

CAPÍTULO IX:

LAS VIGAS-PILAR

9.1. INTRODUCCIÓN

Las vigas-pilar se definen como piezas sometidas a compresión y flexión combinadas. En principio, todos los elementos de las estructuras de edificación son en realidad vigas-pilar, con los casos particulares extremos de las vigas en las que el axil sea nulo $N=0$ y los pilares en los que el momento flector sea nulo $M=0$. Dependiendo del modo en que la carga aplicada sea transferida a la pieza, de la vinculación en los extremos y la forma de la sección transversal de la pieza, serán posibles diferentes situaciones.

9.2. COMPORTAMIENTO EN EL PLANO DE LAS VIGAS-PILAR

Cuando la deformación de una viga-pilar aislada está limitada al plano del momento flector (figura 1), su comportamiento muestra una interacción entre la flexión y el pandeo de la pieza comprimida (figura 2). La línea 1 muestra el comportamiento lineal de la viga elástica, mientras la 6 muestra el comportamiento límite de una viga rígido-plástica con un momento plástico total M_{pl} . La curva 2 muestra la transición de vigas reales elástico-plásticas desde la línea 1 a la 6. El pandeo elástico a compresión centrada para su carga crítica elástica N_{cr} se observa en la línea 4.

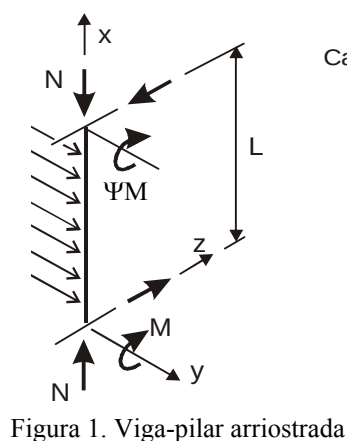


Figura 1. Viga-pilar arriostrada

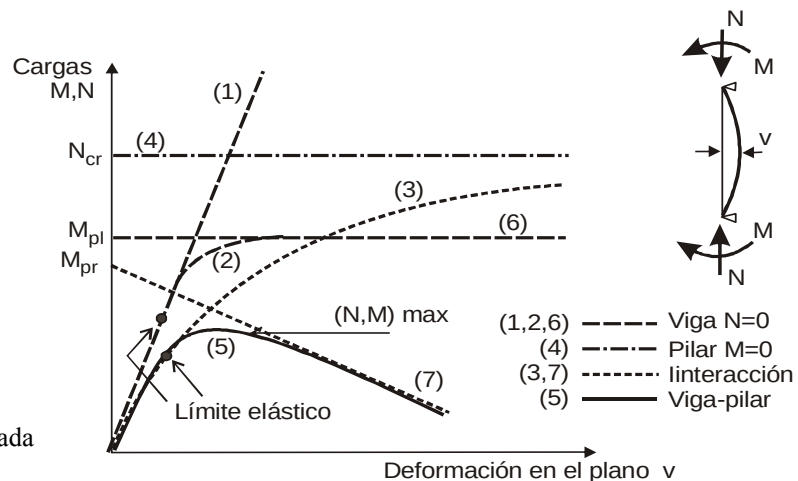


Figura 2. Comportamiento en el plano de las vigas-pilar

La curva 3 muestra la interacción entre flexión y pandeo en piezas elásticas, y tiene en cuenta el momento adicional $N \cdot v$ ejercido por la carga axil. La línea 7 muestra la interacción entre el flector y el axil que hace que la pieza se plastifique totalmente. Esta

curva tiene en cuenta la reducción del momento plástico total desde M_{pl} a M_{pr} como consecuencia del esfuerzo axial, y del momento adicional $N \cdot v$. El comportamiento real de una viga-pilar se observa en la curva 5 proporcionando una transición desde la curva 3 para elementos elásticos a la línea 7 para la plasticidad completa.

9.2.1. COMPORTAMIENTO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES

9.2.1.1 Momento flector y esfuerzo axial para secciones de Clases 1 y 2

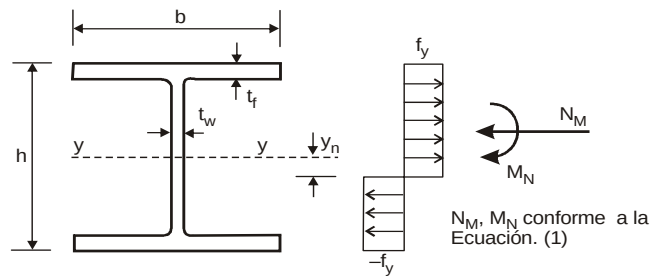
Si se puede alcanzar en la sección la plasticidad completa, entonces la condición de fallo será la que se observa en la figura 3 y la combinación de carga axial y momento flector que proporciona esta condición será:

a) Eje neutro en el alma

$$y_n \leq (h - t_f) / 2$$

$$N_M = 2f_y t_w y_n$$

$$M_N = f_y b t_f (h - t_f) + f_y \left[\left(\frac{h - 2t_f}{2} \right)^2 - y_n^2 \right] t_w$$



b) Eje neutro en el ala

$$y_n > (h - t_f) / 2$$

$$N_M = f_y \left[t_w (h - 2t_f) + 2b \left(t_f - \frac{h}{2} + y_n \right) \right]$$

$$M_N = f_y b \left(\frac{h}{2} - y_n \right) (h - y_n) t_f$$

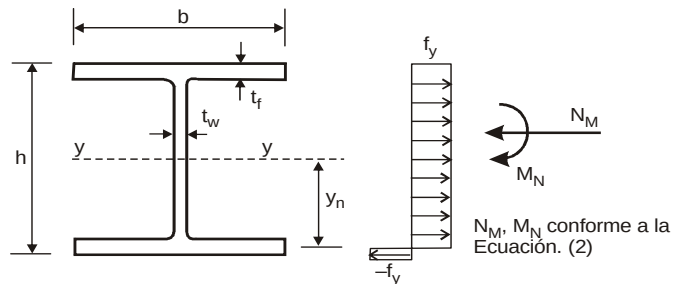


Figura 3. Plasticidad completa bajo carga axial y momento

La figura 4 compara las ecuaciones anteriores con la aproximación del Eurocódigo 3:

$$M_{Ny.Rd} = M_{pl,y} (1 - n) / (1 - 0,5a)$$

de modo que $M_{Ny.Rd} \leq M_{ply.Rd}$

siendo:

$$n = N_{Sd} / N_{pl.Rd}$$

$$a = (A - 2bt_f) / A \leq 0,5$$

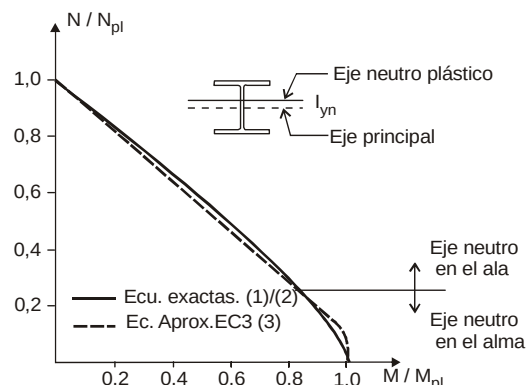


Figura 4. Interacción de plasticidad completa. Sección HEA 450

Para las secciones transversales sin agujeros para tornillos, deben usarse las siguientes aproximaciones para los momentos respecto del eje z:

- para $n \leq a$: $M_{Nz.Rd} \leq M_{pl.z.Rd}$
- Para $n > a$: $M_{Nz.Rd} = M_{pl.z.Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right]$

donde $n = N_{Sd} / N_{pl.Rd}$ y $a = (A - 2bt_f) / A$ para $a \leq 0,5$.

Además en la tabla 1 se presentan simplificaciones y aproximaciones para una serie de formas comunes de secciones transversales. En todos los casos el valor de M_N no debería superar el de M_{pl} .

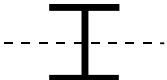
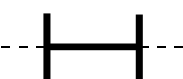
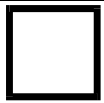
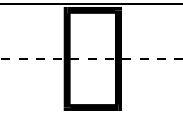
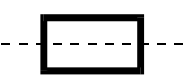
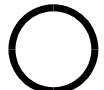
Sección transversal	Forma	Expresión para M_N
Laminada I ó H		$M_{N,y} = 1,11 M_{pl,y} (1 - n)$
		$M_{N,z} = 1,56 M_{pl,z} (1 - n)(0,6 + n)$
Sección hueca cuadrada		$M_{N,y} = 1,26 M_{pl} (1 - n)$
Sección hueca rectangular		$M_{N,y} = 1,33 M_{pl,y} (1 - n)$
		$M_{N,y} = M_{pl,z} \frac{1 - n}{0,5 + \frac{ht}{A}}$
Sección hueca circular		$M_{N,y} = 1,04 M_{pl} (1 - n^{1,7})$

Tabla 1. Expresiones para el momento resistente plástico reducido $M_N (n = N_{Sd} / N_{pl.Rd})$

9.2.1.2 Momento flector y esfuerzo axial para secciones de Clase 3

La figura 5 muestra una sección a lo largo de la longitud de un pilar con forma de H donde la compresión y el momento flector aplicado respecto del eje y dan lugar a la distribución uniforme y variable de tensiones mostradas en las figuras 5a y 5b

Para comportamiento *elástico* puede utilizarse el principio de superposición sumando simplemente las dos distribuciones de tensiones tal y como se observa en la figura 5c. El límite elástico se alcanzará por tanto en el borde donde tiene lugar la tensión máxima de compresión y de flexión y se corresponderá con la condición:

$$f_y = \sigma_c + \sigma_b$$

donde:

$\sigma_c = N / A$ es la tensión debida a la carga de compresión N

$\sigma_b = \frac{Mh/2}{I}$ es la tensión máxima de compresión debida al momento M .

Las secciones de clase 3 son válidas si la tensión máxima $\sigma_{x.Ed}$ satisface el criterio:

$$\sigma_{x.Ed} \leq f_{yd}; \quad f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

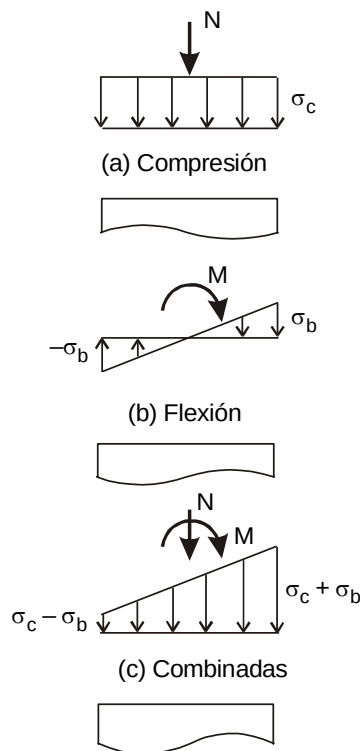


Figura 5. Comportamiento elástico de una sección transversal a compresión y flexión

9.2.1.3 Momento flector y esfuerzo axial para secciones de Clase 4

Las secciones transversales de clase 4 serán válidas si la tensión normal máxima $\sigma_{x.Ed}$ calculada utilizando los anchos eficaces de los elementos comprimidos cumple:

$$\sigma_{x.Ed} \leq f_{yd}; \quad f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

9.2.2. ESTABILIDAD GLOBAL

El tratamiento de los comportamientos de las secciones transversales en los párrafos anteriores no tiene en cuenta el modo exacto en el que se genera el momento M en la sección transversal considerada. La figura 6 muestra una viga-pilar experimentando una deformación lateral como resultado de la combinación del esfuerzo de compresión y unos momentos opuestos e iguales aplicados en los extremos.

El momento en una sección cualquiera de la pieza debe ser considerado como suma de dos componentes:

- Momento principal: M
- Momento secundario: $N v$.

Analizando este problema elásticamente utilizando la teoría de estructuras se obtiene la deformación máxima en el centro como

$$v_{\max} = \frac{M}{N} \sec \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{N}{P_{Ey}} - 1}$$

donde $P_{Ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L^2}$ es la carga crítica de Euler para el pandeo sobre el eje de mayor inercia, y el momento máximo es:

$$M_{\max} = M \sec \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{N}{P_{Ey}}}$$

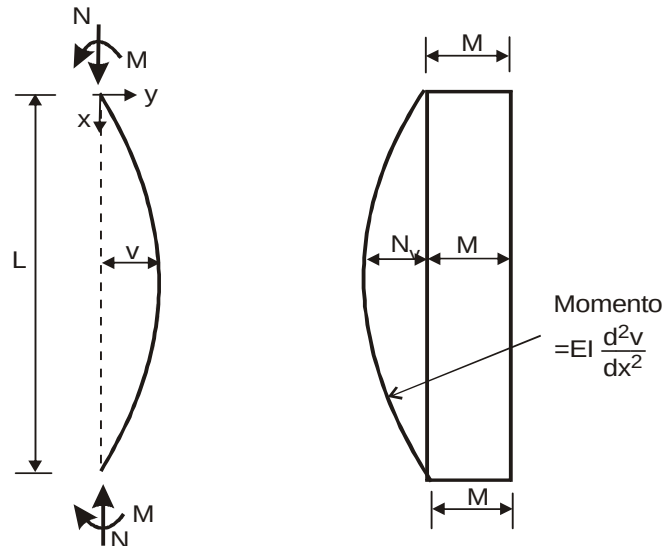


Figura 6. Momentos principal y secundario

En ambas ecuaciones el término secante puede reemplazarse teniendo en cuenta que la deformación de primer orden (debida a los momentos en los extremos M actuando solos) y el momento de primer orden M (obtenido mediante la teoría ordinaria de vigas) están aproximadamente amplificadas por el término: $\frac{1}{1 - N / P_{Ey}}$ de modo que (figura 7).

$$v_{\max} = \frac{ML^2}{8EI_y} \frac{1}{1 - N / P_{Ey}}$$

$$M_{\max} = M \frac{1}{1 - N / P_{Ey}}$$

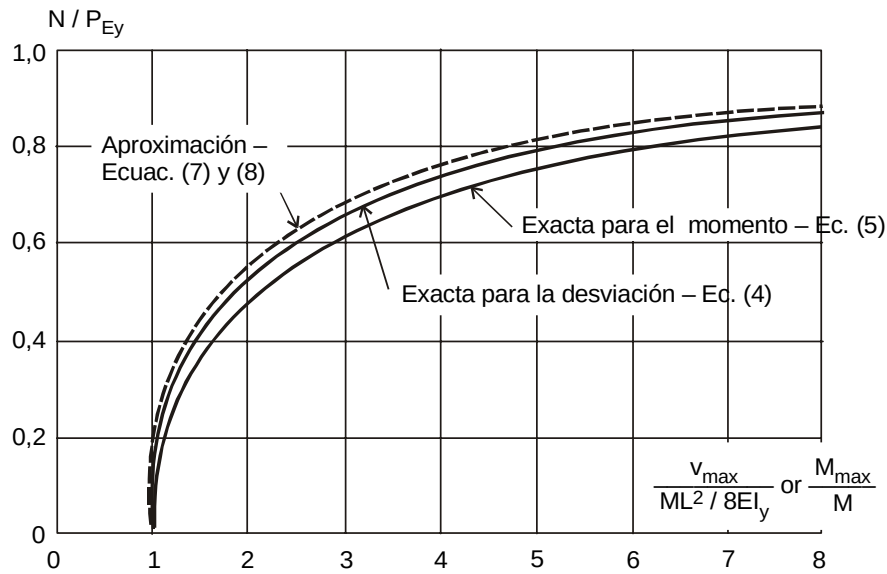


Figura 7. Deformación y momento máximos en vigas-pilar con momentos iguales

Dado que la tensión elástica máxima será:

$$\sigma_{\max} = \sigma_c + \sigma_b \frac{M_{\max}}{M}$$

la ecuación anterior puede escribirse como:

$$\frac{\sigma_c}{f_y} + \frac{\sigma_b}{f_y (1 - N / P_{Ey})} = 1,0$$

Esta ecuación puede ser resuelta para valores de σ_c y σ_b que justamente rebasen el límite elástico, tomando diferentes valores de P_{Ey} (el cual depende de la esbeltez L/i_y). Esto da lugar a una serie de curvas como se muestra en la figura 8, en la que se indica que cuando $\sigma_b \rightarrow 0$, σ_c tiende al valor del límite elástico del material f_y .

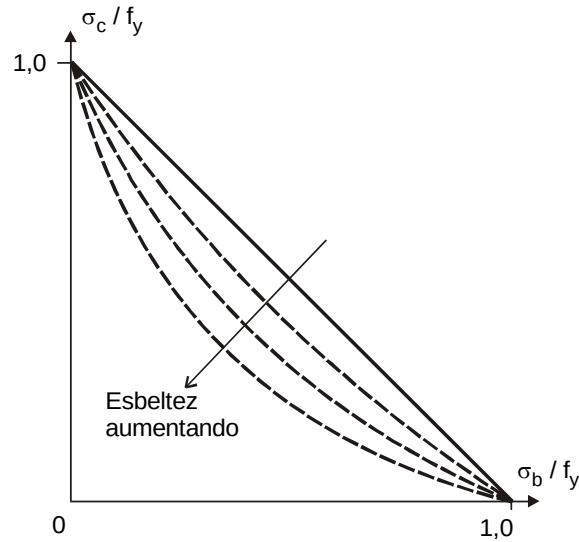


Figura 8. Representación de la ecuación $\frac{\sigma_c}{f_y} + \frac{\sigma_b}{f_y(1 - N/P_{Ey})} = 1,0$

La ecuación anterior, sin embargo, no reconoce la posibilidad de pandeo bajo carga axial pura para una tensión σ_{Ey} dada por:

$$\sigma_{Ey} = \frac{P_{Ey}}{A} = \frac{\pi^2 EI_y}{AL^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_y^2}$$

El uso de ambas ecuaciones asegura que ambas condiciones quedan cubiertas como se muestra en la figura 9.

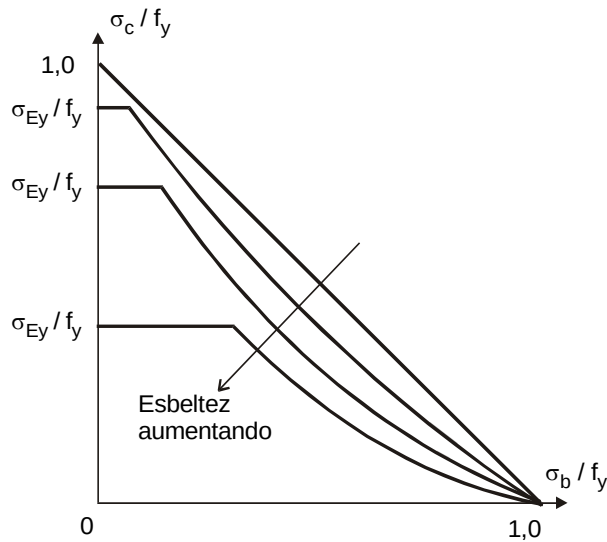


Figura 9. Combinación de las ecuaciones $\frac{\sigma_c}{f_y} + \frac{\sigma_b}{f_y(1 - N/P_{Ey})} = 1,0$ y $\sigma_{Ey} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_y^2}$

9.3. COMPORTAMIENTO A PANDEO LATERAL DE LAS VIGAS-PILAR

Cuando una viga-pilar no arriostrada está flectada respecto de su eje de mayor inercia (figura 10), puede pandear deformándose lateralmente y girando sobre su propio eje para una carga significativamente menor que la carga máxima prevista al llevar a cabo un análisis de la flexión en el plano. Este pandeo lateral puede presentarse mientras el elemento es todavía elástico (curva 1 figura 11), o tras una cierta plastificación (curva 2) debida a la flexión en el plano y la compresión presentes.

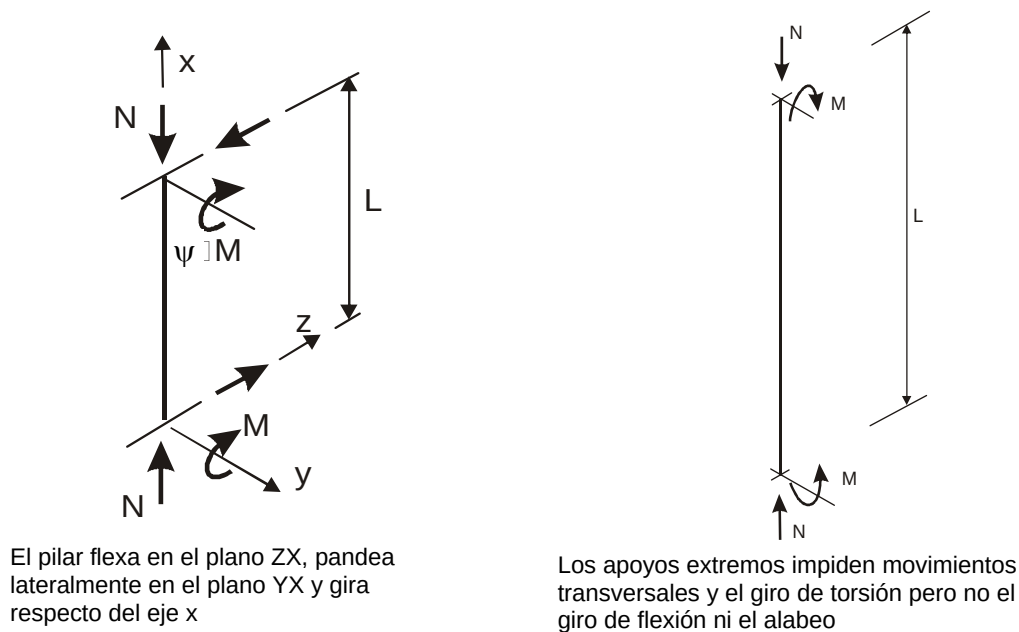


Figura 10. Comportamiento a pandeo lateral

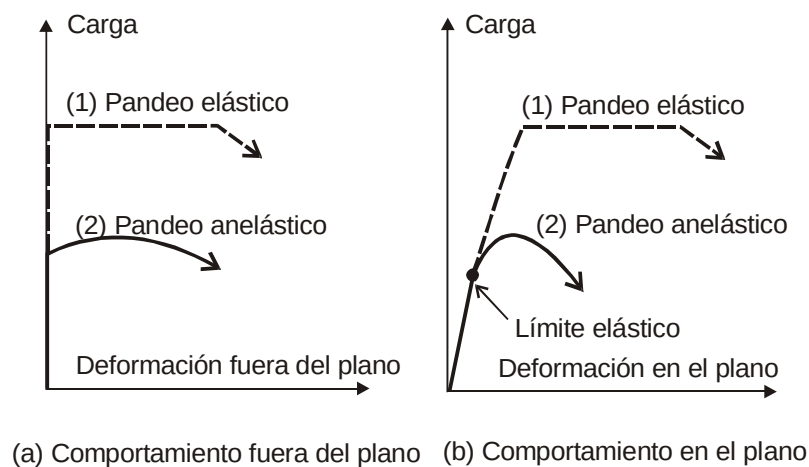


Figura 11. Pandeo lateral de vigas-pilar

Consideremos el comportamiento a pandeo lateral de una viga-pilar con sección en I no arriostrada transversalmente y flectada respecto de su eje fuerte. Suponiendo un comportamiento elástico y la disposición de cargas aplicadas y condiciones de apoyo dadas en la figura 10, las combinaciones críticas de N y M pueden ser obtenidas de:

$$\frac{M^2}{i_0^2 P_{Ez} P_{E0}} = \left(1 - \frac{N}{P_{Ez}}\right) \left(1 - \frac{N}{P_{E0}}\right)$$

en donde

$$i_0 = \sqrt{\frac{I_y + I_z}{A}} \quad \text{es el radio de giro polar}$$

$$P_{Ez} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \quad \text{es la carga crítica para el eje débil}$$

$$P_{E0} = \frac{GI_t}{i_0^2} \left(1 + \frac{\pi^2 EI_w}{GI_t L^2}\right) \quad \text{es la carga de pandeo lateral}$$

La ecuación anterior se reduce al pandeo de una viga cuando $N \rightarrow 0$ y al pandeo de un pilar tanto en flexión (P_{Ez}) como en torsión (P_{E0}) cuando $M \rightarrow 0$. En el primer caso el valor crítico de M viene dado por la ya conocida expresión:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_z GI_t} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2 GI_t}}$$

En la obtención de la ecuación general no se realizó ninguna concesión para la amplificación de los momentos en el plano M , debida a la carga axial actuando a través de las desviaciones en el plano. Esto puede ser estimado mediante $\frac{M}{1 - N/P_{Ey}}$. En ese

caso la ecuación general puede transformarse en:

$$\frac{M^2}{i_0^2 P_{Ez} P_{E0}} = \left(1 - \frac{N}{P_{Ey}}\right) \left(1 - \frac{N}{P_{Ez}}\right) \left(1 - \frac{N}{P_{E0}}\right)$$

teniendo en cuenta las magnitudes relativas de P_{Ey} , P_{Ez} y P_{E0} , y reordenando se llega a:

$$\frac{N}{P_{Ez}} + \frac{1}{1 - N/P_{Ey}} \frac{M}{i_0 \sqrt{P_{Ez} P_{E0}}} = 1$$

o bien

$$\frac{N}{P_{Ez}} + \frac{1}{1 - N/P_{Ey}} \frac{M}{M_{cr}} = 1$$

9.4. INTERACCIÓN DE ESFUERZOS A NIVEL SECCIONAL

9.4.1. PLANTEAMIENTO DEL CTE-DB-SE-A

9.4.1.1 Flexión compuesta sin cortante

Ante una sollicitación combinada esfuerzo axial N_{Ed} y de flexión pura (es decir sin cortante simultáneo) con esfuerzos en dos planos $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$, concomitantes, el CTE propone utilizar unas fórmulas de interacción que califica de prudentes y que son:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rdy}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rdz}} \leq 1 \quad \text{Secciones de Clases 1 y 2}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{el,Rdy}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,Rdz}} \leq 1 \quad \text{Secciones de Clase 3}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{M_{0,Rdy}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz}}{M_{0,Rdz}} \leq 1 \quad \text{Secciones de Clase 4}$$

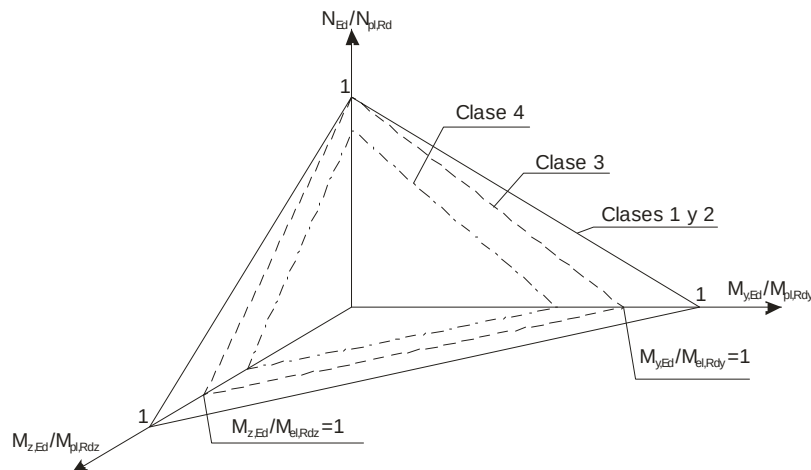


Figura 12. Zonas seguras en la interacción de esfuerzos de flexión compuesta

9.4.1.2 Flexión compuesta con cortante

Solicitación combinada que además de los esfuerzos anteriores incluye el cortante. Ante esta situación, tal y como se indicó en el capítulo de piezas a flexión, siempre que el cortante de cálculo no supere el 50% de la resistencia de cálculo de la sección, se podrán utilizar las expresiones anteriores.

En caso de que el cortante de cálculo superase el 50% de la resistencia de cálculo de la sección, la resistencia de ésta para el conjunto de esfuerzos se determinará utilizando para el cálculo de los momentos resistentes en cada plano un valor reducido del límite elástico conforme al factor $(1-p)$, tal y como se expuso para las piezas a flexión.

9.4.2. PLANTEAMIENTO DEL EUROCÓDIGO 3 Y LA EAE

9.4.2.1 Flexión compuesta sin cortante

Según la Instrucción EAE, el dimensionamiento y la comprobación frente al efecto combinado de solicitaciones de flexión y esfuerzo axial se llevará a cabo de acuerdo con criterios establecidos en función del tipo de sección transversal.

Planteamiento para secciones transversales de Clases 1 y 2

La presencia de un esfuerzo axial implica una reducción de la resistencia plástica de cálculo a flexión para tener en cuenta su efecto. En esta situación deberá verificarse:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd}$$

siendo $M_{N,Rd}$ el momento resistente plástico de cálculo a flexión reducida, debido a la existencia del esfuerzo axial N_{Ed} simultaneo con el momento flector. Esta magnitud $M_{N,Rd}$ varía con el tipo de sección transversal de la pieza, así se tiene:

*Para una *sección rectangular* sin agujeros para tornillos:

$$M_{N,Rd} = M_{c,Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right]$$

**Secciones I y H* simétricas respecto del eje z-z, sometidas a flexión en el eje fuerte y-y:

$$M_{N,y,Rd} = M_{c,y,Rd} \cdot \left(\frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} \right) \quad \text{siendo} \quad M_{N,y,Rd} \leq M_{c,y,Rd} \quad \begin{cases} n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \\ a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A}; \quad a \leq 0,5 \end{cases}$$

Es preciso llevar a cabo la reducción si se cumple: $N_{Ed} > \min \left\{ 0,25 N_{pl,Rd}; \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \right\}$

**Secciones I y H* sometidas a flexión alrededor del eje débil z-z:

$$\text{Para } n \leq a \rightarrow M_{N,z,Rd} = M_{c,z,Rd}$$

$$\text{Para } n > a \rightarrow M_{N,z,Rd} = M_{c,z,Rd} \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right]$$

Deberá llevarse a cabo la reducción cuando se cumpla: $N_{Ed} > \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$

*Secciones de *perfiles huecos rectangulares* con espesor constante y secciones cajón soldadas con alas iguales y almas iguales donde los agujeros para tornillos no sean considerados, podrán aplicarse para flexión alrededor de ambos ejes, las expresiones:

$$M_{N,y,Rd} = M_{c,y,Rd} \cdot \left(\frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_w} \right) \quad \text{siendo} \quad M_{N,y,Rd} \leq M_{c,y,Rd}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{c,z,Rd} \cdot \left(\frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_f} \right) \quad \text{siendo} \quad M_{N,z,Rd} \leq M_{c,z,Rd}$$

donde

$$a_w = \frac{A-2 \cdot b \cdot t}{A} \quad \text{siendo} \quad a_w \leq 0,5 \quad \text{para secciones huecas}$$

$$a_w = \frac{A-2 \cdot b \cdot t_f}{A} \quad \text{siendo} \quad a_w \leq 0,5 \quad \text{para secciones cajón soldadas}$$

$$a_f = \frac{A-2 \cdot h \cdot t}{A} \quad \text{siendo} \quad a_f \leq 0,5 \quad \text{para secciones huecas}$$

$$a_f = \frac{A-2 \cdot h \cdot t_w}{A} \quad \text{siendo} \quad a_f \leq 0,5 \quad \text{para secciones cajón soldadas}$$

*En caso de flexión en dos planos y esfuerzo axil simultáneos, la comprobación será:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1$$

siendo α y β constantes que conservadoramente pueden tomarse igual a la unidad o bien

- Secciones en I y en H: $\alpha = 2; \beta = 5n$ con $\beta \geq 1$

- Secciones huecas circulares: $\alpha = 2; \beta = 2$

- Secciones huecas rectangulares: $\alpha = \beta = \frac{1,66}{1-1,13 \cdot n^2}$ con $\alpha = \beta \leq 6$ donde $n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$

Planteamiento para secciones transversales de Clases 3 y 4

Para secciones de Clases 3 y 4 la Instrucción EAE coincide con las propuesta del CTE

9.4.2.2 Flexión compuesta con cortante

También cuando se combinan un momento flector, un esfuerzo cortante y un esfuerzo axil, el planteamiento de la EAE coincide con lo visto anteriormente para el CTE.

9.5. INTERACCIÓN DE ESFUERZOS A NIVEL DE ELEMENTOS

9.5.1. PLANTEAMIENTO DEL CTE-DB-SE-A

9.5.1.1 Piezas sometidas a flexión + tracción

En las piezas solicitadas por una combinación de un momento flector y un esfuerzo axil de tracción, se comprobará, además de la resistencia a flexotracción de las secciones, su resistencia frente al pandeo lateral en las fibras comprimidas considerando el esfuerzo axil y el momento flector como un efecto vectorial.

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

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

siendo

W_{com} momento resistente de la sección referido a la fibra extrema comprimida

$N_{t,Ed}$ valor de cálculo del esfuerzo 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 flector efectivo $M_{ef,Sd}$

$$M_{ef,Ed} = W_{com} \cdot \sigma_{com,Ed}$$

9.5.1.2 Piezas sometidas a flexión + compresión

En el CT se presentan unas expresiones para llevar a cabo la verificación de las piezas solicitadas por la combinación de un momento flector y un esfuerzo axil de compresión, distinguiendo entre aquellas piezas que puedan ser sensibles o no a la torsión.

Así se tiene que para toda clase de pieza se deberá verificar la siguiente desigualdad:

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

Si la pieza no es susceptible de pandeo por torsión se comprobará además:

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

Si por el contrario la pieza resulta susceptible de pandeo por torsión, se verificará:

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

siendo

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ y $M_{z,Ed}$ el axil y los momentos de mayor valor absoluto de la pieza.

Los valores de A^* , W_y , W_z , α_y , α_z , e_{Ny} y e_{Nz} están indicados en la tabla 2.

χ_y y χ_z son los coeficientes de pandeo en cada dirección.

χ_{LT} el coeficiente de pandeo lateral, 1,00 en piezas no susceptibles de pandeo por torsión.

e_{Ny} y e_{Nz} desplazamientos del c.d.g. de la sección transversal efectiva con respecto a la posición del c.d.g. de la sección transversal bruta, en piezas con secciones de clase 4.

Los coeficientes k_y , k_z , k_{yLT} se indican en la tabla 3.

Los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$, $c_{m,z}$, $c_{m,LT}$ se obtienen de la tabla 4 en función de la forma del diagrama de momentos entre puntos arriostrados.

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

Clase	A^*	W_y	W_z	α_y	α_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 2. Términos de comprobación, 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 $1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$ 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	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$

siendo

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

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

Tabla 3. Coeficientes de interacción según peor clase de sección en la pieza

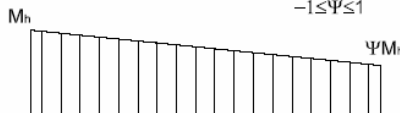
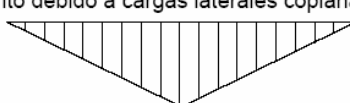
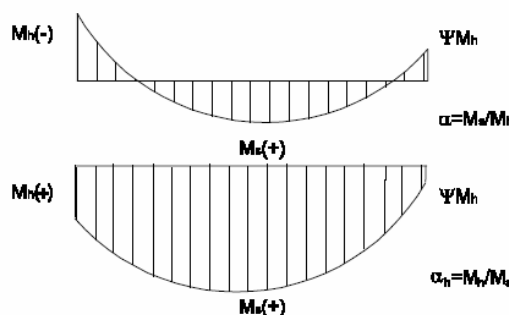
Factor de momento flector	Eje de flexión	Puntos arriostrados en dirección
$c_{m,y}$	y-y	z - z
$c_{m,z}$	z - z	y-y
$c_{m,LT}$	y - y	y-y
Diagrama de Flectores	Factor de momento uniforme equivalente	
	$c_{m,i} = c_{m,i} \text{ (i =y)}$	
	$c_{m,i} = c_{m,i} \text{ (i =z)}$	
	$c_{m,LT} = c_{m,i} \text{ (i =LT)}$	
Momentos de extremo		
	$-1 \leq \psi \leq 1$ $c_{m,i} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$	
Momento debido a cargas laterales coplanarias		
	$c_{m,i} = 0,9$	
	$c_{m,i} = 0,95$	
Momentos debidos a cargas laterales y momentos de extremos		
	$\alpha = M_s/M_h$ $c_{m,i} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4 \text{ si } -1 \leq \alpha \leq 0$ $c_{m,i} = 0,2 + 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4 \text{ si } 0 \leq \alpha \leq 1$	
	$\alpha_h = M_y/M_e$	$c_{m,i} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h \text{ con } -1 \leq \alpha_h \leq 1$

Tabla 4 Coeficientes del momento equivalente

9.5.2. PLANTEAMIENTO DE LA EAE Y DEL EUROCÓDIGO 3

9.5.2.1 Piezas sometidas a compresión y flexión (Método 1)

Salvo que se lleve a cabo un análisis en 2º orden teniendo en cuenta las imperfecciones, deberá verificarse la estabilidad de elementos sometidos a flexión y compresión. Se distingue entre los que no son susceptibles a deformaciones por torsión, tales como piezas con secciones huecas circulares o secciones con torsión impedida y los elementos que sí lo son, tales como piezas con secciones abiertas y sin impedimentos a la torsión.

El dimensionamiento o la comprobación de elementos de sistemas estructurales puede llevarse a cabo sobre el análisis de elementos individuales de un solo vano extraídos del sistema. Los efectos de 2º orden de sistemas traslacionales (efecto P-Δ) deberán tenerse

en cuenta a través de los momentos en extremos del elemento o a través de la longitud de pandeo que les corresponda.

En el caso de piezas sometidas a flexión y compresión se deben cumplir las condiciones:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

siendo

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$, valores de cálculo del axil de compresión y de los momentos flectores **máximos** a lo largo del elemento alrededor de los ejes y - y y z - z .

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ momentos adicionales debidos al desplazamiento del eje baricéntrico del área A_{ef} respecto al eje baricéntrico de la sección bruta. Tabla 5.

χ_y , χ_z coeficientes de reducción para pandeo por flexión.

χ_{LT} coeficientes de reducción para pandeo lateral. Para elementos no susceptibles a deformaciones por torsión $\chi_{LT} = 1,0$

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} coeficientes de interacción, que se obtendrán de la tabla 6.

Clase	1	2	3	4
A	A	A	A	A_{ef}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{ef,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{ef,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} \cdot N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} \cdot N_{Ed}$

Tabla 5. Valores de $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ y $\Delta M_{i,Ed}$ en las expresiones de comprobación y dimensionamiento frente a pandeo.

Interaction factors	Design assumptions	
	elastic cross-sectional properties class 3, class 4	plastic cross-sectional properties class 1, class 2
k_{yy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}$
k_{yz}	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}$
k_{zy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}$
k_{zz}	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}$
Auxiliary terms:		
$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$ $\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$ $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1,5$ $w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1,5$ $n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}}$ C_{my} see Table A.2 $a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} \geq 0$	$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ with $b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$ $C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ with $c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$ $C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ with $d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}}$ $C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ with $e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$	

Tabla 6. Coeficientes de interacción k_{ij} (coincide con Tabla A.1 Anexo A del EC3 1-1)

Este procedimiento adoptado por la Instrucción EAE coincide con el denominado *método 1* propuesto por el EC3 Parte 1-1, cuyas tablas se recogen en el *Anexo A*.

$\bar{\lambda}_{\max} = \max \left\{ \bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z \right\}$	
$\bar{\lambda}_0$ = non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling due to uniform bending moment, i.e. $\psi_y = 1,0$ in Table A.2	
$\bar{\lambda}_{LT}$ = non-dimensional slenderness for lateral-torsional buckling	
For $\bar{\lambda}_0 = 0$:	$C_{my} = C_{my,0}$ $C_{mz} = C_{mz,0}$ $C_{mLT} = 1,0$
For $\bar{\lambda}_0 > 0$:	$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\epsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\epsilon_y} a_{LT}}$ $C_{mz} = C_{mz,0}$ $C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crit,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crit,T}}\right)}}$
$\epsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}}$ for class 1, 2 and 3 cross-sections	
$\epsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{eff,y}}$ for class 4 cross-sections	
$N_{crit,y}$ = elastic flexural buckling force about the y-y axis $N_{crit,z}$ = elastic flexural buckling force about the z-z axis $N_{crit,T}$ = elastic torsional buckling force I_T = St. Venant torsional constant I_y = second moment of area about z-z axis	

Tabla 6 cont. (Coincide con la continuación de Tabla A.1, Anexo A del EC3 1-1)

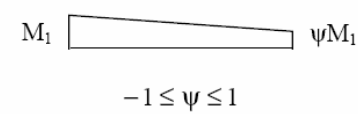
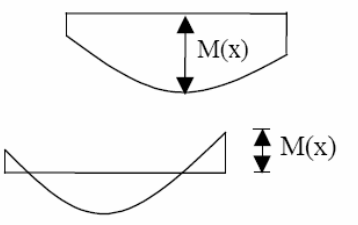
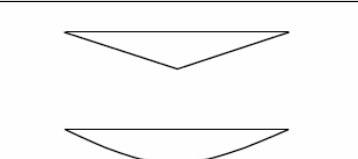
Moment diagram	$C_{mi,0}$
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + \left(\frac{\pi^2 EI_i \delta_x }{L^2 M_{i,Ed}(x) } - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ $M_{i,Ed}(x)$ is the maximum moment $M_{y,Ed}$ or $M_{z,Ed}$ δ_x is the maximum member displacement along the member
	$C_{mi,0} = 1 - 0,18 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ $C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Tabla 7. Coeficientes de momento uniforme equivalente $C_{mi,0}$ (Tabla A.2, EC3 1-1)

9.5.2.2 Piezas sometidas a compresión y flexión (Método 2. Anexo B. Eurocódigo 3)

En el EC3 Parte 1-1 se propone además el *método 2* recogido en el *Anexo B*, en donde se distingue entre las piezas que sean o no sean susceptibles de sufrir deformaciones por torsión, proponiendo coeficientes de interacción diferentes (ver tablas 8, 9 y 10).

Interaction factors	Type of sections	Design assumption	
		elastic cross-sectional properties class 3, class 4	plastic cross-sectional properties class 1, class 2
k_{yy}	I-sections	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	RHS-sections	$\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	I-sections	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
	RHS-sections		
k_{zy}	I-sections	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
	RHS-sections		
k_{zz}	I-sections	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	RHS-sections		$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
For I- and H-sections and rectangular hollow sections under axial compression and uniaxial bending $M_{y,Ed}$ the coefficient k_{zy} may be $k_{zy} = 0$.			

Tabla 8. Coeficientes de interacción k_{ij} para piezas no susceptibles de sufrir deformación por torsión (coincide con Tabla B.1 Anexo B del EC3 1-1)

Interaction factors	Design assumptions	
	elastic cross-sectional properties class 3, class 4	plastic cross-sectional properties class 1, class 2
k_{yy}	k_{yy} from Table B.1	k_{yy} from Table B.1
k_{yz}	k_{yz} from Table B.1	k_{yz} from Table B.1
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$\left[1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$: $t_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$
k_{zz}	k_{zz} from Table B.1	k_{zz} from Table B.1

Tabla 9. Coeficientes de interacción k_{ij} para piezas susceptibles de sufrir deformación por torsión (coincide con Tabla B.2 Anexo B del EC3 1-1)

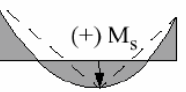
Moment diagram	range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}	
		uniform loading	concentrated load
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s/M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$		
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s \leq 0$		
	$0 \leq \psi \leq 1$ $\psi = -1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ $0,2 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$ $0,2 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h/M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$		
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h \leq 0$		
	$0 \leq \psi \leq 1$ $\psi = -1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$ $0,95 - 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$ $0,90 - 0,10\alpha_h$
For members with sway buckling mode the equivalent uniform moment factor should be taken $C_{my} = 0,9$ or $C_{Mz} = 0,9$ respectively.			
C_{my} , C_{mz} and C_{mLT} shall be obtained according to the bending moment diagram between the relevant braced points as follows:			
moment factor	bending axis	points braced in direction	
C_{my}	y-y	z-z	
C_{mz}	z-z	y-y	
C_{mLT}	y-y	y-y	

Tabla 10. Coeficientes de momento uniforme equivalente C_m (Tabla B.3, EC3 1-1)

9.5.2.3 Método simplificado de la EAE para piezas a compresión y flexión

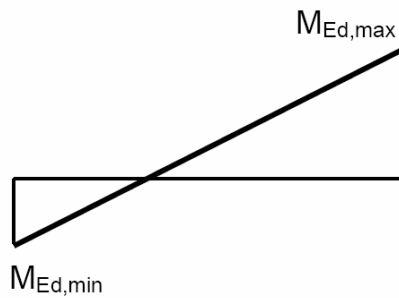
Las fórmulas de interacción recogidas en el apartado previo, están basadas en elementos de un solo vano simplemente apoyados con condiciones de apoyo de horquilla en sus extremos y que dispongan o no de arriostramientos laterales. Los procedimientos expuestos permiten tener en cuenta las posibles formas de agotamiento por inestabilidad que pueden aparecer en elementos sometidos a compresión y flexión.

No obstante y con el fin de alcanzar una mayor simplicidad, la instrucción EAE presenta en los comentarios correspondientes al artículo en cuestión un método simplificado de dimensionamiento y comprobación de elementos sometidos a compresión y a flexión alrededor de uno de sus ejes principales, supuestos impedidos el pandeo alrededor del otro eje principal y el pandeo lateral. En estas circunstancias, el dimensionamiento y comprobación puede llevarse a cabo mediante la siguiente expresión:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \cdot \frac{c_M \cdot M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

donde

$N_{b,Rd}$	resistencia de cálculo a pandeo del elemento comprimido
$M_{c,Rd}$	resistencia de cálculo de la sección según el eje considerado de flexión
N_{cr}	esfuerzo axil crítico elástico para el pandeo por flexión
N_{Ed}, M_{Ed}	valores de cálculo del axil de compresión y del flector máximo en la pieza
c_M	coeficiente de momento equivalente uniforme, referido al eje principal de flexión, que tiene en cuenta la distribución de momentos flectores. En el caso de distribución lineal a lo largo del todo el elemento, se obtiene a partir de:



$$c_M = 0,6 + 0,4 \cdot \left(\frac{M_{Ed,min}}{M_{Ed,max}} \right) \geq 0,4$$

Téngase en cuenta que el paréntesis tiene signo positivo si la flexión inducida por ambos momentos flectores tiene el mismo signo.

En el caso de piezas sometidas sometidos a cargas transversales, perpendiculares a su directriz, o para pilares de recuadros traslacionales, puede utilizarse la expresión anterior recogida en estos comentarios, pero adoptando $c_M=1,0$.

Para los recuadros traslacionales, se adoptará la longitud de pandeo correspondiente

$$L_{cr} = \beta L \quad \text{siendo} \quad \beta \geq 1,0$$

Para piezas de sección constante, sometidas a compresión y a flexión según los dos ejes principales, el dimensionamiento y comprobación frente a inestabilidad puede llevarse a cabo mediante la siguiente expresión:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{c_{My}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} + \frac{c_{Mz}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd}} \leq 1,0$$

donde

$N_{b,Rd}$	mínimo de la resistencia de cálculo a pandeo ($N_{by,Rd}, N_{bz,Rd}$)
$M_{b,Rd}$	resistencia de cálculo de la sección a flexión frente a pandeo lateral
$M_{cz,Rd}$	resistencia de cálculo de la sección a flexión respecto del eje z-z
N_{cr}	esfuerzo axil crítico elástico para el pandeo por flexión

c_{My} , c_{Mz} coeficientes que tienen en cuenta la distribución de momentos flectores según los dos ejes principales de flexión.

Para llevar a cabo la verificación de elementos comprimidos y flectados con sección transversal constante de clase 4, deberá considerarse el desplazamiento del eje principal de la sección reducida para determinar los valores de cálculo de las solicitaciones.

9.5.2.4 Piezas sometidas a esfuerzo cortante, momento flector y esfuerzo axil

Cuando el valor de cálculo del esfuerzo cortante en el alma $V_{w,Ed}$ no supere el 50% de la resistencia de cálculo frente a abolladura del alma por cortante $V_{b,Rd}$ no será necesario reducir la resistencia de la sección a flexión y a esfuerzo axil para tener en cuenta el efecto del esfuerzo cortante.

Sin embargo, si $V_{w,Ed} > 50\% V_{b,Rd}$ la combinación de los efectos de flexión, axil, y cortante, en el alma de una viga en I o en cajón deberá satisfacer la siguiente expresión:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{A_{ef} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{y,Ed} + e_{Ny} \cdot N_{Ed}}{W_{ef,y} \cdot f_{yd}} \right) + \left[\left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \left(2 \cdot \frac{V_{w,Ed}}{V_{b,Rd}} - 1 \right) \right] \leq 1$$

siendo

$M_{f,Rd}$ resistencia plástica a flexión considerando sólo la sección eficaz de las alas.

$M_{pl,Rd}$ resistencia plástica a flexión de la sección completa (independientemente de la clase de sección) Valor reducido $M_{N,Rd}$ si hubiera un axil simultaneo N_{Ed} .

Para llevar a cabo la verificación, el efecto combinado de flexión y esfuerzo axil (1^{er} sumando) puede calcularse las características de la sección transversal bruta. La evaluación de los efectos de las acciones, N_{Ed} y $M_{y,Ed}$, deberá incluir los efectos de 2^o orden cuando éstos sean relevantes.

La comprobación de la interacción de esfuerzo deberá satisfacerse para todas aquellas secciones localizadas a una distancia inferior a $h_w/2$, contada a partir de la sección transversal de arranque del vano.

La resistencia plástica de cálculo de la sección considerando sólo las alas, $M_{f,Rd}$, debe obtenerse como el producto de f_{yd} por el área reducida del ala, tomando el valor más pequeño correspondiente a una de las alas, y por la distancia entre *c.d.g.* de las alas.

Si se trata de una situación de flexión esviada y esfuerzo axil, el efecto combinado de flexión y esfuerzo axil puede calcularse de acuerdo con la siguiente expresión

$$\frac{N_{Ed}}{A_{ef} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{y,Ed} + e_{Ny} \cdot N_{Ed}}{W_{ef,y} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{z,Ed} + e_{Nz} \cdot N_{Ed}}{W_{ef,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$