

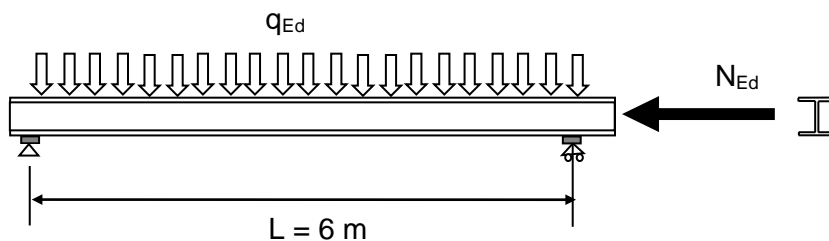
EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MANUAL DE DISEÑO

Preparado en el marco del proyecto Europeo PUREST por Itsaso Arrayago, Esther Real y Enrique Mirambell, del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Nota: Los diferentes cálculos se han realizado utilizando una hoja Excel, por lo que los resultados podrían estar sujetos a ciertos errores de redondeo.

PLANTEAMIENTO DEL EJEMPLO

Sea la viga biapoyada de la figura sometida a las cargas ya mayoradas $N_{Ed} = 400$ kN y $q_{Ed} = 5,0$ kN/ml. El perfil considerado es un HEB 200 fabricado en un grado 1.4301 de acero inoxidable austenítico.



SE PIDE:

- 1) Clasificar la sección.
- 2) Comprobar el estado límite último de resistencia.
- 3) Comprobar el estado límite último de resistencia utilizando el Continuous Strength Method (CSM).
- 4) Comprobar el estado límite último de inestabilidad.

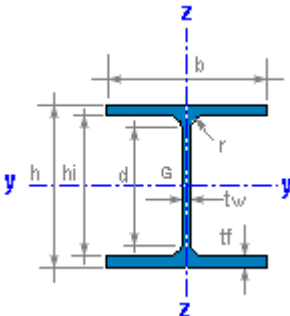
NOTAS:

- Se prescinde del peso propio.

SOLUCIÓN

Propiedades mecánicas del perfil considerado

Las propiedades mecánicas del perfil que se emplearán en la resolución del ejemplo se resumen a continuación:

HEB 200		
	$h = 200 \text{ mm}$ $b = 200 \text{ mm}$ $t_w = 9,0 \text{ mm}$ $t_f = 15,0 \text{ mm}$	$r = 18 \text{ mm}$ $d = 134,0 \text{ mm}$ $h_i = 170,0 \text{ mm}$ $A = 78,1 \text{ cm}^2$ $A_{vz} = 24,84 \text{ cm}^2$
	$I_y = 5696,5 \text{ cm}^4$ $W_{ely} = 569,7 \text{ cm}^3$ $W_{ply} = 642,6 \text{ cm}^3$ $i_y = 8,54 \text{ cm}$ $I_t = 59,7 \text{ cm}^4$	$I_z = 2003,4 \text{ cm}^4$ $W_{elz} = 200,3 \text{ cm}^3$ $W_{plz} = 305,8 \text{ cm}^3$ $i_z = 5,07 \text{ cm}$ $I_w = 171413,31 \text{ cm}^6$

Características del material

Las propiedades del material a considerar en este ejemplo se han obtenido de la Tabla 2.2 del Manual de Diseño (considerando que los espesores del alma y de las alas del perfil considerado están entre 8 mm y 75 mm) y de la sección 2.3.1 del mismo Manual. Así, las características que deberemos considerar son:

$$f_y = 210 \text{ MPa}$$

$$f_u = 520 \text{ MPa}$$

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

Factores parciales de seguridad

Los factores parciales de seguridad que deberán considerarse se recogen en la Tabla 4.1 del Manual de Diseño como sigue:

Para la resistencia de:	Símbolo	Valor (EN 1993-1-4)
Secciones transversales (cualquier clase de sección)	γ_{M0}	1,10
Elementos frente a inestabilidad verificados como elementos	γ_{M1}	1,10

Esfuerzos de cálculo

Teniendo en cuenta que el elemento a estudiar es una viga biapoyada sometida a las cargas mostradas en el esquema, los esfuerzos de cálculo obtenidos elásticamente son los siguientes:

$$M_{Ed} = 22,5kNm$$

$$V_{Ed} = 15kN$$

$$N_{Ed} = 400kN$$

1) Clasificación de la sección:

Tenemos un perfil HEB 200 flexocomprimido. El parámetro ε a considerar para el grado 1.4301 es, según la Tabla 5.2:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = \left[\frac{235 \cdot 200000}{210 \cdot 210000} \right]^{0,5} = 1,03$$

Suponiendo tanto el alma como las alas comprimidas, y con los límites recogidos en la Tabla 5.2, se obtiene lo siguiente:

Alas comprimidas:

$$c/t_f = \frac{b_f/2 - t_w/2 - r}{t_f} = \frac{200/2 - 9/2 - 18}{15} = 5,17 < 9\varepsilon = 9,29 \text{ luego las alas son Clase 1.}$$

Alma comprimida:

$$c/t_w = \frac{d}{t_w} = \frac{134}{9} = 14,88 < 33\varepsilon = 34,07 \text{ luego el alma es Clase 1 a compresión.}$$

La sección considerada es Clase 1 frente a compresión, por lo que será Clase 1 cuando esté flexocomprimida como en este ejemplo.

2) Comprobar el estado límite último de resistencia:

Para verificar el estado límite último de resistencia deberemos verificar el estado límite último frente a flexión, cortante y axil, así como la interacción entre los distintos esfuerzos.

ELU flexión

Como la sección considerada es Clase 1, podemos considerar el momento plástico como resistencia a flexión de la sección, de la ecuación (5.29):

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{642,6 \cdot 210}{1,10 \cdot 10^3} = 122,7kNm > M_{Ed} = 22,5kNm$$

Se verifica el estado límite último de flexión.

ELU cortante

Como la sección considerada es Clase 1, podemos considerar la resistencia plástica a cortante de la sección, ecuación 5.32:

$$V_{pl,Rd} = \left(\frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \right)$$

El área a cortante a considerar para perfiles en I es, de la Tabla 5.5:

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f = 7810 - 2 \cdot 200 \cdot 15 + (9 + 2 \cdot 18) \cdot 15 = 2485 \text{mm}^2$$

pero no menor que $\eta h_w t_w = 1,20 \cdot 170 \cdot 9 = 1836 \text{mm}^2$ por lo que $A_v = 2485 \text{mm}^2$

$$V_{pl,Rd} = \left(\frac{2485 \cdot (210 / \sqrt{3})}{1,10 \cdot 10^3} \right) = 273,9 \text{kN} > V_{Ed} = 15 \text{kN}$$

Se verifica el estado límite último de cortante.

ELU axil

Como la sección es completamente efectiva, no deberemos reducir el área por efecto de abolladura local, y la resistencia a compresión de la sección transversal es (ecuación 5.27):

$$N_{c,Rd} = A_g \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 7810 \cdot \frac{210}{1,10 \cdot 10^3} = 1491 \text{kN} > N_{Ed} = 400 \text{kN}$$

Se verifica el estado límite último frente a axil.

Interacción ELU flexión-axil

Deberá tenerse en cuenta la interacción siempre que, de acuerdo con las ecuaciones 5.34 y 5.35:

$$N_{Ed} > 0,25 N_{pl,Rd} \quad \text{y}$$

$$N_{Ed} > 0,5 h_w t_w f_y / \gamma_{M0}$$

Para este caso en particular, se tiene que

$$N_{Ed} = 400 \text{kN} > 0,25 \cdot 1491 = 372,75 \text{kN} \quad \text{y}$$

$N_{Ed} = 400 \text{kN} > 0,5 \cdot 170 \cdot 9 \cdot \frac{210}{1,10 \cdot 10^3} = 146,05 \text{kN}$ por lo que deberá tenerse en cuenta dicha interacción.

Para ello, deberá reducirse la capacidad a flexión de la sección causada por la presencia del esfuerzo axil a partir de la expresión:

$$M_{Ed} \leq M_{N,y,Rd} = M_{c,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5a}$$

donde

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{400}{1491} = 0,27$$

$$a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A} = 0,23$$

$$M_{N,y,Rd} = 122,7 \frac{1-0,27}{1-0,5 \cdot 0,23} = 101,2 \text{ kNm} > M_{Ed} = 22,5 \text{ kNm}$$

Por lo que se verifica la interacción flexión-axil.

Interacción ELU flexión-axil-cortante

Deberá tenerse en cuenta la interacción siempre que $V_{Ed} \leq 0,5V_{pl,Rd}$, según lo recogido en el apartado 5.7.6.

Puesto que $V_{Ed} = 15 \text{ kN} \leq 0,5V_{pl,Rd} = 136,95 \text{ kN}$, no hace falta tener en cuenta la interacción con el esfuerzo cortante.

3) Comprobar el estado límite último de resistencia utilizando el Continuous Strength Method (CSM)

El procedimiento a seguir es exactamente el mismo que el que se ha explicado en el apartado anterior de este ejercicio, pero utilizando las expresiones recogidas en el Anejo D del Manual de Diseño para el cálculo de las resistencias. Debe tenerse en cuenta que, de momento, el CSM sólo propone expresiones alternativas para el cálculo de la resistencia seccional frente a compresión y flexión, pero no para cortante.

El Continuous Strength Method se basa en una curva (ecuación D.2) que proporciona la deformación máxima ε_{csm} que cierta sección transversal puede sufrir antes de que sobrevengan fenómenos de abolladura local en función de la esbeltez local $\bar{\lambda}_p$ de dicha sección. La expresión puede verse a continuación:

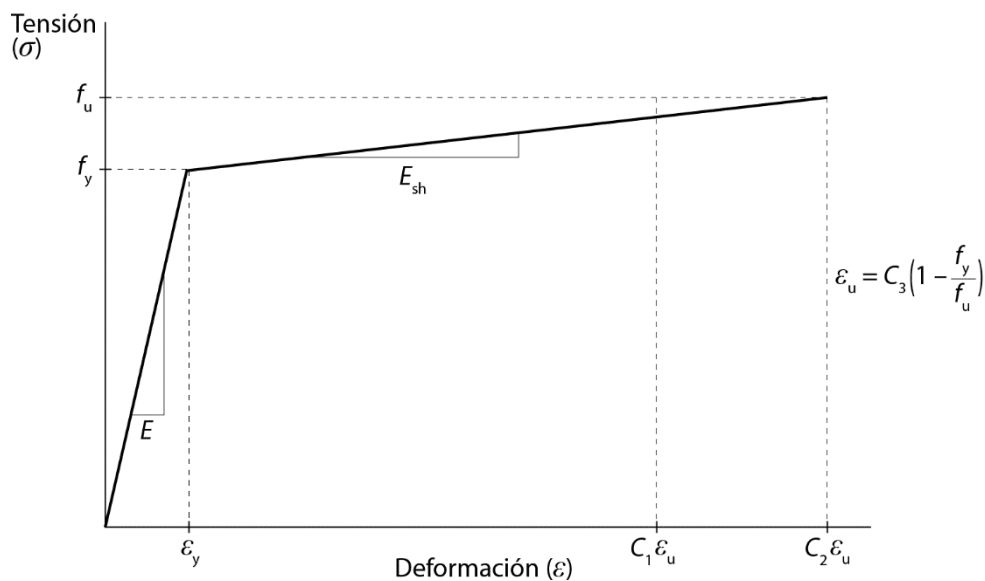
$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{para } \bar{\lambda}_p \leq 0,68 \\ \left(1 - \frac{0,222}{\bar{\lambda}_p^{1,050}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{1,050}} & \text{para } \bar{\lambda}_p > 0,68 \end{cases}$$

El coeficiente C_1 para aceros inoxidables austeníticos es igual a $C_1=0,10$ (Tabla D.1) y la esbeltez local $\bar{\lambda}_p$ puede determinarse a partir de $\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/f_{cr,p}}$ (sección D.3.2) para

secciones formadas por chapas. El valor de la tensión crítica ideal de abolladura $f_{cr,p}$ de la sección transversal sometida a un estado de carga específico puede determinarse numéricamente, o calcularse de manera conservadora como la tensión crítica ideal de abolladura (ecuación D.4) del panel más esbelto que conforme la sección transversal:

$$f_{cr,p} = \frac{k_{\sigma} \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2}$$

Como se recoge en el Anejo D, el CSM adopta un modelo material bilineal de endurecimiento lineal. La definición de dicho modelo depende del tipo de acero inoxidable considerado y de las propiedades del material.



El coeficiente ϵ_u puede determinarse a partir de $\epsilon_u = C_3 \left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right)$, con $C_3=1,00$ para acero inoxidable austenítico. Así, $\epsilon_u = 1,0 \cdot \left(1 - \frac{210}{520}\right) = 0,596 \text{ mm/mm}$. La pendiente de la rama de endurecimiento lineal puede obtenerse de la ecuación D.1 (considerando un valor de $C_2=0,16$ y que $\epsilon_y = f_y/E$) como:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \epsilon_u - \epsilon_y} = \frac{520 - 210}{0,16 \cdot 0,596 - 210/200.000} = 3286,2 \text{ MPa}$$

ELU flexión

Para el caso en el que la sección está flectada, la tensión crítica ideal de abolladura $f_{cr,p}$ del panel más esbelto que conforme la sección transversal se determinará como la tensión mínima entre:

Alas comprimidas:

$$f_{cr,p} = \frac{k_{\sigma} \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} = 2911,8 \text{ MPa} \text{ puesto que } k_{\sigma} = 0,43 \text{ (Tabla 5.4)}$$

Alma flectada:

$$f_{cr,p} = \frac{k_{\sigma} \pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2) b^2} = 19488,6 \text{MPa} \text{ puesto que } k_{\sigma} = 23,9 \text{ (Tabla 5.3)}$$

Por lo tanto,

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y / f_{cr,p}} = \sqrt{210 / 2911,8} = 0,27$$

De acuerdo con la curva base,

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} = \frac{0,25}{0,27^{3,6}} = 28,4 > \min\left(15, \frac{0,1\varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) = \min(15; 56,7) = 15 \text{ por lo que deberá}$$

adoptarse $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = 15$ por criterios de ductilidad establecidos en EN1993-1-1:2005.

Adoptando la expresión D.9 recogida en el Manual de Diseño para flexión, se obtiene que:

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \left[1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^{\alpha} \right]$$

Con $\alpha = 2$ para secciones en doble T según la Tabla D.2.

$$M_{c,Rd} = \frac{642,6 \cdot 210}{1,10 \cdot 10^3} \left[1 + \frac{3286,2}{200000} \frac{569,7}{642,6} (15 - 1) - \left(1 - \frac{569,7}{642,6} \right) / (15)^2 \right] = 147,6 \text{kNm}$$

$$M_{c,Rd} = 147,6 \text{kNm} > M_{Ed} = 22,5 \text{kNm}$$

Se verifica el estado límite último de flexión. Debe notarse que el incremento en la predicción de la capacidad a flexión de la sección al tener en cuenta el endurecimiento por deformación es del 20%.

ELU cortante

Como se ha mencionado anteriormente, en la actualidad el CSM no cuenta con ninguna propuesta para la resistencia a cortante, por lo que

$$V_{pl,Rd} = \left(\frac{2485 \cdot (210/\sqrt{3})}{1,10 \cdot 10^3} \right) = 273,9 \text{kN} > V_{Ed} = 15 \text{kN}$$

Se verifica el estado límite último de cortante.

ELU axil

Para el caso en el que la sección está comprimida, la tensión crítica ideal de abolladura $f_{cr,p}$ del panel más esbelto que conforme la sección transversal se determinará como la tensión mínima entre:

Alas comprimidas:

$$f_{cr,p} = \frac{k_{\sigma}\pi^2Et^2}{12(1-\nu^2)\bar{b}^2} = 2911,8MPa \text{ puesto que } k_{\sigma} = 0,43 \text{ (Tabla 5.4)}$$

Alma comprimida:

$$f_{cr,p} = \frac{k_{\sigma}\pi^2Et^2}{12(1-\nu^2)\bar{b}^2} = 3261,7MPa \text{ puesto que } k_{\sigma} = 4 \text{ (Tabla 5.3)}$$

Por lo tanto,

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/f_{cr,p}} = \sqrt{210/2911,8} = 0,27$$

De acuerdo con la curva base, $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = 28,4$ por lo que deberá también adoptarse que $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = 15$. A partir de las ecuaciones D.6 y D.7,

$$f_{csm} = f_y + E_{sh}\varepsilon_y(\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y - 1) = 258,3MPa$$

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{Af_{csm}}{\gamma_{M0}} = 1834kN > N_{Ed} = 400kN$$

Se verifica el estado límite último a compresión. El incremento en la predicción de la capacidad resistente al tener en cuenta el endurecimiento por deformación es del 23%.

Interacción ELU flexión-axil

Deberá tenerse en cuenta la interacción siempre que:

$$N_{Ed} > 0,25N_{csm,Rd} \quad \text{y}$$

$$N_{Ed} > 0,5h_w t_w f_y / \gamma_{M0}$$

Para este caso en particular, se tiene que

$$N_{Ed} = 400kN < 0,25 \cdot 1834 = 458,5kN \quad \text{y}$$

$N_{Ed} = 400kN > 0,5 \cdot 170 \cdot 9 \cdot \frac{210}{1,10 \cdot 10^3} = 146,05kN$ por lo que deberá tenerse en cuenta dicha interacción.

Para ello, deberá reducirse la capacidad a flexión de la sección causada por la presencia del esfuerzo axil a partir de la misma expresión que se ha utilizado anteriormente, pero sustituyendo las resistencias básicas por las determinadas a partir del CSM:

$$M_{N,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd} \frac{(1-n_{csm})}{(1-0,5a)} \leq M_{csm,y,Rd} \text{ donde}$$

$$n_{csm} = \frac{N_{Ed}}{N_{csm,Rd}} = \frac{400}{1834} = 0,22$$

$$a = \frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A} = 0,23$$

$$M_{N,csm,y,Rd} = 147,6 \frac{1 - 0,22}{1 - 0,5 \cdot 0,23} = 130,6kNm > M_{Ed} = 22,5kNm$$

Por lo que se verifica la interacción flexión-axil.

Interacción ELU flexión-axil-cortante

Deberá tenerse en cuenta la interacción siempre que $V_{Ed} \leq 0,5V_{pl,Rd}$.

Puesto que $V_{Ed} = 15kN \leq 0,5V_{pl,Rd} = 136,95kN$, no hace falta tener en cuenta la interacción con el esfuerzo cortante.

4) Comprobar el estado límite último de inestabilidad

En este caso tenemos una viga biapoyada flexocomprimida. La verificación de elementos flexocomprimidos se realiza mediante lo establecido en la sección 6.5.2 del Manual de Diseño. La expresión a considerar para una sección en doble T es:

Para evitar el pandeo alrededor del eje fuerte (ecuación 6.56):

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

Para evitar el pandeo alrededor del eje débil (para elementos sometidos a pandeo lateral) (ecuación 6.57):

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

donde

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{y} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (\text{ecuación 6.61})$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Para aplicar estas expresiones, necesitamos primero determinar la resistencia del elemento sometido a compresión y la resistencia frente a pandeo lateral.

Resistencia frente a pandeo por flexión

Para la determinación de la resistencia frente a pandeo por flexión deberá aplicarse lo establecido en el capítulo 6.3.3 del Manual de Diseño y la ecuación 6.2:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$$

Donde el factor de reducción se calcula de las ecuaciones 6.4, 6.5 y 6.6:

$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$ y $\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$, con la esbeltez adimensional del elemento calculada a partir de la expresión $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$. Deberán calcularse las resistencias relativas al eje fuerte y eje débil de la pieza, para determinar la situación más desfavorable. Según lo establecido en la Tabla 6.1 del Manual de Diseño, las curvas de pandeo para secciones en doble T de acero inoxidable son:

Tipo de elemento	Eje	α	$\bar{\lambda}_0$
Secciones abiertas soldadas y laminadas en caliente	Fuerte	0,49	0,2
	Débil	0,76	0,2

Los axiles críticos de pandeo por flexión alrededor de ambos ejes son:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 200000 \cdot 5696,5 \cdot 10^4}{6000^2 \cdot 10^3} = 3123,5 kN$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 200000 \cdot 2003,4 \cdot 10^4}{6000^2 \cdot 10^3} = 1098,5 kN$$

Por lo que las esbelteces adimensionales serán:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{1640,1}{3123,5}} = 0,72$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{1640,1}{1098,5}} = 1,22$$

Puesto que la curva de pandeo más desfavorable es la que se proporciona para el eje débil z-z y la esbeltez mayor se obtiene para este mismo eje, el eje débil resulta más desfavorable.

Así, se obtiene que $\phi = 1,63$ y $\chi = 0,37$ por lo que

$$N_{b,z,Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} = 0,37 \cdot \frac{7810 \cdot 210}{1,10 \cdot 10^3} = 548,0 kN > N_{Ed} = 400 kN$$

Por lo que se verifica el estado límite de pandeo por flexión.

El valor de $N_{b,y,Rd}$ necesario más adelante, es de $N_{b,y,Rd} = 1057,7 kN$.

Resistencia frente a pandeo lateral

Para calcular el momento crítico elástico de pandeo lateral se utilizará lo recogido en el Anejo E del Manual de Diseño.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\}$$

Al no haber arriostramientos intermedios, el factor k es igual a la unidad, así como el factor k_w , puesto que el alabeo de la pieza no está impedido.

En esta expresión z_g es la distancia entre el centro de esfuerzos cortantes y el punto de aplicación de la carga, en este caso igual a $h/2 = 100$ mm. Según la Tabla E.2 el valor de los coeficientes C_1 y C_2 son $C_1=1,13$ y $C_2=0,454$.

$$M_{cr} = 1,13 \frac{\pi^2 200.000 \cdot 2003,4 \cdot 10^4}{(6000)^2} \left\{ \sqrt{\frac{171413,3 \cdot 10^6}{2003,4 \cdot 10^4} + \frac{(6000)^2 \cdot 81000 \cdot 59,7 \cdot 10^4}{\pi^2 200.000 \cdot 2003,4 \cdot 10^4} + (0,454 \cdot 100)^2} - 0,454 \cdot 100 \right\}$$

$$M_{cr} = 227,8 kNm$$

El momento resistente frente a pandeo lateral se determinará a partir de las expresiones 6.13 a 6.16, adoptando una curva de pandeo lateral definida por los coeficientes $\alpha = 0,76$ y $\bar{\lambda}_0 = 0,4$.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{134,9}{227,8}} = 0,77$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 0,5 (1 + 0,76 (0,77 - 0,4) + 0,77^2) = 0,94$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} = 0,68$$

$$M_{b,Rd} = 0,68 \cdot \frac{642,6 \cdot 10^3 \cdot 210}{1,10 \cdot 10^6} = 83,4 kNm > M_{Ed} = 22,5 kNm$$

Por lo que se verifica el estado límite de pandeo lateral.

Verificación del elemento flexocomprimido

Una vez se han obtenido todos los factores recogidos en las ecuaciones de verificación presentadas al inicio de este apartado, podemos calcular los factores de interacción y proceder a la verificación de la pieza.

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,0 + 2(0,72 - 0,5) \frac{400}{1057,7} = 1,17, \text{ que no cumple la}$$

$$\text{condición } 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{400}{1057,7} = 1,96 \text{ por lo que } k_y = 1,2$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Finalmente, se obtiene que

$$\frac{400}{548,0} + 1,2 \left(\frac{22,5}{122,7} \right) = 0,730 + 0,220 = 0,95 < 1 \text{ y que}$$

$$\frac{400}{548,0} + 1,0 \left(\frac{22,5}{83,4} \right) = 0,730 + 0,270 = 1,00 \leq 1 \text{ por lo que la pieza verifica todas las comprobaciones de ELU.}$$