisis global elástico	1/350	1/300	1/250	1/200	1/150
Análisis global plástico	1/300	1/250	1/200	1/150	1/100

En el caso particular de presillas, como compresión crítica podrá tomarse la expresión:

$$N_{cri} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\frac{L_k^2}{i^2} + \frac{l_t^2}{i_t^2}} \quad [50]$$

siendo

- A La sección total de los cordones de la barra
- $L_k$  La longitud de pandeo de la pieza completa como si fuese de sección conexas
- $i$  Radio de giro de la pieza completa, como si fuese conexas
- $l_t$  Longitud del tramo entre presillas
- $i_t$  Radio de giro del cordón

Para el cálculo de los elementos de celosía o presillas, al cortante global de la pieza se añadirá el procedente de la imperfección ampliada, que puede tomarse de valor:

$$V_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{150} \cdot \frac{1}{1-r} \quad [51]$$

Las piezas de enlace se unirán rígidamente a los cordones, bien mediante tornillos (al menos dos en el caso de presillas), bien mediante soldadura, y en el caso de las comprimidas se comprobarán frente a la inestabilidad por pandeo.

### 5.3. Barras solicitadas a flexión

Una viga sometida a momentos flectores dentro de su plano, puede pandear lateralmente en caso de que la separación entre apoyos laterales supere un determinado valor. En estos casos, será necesario efectuar una verificación de la seguridad frente a pandeo lateral.

En la determinación de la resistencia frente a pandeo lateral de una viga también se tendrá en cuenta la interacción con la abolladura de las chapas comprimidas.

No será necesaria la comprobación a pandeo lateral cuando el ala comprimida se arriostra de forma continua o bien de forma puntual a distancias menores de 40 veces el radio de giro mínimo. No obstante, en estos casos se deberá asegurar una rigidez y una resistencia adecuadas de los apoyos laterales.

### 5.3.1. Pandeo lateral

Si existe la posibilidad de que una viga pandee lateralmente, debe comprobarse que  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$ , donde  $M_{Ed}$  es el valor de cálculo del momento flector y  $M_{b,Rd}$  el valor de cálculo de la resistencia frente a pandeo lateral.  $M_{b,Rd}$  se podrá determinar de acuerdo con la relación:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [52]$$

siendo

$W_y$  Módulo resistente de la sección, acorde con el tipo de ésta. Es decir:

$W_{pl,y}$  Para secciones de clase 1 y 2

$W_{el,y}$  Para secciones de clase 3

$W_{eff,y}$  Para secciones de clase 4

$\chi_{LT}$  Factor de reducción para el pandeo lateral.

El factor de reducción  $\chi_{LT}$  se podrá determinar a partir de la expresión:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad [53]$$

donde

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + (\bar{\lambda}_{LT})^2 \right] \quad [54]$$

$\alpha_{LT}$  Factor de imperfección, obtenido de la tabla 6.10.

Tabla 6.10 Factor de imperfección  $\alpha_{LT}$

Elemento	Límites	Curva de pandeo	$\alpha_{LT}$
Perfil laminado con sección en doble T	$h/b \leq 2$	a	0,21
	$h/b > 2$	b	0,34
Elemento armado con sección en doble T	$h/b \leq 2$	c	0,49
	$h/b > 2$	d	0,76
Elementos con otras secciones	-	d	0,76

La esbeltez relativa frente al pandeo lateral se determinará según la relación:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad [55]$$

donde

$M_{cr}$  Momento crítico elástico de pandeo lateral, que se determinará según la teoría de la elasticidad.

En el caso de perfiles laminados o de perfiles armados equivalentes, cuando  $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$  se podrá utilizar un valor de  $\chi_{LT} = 1$

Los apoyos laterales del ala comprimida deberán dimensionarse con capacidad para resistir los esfuerzos a que van a estar sometidos.

#### Momento crítico elástico de pandeo lateral

En la mayoría de los casos prácticos es admisible un cálculo simplificado del momento crítico elástico de pandeo lateral, a pesar de las diferencias en las condiciones de apoyo, la introducción de las cargas y la distribución de los momentos flectores.

En los casos en los que los apoyos en los extremos de una barra impidan su deformación por torsión, y si la carga actúa en el eje de la barra, el momento crítico elástico de pandeo lateral se podrá determinar según la ecuación:

$$M_{cr} = \sqrt{M_{LTv}^2 + M_{LTw}^2} \quad [56]$$

siendo

$M_{LTv}$  Componente de  $M_{cr}$  que representa la resistencia por torsión uniforme de la barra (Saint Venant).

$M_{LTw}$  Componente de  $M_{cr}$  que representa la resistencia por torsión no uniforme de la barra.

La componente  $M_{LTv}$  del momento crítico elástico de pandeo lateral se podría determinar a partir de la ecuación:

$$M_{LTv} = C_1 \cdot \frac{\pi}{L_c} \cdot \sqrt{G \cdot I_T \cdot E \cdot I_z} \quad [57]$$

siendo

- $C_1$  Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la ley de momentos flectores que soliciten a la viga.
- $L_C$  Longitud de pandeo lateral (distancia entre apoyos laterales que impidan el pandeo lateral).
- $G$  Módulo de elasticidad transversal.
- $E$  Módulo de elasticidad.
- $I_T$  Constante de torsión uniforme.
- $I_Z$  Momento de inercia de la sección respecto al eje  $z$ .

Para vigas con secciones esbeltas (Clase 4) se adoptará  $M_{LTv}=0$ .

La componente  $M_{LTw}$  del momento crítico elástico de pandeo lateral viene determinada por la carga crítica elástica de pandeo del soporte comprimido del perfil. Este soporte está formado por el ala comprimida y la tercera parte de la zona comprimida del alma, adyacente al ala comprimida. La componente  $M_{LTw}$  se podrá determinar a partir de la ecuación:

$$M_{LTw} = W_{el,y} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{L_C^2} \cdot C_1 \cdot i_{f,z}^2 \quad [58]$$

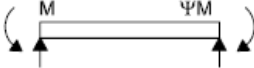








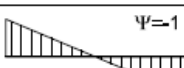
siendo

- $W_{el,y}$  Módulo resistente elástico de la sección, según el eje fuerte de inercia, correspondiente a la fibra más comprimida.
- $i_{f,z}$  Radio de giro, con respecto al eje de menor inercia de la sección, del soporte formado por el ala de la sección, la tercera parte del ala comprimida y la tercera parte de la zona comprimida del alma, adyacente al ala comprimida.

Las características mecánicas de la sección del soporte comprimido arriba mencionado se determinarán para la sección eficaz.

El factor  $C_1$  tiene en cuenta las condiciones de apoyo y la ley de momentos flectores que solicitan la viga. Los valores indicados en la tabla 6.11 son válidos para tramos de vigas en cuyos extremos el giro torsional esté totalmente coaccionado y a lo largo de los cuales el momento flector varía linealmente

Tabla 6.11 Valores de los factores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  correspondientes a los valores del factor  $k_\varphi$  ( $k_w=1$ )

Condiciones de apoyo y tipo de sollicitación	Diagrama de momentos flectores	$C_1$
	$\Psi=+1$ 	1
	$\Psi=+3/4$ 	1,14
	$\Psi=+1/2$ 	1,32
	$\Psi=+1/4$ 	1,56
	$\Psi=0$ 	1,88
	$\Psi=-1/4$ 	2,28
	$\Psi=-1/2$ 	2,7
	$\Psi=-3/4$ 	2,93
	$\Psi=-1$ 	2,75

### 5.3.2. Abolladura del alma por cortante

No es preciso comprobar la resistencia a la abolladura del alma en las barras en las que se cumpla:

$$\frac{d}{t} < 70 \cdot \varepsilon \quad [59]$$

ni en aquellas secciones en las que, disponiendo rigidizadores en sus extremos (e intermedio, en su caso), se cumpla:

$$\frac{d}{t} < 30 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau} \quad [60]$$

siendo

d y t

La altura y el espesor del alma

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Con  $f_{ref} = 235 \text{ N/mm}^2$

$$k_\tau = 4 + \frac{5,34}{\left(\frac{a}{d}\right)^2}$$

Si existen rigidizadores separados una distancia  $a < d$

$k_\tau$ :

$$k_\tau = 5,34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{d}\right)^2}$$

Si existen rigidizadores separados una distancia  $a \geq d$

$$k_\tau = 5,34$$

Si existen rigidizadores sólo en las secciones extremas

- La inercia  $I_s$  de la sección formada por el rigidizador más una anchura del alma a cada lado del rigidizador igual a  $15 \cdot t_w \cdot \varepsilon$ , con relación a su fibra neutra, paralela al plano del alma, ha de ser:

$$I_s \geq 1,5 \cdot \frac{d^3 \cdot t^3}{a^2} \quad \text{Si } \frac{a}{d} < \sqrt{2} \quad [61]$$

$$I_s \geq 0,75 \cdot d^3 \cdot t^3 \quad \text{Si } \frac{a}{d} \geq \sqrt{2} \quad [62]$$

- La resistencia del alma a abolladura por cortante se obtiene de:

$$V_{b,Rd} = \frac{d \cdot t \cdot \tau_b}{\gamma_{M1}} \quad [63]$$

siendo

$$\tau_b = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad \bar{\lambda}_w \leq 0,8$$

$$\tau_b = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot (1 - 0,625 \cdot (\bar{\lambda}_w - 0,8)) \quad \text{Si } 0,8 < \bar{\lambda}_w < 1,2$$

$$\tau_b = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{0,9}{\bar{\lambda}_w}\right) \quad 1,2 \leq \bar{\lambda}_w$$

donde

$$\bar{\lambda}_w = \frac{d/t}{37,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}}$$

- Cada rigidizador intermedio se dimensionará como un soopрте solicitado por el esfuerzo de compresión:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - V_{b,Rd} \quad [64]$$

siendo

$V_{Ed}$  Valor de cálculo del esfuerzo cortante.

$V_{b,Rd}$  Valor de cálculo de la resistencia a abolladura por cortante.

En caso de existir cargas exteriores que puedan actuar directamente sobre el rigidizador, éstas se añadirán al valor de  $N_{Ed}$ . La sección resistente incluirá el rigidizador mas una anchura de alma a cada lado del rigidizador, igual a  $10 \cdot t_w \cdot \epsilon$ . La verificación de la seguridad estructural del rigidizador se realizará utilizando la curva de pandeo c, con una longitud de pandeo de 0,8 d.

### 5.3.3. Cargas concentradas

No es necesario comprobar la resistencia del alma de una pieza frente a la aplicación de una carga concentrada (o una reacción en un apoyo) actuando sobre las alas si se disponen rigidizadores dimensionados tal como se indica en el apartado anterior, para resistir una compresión igual a la fuerza concentrada aplicada (o la reacción).

No es necesario rigidizar el alma de una pieza sometida a cargas concentradas actuando sobre las alas si se cumple que:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \quad [65]$$

siendo

$F_{Ed}$  Valor de cálculo de la carga concentrada.

$F_{b,Rd}$  Resistencia de cálculo del alma frente a cargas concentradas.

La resistencia de cálculo del alma frente a cargas concentradas viene dada por:

$$F_{b,Rd} = \frac{f_y \cdot t_w \cdot L_{ef}}{\gamma_{M1}} \quad [66]$$

siendo

$$L_{ef} = \chi_F \cdot \ell_y \quad [67]$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F} \leq 1 \quad [68]$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{\ell_y \cdot t_w \cdot f_y}{F_{cr}}} \quad [69]$$

$$F_{cr} = 0,9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t^3}{d} \quad [70]$$

Los valores de  $\ell_y$  y de  $k_F$  dependen del caso considerado, de entre los representados en la figura 6.6.

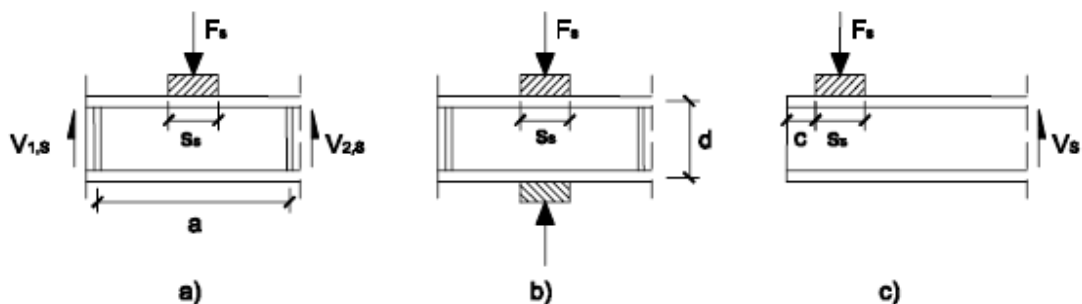


Figura 6.6 Modos de transferencia de cargas concentradas o reacciones

- a) Carga (o reacción) aplicada a una ala y equilibrada por cortantes en el alma.

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2$$

$$\ell_y = s_s + 2 \cdot t \cdot \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2}\right) \leq a$$

- b) Carga (o reacción) transferida de un ala al otro a través del alma. En caso de haber cortantes, se considera la fuerza concentrada de mayor valor de las dos.

$$k_F = 3,5 + 2 \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2$$

$$\ell_y = s_s + 2 \cdot t \cdot \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2}\right) \leq a$$

- c) Carga (o reacción) aplicada a un ala cerca de una sección extrema no rigidizada y equilibrada por un cortante en la otra sección

$$k_F = 2 + 6 \cdot \left( \frac{s_s + c}{d} \right) \leq 6$$

$$l_y = \min(l_{y1}, l_{y2}, l_{y3})$$

viniendo cada coeficiente dado por las expresiones

$$m_1 = \frac{f_{yf} \cdot b_f}{f_{yw} \cdot t_w}$$

$$m_2 = \begin{cases} 0,02 \cdot \left( \frac{d}{t_f} \right) & \text{Si } \bar{\lambda}_F > 0,5 \\ 0 & \text{Si } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \end{cases}$$

Cabe aproximar  $\bar{\lambda}_F$  con la obtenida usando  $m_2=0$

$$l_{y1} = l_{\text{eff}} + t_f \cdot \sqrt{m_1 + m_2}$$

$$l_{y2} = l_{\text{eff}} + t_f \cdot \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left( \frac{l_{\text{eff}}}{t_f} \right)^2 + m_2}$$

$$l_{y3} = s_s + 2 \cdot t_f \cdot \left( 1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right)$$

$$l_{\text{eff}} = \frac{k_F \cdot E \cdot t^2}{2 \cdot f_y \cdot d} \leq s_s + c$$

donde

- $s_s$  Longitud de la entrega rígida de la carga (figura 6.7)
- $t_w$  Espesor del alma
- $t_f$  Espesor del ala
- $f_{yw}$  Tensión de límite elástico del alma
- $f_{yb}$  Tensión de límite elástico del ala
- $E$  Módulo de elasticidad
- $d$  Canto del alma

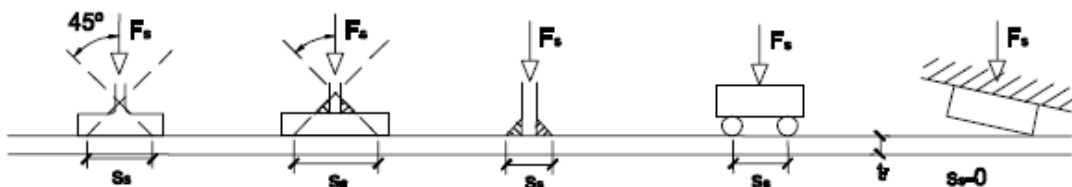


Figura 6.7 Ancho de la entrega rígida de una carga sobre un ala

Si la carga concentrada actúa en el eje de una sección sometida a esfuerzos axiales y de flexión que produzcan una tensión  $\sigma_{x,Ed}$  en el punto del ala situado bajo la carga, debe verificarse que:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{b,Rd}} + 0,8 \cdot \frac{\sigma_{x,Ed}}{\left(\frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}\right)} \leq 1,4 \quad [71]$$

#### 5.4. Barras solicitadas a flexión y tracción

En las piezas solicitadas por una combinación de un momento flector y un esfuerzo axial de tracción, se comprobará, además de la resistencia a flexotracción de sus secciones, tal como se indica en el Apartado 4.7, su resistencia frente al pandeo lateral considerando el esfuerzo axial y el momento flector como un efecto vectorial.

La tensión combinada en la fibra extrema comprimida se determina mediante:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{com}} - 0,8 \cdot \frac{N_{t,Ed}}{A} \quad [72]$$

siendo

$W_{com}$  Momento resistente de la sección referido a la fibra extrema comprimida  
 $N_{t,Ed}$  Valor de cálculo del axil de tracción  
 $M_{Ed}$  Valor de cálculo del momento flector  
 $A$  Área bruta de la sección

La comprobación se lleva a cabo utilizando un momento flector efectivo  $M_{ef,Sd}$

$$M_{ef,Sd} = W_{com} \cdot \sigma_{com,Ed} \quad [73]$$

y la resistencia de cálculo al pandeo lateral indicada en el Apartado 5.3.1.

#### 5.5. Barras solicitadas a flexión y compresión

La comprobación se llevará a cabo con las fórmulas siguientes:

- En todas las piezas:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A^* \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [74]$$

Además

- En piezas no susceptibles de pandeo por torsión

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A^* \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [75]$$

- En piezas susceptibles de pandeo por torsión

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A^* \cdot f_{yd}} + k_{yLT} \cdot \frac{M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [76]$$

donde

$N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  y  $M_{z,Ed}$

Son los valores de la fuerza axial y de los momentos de cálculo de mayor valor absoluto de la pieza.

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Valor de cálculo del axil de tracción.

$A^*$ ,  $W_y$ ,  $W_z$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$ ,  $e_{N,y}$  y  $e_{N,z}$

Valores indicados en la tabla 6.12

$\chi_y$  y  $\chi_z$

Coefficientes de pandeo en cada dirección.

$\chi_{LT}$

Coefficiente de pandeo lateral. Se tomará igual a 1,0 en piezas no susceptibles de pandeo por torsión.

$e_{N,y}$  y  $e_{N,z}$

Desplazamientos del centro de gravedad de la sección transversal efectiva respecto a la posición del centro de gravedad de la sección transversal bruta, en piezas con secciones de clase 4.

$k_y$ ,  $k_z$  y  $k_{LT}$

Coefficientes indicados en la tabla 6.13.

Puede comprobarse que el coeficiente reductor  $\chi_{LT}$  sólo afecta a las flexiones respecto al eje fuerte y no a las flexiones respecto al eje débil. Por tanto, la Norma admite que una pieza flectada respecto al eje débil no pande transversalmente flectando respecto al eje fuerte.

Tabla 6.12 Términos de comprobación, según peor clase de sección en la pieza

Clase	$A^*$	$W_y$	$W_z$	$\alpha_y$	$\alpha_z$	$e_{N,y}$	$e_{N,z}$
1	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
2	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
3	A	$W_{el,y}$	$W_{el,z}$	0,8	1	0	0
4	$A_{eff}$	$W_{eff,y}$	$W_{eff,z}$	0,8	1	Según pieza y tensiones	Según pieza y tensiones

Tabla 6.13 Coeficientes de interacción según peor clase de sección en la pieza

Clase	Tipo de sección	$k_y$	$k_z$	$k_{yLT}$
1 y 2	I, H, abiertas	$1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	el menor de $1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$ y $0,6 + \bar{\lambda}_z$
	Hueca delgada		$1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	
3 y 4	Todas	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$

siendo

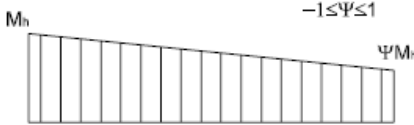
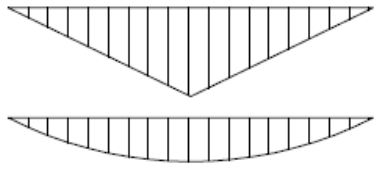
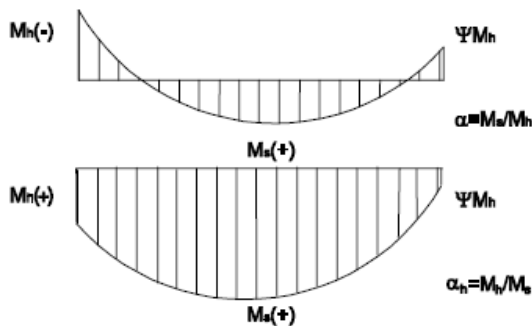
$\bar{\lambda}_y$  y  $\bar{\lambda}_z$  valores de las esbelteces reducidas para los ejes y – y z – z, no mayores que 1,00.

$$N_{C,Rd} = A^* \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Los factores de momento flector uniforme equivalente  $c_{m,y}$ ,  $c_{m,z}$  y  $c_{m,LT}$  se obtienen de la tabla 6.14 en función de la forma del diagrama de momentos flectores entre puntos arriostrados tal y como se indica en la tabla.

En las barras de pórticos de estructuras sin arriostrar con longitudes de pandeo superiores a la de las propias barras debe tomarse  $c_m = 0,9$ .

Tabla 6.14 Coeficientes del momento equivalente

Factor de momento flector	Eje de flexión	Puntos arriostrados en dirección
$C_{m,y}$	y-y	z-z
$C_{m,z}$	z-z	y-y
$C_{m,LT}$	y-y	y-y
<b>Diagrama de Flectores</b>	<b>Factor de momento uniforme equivalente</b>	
	$C_{m,y} = C_{m,i} \text{ (i=y)}$ $C_{m,z} = C_{m,i} \text{ (i=z)}$ $C_{m,LT} = C_{m,i} \text{ (i=LT)}$	
<p>Momentos de extremo <math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>  <p style="text-align: right;"><math>C_{m,i} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4</math></p>		
<p>Momento debido a cargas laterales coplanarias</p>  <p style="text-align: right;"><math>C_{m,i} = 0,9</math></p> <p style="text-align: right;"><math>C_{m,i} = 0,95</math></p>		
<p>Momentos debidos a cargas laterales y momentos de extremos</p>  <p style="text-align: right;"> <math>C_{m,i} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4 \text{ si } -1 \leq \alpha \leq 0</math>  <math>C_{m,i} = 0,2 + 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4 \text{ si } 0 \leq \alpha \leq 1</math> </p> <p style="text-align: right;"><math>C_{m,i} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h \text{ con } -1 \leq \alpha_h \leq 1</math></p>		