

PROBLEMA N°1

Clasificar en base al Eurocódigo 3 Parte 1-1, las secciones transversales propuestas:

- 1º) Perfil IPE300 sometido a flexión simple, a flexión compuesta o a compresión simple y para los tres tipos de acero: S235, S275 y S355.
- 2º) Sección armada equivalente a un perfil IPE300.
- 3º) Sección en cajón sometida a flexión simple y a compresión simple en S275.
- 4º) Tubo rectangular RHS 200x160x3 en S275 sometido a compresión simple.
- 5º) Tubo circular CHS de 3mm de pared en aceros S235, S275 y S355.
- 6º) Perfil armado con sección en C, en acero S275 y sometido a flexión simple.

SOLUCIÓN:

1º) Perfil IPE300 sometido a flexión simple, a flexión compuesta o a compresión simple y para los tres tipos de acero: S235, S275 y S355.

1-a) Clasificación del alma

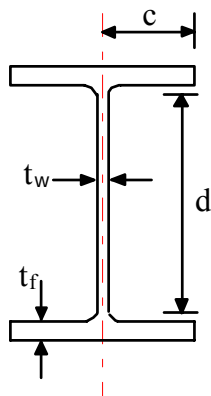


Fig.1 Sección del IPE

En el caso de un perfil IPE 300 las dimensiones son:

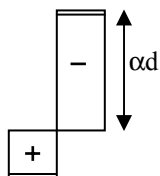
$$t_f = 10,7 \text{ mm}; \quad t_w = 7,1 \text{ mm}; \quad \text{Según el tipo de acero } \varepsilon = \begin{cases} 1,00 & \text{S235} \\ 0,92 & \text{S275} \\ 0,81 & \text{S355} \end{cases}$$

$$c = 75 \text{ mm}; \quad d = 249 \text{ mm}$$

El alma sometida a flexión simple será de clase 1 si cumple:

$$CLASE 1 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon; \quad \frac{249}{7,1} = 35 < 72 \cdot \varepsilon \begin{cases} 72 & \text{S235} \\ 66 & \text{S275} \\ 58 & \text{S355} \end{cases} \Rightarrow CLASE 1$$

El alma sometida a flexión compuesta con un valor $\alpha=2/3$ será de clase 1 si se verifica:



$$CLASE 1 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{(13 \cdot \alpha - 1)}; \quad \frac{249}{7,1} = 35 < 51,6 \cdot \varepsilon \begin{cases} 51,6 & \text{S235} \\ 47,5 & \text{S275} \\ 41,8 & \text{S355} \end{cases} \Rightarrow CLASE 1$$

En el caso del **alma sometida a compresión** los valores límites de clasificación son:

$$CLASE 1 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 33 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{249}{7,1} = 35 > 33 \cdot \varepsilon \quad \left\{ \begin{array}{l} 33 \quad S235 \\ 30 \quad S275 \Rightarrow NO \quad CLASE 1 \\ 28 \quad S355 \end{array} \right.$$

$$CLASE 2 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 38 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{249}{7,1} = 35 \quad \left\{ \begin{array}{l} < 38 \quad S235 \Rightarrow CLASE 2 \\ = 35 \quad S275 \Rightarrow CLASE 2 \\ > 31 \quad S355 \Rightarrow NO \quad CLASE 2 \end{array} \right.$$

$$CLASE 3 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 42 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{249}{7,1} = 35 > 34 \Rightarrow NO \quad CLASE 3 \Rightarrow CLASE 4$$

1-b) Clasificación de las alas

Cuando **el ala se encuentre sometida a compresión** será de clase 1 siempre que se cumpla:

$$CLASE 1 \Rightarrow \frac{c}{t_f} \leq 10 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{75}{10,7} = 7 < 10 \cdot \varepsilon \quad \left\{ \begin{array}{l} 10 \quad S235 \\ 9,2 \quad S275 \Rightarrow CLASE 1 \\ 8,1 \quad S355 \end{array} \right.$$

El **ala solicitada a flexión compuesta** representa una situación más favorable que cuando el ala completa esta comprimida. Por tanto tendremos Clase 1 para los tres tipos de acero.

2º) Sección armada equivalente a un IPE300.

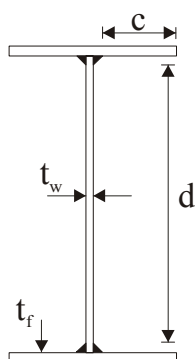


Fig.2 Sección armada

2-a) Clasificación del alma

Las dimensiones de la sección armada equivalente al IPE 300 serían:

$$t_f = 10,7mm ; \quad t_w = 7,1mm ; \quad \text{Variando fundamentalmente la dimensión } c \\ c = 67,5mm ; \quad d = 249mm$$

La relación del esbeltez para **el alma** no ha variado y los límites son los mismos para almas de vigas armadas o laminadas, por lo que en este caso no habría variación con respecto a la clasificación anterior.

2-b) Clasificación de las alas

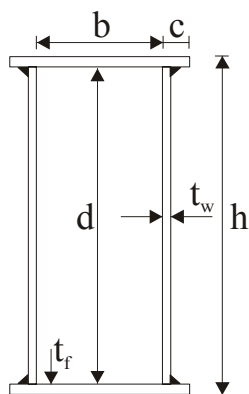
Para la situación de un **ala de viga armada comprimida** tenemos:

$$CLASE\ 1 \Rightarrow \frac{c}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{67,5}{10,7} = 6,3 < 9 \cdot \varepsilon \quad \left\{ \begin{array}{l} 9 \quad S235 \\ 8,3 \quad S275 \\ 7,3 \quad S355 \end{array} \right. \Rightarrow CLASE\ 1$$

De nuevo el **ala sometida a flexión compuesta** supone una situación más favorable desde el punto de vista del posible pandeo local que cuando el ala completa esta comprimida y por ello el ala será de Clase 1 con los tres aceros.

3º) Sección en cajón sometida a flexión simple y a compresión simple en S275.

3-a) Sección en cajón sometida a flexión simple.



Las dimensiones de la sección en cajón propuesta ver figura son:

$$t_f = 12\text{mm} ; \quad t_w = 12\text{mm} ; \quad h = 824\text{mm}$$

$$b = 350\text{mm} ; \quad d = 800\text{mm} ; \quad c = 25\text{mm}$$

El **alma a flexión simple** será de clase 1 o clase 2 si se verifican:

$$CLASE\ 1 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{800}{12} = 66,6 > 72 \cdot 0,92 = 66,24 \Rightarrow \text{NO CLASE 1}$$

$$CLASE\ 2 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 83 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{800}{12} = 66,6 < 82 \cdot 0,92 = 76,36 \Rightarrow CLASE\ 2$$

Fig.3 Sección en cajón

El **ala** como elemento **interno** paralelo al eje de flexión se clasifica de clase 1 si se cumple:

$$CLASE\ 1 \Rightarrow \frac{b}{t_f} \leq 33 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{350}{12} = 29 < 33 \cdot 0,92 = 30,4 \Rightarrow CLASE\ 1$$

En el caso del ala exterior dadas las dimensiones que conducen a una esbeltez muy pequeña no es preciso su evaluación. Globalmente clasificamos entonces la sección como **CLASE 2**.

3-b) Sección en cajón sometida a compresión simple con $t_w=22mm$.

Dado que ya el alma resulta de clase 2 en el caso anterior y evidentemente la situación no mejorará con la sollicitación de compresión simple vamos a aumentar el alma hasta $t_w=22mm$.

Para un **alma** de una sección en cajón sometida a **compresión simple** tenemos:

$$CLASE\ 1 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 33 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{800}{22} = 36,3 > 33 \cdot 0,92 = 30,4 \Rightarrow NO\ CLASE\ 1$$

$$CLASE\ 2 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 38 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{800}{22} = 36,3 > 38 \cdot 0,92 = 34,96 \Rightarrow NO\ CLASE\ 2$$

$$CLASE\ 3 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 42 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{800}{22} = 36,3 < 42 \cdot 0,92 = 39 \Rightarrow CLASE\ 3$$

Por su parte el **ala interior entre dos almas** será de clase 1 siempre y cuando se verifique:

$$CLASE\ 1 \Rightarrow \frac{b}{t_f} \leq 42 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{350}{12} = 29 < 42 \cdot 0,92 = 39 \Rightarrow CLASE\ 1$$

No obstante si queremos clasificar la sección en su conjunto diremos que es de **CLASE 3**.

4º) Tubo rectangular RHS 200x160x3 en S275 sometido a compresión simple.

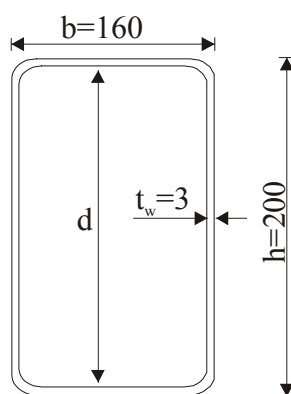


Fig.4 Perfil RHS

Comenzaremos clasificando las almas de la sección teniendo en cuenta que la dimensión d vale: $d=h-3 \cdot t=191mm$. Es evidente que supera los límites para clases 1 y 2 por lo que probamos con la 3:

$$CLASE\ 3 \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 42 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{191}{3} = 63,6 > 42 \cdot 0,92 = 38,9 \Rightarrow CLASE\ 4$$

Para que las alas interiores sean de Clase 1, 2 ó 3 se debe cumplir:

$$\frac{(b-3 \cdot t_f)}{t_f} \leq 42 \cdot \varepsilon ; \quad \frac{(160-3 \cdot 3)}{3} = 50 > 42 \cdot 0,92 = 38,9 \Rightarrow CLASE\ 4$$

El hecho de encontrarnos con una sección de Clase 4 nos obliga a obtener la correspondiente sección eficaz. Para ello debemos calcular el ancho eficaz b_{eff} en almas y alas que depende del coeficiente de reducción ρ y que a su vez está relacionado con la esbeltez normalizada $\bar{\lambda}_p$ del elemento que corresponda en cada caso.

$$\rho = \left(\frac{(\bar{\lambda}_p) - 0,22}{(\bar{\lambda}_p)^2} \right); \quad \bar{\lambda}_p = \left(\frac{f_y}{\sigma_{cr}} \right)^{0,5} = \left(\frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{K_\sigma}} \right)$$

b y t representan la anchura y espesor de la placa mientras que el coeficiente de abolladura K_σ considera la vinculación de los bordes, la distribución de tensiones y la relación de aspecto.

En el caso de elementos internos sometidos a compresión simple resulta:

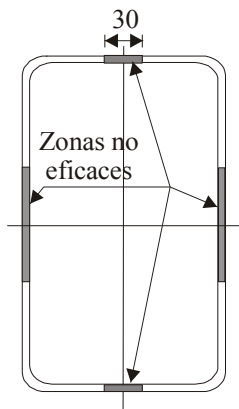
$$\sigma_2 = \sigma_1; \quad \Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \Rightarrow K_\sigma = 4$$

De modo que la anchura efectiva para las almas con $b=191mm$ y $t=3mm$ será:

$$\bar{\lambda}_p = \left[\frac{191/3}{28,4 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{4}} \right] = 1,21 \rightarrow \rho = \left[\frac{1,21 - 0,22}{(1,21)^2} \right] = 0,676 \Rightarrow b_{eff} = 0,676 \cdot 191 = 129$$

$$b_{e1} = 0,5 \cdot b_{eff} = 64,5mm; \quad b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 64,5mm$$

En el caso de las alas como elementos internos con $b=151mm$ y $t=3mm$ la anchura sería:



$$\bar{\lambda}_p = \left[\frac{151/3}{28,4 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{4}} \right] = 0,96 \rightarrow \rho = \left[\frac{0,96 - 0,22}{(0,96)^2} \right] = 0,8$$

$$\Rightarrow b_{eff} = 0,8 \cdot 151 = 120,8 \quad \begin{cases} b_{e1} = 0,5 \cdot b_{eff} = 60,4mm \\ b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 60,4mm \end{cases}$$

En la figura 5 se representa la sección eficaz resultante en la que no habría variación en la posición del c.d.g. ni de los ejes.

Fig.5 Sección eficaz

5º) Tubo circular CHS de 3mm de pared en aceros S235, S275 y S355.

En este caso se pretende determinar cuáles serán los diámetros que nos sitúan en las diferentes clases de sección transversal para los diversos tipos de acero, manteniendo el espesor $t=3mm$.

Para que una sección tubular circular se clasifique de Clase 1, 2 o 3 su diámetro d verificará:

$$CLASE\ 1 \Rightarrow \frac{d}{t} \leq 50 \cdot \epsilon^2 \rightarrow d \leq 50 \cdot t \cdot \epsilon^2 = \begin{cases} 150mm & S235 \\ 127,5mm & S275 \\ 99mm & S355 \end{cases}$$

$$CLASE\ 2 \Rightarrow \frac{d}{t} \leq 70 \cdot \epsilon^2 \rightarrow d \leq 70 \cdot t \cdot \epsilon^2 = \begin{cases} 210mm & S235 \\ 178mm & S275 \\ 138mm & S355 \end{cases}$$

$$CLASE\ 3 \Rightarrow \frac{d}{t} \leq 90 \cdot \epsilon^2 \rightarrow d \leq 90 \cdot t \cdot \epsilon^2 = \begin{cases} 270mm & S235 \\ 229mm & S275 \\ 178mm & S355 \end{cases}$$

Los resultados anteriores nos indican que por ejemplo un **CHS139,7x3** presenta una sección que clasificamos como de Clase 1 si es de acero S235, sería sin embargo de Clase 2 si fuera de acero S275 y deberíamos clasificarlo como de Clase 3 si estuviera fabricado con acero S355.

$$\text{De modo similar la clasificación para un tubo } CHS200x3 \left\{ \begin{array}{ll} \text{Clase 2} & S235 \\ \text{Clase 3} & S275 \\ \text{Clase 4} & S355 \end{array} \right.$$

Visto lo anterior surge la duda de cómo calcular la sección eficaz si el tubo es de clase 4, dado que en las tablas del EC3 no viene considerada esta posibilidad. La respuesta a la pregunta anterior es que no se fabrican tubos para uso estructural normalizados que sean de Clase 4 y esto es debido que ya esta estudiada la relación entre los diámetros y espesores para que esa situación no se presente.

Además a medida que la calidad del acero es mayor, el espesor mínimo de fabricación aumenta. De hecho los tubos elaborados con acero S355 parten de espesores de 8mm.

6º) Perfil armado en acero S275 con sección en C sometido a flexión simple.

6-a) Clasificación de la sección transversal

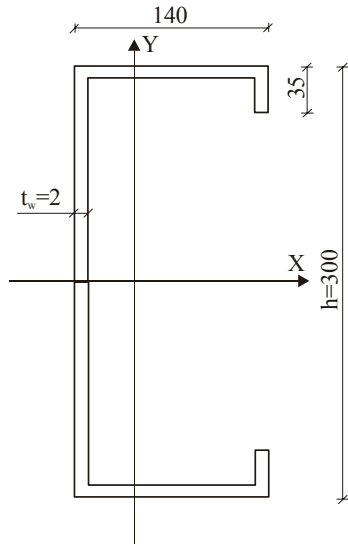


Fig. 6 Sección armada en C

Vamos a estudiar a que clase pertenecen cada uno de los tres elementos de la sección: alma y alas internas y externas.

Como comprobaremos a continuación, en los tres elementos nos encontramos con que las relaciones de esbeltez superan los límites para las clases 1, 2 o 3 por lo que todos son de Clase 4.

Alma (d, t_w)

$$d = 300 - 2 \cdot 2 = 296 \rightarrow \frac{d}{t_w} = 148 > \text{Límites} \Rightarrow \text{CLASE 4}$$

Ala interior superior (b, t_f)

$$b = 140 - 2 \cdot 2 = 136 \rightarrow \frac{b}{t_f} = 68 > \text{Límites} \Rightarrow \text{CLASE 4}$$

Ala exterior superior (c, t_f)

$$\text{CLASE 3} \Rightarrow \frac{c}{t_f} \leq 14 \cdot \varepsilon = 12,9; \quad c = 35 - 2 = 33 \rightarrow \frac{c}{t_f} = 16,5 > \text{Límites} \Rightarrow \text{CLASE 4}$$

6-b) Cálculo de la sección eficaz

***Ancho eficaz en el alma**

El ancho eficaz b_{eff} del alma se obtiene a partir de la dimensión de alma comprimida b_c y del

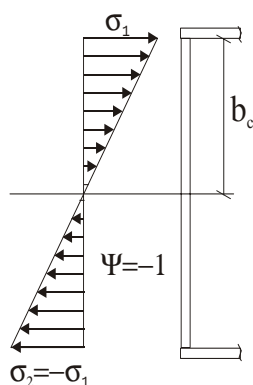


Fig.7 Tensiones en alma

coeficiente de reducción ρ dependiente de la esbeltez normalizada λ_p .

Teniendo en cuenta que nos encontramos con una sección simétrica respecto del eje de flexión simple, la relación de tensiones Ψ y el correspondiente coeficiente de abolladura K_σ valen:

$$\sigma_2 = -\sigma_1; \quad \Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1 \Rightarrow K_\sigma = 23,9$$

De modo que la anchura efectiva para el alma con $b_c=148\text{mm}$ será:

$$\bar{\lambda}_p = \left[\frac{296/2}{28,4 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{23,9}} \right] = 1,16 \rightarrow \rho = \left[\frac{1,16 - 0,22}{(1,16)^2} \right] = 0,7 \Rightarrow b_{eff} = 0,7 \cdot b_c = 104$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 42mm ; \quad b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 62mm$$

*Ancho eficaz en el ala interior superior

Se trata de un ala interior de anchura $\bar{b} = 136mm$ sometido a compresión constante por lo que la relación de tensiones Ψ y el correspondiente coeficiente de abolladura K_σ son en este caso:

$$\sigma_2 = \sigma_1; \quad \Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \Rightarrow K_\sigma = 4$$

Así, la esbeltez normalizada λ_p y el consiguiente coeficiente de reducción ρ valdrán:

$$\bar{\lambda}_p = \left[\frac{136/2}{28,4 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{4}} \right] = 1,3 \rightarrow \rho = \left[\frac{1,3 - 0,22}{(1,3)^2} \right] = 0,64 \Rightarrow b_{eff} = 0,64 \cdot \bar{b} = 87mm$$

$$b_{e1} = 0,5 \cdot b_{eff} = 43,5mm ; \quad b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 43,5mm$$

*Ancho eficaz en el ala exterior superior

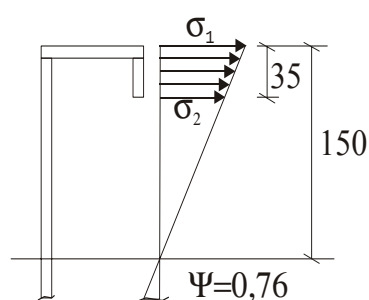


Fig. 8 Tensiones en ala exterior

En esta ocasión estamos ante un ala exterior sometida a una distribución de tensiones de compresión variable tal y como se muestra en la fig 8, de donde deducimos el valor de la tensión σ_2 y la magnitud de la relación Ψ :

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{150 - 35}{150} \rightarrow \sigma_2 = 0,76 \cdot \sigma_1 \Rightarrow \Psi = \frac{0,76 \cdot \sigma_1}{\sigma_1} = 0,76$$

Posteriormente con ayuda de la tabla 5.3.3 de EC3 obtenemos el coeficiente de abolladura K_σ

$$K_\sigma(1 > \Psi > 0) = \frac{0,578}{\Psi + 0,34} = 0,52$$

de modo que la esbeltez normalizada λ_p y el coeficiente de reducción ρ serán ahora:

$$\bar{\lambda}_p = \left[\frac{33/2}{28,4 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{0,52}} \right] = 0,875 \rightarrow \rho = \left[\frac{0,875 - 0,22}{(0,875)^2} \right] = 0,855$$

Dado que la dimensión del ala es $c=33\text{mm}$ tendremos una anchura eficaz

$$b_{\text{eff}} = \rho \cdot c = 0,855 \cdot 33 = 28\text{mm}$$

6-c) Características de la sección eficaz

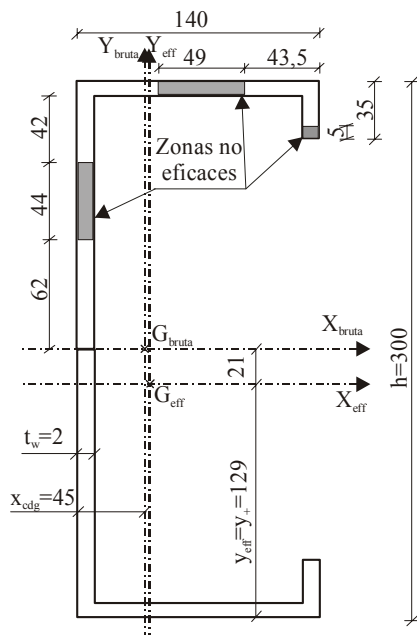


Fig. 9 Sección eficaz resultante

El área y módulo resistente de la sección bruta valían:

$$A_{\text{bruta}} = 2 \cdot (300 + 2 \cdot 35 + 2 \cdot 136) = 1284\text{mm}^2$$

$$I_{x(\text{bruta})} = \left(\frac{2 \cdot 300^3}{12} \right) + 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 35^3}{12} + 2 \cdot 35 \cdot (150 - 17,5)^2 \right) + 2 \cdot \left(\frac{136 \cdot 2^3}{12} + 136 \cdot 2 \cdot 149^2 \right) = 19434692\text{mm}^4 = 1943\text{cm}^4$$

$$W_{x(\text{bruta})} = \frac{I_x}{y_{\text{max}}} = \frac{1943\text{cm}^4}{15\text{cm}} = 129\text{cm}^3$$

La posición del c.d.g. G_{bruta} en la sección bruta era:

$$x_{\text{cdg}(\text{bruta})} = \frac{2 \cdot (300 \cdot 1 + 2 \cdot 35 \cdot 139 + 2 \cdot 136 \cdot 70)}{1284} = 45\text{mm}$$

Las características de la sección eficaz serán una vez descontados las partes no eficaces:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{bruta}} - 2 \cdot (44 + 49 + 5) = 1088\text{mm}^2$$

$$x_{\text{eff}} = \frac{2 \cdot (212 \cdot 1 + 44 \cdot 1 + 136 \cdot 70 + 35 \cdot 139 + 30 \cdot 139 + 43,5 \cdot 23,75 + 43,5 \cdot 116,25)}{1088} = 45,8\text{mm}$$

$$y_{\text{eff}} = \frac{2 \cdot \left(212 \cdot \frac{212}{2} + 44 \cdot (300 - 22) + 136 \cdot 1 + 35 \cdot 17,5 + 30 \cdot 285 + 2 \cdot 43,5 \cdot 299 \right)}{1088} = 128,7 \approx 129$$

CLASIFICACIÓN DE SECCIONES

$$I_{x_{eff}} = \left(\frac{136 \cdot 2^3}{12} + 136 \cdot 2 \cdot 128^2 \right) + \left(\frac{2 \cdot 35^3}{12} + 2 \cdot 35 \cdot (129 - 17,5)^2 \right) + \left(\frac{2 \cdot 212^3}{12} + 2 \cdot 212 \cdot (129 - 106)^2 \right) \\ + \left(\frac{2 \cdot 44^3}{12} + 2 \cdot 44 \cdot (278 - 129)^2 \right) + 2 \cdot \left(\frac{43,5 \cdot 2^3}{12} + 43,5 \cdot 2 \cdot (299 - 129)^2 \right) + \left(\frac{2 \cdot 30^3}{12} + 2 \cdot 30 \cdot (285 - 129)^2 \right) = \\ I_{x_{eff}} = 15607463 \text{ mm}^4 = 1561 \text{ cm}^4$$

$$W_{x_{eff}(+)} = \frac{I_{x_{eff}}}{y_{eff}} = \frac{1561 \text{ cm}^4}{12,9 \text{ cm}} = 121 \text{ cm}^3$$

$$W_{x_{eff}(-)} = \frac{I_{x_{eff}}}{(h - y_{eff})} = \frac{1561 \text{ cm}^4}{(30 - 12,9) \text{ cm}} = 91 \text{ cm}^3 \Rightarrow 29,5\% \downarrow$$

Observamos que la posición del nuevo eje vertical Y_{eff} apenas ha cambiado, sin embargo sí se ha producido un cambio importante en el eje de flexión X_{eff} que conlleva a una reducción próxima al 30% en el módulo resistente de la fibras comprimidas.