

# Dimensionado de soportes de acero solicitados a flexotracción

<b>Apellidos, nombre</b>	Arianna Guardiola VÍllora (aguardio@mes.upv.es)
<b>Departamento</b>	Mecánica del Medio Continuo y Teoría de Estructuras
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia

## 1 Resumen de las ideas clave

En este documento se presentan las expresiones matemáticas que establece el Documento Básico Seguridad Estructural Acero del Código Técnico de la Edificación (DB-SE-A) y la estrategia a seguir para comprobar los soportes de acero laminados solicitados a flexotracción.

## 2 Introducción

El Documento Básico Seguridad Estructural Acero del Código Técnico de la Edificación (DB-SE-A) establece en su artículo 6.2.8 las comprobaciones de resistencia para las secciones solicitadas a flexión y axil, y en el artículo 6.3.4.1 las comprobaciones que tienen en cuenta la interacción del esfuerzo de tracción con un momento flector en las piezas, remitiendo a la comprobación de pandeo lateral.

## 3 Objetivos

El objeto de este documento es facilitar la aplicación de la normativa indicada en el epígrafe anterior, estableciendo la estrategia a seguir en el dimensionado de los soportes de acero solicitados a flexotracción en los casos habituales de edificación.

Cuando el alumno finalice la lectura de este documento será capaz de dimensionar un soporte de acero solicitado a flexotracción.

## 4 Predimensionado

En el caso en que se deba dimensionar un soporte solicitado a flexotracción, es necesario realizar un predimensionado a resistencia del perfil teniendo en cuenta el momento solicitación y el axil de tracción.

Si por el contrario se trata de comprobar el predimensionado de un soporte solicitado a flexotracción se realizarán directamente las comprobaciones del epígrafe 5.

### 4.1 Predimensionado a resistencia

La condición de resistencia a flexión, en ausencia de esfuerzo cortante, es la recogida en la Ecuación 1,

$$M_{E,Rd} \leq M_{c,Rd} \quad \text{Ecuación 1. Comprobación de resistencia a flexión}$$

Siendo

$$M_{Ed} \quad \text{El máximo momento que solicita al soporte}$$

$$M_{c,Rd} \equiv M_{pl,Rd} \quad \text{Momento resistente plástico para secciones clase 1 y 2}$$

$$M_{c,Rd} \equiv M_{el,Rd} \quad \text{Momento resistente elástico para secciones clase 3}$$

Además del predimensionado a flexión se debe comprobar si el área del perfil es suficiente para resistir el esfuerzo de tracción. La condición de resistencia frente a un esfuerzo axil para las secciones clase 1,2, y 3 corresponde a la Ecuación 2,

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M_0}}$$

Ecuación 2. Comprobación de resistencia a axil

## 5 Comprobaciones

### 5.1 Resistencia de la sección a flexión compuesta

En ausencia de esfuerzo cortante las secciones Clase 1 y 2 deben satisfacer la condición de la ecuación 3.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1$$

Ecuación 3. Secciones clase 1 y 2 a flexión compuesta.

Las secciones clase 3 deberán satisfacer la condición de la ecuación 4

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{el,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,Rd,z}} \leq 1$$

Ecuación 4. Secciones clase 3 a flexión compuesta.

### 5.2 Interacción flexión-tracción

Si el axil de tracción es importante, lo más probable es que todas las secciones se encuentren traccionadas, en cuyo caso no es necesario tener en cuenta la interacción flexión axil. Es el caso de la figura 1 (a)

Si por el contrario el momento flector es suficientemente grande, es posible que alguna de las fibras de la sección se encuentre comprimida, siendo necesario comprobar que no se produce pandeo lateral. Corresponde al caso de la figura 1 (b)

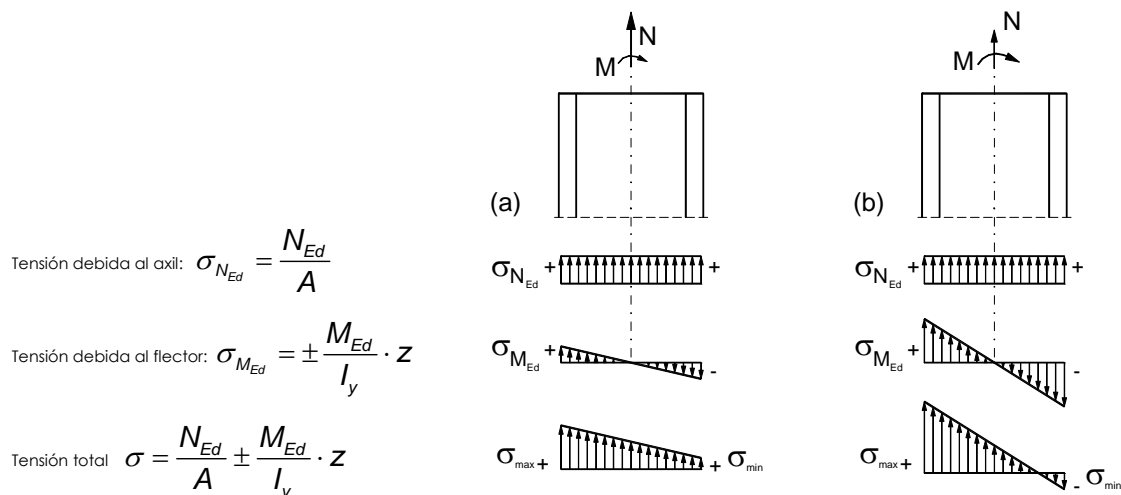


Figura 1. Tensión máxima y mínima en secciones solicitadas a flexotracción.

Por tanto no es necesario hacer la comprobación de pandeo lateral si la tensión en la fibra menos traccionada es de tracción, esto es, es una tensión positiva, tal y como indica la ecuación 5.

$$\sigma_{min} = \frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \cdot z_{fibra\ menos\ traccionada} > 0 \quad \text{Ecuación 5. Tensión en la fibra menos traccionada}$$

Si por el contrario la tensión en la fibra menos traccionada es negativa, quiere decir que existen compresiones, y por lo tanto riesgo de pandeo lateral.

### 5.3 Comprobación a pandeo lateral

En secciones solicitadas por una combinación de un momento flector y un esfuerzo axial de tracción en las que deba comprobarse la resistencia frente al pandeo lateral, se debe considerar el esfuerzo axial y el momento flector como un efecto vectorial, de modo que, de acuerdo con el artículo 6.3.4.1. del DB-SE- A, la condición a verificar es:

$$M_{ef,Ed} \leq M_{b,Rd} \quad \text{Ecuación 6. Condición de pandeo lateral en flexotracción}$$

Siendo  $M_{ef,Ed} = \sigma_{com,Ed} \cdot \frac{I_y}{z_{fibra\ comprimida}}$  Ecuación 7. Momento flector efectivo

donde  $\sigma_{com,Ed}$  es la tensión combinada, de valor:

$$\sigma_{com,Ed} = -0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \cdot z_{fibra\ menos\ traccionada} \quad \text{Ecuación 8. Tensión combinada}$$

Por otro lado, la resistencia a pandeo lateral se obtiene con la expresión de la Ecuación 9

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Ecuación 9. Momento resistente a pandeo lateral}$$

Donde  $f_y$  es el límite elástico del acero del perfil

$W_y \equiv W_{pl,y}$  Módulo resistente plástico para secciones clase 1 y 2, o

$W_y \equiv W_{el,y}$  Módulo resistente elástico para secciones clase 3

$\gamma_{M1} = 1,05$  Coeficiente reductor de resistencia para inestabilidad

El coeficiente de pandeo lateral,  $\chi_{LT}$ , de valor 1 en las secciones cerradas, se obtiene en las secciones abiertas a partir de la esbeltez lateral reducida,  $\bar{\lambda}_{LT}$  en la curva de pandeo indicada en la tabla 1. (Las curvas de pandeo –tabla 6.3 del DB SE A- se han incluido en el anejo 1 de este documento)

elemento	límites	curva de pandeo
perfil laminado con sección en doble T	$h/b \leq 2$	<b>a</b>
	$h/b > 2$	<b>b</b>
elemento armado con sección en doble T	$h/b \leq 2$	<b>c</b>
	$h/b > 2$	<b>d</b>
elementos con otras secciones	--	<b>d</b>

Tabla 1. Curvas para pandeo lateral

$\bar{\lambda}_{LT}$  se calcula tal y como indica la ecuación 10. Su valor depende del momento crítico a pandeo lateral calculado según la ecuación 11.

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

Ecuación 10. Esbeltez reducida

$$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,v}^2 + M_{LT,w}^2}$$

Ecuación 11. Momento crítico a pandeo lateral

$M_{LT,v}$  y  $M_{LT,w}$  son las dos componentes del momento crítico a pandeo lateral que representan la resistencia por torsión uniforme y no uniforme de la barra respectivamente, y que se calculan a partir de las expresiones de las ecuaciones 12 y 13.

$$M_{LT,v} = C_1 \cdot \frac{\pi}{L_c} \cdot \sqrt{G \cdot I_T \cdot E \cdot I_z}; \quad \text{o lo que es lo mismo} \quad M_{LT,v} = b_{LT,v} \cdot \frac{C_1}{L_c} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$M_{LT,w} = C_1 \cdot W_{el,y} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{L_c^2} \cdot I_{t,z}^2 \quad \text{o lo que es lo mismo} \quad M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot \frac{C_1}{L_c^2} \quad \text{Ecuación 13}$$

Siendo  $L_c$ , la distancia entre puntos de arriostramiento transversal,

$b_{LT,v}$  y  $b_{LT,w}$  los coeficientes de pandeo lateral con torsión uniforme y no uniforme respectivamente. Su valor, que depende de la geometría de la sección, se ha calculado para los perfiles de la serie IPE, IPN y HEB en las tablas del Anejo 1 de este documento)

El coeficiente  $C_1$  se obtiene en la tabla 2, a partir del diagrama de momentos flectores y de las condiciones de enlace de la barra.

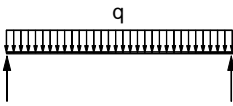
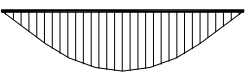
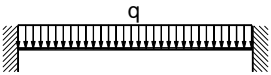
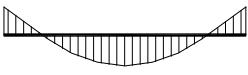
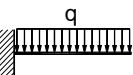



Condiciones de carga y apoyo	Diagrama de momentos flectores	$k$	$C_1$
		1,0 0,5	1,13 0,97
		1,0 0,5	1,28 0,71
		1,0	1,30
		1,0	2,05

Tabla 2. Coeficientes  $C_1$  de pandeo lateral

Si no se cumple la condición de la Ecuación 6, la estrategia a seguir consiste reducir la distancia  $L_c$ , añadiendo más puntos de arriostramiento transversal al soporte.

## 5.4 Aplicaciones prácticas

En este epígrafe se presenta la estrategia a seguir en los casos más habituales de soportes a flexotracción en edificación ordenados de menor a mayor complejidad:

### CASO 1. Soportes solicitados a flexotracción con un momento sollicitación alrededor del eje z, representado por $M_{z,Ed}$

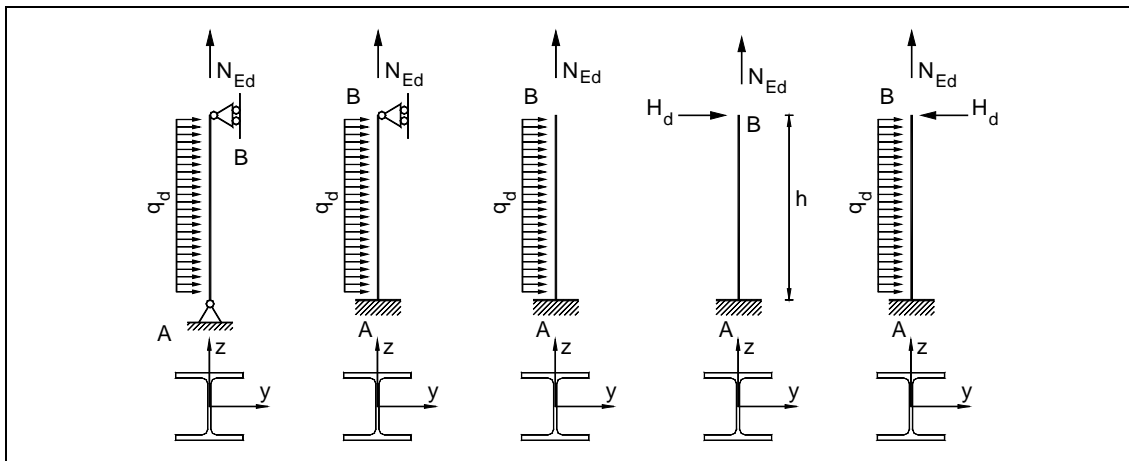


Figura 2. Soportes solicitados a flexotracción con un  $M_{z,Ed}$

En este caso, dado que la flexión se produce en el eje fuerte (eje y), no existe riesgo de pandeo lateral, de modo que la única comprobación que se debe hacer es la comprobación de resistencia de las ecuaciones 3 y 4 según la sección sea clase 1 y 2 o clase 3.

### CASO 2. Soportes solicitados a flexotracción de sección tubular

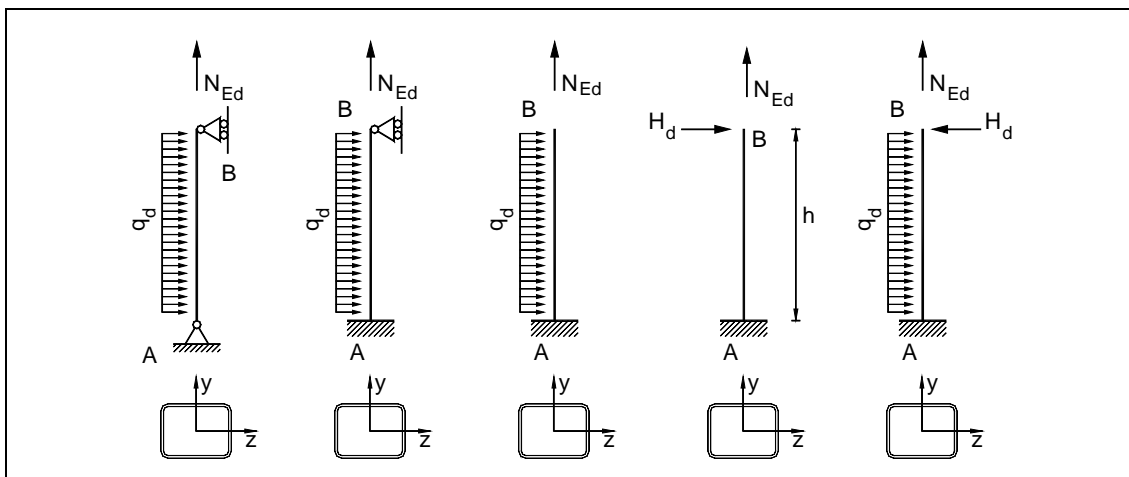


Figura 3. Perfiles tubulares solicitados a flexotracción

Considerando que los soportes de sección tubular son de sección simétrica, y teniendo en cuenta que en las secciones simétricas,

$$\frac{I_y}{z_{\text{fibra comprimida}}} = W_{el,y}, \text{ siendo } W_{el,y} \text{ el módulo resistente elástico de la sección.}$$

Sustituyendo su valor y operando, se obtiene que el momento flector efectivo para las secciones simétricas es igual a:  $M_{ef,Ed} = M_{y,Ed} - 0,8 \cdot W_{el,y} \frac{N_{Ed}}{A}$  ecuación 14

Por otro lado, el artículo 6.3.4.2. del DB-SE A indica que el coeficiente de pandeo por torsión se tomará igual a 1 en piezas no susceptibles de pandeo por torsión, de modo que en el caso de los soportes solicitados a flexotracción de sección tubular, la condición de resistencia a a pandeo lateral será igual a:  $M_{b,Rd} = \frac{1 \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$

De modo que, la comprobación a pandeo lateral en perfiles tubulares será igual a:

$$M_{ef,Ed} \leq M_{pl,Rd} \text{ en secciones tubulares clase 1 y 2}$$

$$M_{ef,Ed} \leq M_{el,Rd} \text{ en secciones tubulares clase 3}$$

Considerando los valores del momento efectivo de la ecuación 14.

### CASO 3. Soportes solicitados a flexotracción de sección abierta simétrica. Perfiles IPE, IPN y HEB.

Al tratarse de secciones simétricas, el valor del momento efectivo será igual al de la ecuación 14.

En cuanto a la obtención del momento resistente a pandeo lateral, el valor de los coeficientes a tener en cuenta en el cálculo de  $\chi_{Lt}$  depende del esquema de carga y las condiciones de enlace del soporte.

A continuación se determinan dichos coeficientes para los casos de carga y enlaces del soporte habituales en edificación.

#### 3.1 Soporte biarticulado en los dos planos con carga uniformemente repartida

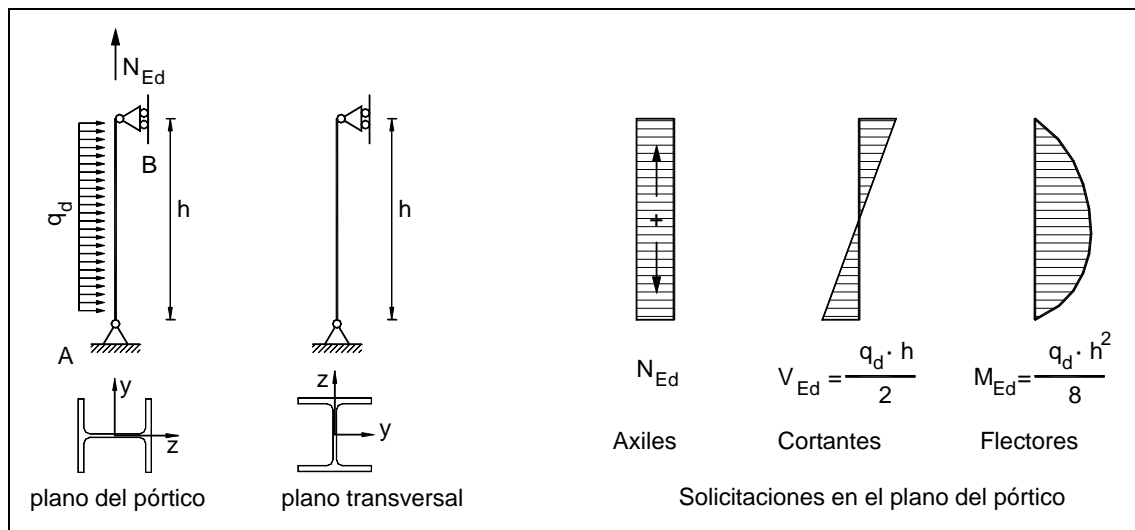


Figura 4. Soporte biarticulado en los dos planos

- $L_c$ , distancia entre puntos de arriostramiento transversal cuyo valor, si no se dice lo contrario, es igual a la altura del soporte.
- El coeficiente  $C_1 = 1,13$  se obtiene en la primera fila de la tabla 2 para un valor de  $k=1$  ( $k=\beta_2$ ), tal y como indica la figura 5.



Figura 5. Coeficiente  $C_1$  para soportes biarticulados en los dos planos

### 3.2 Soporte empotrado-apoyado en el plano del pórtico y empotrado-apoyado en el plano transversal con carga uniformemente repartida.

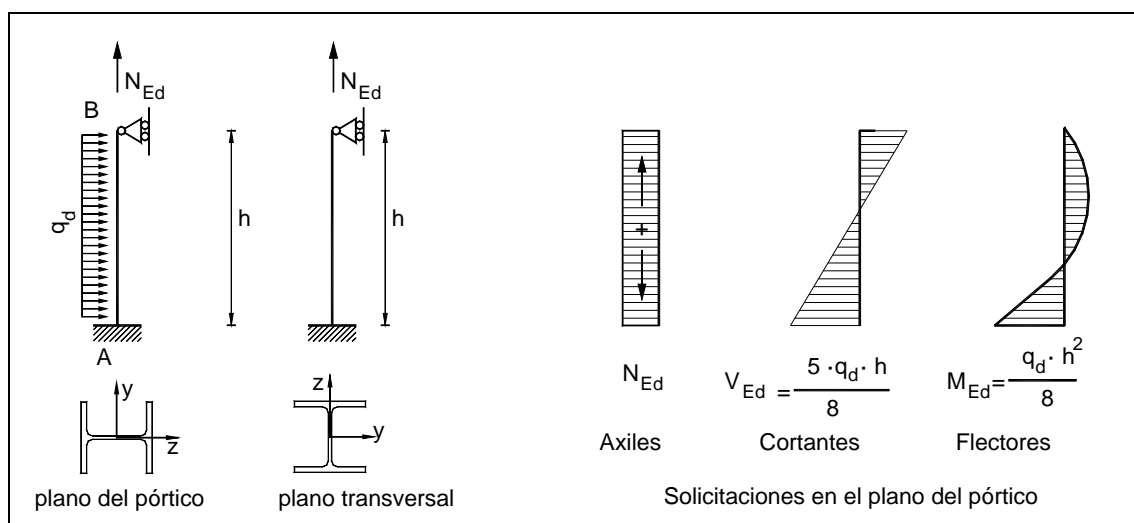


Figura 6. Soporte empotrado-apoyado en los dos planos

- $L_c$  distancia entre puntos de arriostramiento transversal cuyo valor, si no se dice lo contrario, es igual a la altura del soporte.
- El coeficiente  $C_1$  se obtiene en la tabla 2, considerando la semisuma de los valores correspondientes a una viga biarticulada y una biempotrada tal y como se muestra en la figura 7.

$$\text{Por tanto } C_1 = \frac{1,13 + 1,28}{2} = 1,20$$

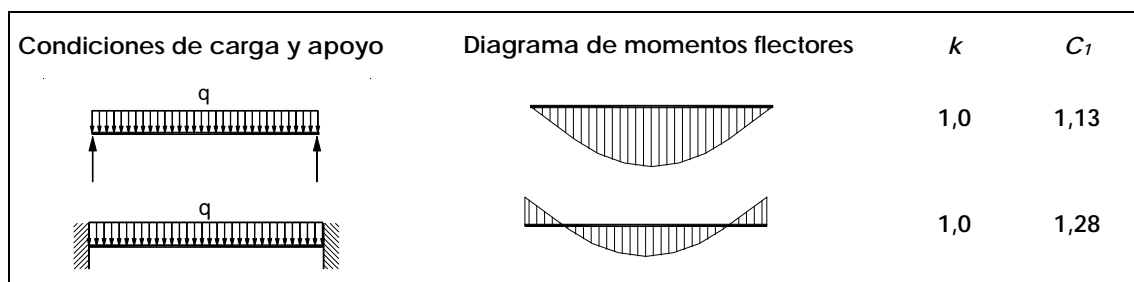


Figura 7. Coeficiente  $C_1$  para barras empotradas-apoyadas



### 3.3 Soporte empotrado libre en el plano del pórtico y empotrado apoyado en el plano transversal con carga uniformemente repartida

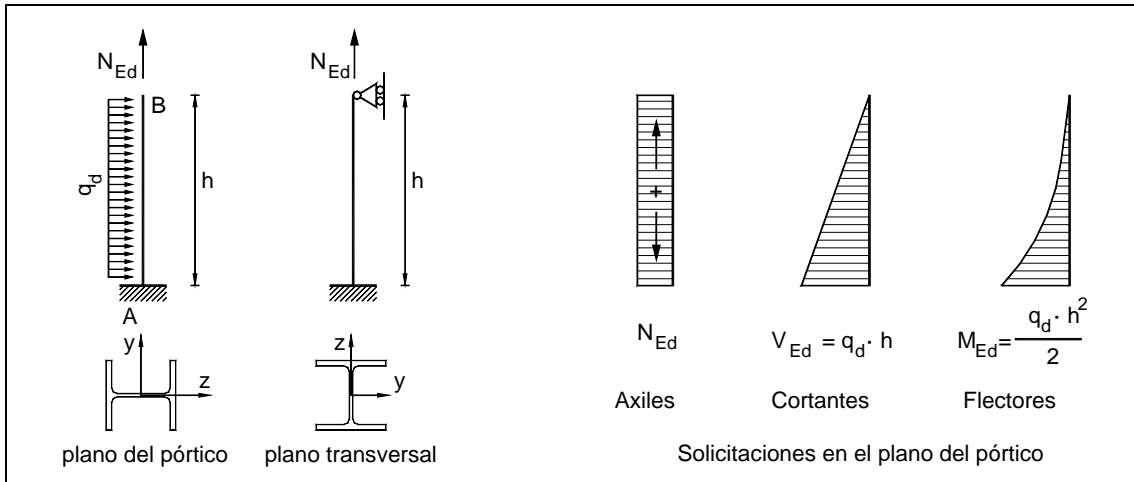


Figura 8. Soporte Empotrado-libre con carga uniformemente repartida

- $L_c$  distancia entre puntos de arriostramiento transversal cuyo valor, si no se dice lo contrario, es igual a la altura del soporte.
- El coeficiente  $C_1=1,30$  se obtiene en la tabla 2 a partir del diagrama de flectores y del coeficiente  $k$  que es igual a  $\beta_z$ . Se toma el valor correspondiente a  $k = 1$  (quedando del lado de la seguridad ya que el verdadero valor de  $k = 0,7$ ). Ver figura 9.

Condiciones de carga y apoyo	Diagrama de momentos flectores	$k$	$C_1$
		1,0	1,30

Figura 9. Coeficiente  $C_1$  barra empotrada-libre

### 3.4 Soporte empotrado libre en el plano del pórtico y empotrado apoyado en el plano transversal con carga puntual

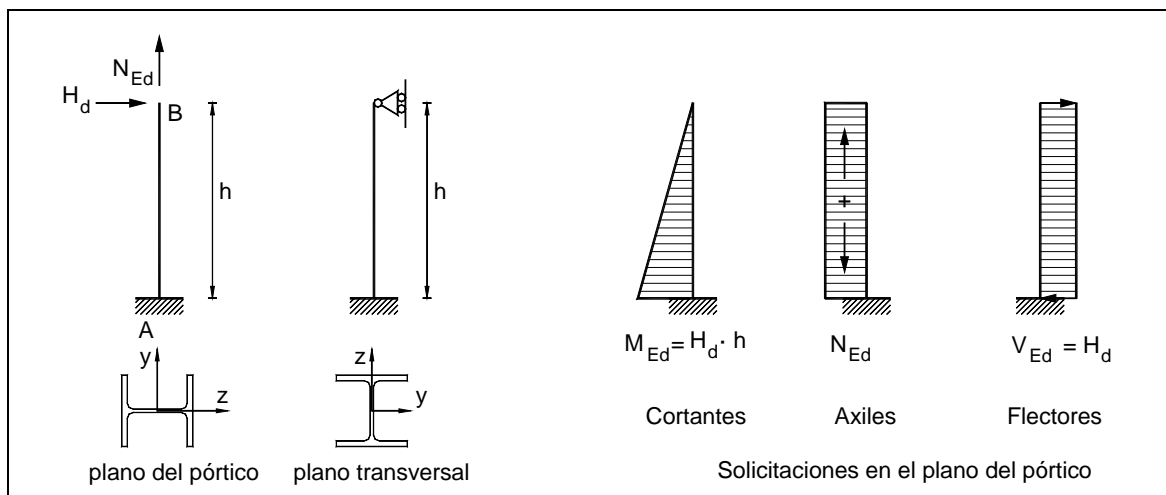


Figura 10. Soporte empotrado-libre en el plano del pórtico

- $L_c$  distancia entre puntos de arriostramiento transversal cuyo valor, si no se dice lo contrario, es igual a la altura del soporte.
- El coeficiente  $C_1 = 2,05$  se obtiene en la *tabla 2* a partir del diagrama de flectores y del coeficiente  $k$  que es igual a  $\beta_z$ . Se toma el valor correspondiente a  $k = 1$  (quedando del lado de la seguridad ya que el verdadero valor de  $k = 0,7$ ) tal y como se muestra en la figura 11.

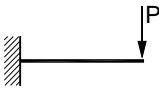
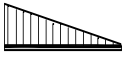
Condiciones de carga y apoyo	Diagrama de momentos flectores	$k$	$C_1$
		1,0	2,05

Figura 11. Coeficiente  $C_1$

### 3.5 Soporte que recibe carga y la comparte con otros soportes (compatibilidad de deformaciones)

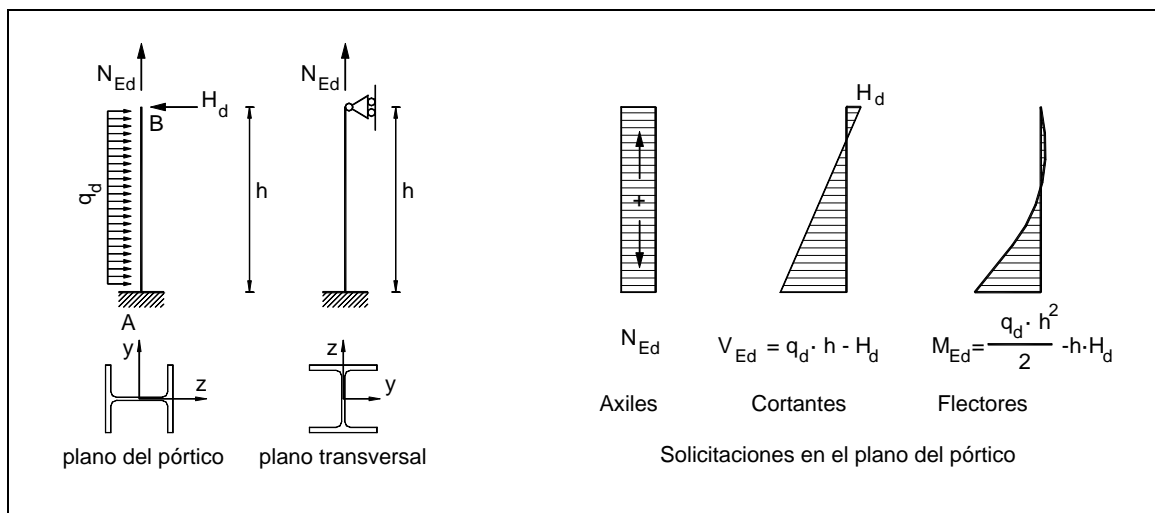


Figura 12. Soporte empotrado libre que comparte carga (compatibilidad de deformaciones)

- $L_c$  distancia entre puntos de arriostramiento transversal es, si no se dice lo contrario, igual a la altura del soporte.
- El coeficiente  $C_1 = 1,30$  se obtiene en la *tabla 2* a partir del diagrama de flectores y del coeficiente  $k$  igual a  $\beta_z$ .
- Se considera que el diagrama de flectores es prácticamente igual al de la figura 13, y se toma el valor correspondiente a  $k = 1$  (quedando del lado de la seguridad ya que el verdadero valor de  $k = 0,7$ ) ver figura 13.

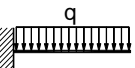

Condiciones de carga y apoyo	Diagrama de momentos flectores	$k$	$C_1$
		1,0	1,30

Figura 13. Coeficiente  $C_1$

## 6 Conclusión

A lo largo de este artículo se han particularizado las comprobaciones generales establecidas por el CTE-DB SE Acero para las barras de solicitadas a flexotracción.

Se ha establecido la condición que evita la comprobación de pandeo lateral.

Se ha analizado el caso de las secciones abiertas solicitadas a flexotracción con un  $M_{z,Ed}$ , las secciones cerradas (tubulares), y las secciones abiertas solicitadas a flexotracción con un  $M_{y,Ed}$ .

Finalmente se han obtenido los coeficientes que permiten calcular el coeficiente reductor por pandeo lateral para cinco casos tipo de soportes diseñados con secciones abiertas solicitadas a flexotracción con un  $M_{y,Ed}$  con enlaces perfectos (casos habituales en edificación)

Como actividad complementaria se propone al alumno obtener la relación entre la carga vertical  $N_{Ed}$  y la carga horizontal  $H_d$  del soporte de la figura 10 que evita la comprobación a pandeo lateral del mismo considerando que es un IPE 200 de 4 metros de longitud. La solución se encuentra al final del anejo 1.

## 7 Bibliografía

### 7.1 Libros:

- [1] MINISTERIO de la VIVIENDA: "Documento Básico Seguridad Estructural, Acero", Código Técnico de Edificación. Disponible en: <http://www.codigotecnico.org>
- [2] Monfort Leonart, J.: "Estructuras Metálicas en Edificación adaptado al CTE" Editorial Universidad Politécnica de Valencia ISBN 84-8363-021-4
- [3] Ejemplos prácticos resueltos en "Problemas de estructuras metálicas adaptados al Código Técnico" capítulos 3 y 7. Autores: Monfort Leonart, J. Pardo Ros, J.L., Guardiola Villora, A. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. ISBN 978-84-8363-322-9

### 7.2 Otras fuentes:

- [1] Polimedia "El fenómeno del pandeo lateral en vigas de alma llena" Autora: Arianna Guardiola Villora. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/13193>
- [2] Artículo docente "Concepto de clase de sección en estructuras de acero" Autora: Arianna Guardiola Villora. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/16430>

### 7.3 Tablas y figuras

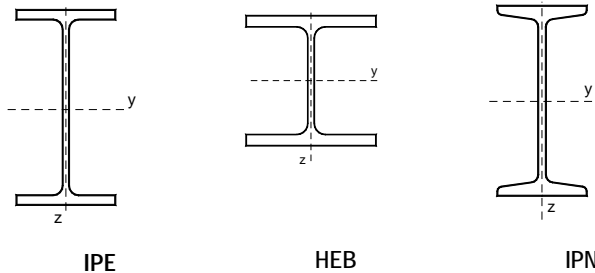
El contenido de la tabla 1. Coeficientes de momento equivalente corresponde con el de la tabla 6.10 del Documento Básico Seguridad Estructural Acero (primera referencia bibliográfica)

El contenido de la tabla 2. Coeficientes  $C_1$  para pandeo lateral se ha tomado de la tabla 4.4 del libro "Estructuras Metálicas en Edificación adaptado al CTE" (segunda referencia bibliográfica). Los valores de las dos primeras filas se han tomado del Eurocódigo 3 (UNE-EN 1993-1-1:2008) y los de las dos últimas de "Structural Analysis and Design" R.L. Ketter, G.C. Lee, S.P. Prawel; Edit McGraw-Hill Book Company, 1979 –pag 455.

El contenido de las tablas 3,4 y 5, de coeficientes  $b_{LT,v}$  y  $b_{LT,w}$  para los perfiles de la serie IPE e IPN ha sido calculado por Guardiola Vllora, A. con las expresiones indicadas en el epígrafe 5.3 ecuaciones 12 y 13.

Todos los dibujos incluidos en este documento han sido realizados por Guardiola Vllora, A.

## Anejo 1. TABLAS para los perfiles de la serie IPE, IPN, y HEB



$$b_{LT,v} = \pi \cdot \sqrt{G \cdot I_t \cdot E \cdot I_z}$$

$$b_{LT,w} = W_{el,y} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot i_{f,z}^2$$

$i_{f,z}$  radio de giro respecto a z del ala comprimida + 1/3 del alma adyacente

### PERFILES IPE

PERFIL	$i_y$ mm	$i_z$ mm	A mm <sup>2</sup>	$W_{pl,y} \times 10^3$ mm <sup>3</sup>	$b_{LT,v}$ $\times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$	$b_{LT,w}$ $\times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$
IPE 80	32,4	10,5	764	23,2	9 994	5 387
IPE 100	40,7	12,4	1030	39,4	17 897	12 918
IPE 120	49,0	14,5	1320	60,8	28 445	27 076
IPE 140	57,4	16,5	1640	88,4	42 974	51 333
IPE 160	65,8	18,4	2010	124	64 248	90 366
IPE 180	74,2	20,5	2390	166	90 121	149 134
IPE 200	82,6	22,4	2850	220	128 995	239 386
IPE 220	91,1	24,8	3340	286	176 678	377 941
IPE 240	99,7	26,9	3910	366	247 810	580 441
IPE 270	112	30,2	4590	484	335 251	968 287
IPE 300	125	33,5	5380	628	451 683	1 538 012
IPE 330	137	35,5	6260	804	610 245	2 224 702
IPE 360	150	37,9	7270	1020	807 215	3 195 858
IPE 400	165	39,5	8450	1310	1 063 933	4 507 677
IPE 450	185	41,2	9880	1700	1 373 321	6 351 658
IPE 500	204	43,1	11600	2200	1 791 060	8 911 695
IPE 550	223	44,5	13400	2780	2 349 973	12 191 912
IPE 600	243	46,6	15600	3520	3 068 100	16 745 269

### PERFILES HEB

PERFIL	$i_y$ mm	$i_z$ mm	A mm <sup>2</sup>	$W_{pl,y} \times 10^3$ mm <sup>3</sup>	$b_{LT,v}$ $\times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$	$b_{LT,w}$ $\times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$
HEB 100	41,6	25,3	2600	104	161 820	133 977
HEB 120	50,4	30,6	3400	165	282 038	309 451
HEB 140	59,3	35,8	4300	246	455 800	629 557
HEB 160	67,8	40,5	5430	354	703 917	1 175 263
HEB 180	76,6	45,7	6530	482	1 030 381	2 034 281
HEB 200	85,4	50,7	7810	642	1 459 021	3 368 809
HEB 220	94,3	55,9	9100	828	2 006 006	5 256 214
HEB 240	103	60,8	10600	1050	2 690 552	7 987 997
HEB 260	112	65,8	11800	1280	3 346 049	11 546 101
HEB 280	121	70,9	13100	1530	4 114 247	16 002 996
HEB 300	130	75,8	14900	1870	5 252 783	22 340 523
HEB 320	138	75,7	16100	2140	6 114 297	25 537 001
HEB 340	146	75,3	17100	2400	6 724 907	28 366 054
HEB 360	155	74,9	18100	2680	7 366 101	31 280 713
HEB 400	171	74,0	19800	3240	8 452 049	36 689 657
HEB 450	191	73,3	21800	3980	9 910 143	44 650 086
HEB 500	212	72,7	23900	4820	11 498 132	53 129 450
HEB 550	232	71,7	25400	5600	12 416 428	60 283 477
HEB 600	252	70,8	27000	6420	13 321 397	67 699 530

## PERFILES IPN

PERFIL	$i_y$ mm	$i_z$ mm	A mm <sup>2</sup>	$W_{pl,y} \times 10^3$ mm <sup>3</sup>	$b_{LT,v}$ $\times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$	$b_{LT,w}$ $\times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3$
IPN 80	32,0	9,1	757	22,8	9 917	4 371
IPN 100	40,1	10,7	1060	39,8	18 769	10 723
IPN 120	48,1	12,3	1420	63,6	32 464	22 860
IPN 140	56,1	14,0	1820	95,4	52 476	44 000
IPN 160	64,0	15,5	2280	136	80 632	77 698
IPN 180	72,0	17,1	2790	187	118 567	130 820
IPN 200	80,0	18,7	3340	250	169 344	208 858
IPN 220	88,0	20,2	3950	324	233 807	320 913
IPN 240	95,9	22,0	4610	412	316 504	477 092
IPN 260	104	23,2	5330	514	417 784	672 790
IPN 280	111	24,5	6100	632	540 463	906 055
IPN 300	119	25,6	6900	762	680 716	1 201 890
IPN 320	127	26,7	7770	914	853 595	1 567 640
IPN 340	135	28,0	8670	1080	1 050 350	2 008 217
IPN 360	142	29,0	9700	1280	1 299 664	2 580 946
IPN 380	150	30,2	10700	1480	1 566 931	3 217 390
IPN 400	157	31,3	11800	1710	1 887 802	4 031 416
IPN 450	177	34,3	14700	2400	2 892 153	6 697 540
IPN 500	196	37,2	17900	3240	4 323 655	10 637 001
IPN 550	216	40,2	21200	4240	1 902 869	16 528 062
IPN 600	234	43,0	25400	5600	2 619 174	23 894 674

Coeficientes reductores de pandeo  $\chi$ 

$\bar{\lambda}$	Curva de pandeo				
	$a_0$	a	b	c	d
$\leq 0,2$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,3	0,99	0,98	0,96	0,95	0,92
0,4	0,97	0,95	0,93	0,90	0,85
0,5	0,95	0,92	0,88	0,84	0,78
0,6	0,93	0,89	0,84	0,79	0,71
0,7	0,90	0,85	0,78	0,72	0,64
0,8	0,85	0,80	0,72	0,66	0,58
0,9	0,80	0,73	0,66	0,60	0,52
1,0	0,73	0,67	0,60	0,54	0,47
1,1	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
1,2	0,57	0,53	0,48	0,43	0,38
1,3	0,51	0,47	0,43	0,39	0,34
1,4	0,45	0,42	0,38	0,35	0,31
1,5	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,6	0,35	0,32	0,31	0,28	0,25
1,7	0,31	0,30	0,28	0,26	0,23
1,8	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21
1,9	0,25	0,24	0,23	0,21	0,19
2,0 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,1 <sup>(1)</sup>	0,21	0,20	0,19	0,18	0,16
2,2 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,3 <sup>(1)</sup>	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14
2,4 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,5 <sup>(2)</sup>	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12
2,6 <sup>(2)</sup>	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11
2,7 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
2,8 <sup>(2)</sup>	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10
2,9 <sup>(2)</sup>	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09
3,0 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

(1) esbeltez no aceptable en los elementos principales  
(2) esbeltez no aceptable incluso en elementos de arriostamiento

NOTA: solución ejercicio propuesto: La carga vertical (axil de tracción) debe ser al menos 51 veces mayor que la carga horizontal para que la tensión resultante sea positiva y no exista riesgo de pandeo lateral.