

# METODOS DE ANALISIS POSCRITICO DE VIGAS METALICAS DE ALMA LLENA SEGUN EL EUROCODIGO 3/84

(METHOD FOR POST-CRITIC ANALYSIS OF FULL CORE METALLIC BEAMS ACCORDING TO THE 3/84 EUROCODE)

Jesús Ortiz Herrera y José M.<sup>a</sup> Sancho Aznal \*

422-20

## RESUMEN

*El presente artículo expone el estado actual de los principales métodos de comprobación del estado límite de pandeo local de las vigas metálicas de alma llena, actualmente disponibles para su aplicación en fase de proyecto.*

*Se efectúa un estudio comparado de los métodos propuestos al respecto por diversas normas y recomendaciones, tomando como referencia principal la actual redacción del Eurocódigo número 3, "Reglas unificadas comunes para las construcciones de acero" (referencia 1, 1984). De entre los diversos métodos prácticos disponibles, los autores recomiendan el método de la sección eficaz, por considerar que dicho método logra el máximo aprovechamiento del material y permite, a la vez, expresiones simplificadas de uso sencillo para las secciones doble T. Y, de entre los diversos métodos basados en el concepto de sección eficaz, se efectúa, asimismo, una comparación y propuesta selectiva.*

*La optimización de las secciones de cantos considerables requiere forzar la esbeltez de las almas, y en este campo los métodos de análisis poscrítico brindan la posibilidad de reducir al mínimo las exigencias de rigidización, con las consiguientes ventajas económicas y constructivas. No obstante, ello requiere por parte del Proyectista un conocimiento adecuado de estos métodos, y un mayor esfuerzo de cálculo que el exigido por las secciones denominadas "semicompactas", a las que también se pasa revista en el presente artículo.*

## SUMMARY

*This work describes the present situation of the most important methods for checking the limit state of local buckling in full core metallic beams, desponible nowadays for its application in a Project phase.*

*A comparative study of the methods proposed by different standards and recommendations is carried out for this purpose, taking as main reference the Eurocode num. 3 (ref. 1, 1984). Among the different disponible practical methods the author advice the effective section method, since this one gets the greatest advantages of the material and permit, at the same time, simplified expressions of simple use for double T sections; and from the different methods based in the effective section concept, there is also a comparison and a selective proposal.*

*The optimization of the section of large edges requires the straining of the cores slenderness, and in this field the methods of postcritic analysis offer the possibility to reduce to the minimum the flexural rigidity, with the resulting economic and constructive advantages. However it requires enough knowledge of this methods and a greater effort regarding calculation than this needed for the sectios named "semicompact" which are also reviewed in this work.*

## 1. INTRODUCCION

El objeto del presente artículo es el fenómeno del pandeo «local» de las vigas metálicas de alma llena solicitadas en flexión simple, y, más concre-

tamente, la abolladura de chapas esbeltas no rigidizadas. Se presenta el estado actual de esta cuestión, en lo referente a métodos vigentes para su aplicación práctica en el diseño estructural. Así, pues, no se contemplan en este artículo los diversos métodos analíticos, numéricos o experimentales utilizados para el estudio del fenóme-

\*Departamento de Estructuras de Edificación, ETSA, UPM.

no mencionado, sino las formulaciones «de diseño» para su uso práctico en fase de Proyecto. Aun así, la presentación no pretende en modo alguno ser exhaustiva, dada la enorme variedad de criterios disponibles, que incluso dentro de cada familia de métodos de similar base conceptual, se formulan con formatos muy variados; así, por dar un ejemplo, de la familia de métodos comentados en el apartado 6 del presente artículo, existen no menos de 10 teorías satisfactorias, pero formalmente distintas. Por ello, se ha seguido el criterio de adoptar como referencia básica la actual redacción del Eurocódigo 3/84 (referencia 1), y tomar éste como base de un estudio comparado de las diversas formulaciones de diseño consideradas por los autores como de mayor interés práctico. El lector que requiera una recopilación más extensa del estado actual de la cuestión puede encontrarla, entre otras, en las referencias 2, 3, 4 y 5 (SSRC, 1976; CECM, 1976; Bjorhovde, 1980; Rockey, Evans *et al.*, 1981); en conjunto, cabe afirmar que las teorías actualmente disponibles en materia de pandeo local forman un sistema relativamente consolidado, salvo, tal vez, el comportamiento de los grandes paneles rigidizados y otras cuestiones fuera del alcance del presente artículo.

En la elección del modelo de cálculo relativo a los fenómenos de pandeo local de las vigas de luces y cantos apreciables, el Proyectista debe conjugar los siguientes aspectos, generalmente contrapuestos:

- Sencillez o complicación de los cálculos. En este sentido, la opción de secciones semicompactas, frente a las secciones esbeltas, proporciona la mayor simplicidad de análisis, pero a costa de incrementar el peso de acero de la pieza (no se hace referencia al caso de vigas pequeñas resolubles con perfiles laminados).
- Minimización del peso de material. Dentro del contexto del método clásico de tensiones críticas (apartado 2), las soluciones más ligeras son generalmente las secciones de paredes esbeltas rigidizadas, pero, salvo en los rangos de los cantos grandes donde estas soluciones son inevitables, suelen preferirse las soluciones sin rigidización o poco rigidizadas, por las razones aducidas en el párrafo siguiente.
- Sencillez constructiva, con objeto de minimizar los costes de fabricación y control. En este sentido, la reducción o eliminación de rigidizadores es altamente deseable, siempre que ello no repercuta en incrementos antieconómicos del peso total de acero.

La adopción de modelos de cálculo poscrítico adecuados constituye una excelente solución

de compromiso entre los intereses anteriormente citados; en efecto:

- De entre la enorme variedad de métodos disponibles, existen algunos, que, manteniendo un nivel de aproximación más que aceptable, resultan de aplicación razonablemente simple, incluso más que los métodos clásicos de tensiones críticas.
- Estos métodos permiten incrementar los cantos y esbelteces de las almas por encima de los valores que resultarían admisibles según los métodos clásicos, y por ello conducen a soluciones considerablemente más ligeras.
- Dentro del rango de los cantos medios, al permitir la eliminación de rigidizadores longitudinales (e, incluso, transversales), o al menos la reducción de su número, los métodos mencionados compatibilizan las soluciones poco rigidizadas con la adopción de almas considerablemente esbeltas.

Por estos argumentos, que los autores han tenido personalmente ocasión de verificar en varios casos prácticos, se considera muy justificado el llamar la atención a los Proyectistas de estructuras metálicas sobre estos nuevos métodos de cálculo, que pueden mejorar considerablemente la competitividad de las vigas metálicas de alma llena.

No se ha incluido en la siguiente exposición el caso de las vigas rigidizadas, por considerar que la presentación de la particular problemática de este tipo de piezas desvirtuaría la concisión y sencillez que se ha pretendido mantener en todo este artículo.

Tampoco se contemplan en esta exposición otros estados límites, tales como el aplastamiento de alma bajo acciones o reacciones localizadas, el posible pandeo lateral o de conjunto, etc., que naturalmente deben estar adecuadamente controlados.

## 2. SECCIONES SEMICOMPACTAS Y ESBELTAS

Según el Eurocódigo 3/84, se denomina «semicompactas» a aquellas secciones metálicas capaces de alcanzar la plastificación de la fibra o fibras extremas más solicitadas. Ello impone determinados límites de esbeltez a las chapas de alma y cabezas constitutivas de la sección. Otros límites más exigentes, que permiten asegurar la aplicabilidad del cálculo plástico a nivel de sección (secciones «compactas») o a nivel de estructura (secciones «plásticas») no serán considerados aquí. Tampoco se tienen en cuenta en este artículo otros diversos fenómenos de inestabili-

dad general (por ejemplo, el pandeo lateral de las vigas) o de aplastamiento por efecto de acciones o reacciones localizadas, fenómenos que se suponen adecuadamente controlados, lo mismo que el resto de estados límites de la pieza. En principio, toda la exposición se limita al caso de las vigas metálicas de alma llena solicitadas en flexión simple.

Así, pues, a efectos prácticos, las vigas metálicas que cumplen las condiciones de sección semicompacta seguidamente expresadas, pueden calcularse ignorando los fenómenos de pandeo local (de nuevo es preciso señalar que el pandeo lateral y el aplastamiento de alma requieren siempre, en su caso, un estudio específico). Para las secciones semicompactas debe aplicarse el cálculo «elástico», tanto a nivel de sección (distribución de tensiones basada en la ley de Hooke), como a nivel de pieza o estructura completa (distribución de esfuerzos elásticamente compatible).

Por lo tanto, la adopción de tipologías de secciones «semicompactas» supone una considerable simplificación de los cálculos respecto de las soluciones «esbeltas», entendidas éstas como aquellas que exceden los límites de esbeltez de las secciones semicompactas (lo que determina la necesidad de un control apropiado de los fenómenos de pandeo local).

Para el caso particular de las vigas doble T o en cajón doblemente simétricas y solicitadas en flexión simple, las secciones deben cumplir las condiciones siguientes para poder ser consideradas como «semicompactas»:

- La relación altura/espesor de las almas no debe exceder de  $102 \cdot \varepsilon$ , siendo  $\varepsilon$  el parámetro definido posteriormente.
- La relación anchura/espesor de cada una de las alas de una cabeza en T comprimida no puede exceder de  $14 \cdot \varepsilon$ .
- Para la cara interior de una cabeza comprimida de una sección en cajón, la relación anchura/espesor no puede exceder del límite  $42 \cdot \varepsilon$ .
- Además de estas limitaciones, tomadas del Eurocódigo, los autores consideran necesario incorporar un control adicional en los paneles con tensiones tangenciales mayoradas superiores a  $0,4 \cdot f_y$  (siendo  $f_y$  el límite elástico del acero); en tal caso, la relación altura/espesor (almas) o anchura/espesor (cabezas) no debería exceder de  $71 \cdot \varepsilon$ , si no existen rigidizadores transversales, o de  $94 \cdot \varepsilon$ , en caso de existir rigidizadores transversales ultrarrígidos con separación no superior a la altura o anchura del recuadro; todo ello, salvo un control

más riguroso de las condiciones de abolladura.

El parámetro adimensional  $\varepsilon$ , que figura en los párrafos anteriores, depende del límite elástico del acero ( $f_y$ ), definiéndose por la expresión:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{235}{f_y}\right)}$$

con  $f_y$  en Newtons/mm<sup>2</sup>; numéricamente, su valor es:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1 && \text{para } f_y = 235 \text{ N/mm}^2 \text{ (2.400 kp/cm}^2\text{)} \\ \varepsilon &= 0,960 && \text{para } f_y = 255 \text{ N/mm}^2 \text{ (2.600 kp/cm}^2\text{)} \\ \varepsilon &= 0,924 && \text{para } f_y = 275 \text{ N/mm}^2 \text{ (2.800 kp/cm}^2\text{)} \\ \varepsilon &= 0,814 && \text{para } f_y = 355 \text{ N/mm}^2 \text{ (3.600 kp/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

### 3. EL METODO DE LAS TENSIONES CRITICAS

El método «clásico» para el control de los fenómenos de abolladuras de chapas, recogido, entre muchas otras, en la norma alemana DIN 4114 (referencia 6) y en la instrucción española em 62 (referencia 7), adopta, como magnitud representativa de la resistencia de las chapas a la abolladura producida por tensiones actuantes en su plano medio, la «tensión crítica» determinada según la teoría «linealizada» del pandeo de chapas. Dentro del dominio elástico, dicha tensión crítica recibe el calificativo de «ideal» ( $\sigma_{ki}$ ), y su deducción se efectúa en base a las siguientes hipótesis:

- Material elástico-lineal (hookeano). La consideración del comportamiento anelástico del material introduce una corrección de la tensión crítica, que pasa a denominarse «real» o «reducida» ( $\sigma_{k, red}$ ).
- Teoría de segundo orden en deformaciones. Debido a esta hipótesis, no puede reproducirse adecuadamente el comportamiento poscrítico, lo cual constituye uno de los principales inconvenientes de este método «clásico».
- No se consideran las imperfecciones geométricas (curvaturas iniciales) y mecánicas (tensiones residuales), cuya influencia sobre las tensiones últimas es, en realidad, muy significativa.
- Otras hipótesis propias de la teoría de la flexión de placas delgadas, tal como la hipótesis de Kirchoff, o condiciones de contorno ideales de articulación, borde libre, etc., pueden generalmente asumirse en la práctica como simplificaciones razonables.

La teoría «linealizada» de la abolladura de chapas metálicas está ampliamente desarrollada en multitud de textos clásicos y modernos, tales como las obras de Bleich (1952; referencia 8), Timoshenko y Gere (1961; referencia 9), Brush y Almroth (1975; referencia 10), Troitsky (1976; referencia 11), etc. Un excelente compendio de expresiones derivadas de dicha teoría, formuladas para su aplicación práctica al cálculo de piezas metálicas, se encuentra en la «guía» del SSRC (1976; referencia 2), así como en la norma ya citada em 62. La norma MV-103 (1972; referencia 12) se basa también en el concepto de tensión crítica, pero hay que advertir que al planteamiento de la comprobación de la inestabilidad de chapas en esta última norma caben varias objeciones importantes:

- Las tensiones críticas aparecen ficticiamente incrementadas en dicha norma en un 25 %, pretendidamente como un procedimiento aproximado para la introducción de la resistencia poscrítica. En realidad, dicho margen, según puede comprobarse por comparación con las tensiones últimas (apartado 4), es muy variable con la esbeltez de la chapa (puede ser incluso negativo), por lo que no es válido traducirlo en un coeficiente corrector constante.
- La corrección mencionada en el párrafo anterior queda enmascarada, en la norma MV-103, en la propia formulación de las tensiones críticas, lo cual puede crear alguna confusión cuando el verdadero valor de las mismas se requiere como instrumento para otros posibles cálculos; en DIN 4114 y em 62, las tensiones críticas aparecen, no obstante, correctamente formuladas como tales, aunque posteriormente las normas citadas corrigen el coeficiente de seguridad a aplicar (tampoco esta corrección es adecuada, si bien es de menor cuantía que en la Norma MV-103).
- La tensión crítica «real» o «reducida» en el dominio anelástico aparece expresada con importantes errores numéricos en la MV-103, según ha demostrado Ortiz (1978; referencia 13).
- Aunque fuera del ámbito del presente artículo, cabe también señalar que la formulación relativa a rigidizadores recogida en la citada norma MV-103 es más que discutible.

Por todo ello, en tanto no se reformen los actuales códigos españoles para dar cabida en ellos a los actuales modelos de comportamiento de las chapas metálicas ante la abolladura, hay que recomendar la aplicación de la instrucción em 62 en lugar de la norma MV-103, o mejor, claro está, la aplicación de los criterios más modernos a los que se pasa revista en los siguientes apartados.

#### 4. EL METODO DE LAS TENSIONES ULTIMAS

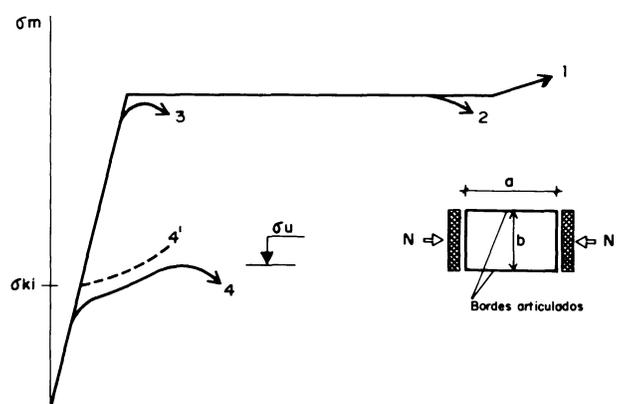
La figura 1 ilustra gráficamente el significado práctico de la nueva magnitud que se comenta en este apartado, la tensión última de la chapa ( $\sigma_u$ ); para simplificar esta presentación, ésta se refiere únicamente al caso de una chapa comprimida (sin gradiente de tensiones en ninguna de las direcciones contenidas en el plano de la chapa) y cuyos bordes longitudinales puedan suponerse articulados y sujetos transversalmente.

En la figura citada, se identifica la tensión última ( $\sigma_u$ ) como el máximo del diagrama tensión-desplazamientos; dicho máximo puede ser indistintamente mayor o menor que la tensión crítica correspondiente. En ordenadas se representa la tensión «media» de la chapa (cociente entre la sollicitación, N, y el área de la sección). En régimen poscrítico la distribución real de tensiones, según se indica posteriormente, no es uniforme, pero a efectos prácticos la chapa se comporta como si lo fuera, aunque reduciendo ficticiamente la resistencia del material al límite antedicho  $\sigma_u$ ; éste viene dado por las expresiones siguientes, tomadas del Eurocódigo 3/84, para el caso particular de chapa con ambos bordes longitudinales articulados y en ausencia de gradiente de tensiones:

$$\sigma_u = \frac{0,6 f_y}{\sqrt{(\bar{\lambda})^2 - 0,16}} \text{ si } \bar{\lambda} > 0,72 ; \sigma_u = f_y \text{ si } \bar{\lambda} < 0,72$$

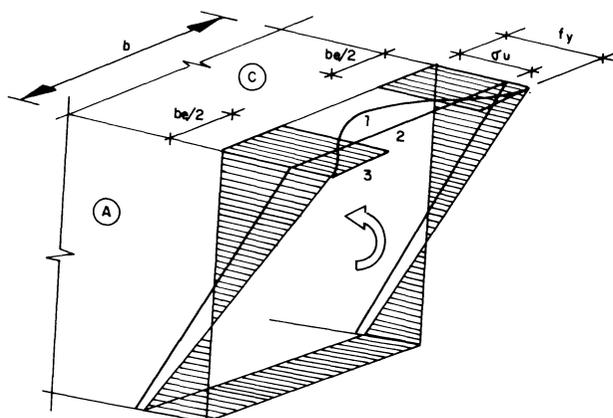
siendo:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{ki}}}$$



1.—Secciones «plásticas». 2.—Secciones «compactas». 3.—Secciones «semicompactas». 4.—Secciones esbeltas (análisis geométrica y mecánicamente no lineal, con imperfecciones geométricas y mecánicas). 4'.—Secciones esbeltas (análisis geoméricamente no lineal). u.—Acortamiento.  $\gamma_m = N/bt =$  tensión media ( $t =$  espesor de la chapa).  $\sigma_{ki} =$  tensión crítica ideal.  $\sigma_u =$  tensión última.

Fig. 1.—Comportamiento macroscópico de las chapas no rigidizadas comprimidas en su plano medio.



C Cabeza comprimida, con bordes longitudinales sujetos transversalmente.

A Alma (supuesta semicompacta).

1.—Distribución real de tensiones normales en agotamiento. 2.—Modelo de tensiones últimas. 3.—Modelo de sección eficaz.

Fig. 2.—Comparación de modelos de análisis para una sección en cajón flectada con cabeza comprimida esbelta y alma semicompacta.

La magnitud adimensional  $\bar{\lambda}$  recibe el nombre de esbeltez generalizada, relativa o reducida, y con formulaciones apropiadas de la correspondiente tensión crítica ideal, aparece con frecuencia en las modernas formulaciones de diversos problemas de pandeo de elementos metálicos.

La principal ventaja del método de las tensiones últimas radica en la fácil transcripción de los métodos clásicos de tensiones críticas: igual que en éstos, se opera con la distribución teórica de tensiones obtenida aplicando la teoría lineal usual sobre la sección original, sin modificación alguna. Tan sólo es preciso reemplazar las expresiones de las tensiones críticas «ideales» y «reales» por las correspondientes a las tensiones «últimas», más ajustadas al auténtico comportamiento de la chapa individual.

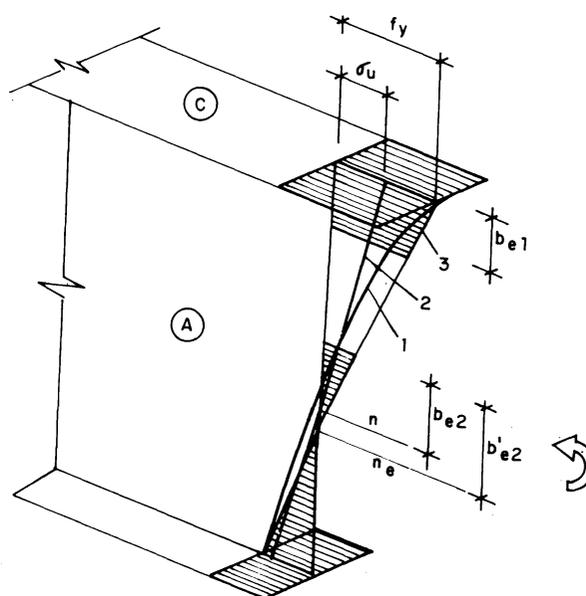
No obstante, este método presenta graves inconvenientes para su aplicación a las secciones usuales, en las que frecuentemente se combinan chapas de diferentes grados de esbeltez. Así, en la figura 2, se muestra el caso de una sección en cajón con cabeza comprimida esbelta, pero con alma semicompacta. En tal caso, el método de las tensiones últimas «obliga» a trabajar al alma al mismo límite tensional que la cabeza, más esbelta, lo cual, como se aprecia en la figura, infravalora claramente la capacidad resistente del alma y, por lo tanto, también la del conjunto de la sección.

Más frecuente en la práctica puede ser el caso de la figura 3, donde se combinan un alma esbelta con una cabeza comprimida en T «semicompacta». Para este tipo de sección, en el estado último

la cabeza comprimida alcanza de hecho el límite elástico, mientras que en el modelo de tensiones últimas, la tensión queda sujeta al límite ficticio correspondiente al alma esbelta. Por ello, el modelo de tensiones últimas no puede reproducir adecuadamente (salvo posibles modificaciones no reflejadas en el Eurocódigo) el comportamiento último de este tipo de secciones, para los que predice en general capacidades globales inferiores a los valores más precisos determinados por el método de la sección eficaz.

## 5. EL MÉTODO DE LA SECCION EFICAZ

Según muestran las figuras 2 y 3, en la fase de comportamiento poscrítico de una chapa esbelta la distribución real de tensiones normales difiere de la supuesta por la teoría «lineal». Así, en una cabeza comprimida, la distribución de tensiones normales deja de ser uniforme, desplazándose las tensiones máximas a los bordes. Aunque en esta etapa la chapa ha abandonado ya la forma plana, puede, no obstante, seguir admitiendo incrementos de sollicitación, hasta que la tensión máxima alcanza el límite elástico del material; existe una reserva resistente plástica adicional, pero generalmente es pequeña, y no se considera a efectos prácticos.



C Cabeza comprimida (supuesta semicompacta).

A Alma esbelta.

1.—Distribución real de tensiones en agotamiento. 2.—Modelo de tensiones últimas. 3.—Modelo de sección eficaz.  $n$ .—Fibra neutra de la sección original.  $n_e$ .—Fibra neutra de la sección eficaz.

Fig. 3.—Comparación de modelos de análisis para una sección doble T flectada con cabeza comprimida semicompacta y alma esbelta.

La explicación cualitativa de este fenómeno es sencilla si se imagina la chapa subdividida en bandas longitudinales y transversales: estas últimas, al pandear la chapa, se ven obligadas a trabajar como una membrana traccionada para acomodarse al desplazamiento transversal, y actúan por ello como una restricción o coacción elástica no lineal para la deformación de las bandas longitudinales comprimidas, por lo cual éstas pueden aun incrementar su sollicitación. Pero las bandas longitudinales centrales quedan menos coaccionadas por este efecto que las bandas más próximas a los bordes sujetos, lo cual explica que las últimas tomen más carga adicional que las primeras, estableciéndose una distribución tensional no uniforme. Esta explicación cualitativa del comportamiento poscrítico de las chapas puede encontrarse en los comentarios del Manual del AISI (1968, 1970, 1971; referencia 14); los desarrollos matemáticos correspondientes pueden seguirse, entre muchos otros, en los textos ya citados de Troitsky y de Brush y Almroth.

De la misma manera que en los fenómenos de «retraso de cortante», una distribución no homogénea de tensiones normales en la cabeza de una viga puede tratarse convenientemente a efectos prácticos mediante el concepto de «ancho eficaz», definido como la anchura ficticia de la chapa que, trabajando a la tensión máxima existente, produce el mismo efecto estático que las tensiones variables que realmente existen. Sin embargo, una diferencia importante con el retraso de cortante, anteriormente mencionado, es que el ancho eficaz asociado al fenómeno de pos-abolladura depende de la tensión máxima existente, lo cual pone de manifiesto el carácter no lineal de este fenómeno. No obstante, es muy sencillo eludir de una forma conservadora la complicación práctica que dicha no linealidad conlleva: puesto que el ancho eficaz disminuye a medida que aumenta la tensión máxima del material, basta adoptar el valor correspondiente al límite elástico, ya que el ancho eficaz real será siempre mayor o igual que el así determinado.

Son muy numerosas las formulaciones prácticas del ancho eficaz de las chapas en régimen poscrítico, siendo las más utilizadas las propuestas por von Kármán, Conley, Faulkner, Winter y otros investigadores; un repertorio amplio de fórmulas puede encontrarse en la «guía» ya citada del SSRC, y en el trabajo de Dubas (1983; referencia 15). El Eurocódigo 3/84 maneja una de las fórmulas de Winter, que expresa el ancho eficaz en la forma:

$$b_e = b \cdot \left( 1 - 0,22 \sqrt{\left| \frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d} \right|} \right) \cdot \sqrt{\left| \frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d} \right|}$$

siendo  $\sigma_{ki}$  la tensión crítica ideal (apartado 3) y  $\sigma_d$  la tensión máxima ponderada. Cuando ésta se

reemplaza por el límite elástico del material, se obtiene:

$$b_e = \frac{b}{\bar{\lambda}} \cdot \left( 1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}} \right)$$

siendo  $\bar{\lambda}$  la misma magnitud adimensional introducida en el apartado 4 (esbeltez generalizada, reducida o relativa).

Una vez determinado el ancho eficaz de la chapa, simplemente se reemplaza el ancho real de la misma por dicho ancho eficaz y se aplica la teoría lineal usual; es decir, se obtienen las constantes estáticas de la sección eficaz (centro de gravedad, momento de inercia, módulos resistentes), se calculan las tensiones normales ponderadas, y las mismas se limitan al límite elástico del material. Esta forma de proceder, válida en caso de que el único esfuerzo actuante sobre la sección sea un momento flector, se generaliza posteriormente para el caso de flector y cortante combinados. Se recuerda, asimismo, la hipótesis de que la pieza se encuentra arriostrada frente al pandeo lateral y que los restantes estados límites deben estar, asimismo, adecuadamente controlados.

Para las almas esbeltas, según se aprecia en la figura 3, es preciso establecer un criterio de reparto del ancho eficaz en dos bloques,  $b_{e1}$  y  $b_{e2}$ , para lo cual existe una diversidad de criterios propuestos en la literatura. Con el propósito de orientar, más que confundir, que preside este artículo, se indican solamente unos pocos de dichos criterios, considerados de mayor interés; todos ellos se refieren al caso particular de una sección doble T doblemente simétrica, de alma esmelta y cabezas semicompactas, sollicitada en flexión pura:

- El Eurocódigo 3/84 distribuye el ancho eficaz en dos fracciones,  $\frac{b_e}{3}$  del lado comprimido y  $\frac{2b_e}{3}$  del lado traccionado, con la particularidad de que este último bloque se toma, no a partir de la fibra neutra (como aparece representado en la figura 3), sino a partir de la fibra inferior del alma. A pesar de que los resultados numéricos globales son homologables con los de otros métodos, el supuesto por el Eurocódigo presenta la incoherencia de que, generalmente, parte de la zona del alma deformada en tracción se considera «ineficaz» a efectos tensionales, lo que resulta, cuando menos, paradójico. Además, presenta algunos inconvenientes de tipo práctico, tales como que el reparto del ancho eficaz puede diferir del anteriormente indicado, quedando en función de la posición de la fibra neutra, y obligando por ello a iteraciones incómodas; además, no se presenta en el Eurocódigo una expresión

aproximada directa para el módulo resistente de la sección eficaz, mientras que otros métodos incluyen dichas expresiones aproximadas, que resultan de gran utilidad práctica. Por todo ello, los autores de este artículo recomiendan la aplicación de los criterios de sección eficaz alternativos seguidamente expuestos, y entienden, además, con Dubas (referencia 15), que la formulación del Eurocódigo debería ser reformada en este aspecto.

- El criterio, ya clásico, de Basler y Thurlimann (referencia 2), establece los valores siguientes:  $b_{e1} = 30 \cdot t \cdot \varepsilon$  (ver definición de  $\varepsilon$  en el apartado 2;  $t$ , por su parte, es el espesor del alma); y  $b'_{e2} = 0$  (ver figura 3). Este criterio, recogido en la norma americana AISC (1978; referencia 16) y por el comité ASCE/LFRD (1978; referencia 17) tiene el inconveniente de requerir un ajuste de la sección eficaz: al ser  $b'_{e2} = 0$ , es preciso conseguir que la fibra neutra de tensiones, que marca el comienzo de la zona ineficaz del alma, coincida con el baricentro de la propia sección eficaz, como corresponde a un problema de flexión pura, y ello obliga, bien a un ajuste por tanteos sucesivos, bien a la resolución de una ecuación de segundo grado. Sin embargo, esta incomodidad se resuelve aplicando la siguiente expresión aproximada, que proporciona de manera directa el módulo resistente de la sección eficaz, referido a la fibra extrema comprimida:

$$W_{\text{sup}} \approx W \cdot \left\{ 1 - 0,0005 \cdot \frac{A_w}{A_f} \left[ \left( \frac{h}{t} \right) - \left( \frac{h}{t} \right)_y \right] \right\} \triangleright W,$$

siendo:

- $W$  : momento resistente de la sección original sin reducir.
- $A_f, A_w$  : áreas de la cabeza comprimida y del alma (ídem).
- $h, t$  : canto y espesor del alma.
- $\left( \frac{h}{t} \right)_y$  : relación  $\frac{h}{t}$  límite para las secciones semicompactas, igual a  $166 \cdot \varepsilon$ , según Basler y Thurlimann, o  $102 \cdot \varepsilon$ , según el Eurocódigo (ver apartado 2).

- Por último, el método de Höglund (referencias 2 y 3) obvia los diversos inconvenientes prácticos citados y mantiene una aproximación adecuada. Este método refiere  $b_{e2}$  (ver figura 3) a la fibra neutra de la sección original, con lo que desaparece la necesidad de ajustar la sección eficaz, la cual queda definida de modo directo. Los bloques propuestos por Höglund son  $b_{e1} = 23 \cdot t \cdot \varepsilon$  y  $b_{e2} = 49 \cdot t \cdot \varepsilon$  (ver

figura 3). Además, se dispone de una fórmula aproximada para que  $W_{\text{sup}}$  análoga a la del método de Basler y Thurlimann, que en este caso se expresa como sigue:

$$W_{\text{sup}} \approx W \cdot \left\{ 1 - 0,15 \cdot \frac{A_w}{A_f} \cdot \left[ 1 - \frac{\left( \frac{h}{t} \right)_y}{\left( \frac{h}{t} \right)} \right] \right\} \triangleright W,$$

donde ahora  $\left( \frac{h}{t} \right)_y = 144 \cdot \varepsilon$ , ó  $102 \cdot \varepsilon$ , según el Eurocódigo. El criterio anterior admite una generalización sencilla para secciones «híbridas» (constituidas por aceros de distinto límite elástico).

Para secciones solicitadas en flexión simple (flector y cortante concomitantes), el Eurocódigo propone un sencillo criterio de interacción, que coincide en varios aspectos con la norma suiza SIA 161 (1979; referencia 18). La expresión del cortante último incluida en este criterio es:

$$V_u = h \cdot t \cdot \tau_u, \text{ siendo } \tau_u = 0,9 \cdot \sqrt{(\tau_{ki} \cdot \tau_y)} \triangleright \tau_y,$$

con  $\tau_{ki}$  igual a la tensión tangencial crítica ideal (ver apartado 3), y  $\tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$ . Esta expresión es válida

para las almas esbeltas no rigidizadas consideradas en este artículo (siempre, claro está, pueden ser necesarios rigidizadores en las secciones de apoyo y/o bajo cargas puntuales importantes). El cortante ponderado debe cumplir la limitación:  $V_d \leq V_u$ ; y, por su parte, el flector ponderado debe verificar:

$$M_d \leq M_f + (M_u - M_f) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{V_d}{V_u} \right)^2 \right],$$

siendo  $M_u = W_{ef} \cdot f_y$ , en donde  $W_{ef}$  es el menor de los dos módulos resistentes de la sección eficaz (el referido a la fibra superior o el referido a la fibra inferior). El parámetro  $M_f$  es igual al momento del par de fuerzas constituido por las cabezas comprimida y traccionada trabajando al límite elástico.

El modelo de Höglund incluye también expresiones de  $\tau_u$ , que, para el caso de las almas no rigidizadas, coincide prácticamente con el criterio del Eurocódigo.

## 6. FLEXION SIMPLE: METODO DEL CAMPO DE «TRACCIONES DIAGONALES»

Aunque el análisis poscrítico de las secciones rigidizadas no forma parte del objeto del presente

artículo, parece conveniente la mención de un método, presente en el Eurocódigo, que cuantifica el comportamiento último de una viga doble T doblemente simétrica solicitada en flexión simple, bajo la hipótesis de que el alma está dotada de rigidizadores verticales que deben cumplir una serie de condiciones específicas. Si el alma carece de rigidizadores (salvo los posibles rigidizadores necesarios por aplastamiento de apoyos, etc.), las tensiones principales, que en el baricentro de la sección están inclinadas  $\pm 45^\circ$  en la fase lineal, en la fase poscrítica varían su inclinación, al tiempo que se mantienen aproximadamente constantes las tensiones de compresión y aumenta el valor de las tracciones. Ello proporciona una cierta reserva resistente poscrítica, que está incluida en la formulación de la tensión tangencial última recogida al final del apartado 5.

Un mecanismo resistente distinto aparece en las almas que poseen rigidizadores transversales adecuados. En las mismas, en la fase poscrítica se desarrolla, superpuesto al estado tensional existente en el instante del inicio de la abolladura, un campo o banda de tensiones de tracción inclinadas, cuya orientación no coincide exactamente con las diagonales geométricas de los recuadros del alma, pero que recuerdan a las diagonales traccionadas de una viga triangulada Pratt. De la misma manera que en ésta los montantes trabajan a compresión, también en la viga de alma llena, en la fase poscrítica, los rigidizadores verticales absorben los esfuerzos de compresión necesarios para el mantenimiento del equilibrio del sistema. El correcto dimensionamiento de dichos rigidizadores es, pues, primordial para el funcionamiento efectivo de este esquema resistente, que proporciona reservas resistentes poscríticas muy considerables. Más importantes, si cabe, son los rigidizadores de extremo de la pieza, que no sólo deben ser capaces de resistir las compresiones antedichas, sino, además, los esfuerzos de flexión derivados de que la banda de tracciones del último recuadro no queda compensada por otra adyacente, introduciendo componentes de fuerzas perpendiculares al rigidizador, precisamente en el recuadro donde normalmente el esfuerzo cortante es máximo. Un efecto similar, también relacionado con el carácter no puntual, sino distribuido, de las tracciones poscríticas, se produce en las cabezas de la viga, que quedan solicitadas en flexión compuesta, y desarrollan rótulas plásticas que intervienen en el mecanismo de colapso.

Desgraciadamente la formulación de este fenómeno que figura en el Eurocódigo, lo mismo que la mayor parte de modelos al respecto, resulta considerablemente farragosa y su aplicación práctica no es tan sencilla e inmediata como los modelos poscríticos comentados en los apartados previos de este artículo. De nuevo el criterio dado por Höglund aparece como uno de los más sencillos, relativamente. Su formulación puede encontrarla el lector interesado en las referen-

cias 2 y 3. En las piezas de gran canto en las que el esfuerzo cortante no sea la sollicitación dominante, la formulación recogida al final del apartado 5 de este artículo, que incluye una cierta reserva poscrítica ante las tensiones tangenciales, pero que no integra el efecto favorable de los posibles rigidizadores transversales (salvo por su efecto sobre  $\tau_{ki}$ ), puede ser suficiente para un análisis adecuado, con un nivel de complicación reducido.

## 7. CONCLUSIONES

El presente artículo, cuyo objeto es la divulgación de los nuevos métodos de análisis poscríticos de las vigas metálicas esbeltas, no rigidizadas, pretende establecer, de cara a la utilización práctica de dichos métodos en fase de Proyecto, las siguientes conclusiones, que en varios aspectos coinciden con las opiniones ya manifestadas por otros autores (Dubas; referencia 15):

- Los modelos de análisis poscrítico antedichos están suficientemente desarrollados, incluso a nivel normativo, para su utilización sistemática por los Projectistas de estructuras metálicas.
- El nivel de complicación inherente a los mismos es similar, e incluso menor, que el de los métodos clásicos de tensiones críticas.
- El método denominado de las tensiones últimas propuesto en el Eurocódigo presenta determinadas incoherencias que lo hacen excesivamente conservador para tipos de secciones usuales, no siendo adecuado para reproducir adecuadamente el comportamiento último de muchas secciones.
- El método de la sección eficaz aparece como el más adecuado para su utilización práctica, por su buen ajuste al comportamiento último y por su sencillez de aplicación.
- El modelo concreto de sección eficaz propuesto por el Eurocódigo es menos adecuado, tanto a nivel teórico como práctico, que otros modelos suficientemente contrastados, de entre los cuales los autores de este artículo destacan el método de Höglund.
- Para las vigas metálicas de alma llena esbelta y no rigidizada, solicitadas en flexión simple, en las que el esfuerzo cortante no sea la sollicitación dominante, es francamente sencillo obtener el pleno beneficio de la fase de comportamiento poscrítico del alma.

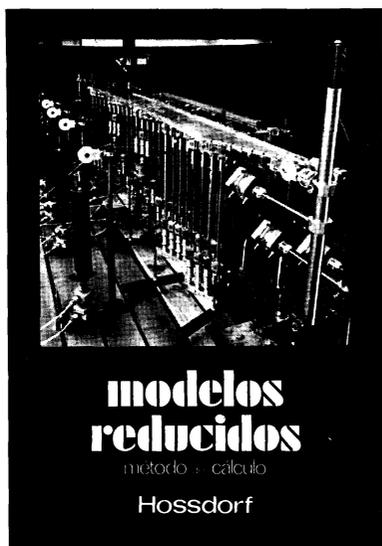
Otros estados límites, tales como el aplastamiento del alma bajo acciones o reacciones localizadas, pandeo lateral, etc., no han sido incluidos explícitamente en esta exposición, pero como es lógico deben ser adecuadamente controlados.

## REFERENCIAS

1. EUROCODE 3: «Règles unifiées communes pour les constructions en acier». Commission des Communautés Européennes. «Procédés industriels, bâtiment et génie civil», 1984.
2. SSRC: «Guide to stability design criteria for metal structures». 3rd edition, Wiley, 1976.
3. ECCS: «Manual on Stability of Steel Structures», 1976.
4. BJORHOVDE, R.: «Research Needs in Stability of Metal Structures». ASCE-SD, December, 1980.
5. ROCKEY, K. C. y EVANS, H. R.: «The Design of Steel Bridges», Granada, 1981.
6. DIN 4114: «Bases para el cálculo sobre inestabilidad de las estructuras de acero (pandeo, pandeo lateral, abolladura)», 1952 y 1953.
7. EM 62: «Instrucción para estructuras de acero», IETCC, 1969.
8. BLEICH, F.: «Buckling Strength of Metal Structures», McGraw-Hill, 1952.
9. TIMOSHENKO, S. y GERE, J. M.: «Theory of Elastic Stability», McGraw-Hill, 1961.
10. BRUSH, D. O. y ALMROTH, B. O.: «Buckling of Bars, Plates and Shells», McGraw-Hill, 1975.
11. TROITSKY, M. S.: «Stiffened Plates: Bending, Stability and Vibrations», Elsevier, 1976.
12. NBE-MV-103/1972: «Cálculo de las estructuras de acero laminado en la edificación», MOPU, 1972.
13. ORTIZ HERRERA, J.: «Nota relativa al abollamiento de almas metálicas en régimen anelástico según la Norma Básica MV-103/1972». Revista de Obras Públicas, ETS de ICCP, Madrid, núm. 3.154, 1978.
14. AISI: «Cold-Formed Steel Design Manual», Part I Specification (1968), Part V - Comentario (1970), Part II - Supplementary Information (1971), American Iron and Steel Institute.
15. DUBAS, P.: «Voilement postcritique des poutres à âme mince sans raidisseurs longitudinaux», Construction Métallique, CTICM, núm. 2, 1983.
16. AISI: «Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings», American Institute for Steel Construction, 1978.
17. COOPER, P. B.; GALAMBOS, T. V., y RAVINDRA, M. K.: «LFRD Criteria for Plate Girders», ASCE-SD, Sept., 1978.
18. SIA 161: «Constructions métalliques», Société suisse des ingénieurs et des architectes, 1979.

\* \* \*

## publicaciones del I.E.T.c.c.



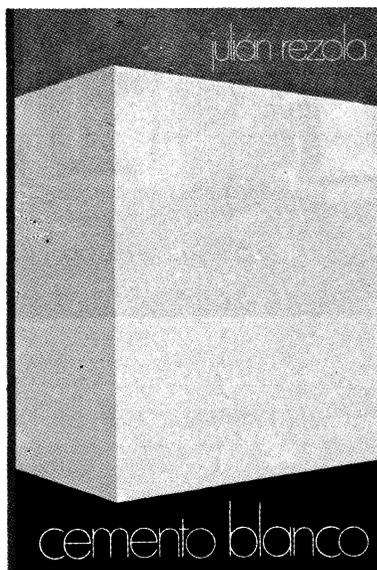
### Modelos reducidos. Método de cálculo

H. Hossdorf, Ingeniero Civil

La técnica de los ensayos en modelos reducidos de estructuras sufre hoy día una decisiva metamorfosis. Hasta hace poco era un medio más bien de artesanía, que no siempre era tomado en serio por los académicos teorizantes para comprender el comportamiento resistente de las estructuras complejas y al que se acudió las más de las veces, como a un último remedio debido a sus indiscutibles insuficiencias. Sin embargo, en poco tiempo y gracias a su conexión con los ordenadores digitales, se ha transformado en un instrumento científicamente valioso, que no puede quedar a un lado en la práctica diaria del Ingeniero Projectista.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 17 x 24 cm, compuesto de 250 páginas, 158 figuras y fotografías.

Precios: 1.800 ptas.; \$ USA 26.00.



### Cemento blanco

Julián Rezola  
Ingeniero Químico Dipl. I. Q. S.

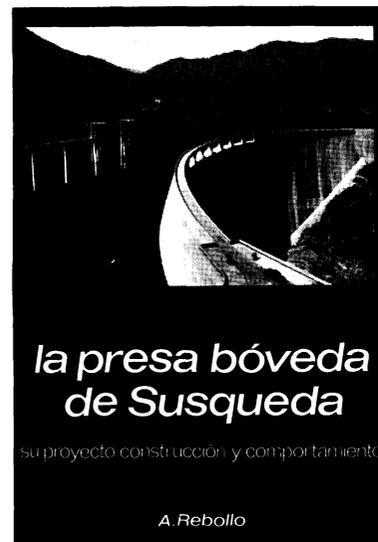
Sabido es que existe una extensa y documentada bibliografía sobre el cemento gris: en cambio, no puede decirse lo mismo acerca del cemento portland blanco, ya que los escritos existentes se refieren tan sólo a algunas peculiaridades que le distinguen de aquél.

El autor nos ofrece sus profundos conocimientos y su larga experiencia tanto en laboratorio como en fabricación.

La parte descriptiva del libro se complementa con gráficos, diagramas y fotografías de gran utilidad, destinados a conseguir la aplicación apropiada de este aglomerante.

Un volumen encuadernado en cartón policerado, de 17,4 x 24,3 cm, compuesto de 395 páginas, numerosas figuras, tablas y ábacos.

Precios: España, 1.700 ptas.; extranjero, \$ 24.



### La presa bóveda de Susqueda

A. Rebollo,  
Dr. Ingeniero de Caminos

El esfuerzo del constructor de presas se sitúa, por su pretensión de perennidad, a contracorriente de las tendencias de la civilización actual, caracterizada por lo fungible. Pueden evocarse las 10.000 grandes presas en funcionamiento o en construcción que están envejeciendo y reclaman los cuidados gerontológicos para mantener y perfeccionar su servicio y garantizar su inalienable pretensión de perennidad. En la medida en que todas nuevas obras, grandes o pequeñas, son portadoras de riesgos ecológicos y, a veces, catastróficos, que aumentan con el envejecimiento, la gerontología de las presas es todo un emplazo. La acción adelantada de Arturo Rebollo en este terreno marca un camino a seguir para todos los que aman su propia obra con la devoción paternal que él ha puesto en Susqueda.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 18 x 24,5 cm, compuesto de 408 páginas, 330 figuras y fotografías y 39 tablas.

Precios: 1.700 ptas.; extranjero, \$ USA 24.00.