GEOMETRIA DE LOS PERFILES ALVEOLARES

(GEOMETRY OF CASTELLATED PROFILES)

José Monfort Lleonart, Arquitecto

Profesor Titular de la E.T.S. de Arquitectura de Valencia. España

Fecha de recepción: 20-VII-88
422-21

RESUMEN

Las series de perfiles alveolares, usualmente utilizadas, se establecen a partir de un conjunto reducido de plantillas/patrón para realizar el corte del perfil original, cuya utilización sistemática equivale a no considerar la influencia de algunos parámetros que podrían mejorar el comportamiento resistente de la viga alveolada obtenida a partir del mismo perfil original.

En este trabajo se analiza la influencia de algunos de estos parámetros, y se obtienen gráficas de fácil aplicación para el caso de vigas biapoyadas con carga uniformemente repartida.

SUMMARY

The most common castellated profiles series are established from a reduced set of templates to cut the original profiles. This means that no consideration is given to some parameters that could improve the beam strength behavior obtained from the same profile.

In this paper the influence of some of these parameters are studied and some easy to use charts are give for simple beams with uniform load.

1. Introducción

Las vigas alveoladas se obtienen cortando un perfil doble T según una línea quebrada, y soldando las dos partes posteriormente con un desplazamiento relativo entre ellas, figura 1; si además intercalamos chapas entre las dos partes antes de soldarlas, se obtienen vigas peraltadas de alveolos octogonales, figura 2. Variando el trazado del corte aplicado al perfil original, es posible obtener de forma semejante vigas con alveolos circulares [1], figura 3, aunque esta solución ha tenido poca aceptación en la práctica.

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 4

Refiriéndonos a las vigas con alveolos hexagonales que son las más usuales, dado que en las peraltadas el alma resulta demasiado esbelta y se suelen producir problemas de inestabilidad, son frecuentes los trazados recogidos en la figura 4: el (A), denominado trazado de Litzka [2], al que se ajustan las tablas de perfiles alveolares incluidas en el Prontuario Ensidesa; el (B), recogido de la referencia [3], que proporciona mejor resistencia que el anterior, salvo en el caso de que las tensiones tangenciales sean relativamente importantes frente a las normales; y el (C), recogido de la referencia [4], de utilización frecuente en la zona sajona.

La geometría de estos trazados corresponde a consideraciones constructivas que intentan normalizar las series de perfiles alveolares que se obtienen a partir de ellos, de forma que se puedan realizar utilizando un conjunto reducido de plantillas/patrón para el corte del perfil original. Sin embargo, esta normalización supone despreciar la influencia de algunas variables que afectan al comportamiento resistente del perfil.

En este trabajo nos proponemos estudiar las dimensiones de este trazado para adecuar el comportamiento resistente de los perfiles alveolares a determinados

casos concretos, bastante usuales en la práctica. Para ello, teniendo en cuenta que nos limitaremos a los perfiles obtenidos a partir de las series comerciales IPE e IPN —normalizadas por MV-102/1975— que son los de más frecuente utilización, consideraremos como datos de partida las siguientes magnitudes que se pueden obtener de las tablas incluidas en el apéndice B de la norma citada:

- h : altura del perfil;
- e : espesor del alma;
- A : sección;
- I : momento de inercia con respecto al eje X;
- W : momento resistente con respecto al eje X;
- S : momento estático de media sección con respecto al eje X del perfil completo.

En el procedimiento analítico, expuesto a continuación, nos aparecen como parámetros de cálculo las características de la viga (longitud y condiciones de sustentación) y el tipo de carga; el estudio lo referiremos al caso de viga biapoyada con carga uniformemente repartida, como situación más frecuente en la práctica, dado que las cargas puntuales producen problemas de inestabilidad en el alma, en cuyo caso no son adecuadas las vigas alveoladas.

2. Variables

Para definir el trazado del corte que hay que aplicar al perfil original, se deben determinar las variables a , b y c indicadas en la figura 5. A partir de ellas, queda completamente definida la geometría del perfil alveolar, por lo que éstas serán las tres únicas variables independientes del problema.

Para el desarrollo analítico necesitaremos las características geométricas y estáticas de la sección del perfil alveolar, que designaremos por la siguiente notación:

- H : altura;
- p : paso de alveolo;
- A_c : área de la sección del cordón;
- V_o : distancia del centro de gravedad de la sección del cordón, al centro de gravedad de la viga alveolada;
- I_c : momento de inercia de la sección del cordón con respecto a su propio eje baricéntrico.
- W_c : momento resistente de la sección del cordón con respecto a su propio eje baricéntrico, referido a la fibra interior;
- I_m : momento de inercia medio del perfil alveolar (promedio entre el correspondiente a la sección completa por el montante y a la sección por el aligeramiento máximo).

Fig. 5

Todas estas magnitudes se pueden expresar en función de las variables independientes, por lo que tendrán el carácter de variables función. Su expresión en función de los datos y de las variables independientes, resulta:

$$H = h + c \quad (1)$$

$$p = 2 \cdot (a + b) \quad (2)$$

$$A_c = \frac{A - c \cdot e}{2} \quad (3)$$

$$V_o = \frac{S}{A_c} + \frac{c}{2} - \frac{c^2 \cdot e}{8 \cdot A_c} \quad (4)$$

$$I_c = \frac{I}{2} - \frac{e \cdot c^3}{24} - A_c \cdot \left(V_o - \frac{c}{2} \right)^2 \quad (5)$$

$$W_c = \frac{I_c}{V_o - c} \quad (6)$$

$$I_m = 2 \cdot (I_c + A_c \cdot V_o^2) + \frac{e \cdot c^3}{3} \quad (7)$$

3. Criterio de resistencia

A efectos de realizar la comprobación de resistencia, utilizaremos el método simplificado habitual en este tipo de vigas, idealizando cada uno de los cordones y montantes en una línea material coincidente con su eje baricéntrico, asimilándola a una viga Vierendel, figura 6 (A) y (B).

La carga, que supondremos uniformemente repartida, la idealizamos en fuerzas concentradas actuando en los nudos de la viga Vierendel, y admitimos que, en estas condiciones, se produce un punto de momento nulo en el centro de cada barra, lo que nos permite suponer la existencia de una rótula en cada uno de estos puntos, con lo que transformamos la viga en una estructura isostática, figura 6 (C).

Si ahora aislamos un elemento situado entre tres rótulas contiguas, figura 6 (D), podemos admitir que el cortante, por simetría, se reparte por igual entre los dos cordones, y análogamente el momento genera en cada cordón un axil baricéntrico de valor $M/(2 \cdot V_o)$; para determinar los esfuerzos en la rótula del montante, imponiendo las condiciones de equilibrio, se obtiene

$$R = (M_d - M_i)/(2 \cdot V_o) \quad (8)$$

$$V = (T_d - T_i)/2 + q \cdot p \quad (9)$$

En estas condiciones, para la comprobación de resistencia de la viga alveolada, se habrá de verificar en cada uno de estos elementos que las tensiones en el cordón y el montante no sobrepasan unos límites máximos.

Para la comprobación del cordón, en la sección 1-1 que es la más desfavorable, despreciando las tensiones tangenciales debidas al cortante, habrá que comprobar que la suma de las tensiones normales debidas al axil y al momento originado por el esfuerzo cortante no sobrepasa el límite elástico del acero, obteniéndose como condición de resistencia en la fibra interior, que siempre será la más desfavorable puesto que en ella se suman las dos tensiones

$$\sigma_{\max} = \sigma_N + \sigma_M = \frac{M_d}{2 \cdot V_o \cdot A_c} + \frac{T_d \cdot a}{4 \cdot W_c} \leq \sigma_E \quad (10)$$

esta condición deberá verificarse en cada uno de los elementos de la viga; para la viga biapoyada con carga uniformemente repartida, puede demostrarse derivando e igualando a cero la derivada [5], que el elemento más desfavorable es el correspondiente a la abscisa, figura 7,

$$x_{\text{pesima}} = \frac{L \cdot W_c - V_o \cdot a \cdot A_c}{2 \cdot W_c} \quad (11)$$

por lo que calculando los valores de M y T correspondientes a esta posición, y sustituyendo en la expresión (10), obtenemos la condición de resistencia de la sección 1-1 del cordón en la posición más desfavorable de la viga

$$\sigma_{\max} = q \cdot \frac{L^2 \cdot W_c^2 + a^2 \cdot V_o^2 \cdot A_c^2}{16 \cdot W_c^2 \cdot A_c \cdot V_o} \leq \sigma_E \quad (12)$$

Fig. 6

Fig. 7

Para la comprobación del montante, despreciando las tensiones normales que aquí tienen poca influencia, consideraremos sólo la actuación de la fuerza R , figura 6 (D); supondremos que la configuración geométrica en las proximidades del apoyo (zona de cortante máximo, y por tanto más desfavorable a efectos del montante), es la de la figura 6 (A). Las rótulas del cordón correspondiente a este elemento están a distancias p y $2 \cdot p$ del apoyo, por lo que sustituyendo los momentos flectores correspondientes a estas abscisas en la

expresión (8) obtendremos el valor de R a considerar para la comprobación del montante más desfavorable

$$R = \frac{q \cdot (a + b)}{2 \cdot V_0} (6 \cdot a + 6 \cdot b - L) \quad (13)$$

teniendo en cuenta que la sección por el centro del montante es rectangular, la tensión tangencial máxima que origina esta fuerza cortante será

$$\tau_{\max} = 1,5 \cdot \frac{R}{e \cdot a} \quad (14)$$

y sustituyendo el valor de R dado por la expresión (13), obtenemos como condición de resistencia del montante

$$\tau_{\max} = \frac{0,75 \cdot q \cdot (a + b)}{V_0 \cdot e \cdot a} \cdot (6 \cdot a + 6 \cdot b - L) \leq 0,577 \cdot \sigma_E \quad (15)$$

4. Criterio de deformación

En las condiciones de carga y sustentación que estamos considerando, suponiendo viga de sección constante, la flecha máxima debida al momento flector viene dada por

$$f_{M,max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I} \quad (16)$$

En las vigas alveolares, debido a que el alma tiene poca rigidez por su propia configuración, el valor anterior habría que incrementarlo con otro término que tenga en cuenta la deformación debida al cortante, que aquí no es despreciable. Este efecto ha sido analizado por Delesques [6], y por Bazile y Texier [7], obteniendo expresiones relativamente complicadas para determinar la flecha de un perfil alveolar debida al cortante.

En la práctica, teniendo en cuenta que esta flecha nunca sobrepasa el 20% de la flecha total, se puede emplear la relación simplificada

$$f = K_t \cdot f_M \quad (17)$$

siendo K_t un coeficiente de mayoración de la flecha debida al momento, que es función de la longitud de la viga y de la naturaleza de las cargas (este coeficiente aumenta cuando la longitud es pequeña, y es mayor para cargas concentradas que para cargas repartidas). Para cargas repartidas, si la luz de la viga oscila entre 4 y 15 m, el coeficiente K_t varía entre 1,15 y 1,05; a efectos de este trabajo adoptaremos como valor promedio

$$K_t = 1,10$$

por lo que la flecha máxima, a partir de la expresión (16) la podremos escribir

$$f_{max} = \frac{5,50}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I_m} \quad (18)$$

donde I_m es el valor del momento de inercia medio, obtenido como se indica en el apartado 2.

5. Criterio de diseño

Nos propondremos como objetivo inicial conseguir que se verifique la restricción de deformación (18), que podemos escribir de la forma

$$f_{max} = \frac{5,50}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I_m} \leq f_{adm} \quad (19)$$

siendo f_{adm} el valor máximo admisible de la flecha, que depende de las necesidades específicas de cada caso, y que viene establecido, para estructuras metálicas en general, en el artículo 5.4.2 de la norma MV-103/1972.

De la expresión anterior vemos que f_{max} es inversamente proporcional a I_m , por lo que desde el punto de vista de la deformación de la viga el criterio de deformación será hacer que I_m tienda a máximo, y a partir de la expresión (7) vemos que esta variable función sólo depende de la variable independiente c .

En la figura 8 se ha representado la variación de I_m en función de c para algunos perfiles de la serie IPE: esta gráfica se ha limitado superiormente al valor $c = 0,6 \cdot h$ dado que, si bien este valor se puede aumentar aun sin sobrepasar la altura del alma de la viga, para valores mayores el cordón resulta demasiado reducido y las tolerancias que establece la normativa para las dimensiones de la cabeza de los perfiles comerciales podrían resultar desproporcionadas; inferiormente se ha limitado para $c = 0,25 \cdot h$ ya que, por debajo de este valor, el incremento de I_m no compensa el coste económico que supone la ejecución del perfil alveolar.

Las funciones anteriores vemos que no presentan máximo relativo, por lo que de ellas lo único que se deduce es que interesa que c adopte el mayor valor posible. Sin embargo, este planteamiento sólo contempla parcialmente el problema, ya que a medida que aumenta c disminuye la sección del cordón del perfil alveolar, y por tanto, llegará un momento en que no se verificará la condición de resistencia (12), por lo que habrá que tener en cuenta las demás restricciones para determinar el valor adecuado de c .

Fig. 8

Si de (12) despejamos a tenemos

$$a \leq \frac{1}{V_o \cdot A_c} \cdot \sqrt{\sigma_E \cdot \frac{16 \cdot W_c^2 \cdot A_c \cdot V_o}{q} - L^2 \cdot W_c^2} \quad (20)$$

vemos que en esta expresión aparecen los parámetros q y L que, a ser posible, interesa que no intervengan en la definición geométrica del trazado del corte que vamos buscando.

Si tomamos como criterio, que parece lógico en un proceso de adecuación estructural, que la relación entre la carga y la luz sea tal que se alcance el estado límite de deformación en la viga, despejando q de (19), tenemos

$$q = \frac{384 \cdot E \cdot I_m \cdot f_{adm}}{5,50 \cdot L^4} \quad (21)$$

y adoptando

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_E = 2600 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{adm} = L/250 \text{ ó } L/400$$

resulta

$$q = 586472 \cdot \frac{I_m}{L^3} \text{ (en kg/cm}^2\text{) para } f_{adm} = L/250 \quad (22)$$

$$q = 366545 \cdot \frac{I_m}{L^3} \text{ (en kg/cm}^2\text{) para } f_{adm} = L/400 \quad (23)$$

y sustituyendo en (20), tenemos

$$a \leq \frac{W_c \cdot L}{V_o \cdot A_c} \cdot \sqrt{0,071 \cdot \frac{A_c \cdot V_o \cdot L}{I_m} - 1} \text{ para } f_{adm} = L/250 \quad (24)$$

$$a \leq \frac{W_c \cdot L}{V_o \cdot A_c} \cdot \sqrt{0,113 \cdot \frac{A_c \cdot V_o \cdot L}{I_m} - 1} \text{ para } f_{adm} = L/400 \quad (25)$$

y teniendo en cuenta que las magnitudes A_c , V_o , W_c e I_m sólo dependen de c para un perfil dado, según puede apreciarse en las expresiones (3), (4), (6) y (7), cada una de las desigualdades anteriores, para valores dados $L = \text{cte.}$, nos relacionan las variables independientes a y c para un tipo de perfil y una flecha admisible prefijados; en la figura 9 se representa gráficamente un ejemplo de esta relación.

Fig. 9

En esta gráfica se ve que si c aumenta (lo cual interesa desde el punto de vista de que aumente también I_m), a disminuye, lo cual no interesa desde el punto de vista constructivo, ya que complica el trazado del corte puesto que nos vamos a soluciones del tipo indicado en la figura 10. Por ello tendremos que manejar soluciones intermedias que correspondan simultáneamente a valores razonables de a y c , y que analizaremos gráficamente en el apartado siguiente.

En las consideraciones que hemos realizado aquí, no interviene para nada la variable b ; desde el punto de vista del criterio de deformación, no influye en absoluto, puesto que como hemos visto I_m sólo depende de c ; desde el punto de vista de la resistencia del cordón, tan sólo si nos fuéramos a soluciones anormalmente alargadas para el alveolo, figura 11, la dimensión b sería una condición restrictiva puesto que entonces la sección 1-1, figura 6 (D), que es la única que hemos con-

Fig. 10

Fig. 11

siderado, dejaría de ser la más desfavorable y pasaría a serlo la 2-2, en la que el valor del momento debido al cortante es mayor, y además aparece otro término de momento debido a la excentricidad del axil. Sin embargo, este tipo de soluciones no lo consideraremos puesto que al haber ángulos muy agudos se producen importantes efectos debido a la concentración de tensiones, y ya no son constructivamente adecuadas.

En la condición de resistencia del montante, dada por la expresión (15), si que aparece la variable b ; si en esta expresión sustituimos q y σ_E por los valores antes indicados, se obtiene

$$\frac{293,19 \cdot I_m \cdot (a + b)}{V_o \cdot e \cdot a \cdot L^3} \cdot (6 \cdot a + 6 \cdot b - L) \leq 1$$

$$\text{para } f_{adm} = L/250 \quad (27)$$

$$\frac{183,24 \cdot I_m \cdot (a + b)}{V_o \cdot e \cdot a \cdot L^3} \cdot (6 \cdot a + 6 \cdot b - L) \leq 1$$

$$\text{para } f_{adm} = L/400 \quad (28)$$

expresiones que dependen de a , b y c , las cuales deberán verificarse para asegurar la resistencia del montante en la solución constructiva adoptada.

6. Resultados gráficos

Con el fin de facilitar la aplicación práctica de los criterios recogidos en los apartados anteriores, en el anexo I se han representado gráficamente los resultados correspondientes a todos los perfiles comerciales de las series IPN e IPE.

En cada una de estas gráficas se han agrupado los mismos valores que antes, a modo de ejemplo, se habían representado por separado en las figuras 8 y 9.

Cada gráfica corresponde a una serie de perfiles comerciales (IPN o IPE), a una longitud de viga (se han representado las correspondientes a 6, 9, 12 y 15 m), y a un valor de la flecha admisible (se ha tomado $L/400$ y $L/250$); entrando en la parte izquierda de la gráfica correspondiente, por el eje de abscisas, con el valor de I_m necesario para cumplir la limitación de flecha, obtenido a partir de la expresión (19), nos proporciona en ordenadas el valor (o valores) de c correspondiente a los perfiles originales que podemos utilizar para obtener un perfil alveolar que cumpla esta limitación (que serán aquellos cuya curva representativa corta a la vertical trazada por el valor de referencia I_m).

En estas gráficas, a cada curva correspondiente a un perfil en el cuadrante de la izquierda, se asocia otra curva en el cuadrante de la derecha, similar a las que se han representado antes en la figura 9 clasificadas por longitudes. Prolongando en este cuadrante la horizontal anterior que nos ha servido para determinar el valor de c , hasta su intersección con la curva correspondiente al perfil original de referencia, este punto nos definirá sobre el eje de abscisas de este cuadrante el valor máximo de a que verifica la relación (24) ó (25), según el caso de que se trate.

A modo de ejemplo, si queremos proyectar una viga alveolada biapoyada para cubrir un vano de 15 m, con carga uniforme repartida $q = 1075 \text{ kg/m}$, con una limitación de flecha $L/250$, a partir de la expresión (19) tenemos que el valor del momento de inercia medio del perfil alveolar deberá ser

$$I_m = \frac{5,50 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot f_{adm}} = \frac{5,50 \cdot 10,75 \cdot 1500^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot (1500/250)} = 61683 \text{ cm}^4$$

si queremos que el perfil original sea de la serie IPE, entrando en la gráfica correspondiente a esta serie para la luz y flecha dadas, con el valor obtenido para I_m , vemos que podemos partir de un IPE 400 ó 450, los valores de c en cada caso deberán ser 23 ó 14 cm, y los valores de a 20,5 ó 27,3 cm, respectivamente.

Con el fin de que las soluciones obtenidas aplicando estas gráficas puedan considerarse válidas experimentalmente, se ha procurado que las proporciones del perfil alveolar resultante se mantengan dentro de los límites correspondientes a perfiles de los que existe constancia de ensayos efectuados. Para ello, con datos recogidos de las referencias [1] y [6] a [12], en las

gráficas se han tenido en cuenta las limitaciones siguientes:

- a) Los valores de c se han limitado con el criterio

$$c \leq 0,6 \cdot h$$

$$c \geq 0,25 \cdot h$$

por la justificación antes indicada en el apartado 5.

- b) Además de la limitación anterior, los valores (a , c) grafados en las figuras, corresponden a trazados para los cuales el perfil soporta una carga al menos igual a cinco veces su peso propio.

Esta restricción es necesaria para que no aparezcan soluciones correspondientes a cargas muy pequeñas, puesto que la variable q la hemos eliminado con el criterio indicado por las expresiones (22) ó (23).

- c) El ángulo α que define la inclinación del montante, figura 5, debe estar comprendido entre 45° y 60° . Esta limitación no se incluye en las gráficas, puesto que en ellas no aparece el valor de b , que puede definirse solamente con este criterio de limitación de la pendiente.
- d) El valor de a se ha limitado superiormente con la condición de que el paso de alveolo sea

$$p \leq 1,4 \cdot H$$

lo que equivale a

$$2 \cdot (a + b) \leq 1,4 \cdot H$$

y teniendo en cuenta el valor de H dado por (1), y las limitaciones para la pendiente del montante indicadas en el punto b), se ha tomado como límite superior de a el valor

$$a \leq 0,7 \cdot h - 0,3 \cdot c \quad (29)$$

esta limitación gráficamente equivale a una recta, que es la que sustituye en las gráficas del anexo I a la curva que proporciona el valor de a en función de c , cuando este valor sobrepasa la limitación anterior.

- e) Las expresiones (27) ó (28) nos definen el límite inferior de a para asegurar la resistencia del montante. En estas expresiones intervienen c y b ; el valor de c lo obtenemos previamente al de a , y el de b viene condicionado solamente por la pendiente del montante, por lo que aquellos valores de a que no sean compatibles con los correspondientes de b y c , a efectos de que se verifiquen las restricciones (27) ó (28), no se han incluido en los gráficos. Esta restricción también limita superiormente los valores de a , aunque da valores mayores que los definidos por (24) ó (25), por lo que no es una restricción activa.

7. Criterio constructivo

Dado que la construcción de este tipo de perfiles exige la disponibilidad de una serie de plantillas cuyo número conviene que sea reducido, lo cual no es compatible con la amplia gama de trazados que pueden deducirse de las gráficas anteriores, parece lógico desde el punto de vista constructivo reducir todos estos resultados a unos pocos trazados/tipo que puedan materializarse en plantillas/patrón.

Un criterio para realizar esta simplificación, sería trazar una cuadrícula en el cuadrante de la derecha de cualquiera de las gráficas del anexo I, y cada uno de los recuadros asociarlo a un par de valores (a_n , c_m), podrían ser el centro del recuadro, que serían los que determinan el trazado/tipo correspondiente a cualesquiera valores de (a , c) contenidos en él; el número de recuadros coincidiría con el de plantillas/patrón de que deberíamos disponer para aplicar este criterio.

Una discrepancia fácilmente observable entre esta propuesta y la práctica actual, es que las plantillas/patrón se aplican usualmente sólo en función del tipo de perfil original, mientras que con el criterio que se propone, cada plantilla se aplicaría simultáneamente en función del perfil original y de la longitud de viga dada.

Una forma más racional de utilizar las plantillas actualmente estandarizadas, sería representar en el cuadrante de la derecha de cada una de las gráficas, los puntos (a , c) que definen el trazado de cada una de estas plantillas, y sustituir los valores que se obtienen aplicando el criterio que aquí se propone, por el punto más próximo que corresponda a cualquiera de las plantillas estandarizadas.

ANEXO I

Agradecimiento

Agradezco a Enrique Gil Benso, profesor de la E.T.S. de Arquitectura de Valencia, la colaboración prestada para el trazado gráfico por medio de plotter de las figuras que acompañan a este trabajo.

Bibliografía

- (1) Un nouveau type de poutres ajourées. D. Mateesco y G. Mercea. Construction Metallique n.º 3/1981.
- (2) La production automatique de poutres a âme évidée de tous types et de toutes dimensions. H. Litzka. Acier-Stahl-Steel. n.º 11/1960.
- (3) Prontuario de estructuras metálicas. R. Rodríguez Borlado y C. Martínez Lasheras. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, 1981.
- (4) Steel Designers' Manual. Constructional Steel Research and Development Organisation. Granada Publishing. 4a. Ed. (rev.). 1983.
- (5) Vigas de alma aligerada. V. Cudós. Construcciones Metálicas y Calderería. n.º 1/1985.
- (6) Le calcul des poutres ajourées. R. Delesques. Construction Metallique. n.º 4/1969.
- (7) Essais de poutres ajourées. A. Bazile y J. Texier. Construction Metallique n.º 3/1968.
- (8) Stresses and deflexions in castellated beams. J. Kolsowski. The Structural Engineer. n.º 1/1964.
- (9) Lateral-torsional buckling of castellated beams. D. A. Nethercot y D. Kerdal. The Structural Engineer. n.º 3/1982.
- (10) Failure modes for castellated beams. D. Kerdal y D. A. Nethercot. Artículo original para su publicación en Journal of Constructional Steel Research.
- (11) Etude expérimentale et technique du comportement élastique des poutres a ame évidée. P. Halleux. Revue Française de la Mécanique. Vol. 18-19. 1966.
- (12) Optimum expansion ratio of castellated steel beams. A. R. Galambos, M. U. Hosain y W. G. Speirs. Engineering Optimization. Vol. 1, n.º 4. 1975.

* * *