



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tensiones normales

Dimensionado de secciones de acero a resistencia

Apellidos, nombre	Agustín Pérez-García (aperezg@mes.upv.es)
Departamento	Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se muestran los fundamentos y los procedimientos prácticos aplicables al dimensionado de vigas y pilares de acero construidos con perfiles laminados.

Mediante el desarrollo detallado de un ejercicio práctico se ilustran los casos de dimensionado de barras sometidas a flexión simple o a flexión compuesta. El análisis se refiere tanto a secciones formadas por un solo perfil como a secciones construidas con varios perfiles.

2 Introducción

El dimensionado a resistencia de barras de acero suele realizarse considerando que el material se comporta elásticamente y que en todos los puntos de la barra se alcanza, a lo sumo, la tensión de fluencia plástica del acero.

El proceso es iterativo y en cada paso se plantean, básicamente, dos fases: el pre-dimensionado y la comprobación. En la primera fase de cada paso se elige, de la manera más eficiente posible, un perfil o combinación de perfiles que permitan soportar las solicitaciones a las que están sometidas las barras. En la segunda se comprueba que las tensiones generadas no alcanzan el límite elástico del material en ningún punto de ninguna de las secciones transversales de las barras.

Las tensiones más relevantes suelen ser las generadas por el alargamiento y/o acortamiento de las fibras de las barras como consecuencia de la actuación del esfuerzo axial y/o de los momentos flectores que curvan las piezas de la estructura.

Las tensiones tangenciales generadas por el esfuerzo cortante tan solo tienen relevancia en el caso de barras muy cortas que se encuentran sometidas a flexión como consecuencia de la acción de grandes cargas. Sin embargo, esta es una situación poco frecuente.

Por otro lado, en los perfiles de acero laminado las dimensiones de la sección se han diseñado de manera que las tensiones principales, en los puntos donde la tensión tangencial alcanza un valor significativo, no superan las tensiones normales máximas debidas al axial y/o a los momentos flectores.

En consecuencia, habitualmente se realiza el dimensionado de las piezas de acero laminado de una estructura considerando, únicamente, las tensiones normales provocadas por las cargas a las que está sometida.

3 Objetivos

Una vez que el lector estudie con detenimiento este documento, será capaz de

- Apreciar la relevancia del peso propio en el dimensionado de estructuras de acero.
- Analizar la distribución de tensiones normales en secciones con al menos un eje de simetría, sometidas a flexión simple o compuesta.
- Detectar los puntos de la sección en los que actúa la tensión máxima y calcular su magnitud.



- Dimensionar barras sometidas a flexión, simple o compuesta, utilizando perfiles de acero laminado y aplicando criterios de resistencia.
- Utilizar las bases de datos donde se suelen consultar las características geométricas y mecánicas de los perfiles de acero laminado.

Para ilustrar debidamente cada uno de estos objetivos se resuelve detalladamente un ejercicio práctico y se proponen actividades de aprendizaje autónomo para las que se proporcionan los resultados y con las que el lector puede autoevaluar su progreso.

4 Resolución del caso práctico

4.1 Datos del ejercicio

Para resolver el problema es necesario conocer

- La geometría de la estructura y las cargas que debe soportar.
- El límite elástico del material y el coeficiente de minoración aplicable en el caso de comprobaciones de resistencia.
- Los coeficientes de mayoración de las acciones en función de la naturaleza de las cargas.

La geometría queda definida en la Fig. 1. Como puede observarse, se trata de un pescante (conjunto formado por un pilar y una viga en voladizo) empotrado en una base maciza de grandes dimensiones. La sección transversal propuesta para el voladizo es un perfil en doble T tipo IPE cuyas dimensiones iniciales no se especifican. En el caso del pilar se propone una sección compuesta por un perfil IPE soldado longitudinalmente a un perfil UPN. Las dimensiones iniciales sugeridas para ambos perfiles se observan en el detalle de la Fig. 1.

Por lo que respecta a las cargas, puede verse que la estructura está sometida tan solo a dos fuerzas. Una de ellas provoca el acortamiento del pilar y la otra genera la curvatura de ambas barras.

El dimensionado se realizará utilizando acero S275 que tiene un límite elástico de 275 N/mm². El coeficiente de minoración del límite elástico en las comprobaciones de resistencia es de 1.05

Cuando, como ocurre en este caso, no se especifica el origen de las cargas, hay que mayorarlas de modo que los resultados del cálculo queden del lado de la seguridad. En este caso se aplicará el coeficiente 1.50 (máximo previsto en el Código Técnico de la Edificación para cargas variables desfavorables y persistentes).

4.2 Solicitaciones en las barras

Las solicitaciones a lo largo de la estructura se obtendrán considerando que la fuerza de 400 kN está aplicada en el centro de gravedad de la sección compuesta del pilar y que la fuerza de 60 kN estará ubicada a un metro del eje del pilar (sea cual sea el tamaño del pilar).



Por otro lado, hay que tener en cuenta que en una estructura de acero, el peso propio de los perfiles es muy pequeño comparado con la magnitud de las cargas que debe soportar la estructura en general y sus barras en particular. Por lo tanto, las solicitaciones se obtendrán despreciando el peso propio de las barras.

Esta afirmación resulta evidente cuando se calcula el peso del voladizo y se compara con la carga de 60 kN que debe soportar. Consultando un Prontuario [1] se aprecia que el peso de un perfil IPE de tamaño medio (p. ej. IPE 240) está alrededor de 0.3 kN/m. Como el voladizo tiene un metro de longitud, el peso propio del IPE comparado con la carga de 60 kN apenas es significativo

$$\frac{0.3}{60} = 0.005 \quad \rightarrow \quad 0.5\% \quad \text{ec. 1}$$

Si la comparación se hace entre el peso del pilar más el voladizo (cerca de 1.3 kN) y la carga total (460 kN) resulta todavía más evidente que el peso propio apenas tiene relevancia en el dimensionado de las barras

$$\frac{1.3}{460} = 0.0028 \quad \rightarrow \quad 0.28\% \quad \text{ec. 2}$$

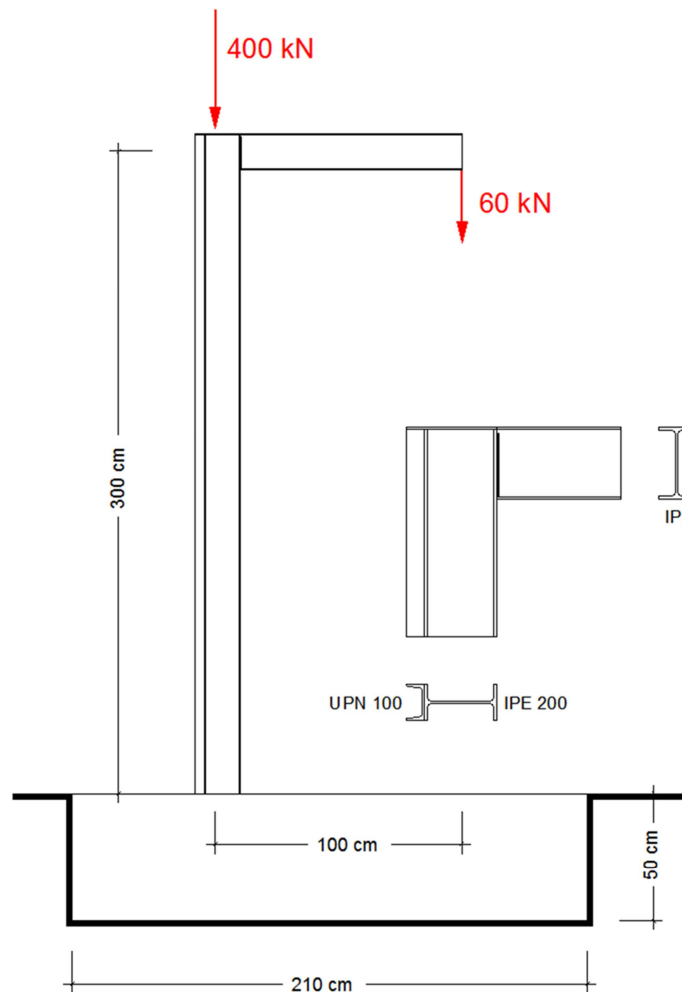


Fig. 1 Dimensiones de la estructura y definición de las cargas



Los axiles y los momentos flectores que generan las cargas son los que se muestran en la Fig. 2.

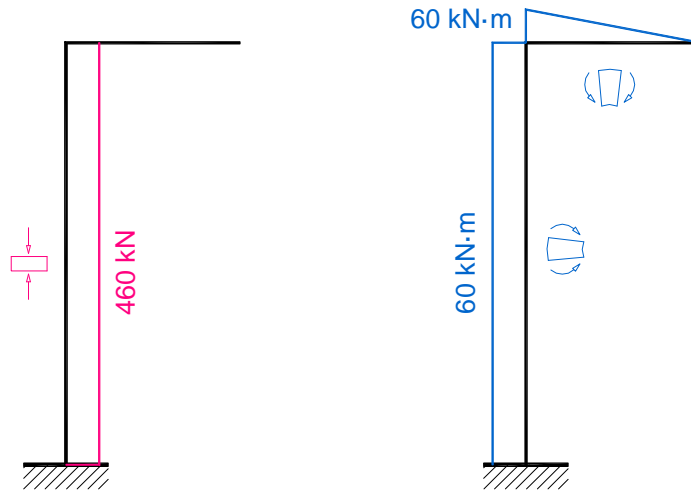


Fig. 2 Axiles y momentos flectores que solicitan a las barras del pescante

Como puede observarse en la Fig. 2, el voladizo no está sometido a axiles y el máximo momento flector que debería soportar es el que actuaría en su encuentro con el eje del pilar. La magnitud de dicho momento sería de $60 \text{ kN}\cdot\text{m}$.

El pilar estará sometido a un axil de 460 kN (suma de la carga en cabeza más la aplicada en el extremo del voladizo) y a un flector de $60 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Ambas solicitaciones permanecen constantes a lo largo de la barra. Si se tiene en cuenta la ec. 2 y se desprecia el peso propio del pilar, resulta indiferente la sección en la que se realicen las comprobaciones de resistencia.

4.3 Distribución de tensiones

Tanto la sección del voladizo como la del pilar tienen, al menos, un eje de simetría. Ello permite utilizar las expresiones simplificadas de la Ley de Navier [2]. El voladizo está sometido a flexión simple y las tensiones que provoca el momento flector se distribuyen en la sección transversal de la barra de acuerdo con la ec. 3. En el caso del pilar la sollicitación es de flexión compuesta y la distribución de tensiones viene dada, en función del sistema de referencia de la Fig. 3, por la ec. 4.

$$\sigma = \frac{M_z}{I_z} \cdot y \quad \text{ec. 3}$$

$$\sigma = \frac{N}{\Omega} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z \quad \text{ec. 4}$$

4.4 Dimensionado del pilar

Se comienza por dimensionar el pilar para fijar sus dimensiones mínimas y poder calcular con precisión el momento que debería soportar el voladizo. Se utiliza la ec. 4 para tantear la magnitud de las tensiones máximas generadas por las sollicitaciones que debe soportar el pilar (véase la Fig. 2).



Para determinar los términos de dicha ecuación se comienza calculando los parámetros que definen la geometría de masas de la sección compuesta propuesta en el enunciado (detalle de la Fig. 1).

En primer lugar se obtiene el área de la sección conjunta

$$\text{área total} = \text{área IPE 200} (2850 \text{ mm}^2) + \text{área UPN 100} (1350 \text{ mm}^2) = 4200 \text{ mm}^2$$

Después se determina la posición del centro de gravedad de acuerdo con el siguiente procedimiento: se iguala la suma de los momentos estáticos de cada uno de los perfiles (respecto de una línea de referencia cualquiera) con el momento estático de la sección conjunta (respecto de esa misma línea de referencia). De este modo se obtiene la distancia que separa el centro de gravedad de la línea de referencia. Véanse la ec. 5 y la Fig. 3.

En este caso se ha tomado como línea de referencia la recta vertical que pasa por el lateral izquierdo de la sección conjunta. La distancia buscada vale

$$2850 \cdot (100 + 50) + 1350 \cdot 34.5 = (2850 + 1350) \cdot d \quad d = 112.9 \text{ mm} \quad \text{ec. 5}$$

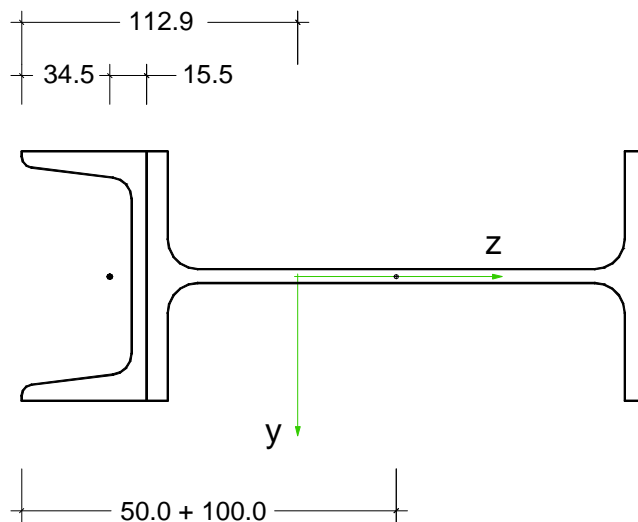


Fig. 3 Posición del centro de gravedad del perfil compuesto

Finalmente, se calculan los momentos de inercia. Como sólo se tiene momento flector M_y , basta con calcular el momento de inercia respecto del eje Y.

Del Prontuario [1] se obtienen los momentos de inercia de cada uno de los perfiles respecto de un eje paralelo al eje Y que pase por el centro de gravedad del perfil.

IPE 200 $1940 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ (momento de inercia respecto de un eje perpendicular al alma que pasa por su centro de gravedad).

UPN 100 $29.3 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ (momento de inercia respecto de un eje paralelo al alma que pasa por su centro de gravedad).

Aplicando el teorema de Steiner [2] se deduce el momento de inercia de la sección conjunta respecto del eje Y que pasa por su centro de gravedad.

$$I_y = 1940 \cdot 10^4 + 2850 \cdot (100 + 50 - 112.9)^2 + 29.3 \cdot 10^4 + 1350 \cdot (112.9 - 34.5)^2$$
$$I_y = 3191 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad \text{ec. 6}$$



En la Fig. 4 se muestran los resultados obtenidos con el programa SigmaCAD [3]. Como puede observarse, los valores coinciden sustancialmente. Las pequeñas diferencias se deben a la precisión con la que se define el espesor variable de las alas del UPN y el área de los radios de acuerdo ala-alma en ambos perfiles.

Area	Ω 4.242E+01 cm ²
Inercias ejes z y	I_z 3.534E+02 cm ⁴
	I_y 3.222E+03 cm ⁴
	I_{zy} 0.000E+00 cm ⁴
Radios giro ejes z y	i_z 2.89 cm
	i_y 8.71 cm
Vectores ejes principales	vector unitario direccion ξ 1.0000 0.0000
	vector unitario direccion ψ 0.0000 1.0000
Inercias ejes principales	I_ξ 3.534E+02 cm ⁴
	I_ψ 3.222E+03 cm ⁴

Fig. 4 Geometría de masas de la sección compuesta obtenida con SigmaCAD

Como no se está dimensionando el pilar sino que tan solo se pretende conocer la distribución y el orden de magnitud de las tensiones que soporta esa barra, las sollicitaciones se toman sin mayorar: $N = 460$ kN y $M_y = 60$ kN·m.

La distribución resultante es la siguiente

$$\sigma = \frac{-(400 + 60) \cdot 10^3}{(2850 + 1350)} + \frac{-60 \cdot 10^6}{3191 \cdot 10^4} \cdot z \quad \text{ec. 7}$$

En los puntos del extremo izquierdo de la sección (cuya $z = -112.9$ mm), se alcanzan la máxima tensión de tracción y vale

$$\sigma_{\text{max tracción}} = \frac{-(400 + 60) \cdot 10^3}{(2850 + 1350)} + \frac{-60 \cdot 10^6}{3191 \cdot 10^4} \cdot (-112.9) = 102.7 \text{ N/mm}^2 \quad \text{ec. 8}$$

En los puntos del extremo derecho ($z = 137.1$ mm), actúa la máxima tensión de compresión. Esta es, a su vez, la de mayor valor absoluto de toda la sección

$$\sigma_{\text{max compresión}} = \frac{-(400 + 60) \cdot 10^3}{(2850 + 1350)} + \frac{-60 \cdot 10^6}{3191 \cdot 10^4} \cdot 137.1 = -367.3 \text{ N/mm}^2 \quad \text{ec. 9}$$

En la Fig. 5 se muestra la distribución de tensiones proporcionada por SigmaCAD. Las pequeñas diferencias con los resultados anteriores se deben a las razones aducidas anteriormente.

Las tensiones obtenidas superan ampliamente el límite elástico del acero S275. Por lo tanto, para dimensionar el pilar se aumentará sustancialmente el tamaño de los perfiles componiendo ahora un UPN 180 con un IPE 300.

La geometría de masas de esta nueva sección se obtiene siguiendo el procedimiento descrito en la ec. 5 y en la ec. 6. Sus parámetros son los siguientes



$$\Omega = 5380 + 2800 = 8180 \text{ mm}^2 \quad d = 162.1 \text{ mm} \quad I_y = 13746 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad \text{ec. 10}$$

El cálculo detallado se realiza siguiendo el procedimiento expuesto cuya comprobación se propone al lector como una actividad de aprendizaje autónomo.

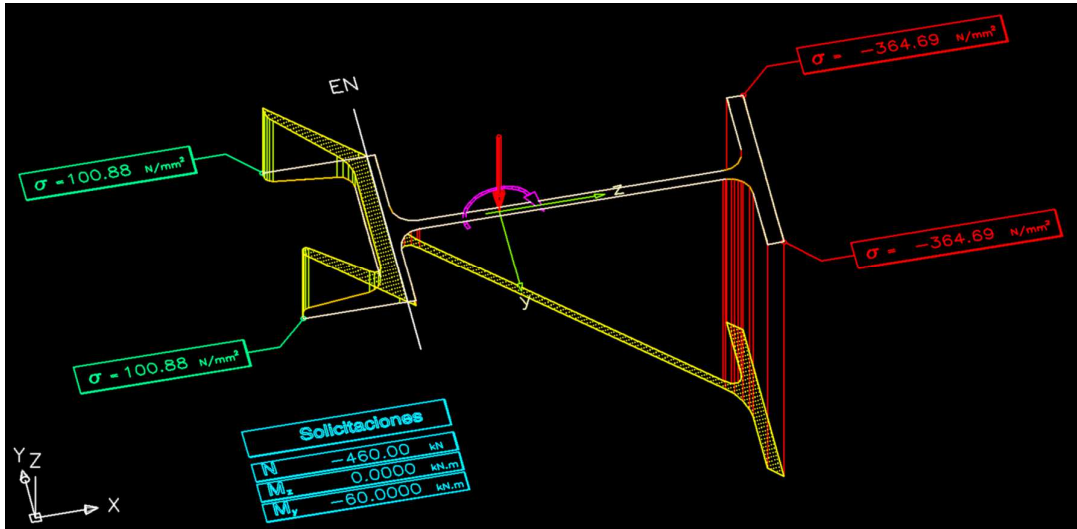


Fig. 5 Distribución de tensiones obtenida con SigmaCAD

En este segundo ciclo del proceso de dimensionado ya se toman las solicitaciones mayoradas y las tensiones se comparan con el límite elástico del material debidamente minorado. Como se desconoce el origen de las cargas se multiplican por el factor 1.50 (ponderando del lado de la seguridad) con lo que las solicitaciones de cálculo toman los siguientes valores

$$N^* = 1.5 \cdot 460 = 690 \text{ kN} \quad \text{y} \quad M_y^* = 1.5 \cdot 60 = 90 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{ec. 11}$$

La distribución de tensiones se muestra en la Fig. 6 y viene dada por la función

$$\sigma = \frac{-690 \cdot 10^3}{8180} + \frac{-90 \cdot 10^6}{13746 \cdot 10^4} \cdot z \quad \text{ec. 12}$$

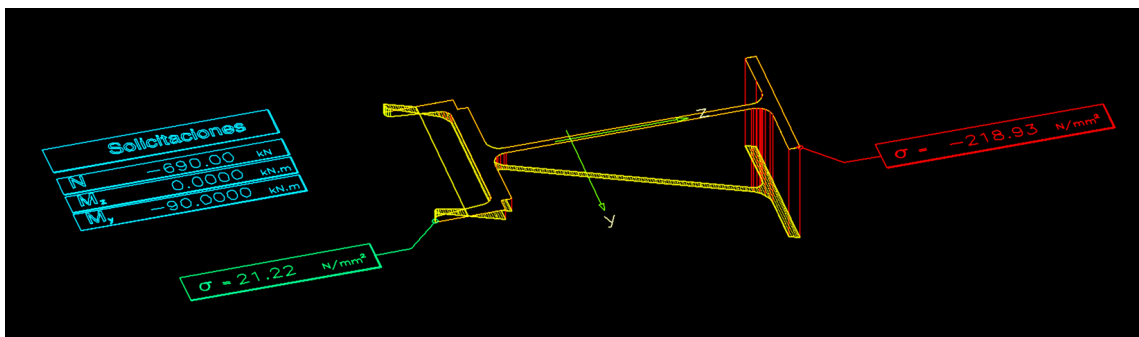


Fig. 6 Distribución de tensiones obtenida con SigmaCAD para el dimensionado final

A la vista de los resultados preliminares obtenidos en la ec. 9, sólo se comprueba la tensión en los puntos del extremo derecho de la sección ($z = 207.9 \text{ mm}$) ya que es



en esas fibras en las que las tensiones alcanzan el máximo valor absoluto. Concretamente se trata de una compresión de magnitud

$$\sigma = \frac{-690 \cdot 10^3}{8180} + \frac{-90 \cdot 10^6}{13746 \cdot 10^4} \cdot 207.9 = -220.47 \text{ N/mm}^2 < \frac{275}{1.05} \quad \text{ec. 13}$$

Esta tensión es inferior al límite elástico minorado del acero S275 por lo que el dimensionado se da por válido.

Se propone al lector que calcule la máxima tensión de tracción y que la compare con la que se muestra en la Fig. 6 (obtenida con el programa SigmaCAD [3]).

4.5 Dimensionado del voladizo

El voladizo está sometido a flexión simple por lo que su dimensionado es directo. El máximo momento flector que deberá soportar el perfil IPE es el que actúa en la sección de encuentro con el pilar. El momento flector de cálculo será el que corresponde a una distancia del extremo del voladizo igual a $1000 - 207.9 = 792.1 \text{ mm}$

$$M^* = 1.50 \cdot 60.0 \cdot 0.792 = 71.29 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{ec. 14}$$

El módulo resistente se deduce de la ecuación de Navier para la flexión simple (ec. 3). La tensión máxima que condiciona el dimensionado es la que actúa en las fibras más alejadas del eje neutro (coincidente con el eje Z) y viene dada por

$$\sigma_{\max} = \frac{M_y}{I_y} \cdot z_{\max} = \frac{M_y}{I_y/z_{\max}} = \frac{M_y}{W_y} \quad \text{ec. 15}$$

Sustituyendo en la ec. 15 el momento flector obtenido en la ec. 14, y limitando la tensión máxima al límite elástico del acero, se obtiene el módulo resistente elástico necesario

$$\sigma_{\max} = \frac{M^*}{W} \leq \frac{275}{1.05} = 262 \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \quad \rightarrow \quad W = \frac{71.29 \cdot 10^6}{262} = 272.1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \quad \text{ec. 16}$$

Consultando las tablas del Prontuario [1] se comprueba que un perfil IPE 240 tiene, respecto del eje perpendicular al alma, un módulo resistente elástico de $324 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ por lo que sería suficientemente resistente.

También se puede obtener el perfil IPE necesario buscando, en las gráficas de dimensionado a flexión simple con acero S275, el perfil que sea capaz de soportar, al menos, un momento flector de $71.29 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (véase la Figura 5-17 del Prontuario que se reproduce parcialmente en la Fig. 7).

Como el perfil IPE tiene doble simetría, las tensiones también se distribuyen simétricamente a lo largo de la sección. Los valores máximos actúan (véase la Fig. 8) en la parte alta del ala superior (tracciones) y en la parte baja del ala inferior (compresiones). La magnitud de la tensión máxima es de 220 N/mm^2 .

El voladizo también podría haberse diseñado utilizando un perfil HEB o un perfil IPN. Las solicitaciones a considerar serían las mismas y el perfil necesario en cada caso sería: HEB 160 y UPN 220. La magnitud máxima de las tensiones en el HEB es de 229.2 N/mm^2 mientras que en el IPN es de 256.4 N/mm^2 .

Se propone al lector que compruebe tales resultados como actividad autónoma de aplicación práctica de los contenidos de este artículo.

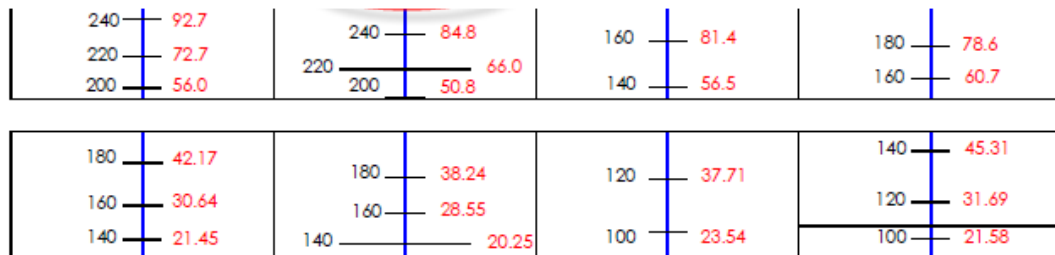


Fig. 7 Gráfica de dimensionado a flexión simple del acero S275

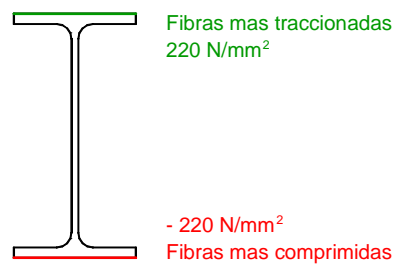


Fig. 8 Tensiones máximas en el voladizo

5 Cierre

En este artículo se dimensionan las barras de una estructura sencilla construida con perfiles de acero. Una de las barras está sometida a flexión simple y su sección es un perfil IPE. La otra barra está sometida a flexión compuesta y su sección se obtiene ensamblado un perfil UPN con un perfil IPE. En ambos casos se proponen al lector ejercicios complementarios para que los resuelva de manera autónoma y se le proporcionan las soluciones para que pueda autoevaluar su progreso.

6 Bibliografía

6.1 Libros

- [1] A. Pérez García and A. Guardiola VÍllora, "Geometría y Capacidad Resistente de Perfiles y Barras de Acero," in *Prontuario y Herramientas Informáticas para Cálculo de Estructuras*, 3ª ed., Inter Técnica Ediciones, Ed. Valencia: Imprenta Llorens, 2011, p. 5.1 a 5.230.
- [2] L. Ortiz Berrocal, *RESISTENCIA DE MATERIALES*, 3ª ed. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A., 2007, p. 864.

6.2 Referencias de fuentes electrónicas

- [3] A. Perez-Garcia, "SigmaCAD." [Online]. Available: <http://personales.upv.es/aperezg/SigmaCAD.htm>. [Accessed: 13-May-2013].