estructuras metálicas ligeras

Conferencias pronunciadas en el aula de Costillares por el profesor
Dr. HERMANN BEER, GRAZ - AUSTRIA

846 - 1

Presentación

Este trabajo, cuya primera parte se publica en este número y continuará y terminará en los dos próximos de INFORMES DE LA CONSTRUCCION, corresponde al texto escrito por el propio conferenciante de las dos conferencias pronunciadas, en el aula de Costillares, por el profesor Hermann Beer, los días 8 y 9 de marzo pasado.

El profesor Beer, Catedrático de la Escuela Técnica Superior de Graz (Austria), Presidente de la Comisión II de la A.I.P.C. y de la Comisión VIII de la Convención Europea de la Construcción Metálica, goza de una reputación universal en el campo de las estructuras metálicas.

La actualidad del tema elegido para sus conferencias y la abundante documentación gráfica con que las ilustró, han hecho pensar al Instituto en el gran interés que, para los profesionales, pueda tener su publicación.

Es de destacar que el profesor Beer conoce a fondo la lengua española, cuyo dominio adquirió durante sus años de profesor en la Universidad de Tucumán (Argentina). En el texto que sigue el Instituto no ha introducido más que ligeros retoques de sintaxis y ortografía.

Introducción

La aplicación de elementos formados de chapas muy delgadas a la ejecución de construcciones metálicas de tipos muy diversos ha experimentado un gran progreso en los últimos años. Especialmente en Norteamérica, algunos grupos de investigadores han realizado trabajos teóricos, y muy particularmente ensayos, para dilucidar los complicados problemas ligados con el cálculo, el dimensionamiento y la ejecución de las construcciones metálicas ligeras. Quisiera mencionar aquí tan sólo los valiosos trabajos del profesor Winter, que formaron la base del reglamento americano. Se ha traducido el «Light-Gage Cold-Formed Steel Design Manual» al alemán y al francés, y también parcialmente al español; no obstante, quisiera presentarles los resultados de algunas de las interesantes investigaciones de nuestros colegas americanos.

En las estructuras metálicas ligeras se trata de lograr, con un mínimo de peso de acero, un máximo de rigidez frente a la sollicitación correspondiente. Es, por esto, generalmente imprescindible el aplicar los elementos formados de chapas de débil espesor, conformando su sección de tal manera que se obtenga la mayor resistencia contra los distintos tipos de sollicitación, como, por ejemplo, tracción, compresión, flexión y torsión.

O. Jungbluth ha resumido la esencia de la disposición de las construcciones metálicas ligeras con las dos expresiones siguientes:

«Rigidez óptima — Peso mínimo.»

La mayor parte de los elementos usados en construcciones metálicas ligeras está compuesta de chapas muy delgadas, obteniéndose las secciones correspondientes por los procesos de laminación y de doblado en frío. Se emplea para este fin el fleje de acero arrollado en un «coil» (bobina). El espesor de la chapa varía generalmente de 1 a 5 milímetros.

Hay que distinguir dos tipos de estructuras metálicas ligeras: El *primer tipo* consiste en una estructura principal, compuesta de perfiles laminados en caliente de espesor normal, y de estructuras ligeras secundarias de espesor muy delgado, como por ejemplo, para cerramientos, forjados de pisos, cubiertas, etc. El *segundo tipo* está compuesto solamente de perfiles ligeros laminados o plegados en frío para toda la construcción metálica.

Es importante observar que el proceso de fabricación de los elementos para estructuras ligeras está vinculado casi siempre con un proceso de estirado en frío del acero, lo que aumenta su resistencia a la tracción y compresión, pero más aún su límite de fluencia. Puesto que este límite es generalmente decisivo para la resistencia de la estructura, sería muy conveniente y económico aprovechar su valor aumentado para el dimensionamiento de la estructura.

En lo que sigue quisiera darles un cuadro completo, aunque sea muy resumido, de los puntos de vista estático, constructivo y de ejecución, que deben observarse para la aplicación práctica de las estructuras metálicas ligeras.

b Material

En la figura 1 vemos los dos tipos característicos del diagrama «Tensión-alargamiento». El diagrama (a) corresponde a un acero común de construcción, como por ejemplo, el A 37 ó

el A 52, mientras que el diagrama (b) es característico de un acero duro de alta resistencia. El criterio más importante para la resistencia de una construcción metálica es el límite de fluencia del material, cuyo valor se obtiene generalmente mediante el ensayo de tracción. Pero es importante observar que —particularmente en estructuras metálicas ligeras— también tiene importancia el límite de fluencia obtenido mediante el ensayo de compresión, considerando la elevación debida al estirado en frío.

El proceso de estirar, en frío, por ejemplo un fleje de acero, está

representado en el diagrama de la figura 2. Si se aumenta la tensión hasta exceder el límite de fluencia y se descarga después, completamente, la probeta, se ha elevado el límite de fluencia, permaneciendo rectilíneo el diagrama de la nueva carga hasta alcanzar el nuevo límite de fluencia. Puede realizarse este proceso con el fleje de acero mediante el laminado en frío o doblando la platabanda para formar perfiles de tipos muy diversos. Observen ustedes, en la figura 3, la diferencia entre el diagrama de tensiones de un acero común de construcción y el del mismo acero después de estirado en frío. Se nota en este último caso el aumento considerable del límite de fluencia mientras que la zona de deformación plástica se reduce, y, además, que la tensión de rotura no aumenta en la misma proporción. El endurecimiento del material tiene como consecuencia una reducción del alargamiento de rotura y una disminución de la relación «tensión de rotura-límite de fluencia».

Como he mencionado ya, los ensayos de tracción y de compresión dan resultados diferentes considerando el efecto del estirado en frío. La figura 4 muestra los dos diagramas correspondientes. Se observa que, por el proceso de estirado en frío, el límite de fluencia a la tracción aumenta el doble que el límite de fluencia a la compresión.

La distribución de los valores del límite de fluencia en la sección necesita un estudio amplio, teniendo en cuenta no solamente la forma de la sección y las dimensiones del perfil, sino también el proceso del estirado en frío (laminación, doblado, etc.). Al plegar una platabanda, predomina el aumento del límite de fluencia cerca de las aristas, como puede verse en la figura 4. La AIPC está desarrollando un programa de ensayos muy amplio para obtener más resultados al respecto.

5

es necesario soldar por puntos las almas de dos perfiles $\square$. La desventaja de estas secciones es el alma relativamente gruesa y las alas delgadas. A fin de obtener un área de mayor sección en las cabezas de la viga se suelda por puntos una platabanda, aumentando además la seguridad al pandeo con «labios» en los bordes de aquellas cabezas.

Se obtiene la sección tubular por un proceso particular de laminado a partir de una barra redonda, o por soldadura automática de la junta de contacto de un fleje de acero enrollado.

Finalmente, forman parte de los elementos para construcciones ligeras los redondos y el cable, formado éste por alambres de alta resistencia de secciones diversas.

Con todos estos elementos pueden componerse vigas reticuladas o de alma llena, columnas, pórticos planos y espaciales, así como también estructuras de tipos muy diversos.

C Elementos de construcción

La materia prima para fabricar los elementos de las estructuras metálicas ligeras es el fleje de acero (fig. 5), transportado en rollos de hasta 6 t de peso cada uno. Por los procesos de laminación o plegado en frío pueden obtenerse perfiles angulares y en forma de $\square$, $\square$, $\square$, etc. (fig. 6). Mientras que los perfiles laminados en caliente tienen casi siempre ángulos rectos, considerando la forma de la sección, puede plegarse también el fleje con ángulos obtusos o agudos, lo que aumenta mucho la variedad de las secciones. Pero no es posible formar en frío perfiles de sección I.

Con el proceso de soldadura por arco voltaico o por puntos, se forman perfiles compuestos (fig. 7), como por ejemplo el tipo cajón con perfiles $\square$ y $\square$ o el tipo «sombrero» (este último con soldadura por puntos). Para obtener vigas de perfil I

Perfiles plegados.

Perfiles plegados compuestos.

En la figura 8 pueden apreciarse algunos nudos soldados, con barras de secciones distintas. Se recortan las alas y se suelda la diagonal en el alma de la cabeza. Mientras aquí hemos considerado secciones abiertas, se ven en la figura 9 cabezas y, en parte, también diagonales del tipo «cajón». La unión se hace en ambos casos sin cartelas soldando directamente las diagonales a las caras de la cabeza. Los ensayos han demostrado que puede prescindirse generalmente de las cartelas, puesto que se realiza directamente la transmisión de los esfuerzos desde el cordón a las diagonales. En la figura 10 se ve un nudo de un tipo de viga reticulada que se aplica en la construcción de naves industriales (figs. 11 y 12). Los

10

11

12

ensayos con una viga entera ejecutados en la Technische Hochschule Graz (fig. 13) han demostrado claramente que los nudos quedaron completamente intactos hasta la rotura por pandeo de una diagonal, cerca del límite de fluencia. Sin embargo, el diagrama «fuerza-flecha de deformación» muestra una leve curvatura debida a las tensiones residuales de la soldadura (fig. 14).

Pueden construirse también columnas compuestas por dos o más perfiles plegados, unidos con presillas, empleando la soldadura por puntos o cordones de ángulo y en «k» (fig. 15).

13

Barras comprimidas de dos elementos.

15

d

Problemas del pandeo local

En lo que sigue se introducen dos constantes características del material; a saber: el módulo de elasticidad (E) que es constante para todos los aceros de construcción y el límite de fluencia (σ_F) que depende de la calidad del acero. Calculando con una seguridad (en el sentido clásico) de 1,65, obtenemos la tensión admisible básica ($\sigma_g = \frac{1}{1,65} \sigma_F$). Existen dos conceptos distintos para el pandeo local de la chapa:

1. Se considera solamente el estado de tensiones y deformaciones antes de llegar al límite de estabilidad y, más aún, se exige una cierta seguridad frente a este estado límite de pandeo de la chapa.
2. Se considera el estado postcrítico, lo que equivale a decir que se aprovechan, en lo posible, la elevada capacidad de carga debida a la trasposición de las tensiones a las zonas no pandeadas y la acción de membrana.

Es claro que la segunda interpretación da un dimensionamiento más económico, porque se hace uso de todas las reservas de resistencia que se encuentran en la estructura. En la figura 16 puede verse la chapa pandeada de una barra, suponiéndola libremente apoyada en los bordes. Se forman ondas cuya longitud es prácticamente constante e igual al ancho de la chapa. Siendo $\sigma_{cr} = k \cdot \sigma_e$ se obtiene, con $k = 4$ (para esfuerzos normales de compresión), la tensión crítica de pandeo de la chapa. σ_e es la tensión de Euler de una faja de ancho unitario y de longitud b (ancho de la chapa). Es importante recalcar que k depende, además del tipo de sollicitación, esencialmente de las condiciones de borde. Para la chapa con un borde libre (ala de un perfil $\square$) se obtiene un factor de pandeo de solamente $k = 0,5$, mientras que para la chapa superior de la sección tipo «sombrero» este valor es mayor de 4, porque esta chapa está empotrada parcialmente en las almas.

La sección en cajón se utiliza frecuentemente para barras de sistemas reticulados o para columnas y dinteles de sistemas aporticados (figura 17). El pandeo local de las paredes de la barra puede realizarse en distintas formas, y el factor k correspondiente depende de la distribución de las tensiones normales sobre la sección y de las relaciones entre los lados ($r = b_s/b_f$) y entre los espesores ($t = t_f/t_s$).

16

Diferentes posibilidades de deformación por pandeo.

17

23

veces el espesor de la chapa. En la figura 25 se ve claramente el desplazamiento de las tensiones hacia los bordes longitudinales, al aumentar la flecha de deformación. Con $f/t = 3$ se obtiene en los bordes casi el doble del valor de la tensión en el centro de la chapa.

El ancho eficaz se reduce con el aumento de la tensión (fig. 26). Si se conoce la distribución de las tensiones sobre el ancho de la chapa, se calcula el ancho eficaz con el rectángulo de área igual al diagrama de distribución real.

24

Ancho eficaz en el dominio postcrítico, en función de la relación «flecha: espesor de la chapa».

la chapa. En construcciones metálicas ligeras pueden admitirse algunas veces flechas de deformación mucho mayores. Investigaciones de Volmir han demostrado que, admitiendo una flecha de dos veces el espesor de la chapa, se obtiene un aumento de la carga crítica de un 50 por 100.

Para facilitar el cálculo y el dimensionamiento de las chapas en estructuras ligeras se introduce el concepto del «ancho eficaz». En un ancho ficticio que da, suponiendo una distribución uniforme de tensiones, la misma resistencia que la chapa real en el estado pandeado. Se considera por esto a la chapa restante como ineficaz. La figura 24 muestra la disminución del ancho eficaz con la flecha de deformación. Ustedes pueden ver que el ancho eficaz se reduce a la mitad del ancho total, si la flecha de deformación crece hasta tres

Tensiones en el borde y en el centro en el dominio postcrítico, en función de la relación «flecha: espesor de la chapa».

Para el cálculo del ancho eficaz debe partirse del ancho real de la chapa plana, descontando las partes curvas y los nervios. La figura 27 muestra diversos ejemplos de perfiles para estructuras metálicas ligeras, solicitados a flexión y a compresión. Debe notarse que la sección resultante difiere bastante de la sección original del perfil, necesiéndose tener en cuenta para el cálculo del área de la sección y del momento de inercia solamente la parte no rayada. La consecuencia más importante de esto es el desplazamiento del eje neutro, con la variación de la tensión en la zona postcrítica. En el perfil representado en la figura 28 se desplaza el eje neutro hacia abajo, aumentando así la sollicitación a la flexión de la chapa del cordón superior. Por ello es necesario calcular el ancho eficaz mediante un proceso de iteración.

La chapa rigidizada

Hemos visto que, aumentando las tensiones de compresión, la resistencia de la chapa se acerca a un límite, iniciándose finalmente la rotura del elemento. Para aumentar la resistencia de la chapa se colocan rigidizadores longitudinales. En la figura 29 pueden verse distintos tipos de rigidizadores. Pueden preverse «labios» para las alas de un perfil $\square$ o nervios (por plegado de la chapa), pero también se usan rigidizadores de pletinas, perfiles $\perp$ o angulares, soldados a la chapa con cordones de ángulo.

El rigidizador de tipo cajón o tubular es muy eficiente debido a su rigidez a la torsión. La figura 30 muestra una comparación de rigidizadores sin y con rigidez a la torsión para una chapa muy delgada. Ustedes pueden observar un aumento muy grande del factor de pandeo k para la chapa con

29

Coefficiente de abolladura para chapa con rigidizadores con y sin rigidez torsional (según A. Pflüger).

refuerzos tubulares, que llega al 200 por 100 para un panel con relación de lados $\alpha = 2$. Es claro que desaparece esta ventaja acercándose a $\alpha = 0$. La figura 31 muestra en otra forma esta comparación. En ella está dibujada la familia de curvas del factor de pandeo (k) en función (ρ) del espesor de la chapa (t), dividido por el espesor de una chapa ficticia que se obtiene cuando se suponen los rigidizadores uniformemente distribuidos sobre la chapa ($t + F_R/s$), siendo F_R el área de la sección de un rigidizador y s la distancia entre los mismos. El parámetro h corresponde a la relación de la altura al espesor de la chapa. El factor de pandeo k está dado en escala logarítmica. Se observa un aumento de la diferencia entre las curvas sin y con rigidizadores tubulares al disminuir la relación ρ , lo que corresponde a rigidizadores más fuertes.

El cálculo electrónico del pandeo de un alma con varios rigidizadores hace posible investigar el problema del peso mínimo de acero para la chapa rigidizada. En el diagrama de la figura 32 está expresada el área de la sección total (chapa + refuerzos) como función del espesor de la chapa, considerando flexión pura (curva inferior) y flexión con esfuerzo

31

Coefficiente de abolladura para chapas con rigidizadores con y sin rigidez torsional en función de la relación «área de la chapa : área total» (según A. Pflüger).

32

Área necesaria de alma y rigidizadores, en función del espesor del alma, número de rigidizadores y esfuerzo cortante.

cortante (curva de arriba). Para el primer caso, ustedes no pueden ver un mínimo del área de la sección, porque aún en una chapa muy delgada es económico aumentar el número de los rigidizadores hasta el límite dado por razones constructivas. En el segundo caso se ve claramente la formación de un mínimo del área de la sección, que corresponde a cinco refuerzos longitudinales. Es claro que el mínimo de área no corresponde al mínimo de los costes de obra; pero la curva es muy instructiva y permite llegar finalmente a una solución óptima.

En la figura 33 se representan distintos tipos de rigidizadores para secciones delgadas. Se aplica el simple «labio», que refuerza mucho el ala de un perfil $\square$ o Γ hasta $b_0/t = 60$. Para relaciones b_0/t más grandes se forma un nervio en la mitad de la chapa plana por el proceso del plegado en frío, aumentando así considerablemente la seguridad al pandeo local sin necesitar medios de unión (remaches, soldadura, etc.). Sin embargo, deben soldarse las platabandas y los perfiles $\square$ y Γ a la chapa mediante cordones de ángulo, con la desventaja de producir efectos de contracción que hacen necesario un trabajo adicional de enderezado.

Para obtener el diagrama de tensiones de una viga de la sección dada en la figura 33, debe tenerse en cuenta que los rigidizadores no transmiten tensiones tangenciales. Por esto la curva va decreciendo desde los bordes y creciendo hacia el centro, pero sin lograr nuevamente el valor de los bordes, a pesar de que la chapa no está pandeada en la zona que corresponde al nervio de refuerzo. Puede calcularse de manera aproximada el ancho eficaz de la chapa de cabeza con las fórmulas indicadas en la figura.

$$b_0/t = 180 \quad \sigma_g = 1400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{sin ref.: } b_i/t = 0,29b_0/t$$

$$\text{con ref.: } b'_0/t = 85$$

$$b_i/t = 45 \quad 0,53 \cdot 85 = 45$$

Structures métalliques légères

Ce travail, dont la première partie est présentée ici et dont la suite paraîtra dans les deux prochains numéros d'«Informes de la Construcción», correspond au texte écrit par le Prof. Hermann Beer, auteur des deux conférences prononcées dans la salle de conférences de Costillares, les 8 et 9 mars dernier.

Le Prof. Beer, agrégé de l'Ecole Technique Supérieure de Graz (Autriche), Président de la Commission II de l'A.I.P.C. et de la Commission VIII de la Convention Européenne de la Construction Métallique, jouit d'une réputation universelle dans le domaine des structures métalliques.

L'actualité du thème choisi pour ses conférences et l'abondance de documentation graphique qui les illustre, ont fait penser à l'Institut Eduardo Torroja au grand intérêt que leur publication pourrait avoir pour les professionnels.

Il est à remarquer que le Prof. Beer connaît à fond la langue espagnole, qu'il apprit durant ses années de professorat à l'Université de Tucumán (Argentine). L'Institut s'est donc borné à n'effectuer que de légères corrections de syntaxe et d'orthographe.

Lightweight metallic structures

The first part of this paper is being published in the present issue of «Informes de la Construcción», and will be followed by two further parts in the next two numbers of this magazine. It corresponds to the manuscript utilised for the two lectures given at Costillares by professor Hermann Beer. These lectures were given on March 8 and 9th last.

Professor Beer, professor of the High Technical School of Graz, Austria, is President of the Committee II of A.I.P.C. and of the Committee VIII of the European Convention on Metallic Construction, and has world wide reputation in the field of metallic structures.

The up to date nature of the subject and the abundant graphical documentation which illustrates it has led this Institute to believe that it will be of great interest to professionals to publish the text of these lectures.

It should be emphasized that professor Beer knows Spanish very well. He learnt this language during the years he was professor at the University of Tucumán, in Argentina. In the following text the Institute has only introduced some slight adjustments of syntax and spelling.

Leichte Metallstrukturen

Diese Arbeit, deren erster Teil in dieser Nummer veröffentlicht wird und deren Fortsetzung und Schluss in den beiden folgenden Nummern von «Informes de la Construcción» (Baunachrichten) erscheinen werden, entspricht dem Text, den der Referent der beiden am 8. und 9. März d. J. in der Aula von Costillares gehaltenen Vorträge selbst geschrieben hat. Bei den Referenten handelt es sich um Herrn Professor Hermann Beer. Professor Beer, ordentlicher Professor an der Technischen Hochschule von Graz (Oesterreich), Präsident der Kommission II der A.I.P.C. und der Kommission VIII der Europäischen Konvention für Metallbauten, genießt Weltruf auf dem Gebiete der Metallstrukturen.

Das aktuelle Thema seiner Vorträge und die reichhaltigen graphischen Unterlagen, mit welchen er diese illustriert hat, haben beim Institut den Gedanken aufkommen lassen, dass deren Veröffentlichung für die Fachwelt von grossem Interesse sein könnte.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass Professor Beer die spanische Sprache gründlich kennt. Er hat sie während seiner Jahre als Professor an der Universität Tucumán (Argentina) beherrschen gelernt. Im nachfolgenden Text hat das Institut lediglich leichte syntaktische und orthographische Berichtigungen vorgenommen.