11

Construcción con chapa de pequeño espesor

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 11

CONSTRUCCIÓN CON CHAPA DE PEQUEÑO ESPESOR

Lección 11.1: Elementos de Pequeño Espesor y Cerramientos 1

1 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE PERFILES EN FRÍO 4
1.1 Productos y usos típicos 5
1.2 Aplicaciones 5
1.3 Ventajas 5
1.4 Fabricación 6
1.5 Materiales 7
1.6 Efectos de la conformación en frío 7
1.7 Uniones 9
1.8 Reglamentos 9
2 COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO 11
2.1 Generalidades 11
3 ABOLLADURA Y CONCEPTO DE ANCHURA EFICAZ 13
3.1 Elementos con apoyo doble y simple 14
3.2 Secciones transversales eficaces 15
3.3 Pandeo y aplastamiento del alma 16
3.4 Pandeo lateral por torsión 17
3.5 Interacción del pandeo local y el pandeo global 18
4 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS 19
4.1 Notas para una buena práctica 19
4.2 Influencia de la flexibilidad de la unión 19
5 RESUMEN FINAL 20
6 BIBLIOGRAFÍA 20

Lección 11.2: Procedimientos de Cálculo para Pilares 21

1 INTRODUCCIÓN 24
2 PREPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO 25
3 CÁLCULO DE PILARES SOMETIDOS A CARGA AXIAL 31
4 RESUMEN FINAL 34
5 BIBLIOGRAFÍA 34

Lección 11.3: Procedimientos de Cálculo para Vigas 35

1 GENERALIDADES 38
2 PREPARACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO 39
2.1 Momento Resistente M_d 39
2.1.1 Momento resistene plástico 39
2.1.2 M_d respecto al pandeo 39
2.2 Deformación Por Cortante 40
2.3 Alabeo del Ala 40
2.4 Restricciones Laterales y de Torsión 41
3 CÁLCULO DE VIGAS 42
3.1 Cálculo de Vigas sin Pandeo Lateral-Torsional 43
3.2 Cálculo de Vigas con Pandeo Lateral 43
3.3 Cálculo en Torsión 43
4 CÁLCULO DE CORREAS 45
4.1 Secciones transversales 45
4.2 Sistemas de correas 45
4.3 Procedimientos de cálculo 46
4.4 Comprobación de la Estabilidad 47
4.5 Cálculo de Sistemas Especiales de Correas 47
4.5.1 Sistemas de tramo único 47
4.5.2 Sistemas de tramo doble con secciones transversales continuas 47
4.5.3 Sistemas de solape y manguito 48
4.6 Otros aspectos del cálculo 48
4.7 Cálculo por Ensayos 49

4.8 Algunos aspectos prácticos 50
4.8.1 Conexión de correas a pórticos 50
4.8.2 Fuerzas en el plano del cerramiento 50
4.8.3 Prevención del pandeo lateral 51
5 RESUMEN FINAL 52
6 BIBLIOGRAFÍA 52

Problema Resuelto 11.2: Cálculo de una correa 53

1 SISTEMA Y CARGA 56
2 PROPIEDADES DE LA SECCIÓN 57
3 SECCIÓN EFICAZ BRUTA PARA EL PANDEO 58
4 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE LA SECCIÓN 63
5 TENSIONES DEBIDAS AL COMPORTAMIENTO A TORSIÓN Y A FLEXIÓN LATERAL 64
6 CÁLCULO 68
RESUMEN FINAL 73

Lección 11.4: Procedimiento de cálculo para chapado 75

1 INTRODUCCIÓN-TIPOS DE CERRAMIENTO 78
2 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO 81
3 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO PARA CHAPA TRAPEZOIDAL 84
3.1 Procedimientos de Cálculo de Flexión 84
3.1.1 Parte eficaz del alma 85
3.1.2 Efecto de alabeo del ala 85
3.1.3 Efecto de la deformación por cortante 85
3.1.4 Efecto de los rigidizadores intermedios en las alas y las almas 85
3.1.5 Efecto de la plasticidad en la zona a tracción 86
3.2 Procedimientos de cálculo de cortante 87
3.3 Procedimientos de cálculo de abolladura del alma 87
3.4 Procedimientos de cálculo para la interacción de la flexión y las reacción en el apoyo 87

3.5 Procedimientos de cálculo para el desarrollo de la redistribución de momentos 88
3.6 Procedimientos de cálculo para la estimación de la rigidez a la flexión 89
4 RESUMEN FINAL 90
5 BILIOGRAFÍA 90
6 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 90

Problema Resuelto 11.3: Proyecto de Cerramiento Trapezoidal 91

PROBLEMA 95
DATOS 95
1 CÁLCULO DEL MOMENTO FLECTOR RESISTENCIA Y RIGIDEZ 96
2 RESISTENCIA A CORTANTE 102
3 RESISTENCIA CONTRA LA INESTABILIDAD DEL ALMA 103
4 PROYECTO 105
OBSERVACONES FINALES 107

Lección 11.5: Diseño de Cubierta Pretensada 109

1 INTRODUCCIÓN-PRINCIPIOS DE CÁLCULO 115
1.1 Acción del entramado 115
1.2 Formas de construcción adecuadas 115
1.3 Ventajas, condiciones y limitaciones 116
1.4 Tipos de entramados 117
2 RESISTENCIA DE LOS ENTRAMADOS DE CORTANTE 119
2.1 Principios 119
2.2 Expresiones del cálculo 119
3 FLEXIBILIDAD DE LOS ENTRAMADOS DE CORTANTE 121
3.1 Principios 121
3.2 Expresiones del cálculo 121
4 APLICACIÓN DEL PROYECTO DE CUBIERTA PRETENSADA 124
4.1 Entramado de cortante con pórtico simple 124

4.2 Entramado de cortante con pórticos rígidos 124
4.3 Entramados complejos 125
4.4 Aperturas en entramados 125
4.5 Arriostramiento del entramado 125
4.6 Método simplificado de cálculo 126
5 RESUMEN FINAL 127
6 BIBLIOGRAFÍA 127
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 127

Problema Resuelto 11.1 (i), (ii) y (iii): Diseño de Cubierta Pretensada .. 129

INFORMACIÓN 133
CASO 11.1 (i) PÓRTICOS ARTICULADOS-EL ENTRAMADO DE LA CUBIERTA SOPORTA TODA LA CARGA DEL VIENTO .. 136
CASO 11.1 (ii) PÓRTICOS RÍGIDOS-PÓRTICOS EXENTOS SOPORTANDO TODA LA CARGA DEL VIENTO 141
CASO 11.1 (iii) PÓRTICOS RÍGIDOS-LOS PÓRTICOS ACTÚAN CONJUNTAMENTE CON EL ENTRAMADO DE LA CUBIERTA 142
CONCLUSIONES 143

Lección 11.6: Uniones 145

1 INTRODUCCIÓN 148
2 TIPOS DE UNIÓN 149
3 TIPOS DE ELEMENTOS DE UNIÓN 151
3.1 Elemetos mecánicos de unión 151
3.2 Soldaduras 154
4 CÁLCULO DE UNIONES 156
4.1 Requisitos generales 156
4.2 Fuerzas en las uniones 157
4.3 Modos de Colapso de las Uniones 160
4.3.1 Elementos de fijación mecánicos 160
4.3.2 Modos de colapso de conexiones soldadas 162

4.4 Aplicaciones 162
4.4.1 Fijación de chapa exterior perfilada a bandejas 162
4.4.2 Fijación de chapa perfilada exterior a chapa perfilada interior con perfiles en Z 163
5 RESUMEN FINAL 165
6 BIBLIOGRAFÍA 165
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 165

Lección 11.7: Aplicaciones de la Construcción con Chapas de pequeño espesor 167

1 INTRODUCCIÓN 170
1.1 Productos Disponibles 171
1.1.1 Chapa perfilada 171
1.1.2 Perfiles 173
1.1.3 Paneles Sandwich 173
2 CONSTRUCCIÓN MIXTA 175
2.1 Perfiles en Frío y Chapa 175
2.2 Chapa Perfilada y Hormigón 175
2.3 Elementos de Fijación 175
3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS 177
3.1 Acústica 177
3.2 Resistencia al incendio 177
3.3 Condensación 177
3.4 Durabilidad 177
4 UTILIZACIÓN EN SERVICIO 179
5 TIPOS DE ESTRUCTURAS LIGERAS 180
5.1 Edificios industriales 180
5.2 Viviendas 183
5.3 Acomodación temporal 184
5.4 Almacenamiento 184
6 RESUMEN FINAL 185
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 185
DIAPOSITIVAS COMPLEMENTARIAS 187

ESDEP TOMO 11
CONSTRUCCIÓN CON CHAPA DE PEQUEÑO ESPESOR

Lección 11.1: Elementos de Pequeño Espesor y Cerramientos

OBJETIVOS/CONTENIDO

Presentar los elementos conformados en frío y explicar su fabricación, aplicaciones y diseño.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 8.2: Criterios Generales de Estabilidad Elástica

Lecciones 8.6: Pandeo de Elementos Estructurales Reales

Lección 10.1: Introducción al Comportamiento y Diseño de Placas

LECCIONES DE REFERENCIA

Lección 3.4: Calidades y Tipos del Acero

Lección 5.2.1: Corrosión en Edificios

Lección 16.1.1: Edificios de Una Sola Planta: Introducción y Estructura Primaria

RESUMEN

En esta lección se presentan las secciones y elementos conformados en frío; se explican los métodos de fabricación y las aplicaciones y se muestra cómo estas secciones presentan ciertas ventajas respecto a otras estructuras de acero más convencionales. Se explican los métodos de diseño que se utilizan generalmente y se facilitan consejos sobre consideraciones prácticas.

1. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE PERFILES EN FRÍO

Anteriormente, el uso de secciones de acero de pequeño espesor conformadas en frío se limitaba principalmente a productos en los que el ahorro de peso tenía una importancia primordial, por ejemplo, en la industria aeronaval, ferroviaria y del motor. Durante aproximadamente cien años se han utilizado también, como elementos no estructurales, en edificios, tipos simples de perfiles en frío (principalmente similares a las formas laminadas en caliente), así como perfiles de cerramiento.

El trabajo sistemático de investigación realizado durante las cuatro últimas décadas, así como el perfeccionamiento de la tecnología de fabricación, la protección contra la corrosión, una mayor resistencia de los materiales y la disponibilidad de normas prácticas de diseño, han ampliado el uso de perfiles en frío en la industria de la construcción. En numerosos países, la construcción con acero conformado en frío es el

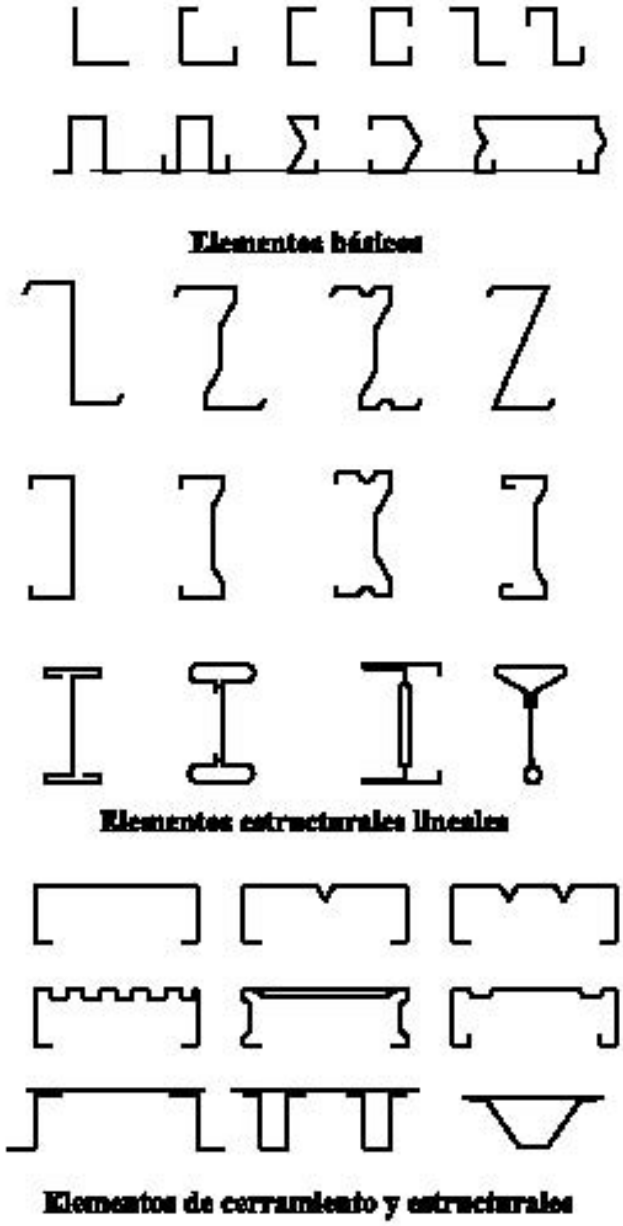


Figura 1 Elementos conformados en frío

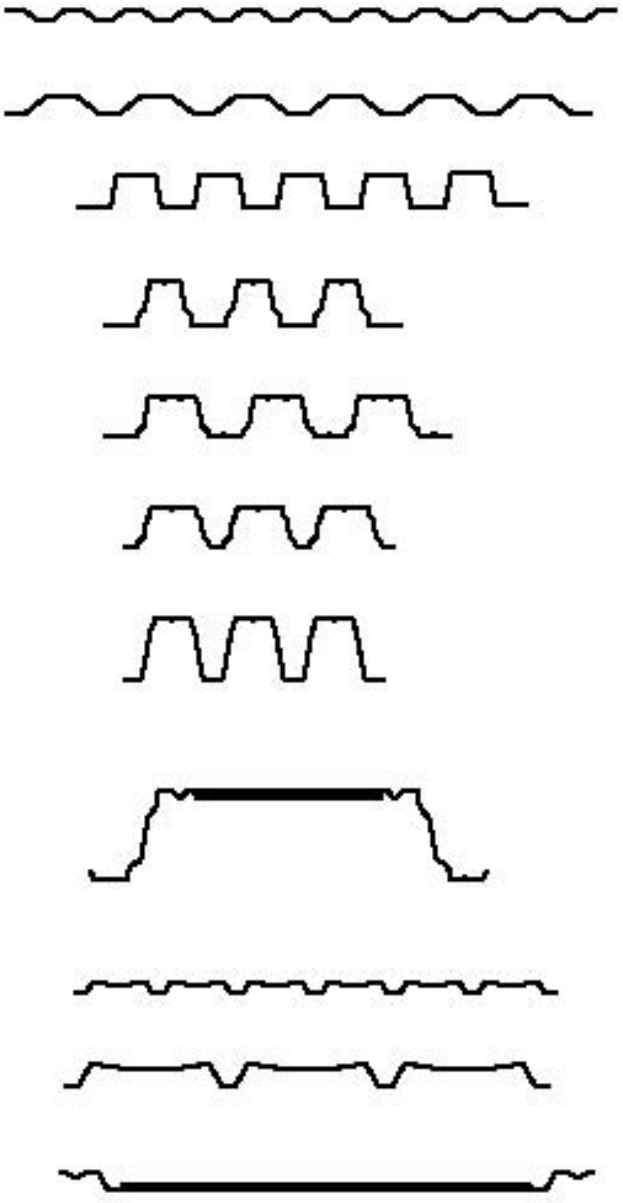


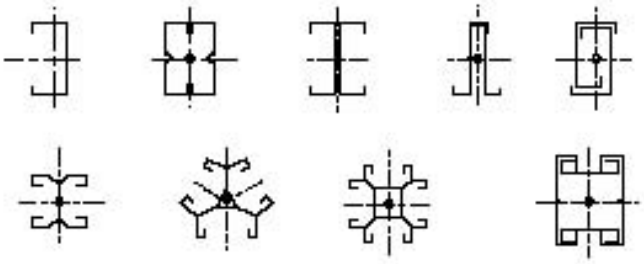
Figura 2 Chapa perfilada

sector del mercado del acero estructural que registra un crecimiento más rápido.

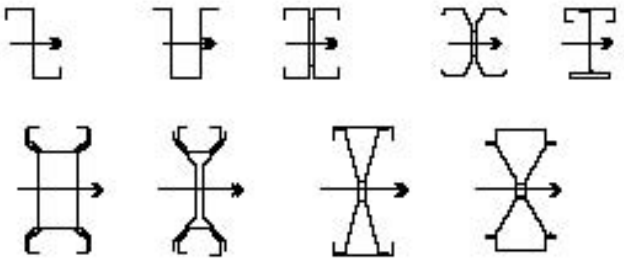
1.1 Productos y usos típicos

Los perfiles en frío son elementos prismáticos, con un espesor de chapa constante, formados mediante una secuencia de sub-elementos planos y pliegues para desempeñar funciones específicas de resistencia de cargas para elementos y también, a veces, una función de cerramiento (véanse las figuras 1-3).

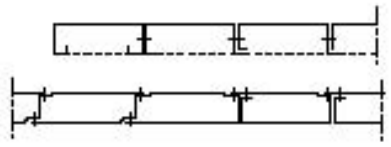
Una característica propia de los perfiles en frío es que las piezas esbeltas sometidas a compresión se rigidizan mediante plegado (rigidizadores intermedios y en los bordes), lo cual retarda o evita el pandeo prematuro de las zonas sometidas a compresión. Este fenómeno se explica en el apartado 2.



Elementos estructurales adecuados para esfuerzos de compresión y tracción



Elementos estructurales adecuados para momentos flectores



Elementos de cerramiento adecuados para acciones combinadas

Figura 3 Elementos constructivos basados en secciones conformadas en frío

1.2 Aplicaciones

Los tipos de productos disponibles para su utilización en estructuras de edificios son:

- elementos lineales, utilizados principalmente en la gama más alta de espesores, como vigas para cargas comparativamente bajas en vanos pequeños (correas y carriles), como pilares y apoyos verticales y en cerchas.

- elementos planos estructurales en la gama más baja de espesores, y con resistencia a las cargas, se utilizan en los casos en que se requiere una función de cerramiento de con cargas moderadamente distribuidas, por ejemplo en suelos, paredes y cubiertas.

Por lo tanto, los elementos de construcción de pequeño espesor conformados en frío se utilizan principalmente en edificios bajos y edificios industriales ligeros con vanos pequeños, en los que la combinación de perfiles en frío y perfiles de cerramiento puede ser óptima. El diseño de cerramientos resistentes con perfiles de revestimiento puede tener también aplicaciones en el interesante campo de estructuras espaciales tales como láminas plegadas o láminas parabólicas hiperbólicas.

1.3 Ventajas

El uso de elementos estructurales conformados en frío ofrece numerosas ventajas en las construcciones en las que se utilizan más elementos de acero estándar;

- la forma de la sección puede optimizarse para utilizar el material de la mejor manera.
- existen muchas posibilidades para la innovación (en la práctica, esto ha demostrado ser muy significativo).
- los elementos conformados en frío combinados con revestimiento ofrecen soluciones económicas y fiables que desempeñan una función de cerramiento y resistencia lateral contra el pandeo. Los edificios industriales ligeros construidos con elementos conformados en frío y revestimiento son un ejemplo de la combinación de estos dos efectos (figura 4).

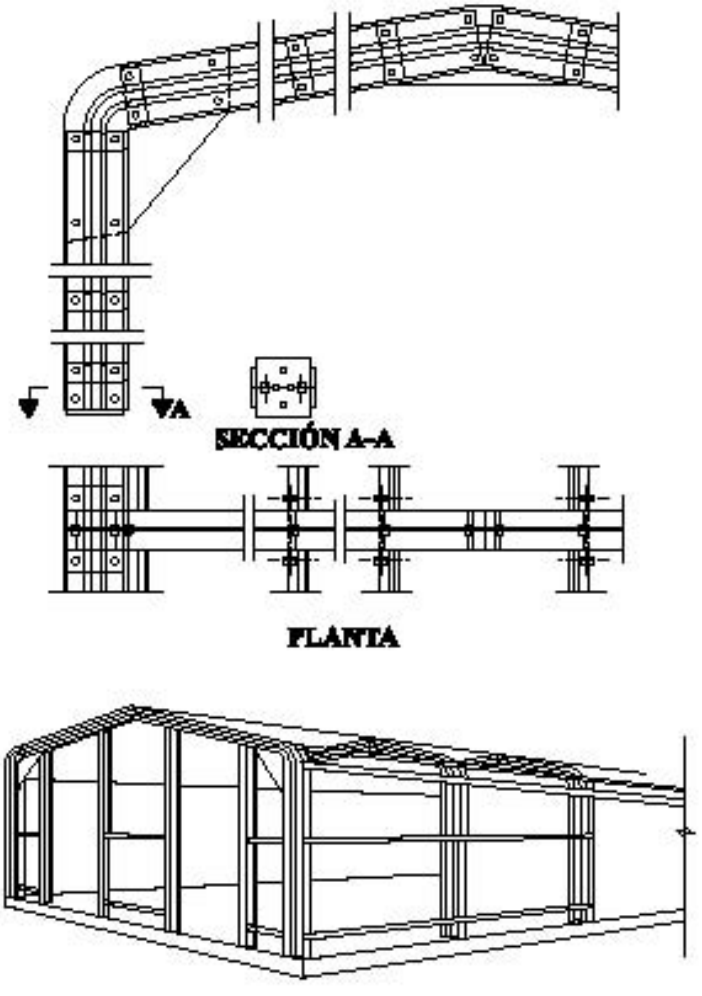


Figura 4 Nave industrial ligera construida con elementos conformados en frío y chapado

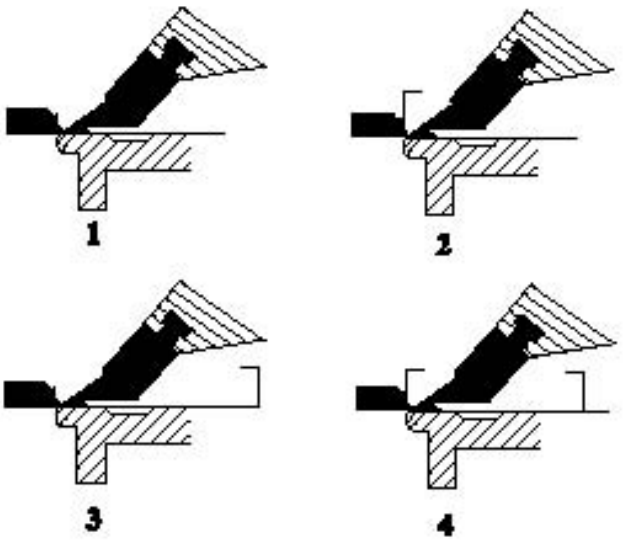


Figura 5 Fabricación por plegado

Estas ventajas pueden, por tanto, clasificarse de forma general como ahorradoras de peso, mediante la optimización de los productos con respecto a la función de resistencia de cargas y demandas constructivas; y rendimiento funcional en términos de capacidad de cerramiento.

1.4 Fabricación

Los perfiles en frío pueden fabricarse por plegado (figura 5), prensa de embutir (figura 6) o laminación en frío (figura 7).

Para pequeños lotes de elementos constructivos con longitudes de ≤ 6 m (en casos excepcionales ≤ 12 m), normalmente resulta ventajoso utilizar plegadoras hidráulicas o prensas de embutido. El esfuerzo requerido para conformalos depende del espesor de la chapa, la ductilidad del material y la forma de la sección, que viene limitada por la anchura de la banda.

Estos métodos de fabricación permiten obtener secciones con una resistencia óptima a las cargas para el uso que se pretende y permiten someter el producto a procesos adicionales.

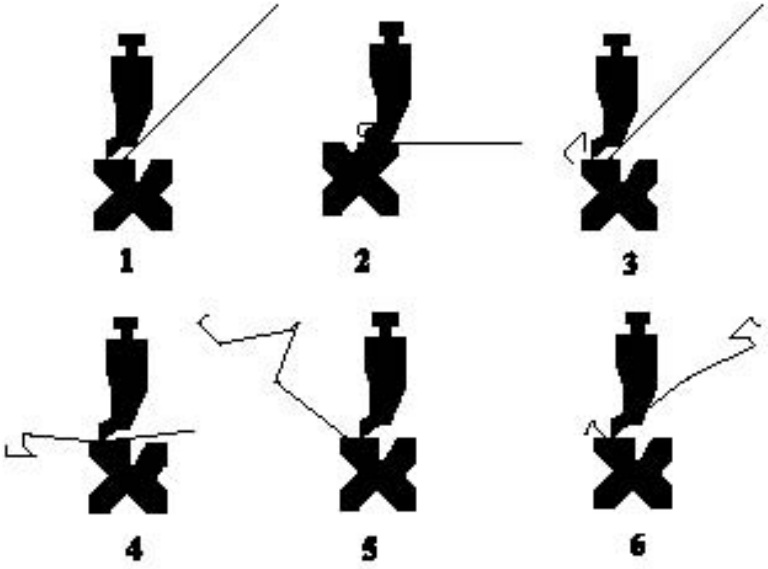


Figura 6 Fabricación en prensa de embutir

1.5 Materiales

El tipo de acero utilizado debe ser adecuado para la conformación en frío y, si fuera necesario, para la galvanización. Para los perfiles en frío y el chapado es preferible utilizar acero laminado en frío con galvanización de forma continua, con tensiones de fluencia del orden de 280 - 320 - 350 N/mm^2, y con un alargamiento total de al menos el 10% para una banda de 12,5 mm de anchura, referida a una longitud de galga l_o = 80 mm, y una relación de resistencia a la rotura por tracción/tensión de fluencia de al menos 1,1.

En condiciones normales es suficiente una protección de zinc Z275 (275g/m^2); en ambientes más corrosivos puede ser necesaria una mayor protección mediante sistemas de pinturas adecuados. Por lo general, el espesor de los sistemas de pinturas protectoras al zinc aplicados de forma continua se limita a aproximadamente un mínimo de 3,5 mm. Para incrementar el espesor del material puede utilizarse la galvanización por baño caliente y capas de acabado aplicadas en la obra o en el taller.

1.6 Efectos de la conformación en frío

Las técnicas de conformación en frío permiten variar fácilmente las propiedades geométricas de una forma. Por lo tanto, se puede influir en el comportamiento de apoyo de cargas del elemento con respecto a la resistencia, la rigidez y las modalidades de rotura mediante, por ejemplo, la introducción de rigidizadores intermedios o asegurando relaciones anchura/espesor adecuadas en las piezas planas adyacentes de la sección.

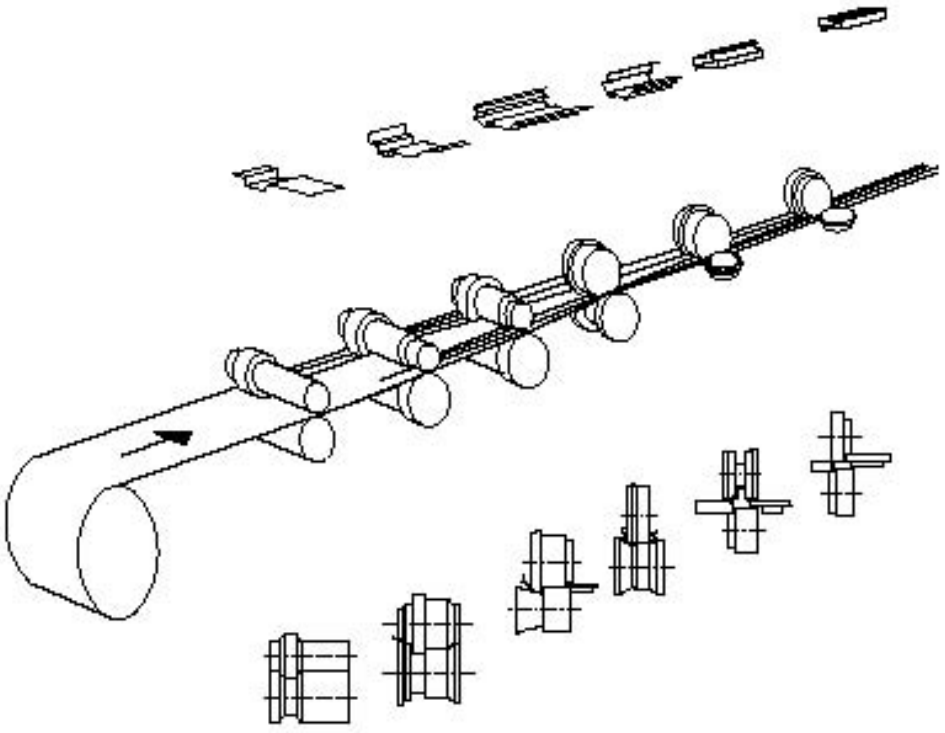


Figura 7 Fabricación por laminación en frío

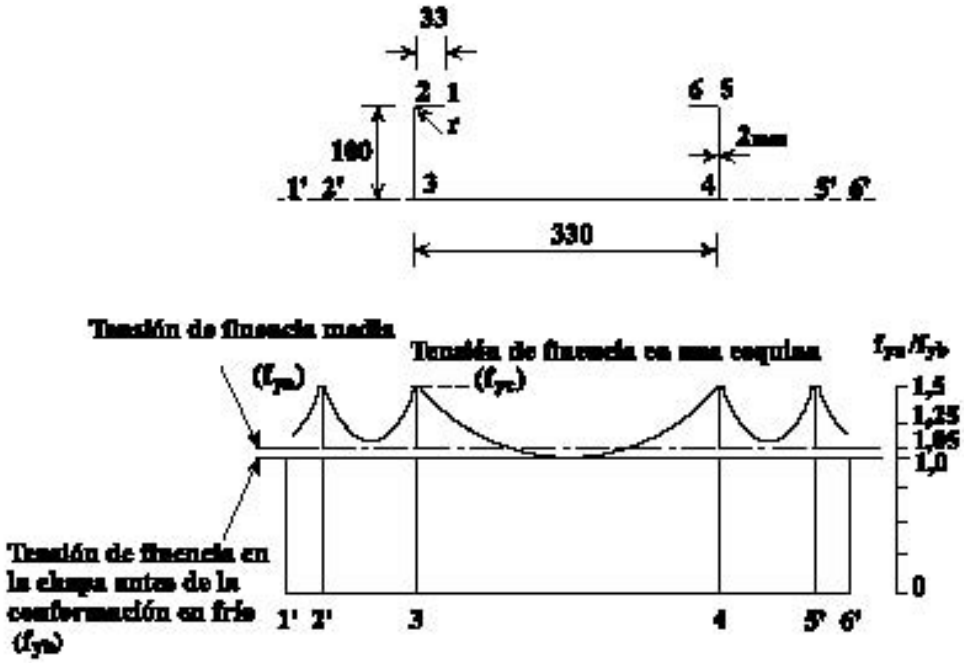


Figura 8 Efecto de la conformación en frío sobre la tensión de fluencia

Puesto que durante la conformación en frío de la chapa de acero se producen efectos de endurecimiento por deformación en frío, la tensión de fluencia, la resistencia a la rotura y la ductilidad se ven influidas localmente en un grado que depende del radio de plegado, el espesor de la chapa, el tipo de acero y el proceso de conformación. La tensión de fluencia media de la sección depende pues del número de esquinas y de la anchura de los elementos planos. El efecto de la conformación en frío sobre la tensión de fluencia se muestra en la figura 8.

La tensión de fluencia media puede estimarse mediante las expresiones aproximadas que figuran en los códigos correspondientes. En el ejemplo, la relación de tensión de fluencia media $f_{ya}/f_{yb} \approx 1,05$ y la relación de tensión de fluencia en las esquinas $f_{yc}/f_{yb} \approx 1,4$.

Durante el proceso de conformación en frío, las fuerzas de estiramiento variantes pueden también inducir tensiones residuales que pueden modificar de forma significativa la resistencia a la carga de una sección. Pueden observarse efectos favorables si las tensiones residuales son inducidas en partes comprimidas de la sección y, al mismo tiempo, son susceptibles a producir pandeo local.

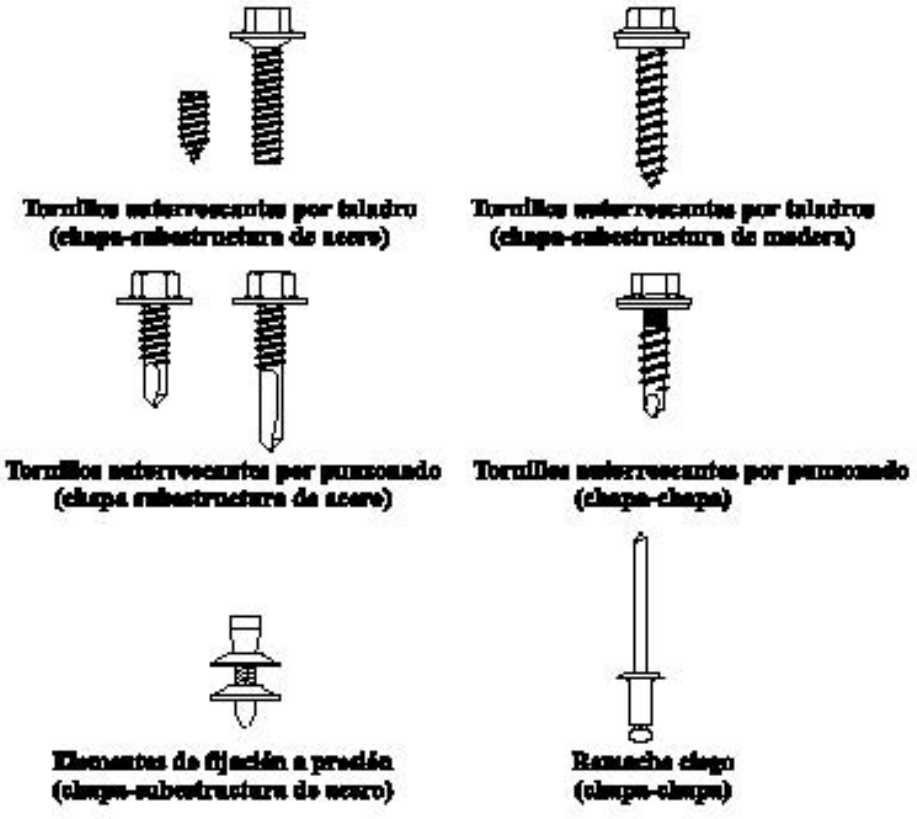


Figura 9 Elementos de fijación especiales para perfiles de pequeño espesor

1.7 Uniones

El desarrollo de una construcción ligera requiere disponer de las técnicas adecuadas de fijación; los métodos adecuados de fijación son tornillos con tuercas, remaches ciegos, tornillos autorroscantes, tornillos autotaladrantes y tornillos autoperforantes (figura 9); pueden utilizarse asimismo la soldadura por puntos de producción industrializada y colas o pegamentos. Para utilizar elementos de fijación en la construcción de edificios, es necesario estar familiarizado con el comportamiento de las uniones y establecer criterios de diseño de cara a la utilidad y la estabilidad. La experimentación exhaustiva y las investigaciones teóricas forman la base de la evaluación analítica del comportamiento en resistencia a la carga de los elementos de unión sometidos a cargas estáticas y dinámicas. En la figura 10 se muestran los campos de aplicación y las correspondientes modalidades de rotura.

Por lo general, deben evitarse las modalidades de rotura que provocan una rotura repentina de las uniones. La sobrecarga viene indicada por grandes deformaciones y debe reducirse mediante la transmisión de la carga a las uniones adyacentes.

1.8 Reglamentos

La amplia investigación y el desarrollo de productos en el pasado han permitido la elabora-

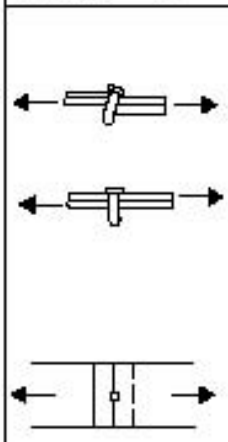
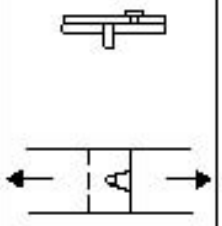
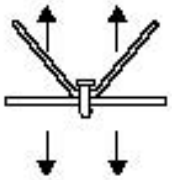
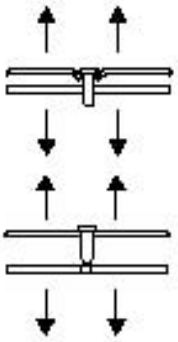
Tipo de carga	Tipo de conexión		Tipo de elemento de fijación	Tipo de agotamiento	
	Pequeño espesor-Pequeño espesor	Pequeño espesor-Elemento grueso		Aceptable	No deseable
Carga de cortadura	X		Remaches ciegos		
	X		Tornillos autorroscantes por punzonado		
	X	X	Tornillos autorroscantes por taladros		
	X	X	Soldaduras		
		X	Elementos insertados por disparo pirotécnico		
		(X)	Tornillos		
	(X)	(X)	Tornillos trabajando por fricción		
	(X)	(X)	Adhesivos		
Carga de tracción	X		Remaches ciegos		
	(X)		Tornillos autorroscantes por punzonado		
	X	X	Tornillos autorroscantes por taladro		
		X	Elementos insertados por disparo pirotécnico		
	(X)	(X)	Tornillos		
	(X)	(X)	Tornillos trabajando por fricción		

Figura 10 Tipos de elementos de fijación y conexiones; modos de agotamiento

ción de normas nacionales de diseño de perfiles y estructuras en frío en numerosos países. Las Recomendaciones Europeas para el diseño de perfiles en frío han sido desarrolladas por la Convención europea para las Estructuras de Acero Constructivas [1, 2] y constituyen la base de la Parte 1.3 del Eurocódigo 3 "Elementos y cerramientos conformados en frío de pequeño espesor"[3].

2. COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO

2.1 Generalidades

Comparados con los elementos de acero convencionales, los elementos estructurales de pequeño espesor se caracterizan por:

- relaciones anchura/espesor relativamente altas.
- partes de secciones sin rigidizar o incompletamente empotradas.
- formas individualmente simétricas o asimétricas.
- imperfecciones geométricas del mismo orden que el espesor de la sección o superiores al mismo.
- imperfecciones estructurales causadas por el proceso de conformación en frío.

Como consecuencia de ello, cuando se diseñan estos elementos deben considerarse algunos factores:

- pandeo dentro del campo de flechas grandes.
- efectos de abolladura en la estabilidad general.
- combinación de pandeo por torsión y por flexión.
- efectos de desfase de cizallamiento y alabeo.
- efectos de tensiones residuales variables sobre la sección.

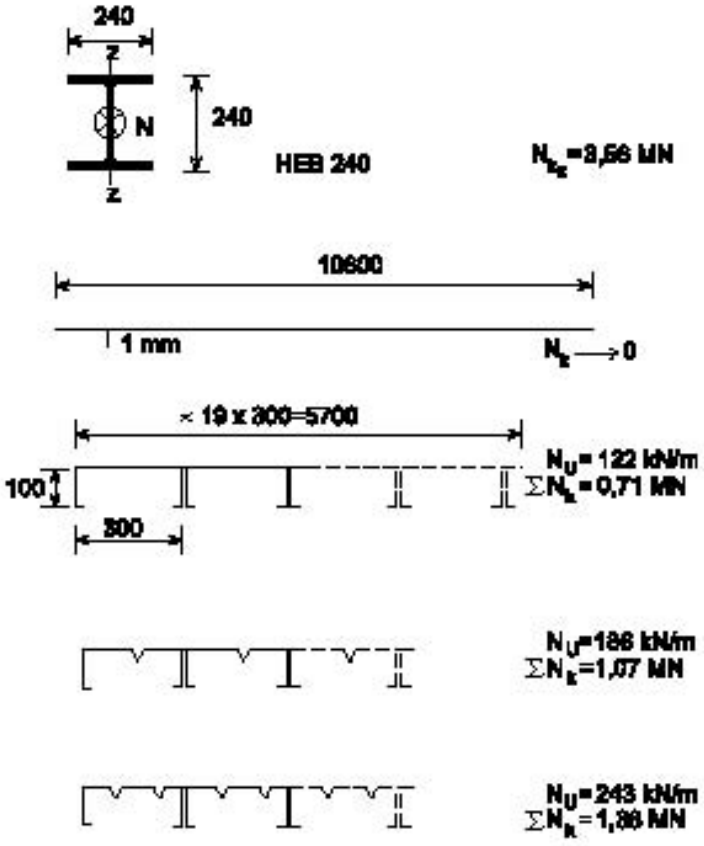


Figura 11 Ejemplo: efecto de los rigidizadores sobre la resistencia a la carga de secciones de pequeño espesor

Sometidos a una carga creciente, los elementos estructurales de pequeño espesor están generalmente sujetos a distribuciones de tensión y deformación variables, no lineales sobre la sección transversal, a menudo asociadas a flechas substanciales fuera de plano. Existe asimismo la posibilidad de diferentes modalidades de rotura, en particular para las secciones con partes planas a compresión que no están rigidizadas, es decir, empotradas elásticamente sólo a lo largo de un canto.

El efecto de los rigidizadores sobre la resistencia a la carga se muestra en la figura 11, donde se compara la resistencia total y nominal a la rotura de un perfil laminado en caliente HEB 240 con diferentes formas de elementos de pequeño espesor. Además, este ejemplo muestra la ventaja de la función de cerramiento de los elementos de pequeño espesor. En la figura 12 se da otro ejemplo que muestra el incremento de la resistencia a los momentos mediante pliegues intermedios y rigidizadores de alma.

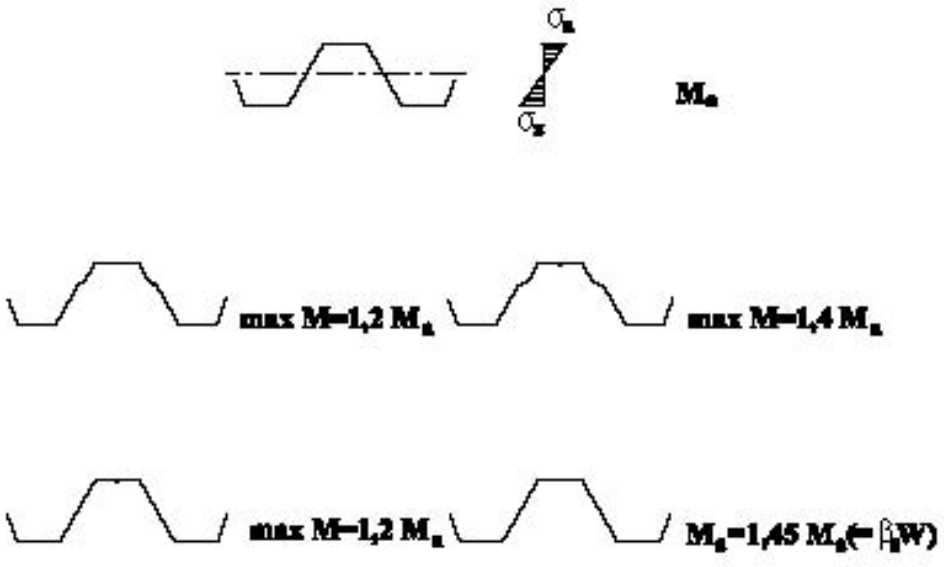


Figura 12 Ejemplo: efecto de los rigidizadores intermedios sobre la resistencia al momento de una sección de pequeño espesor

Por lo anteriormente dicho, resulta evidente que un análisis preciso de la modalidad de acción es, por lo general, sumamente complicado, en especial cuando se deben tener en cuenta imperfecciones y la plasticidad. Para el cálculo práctico existe una necesidad de modelos analíticos simplificados que permitan realizar una estimación aproximada pero conservadora de la carga de rotura y del comportamiento de la estructura sometida a la carga de servicio.

3. ABOLLADURA Y CONCEPTO DE ANCHURA EFICAZ

Tal como se ilustra más arriba, el efecto de abolladura en los elementos comprimidos de una sección determina a menudo el comportamiento y la resistencia a la carga. La solución teórica a este problema, teniendo en cuenta la resistencia posterior a la abolladura, no resulta práctica a efectos del cálculo, por lo que se ha desarrollado el modelo de cálculo de la anchura eficaz.

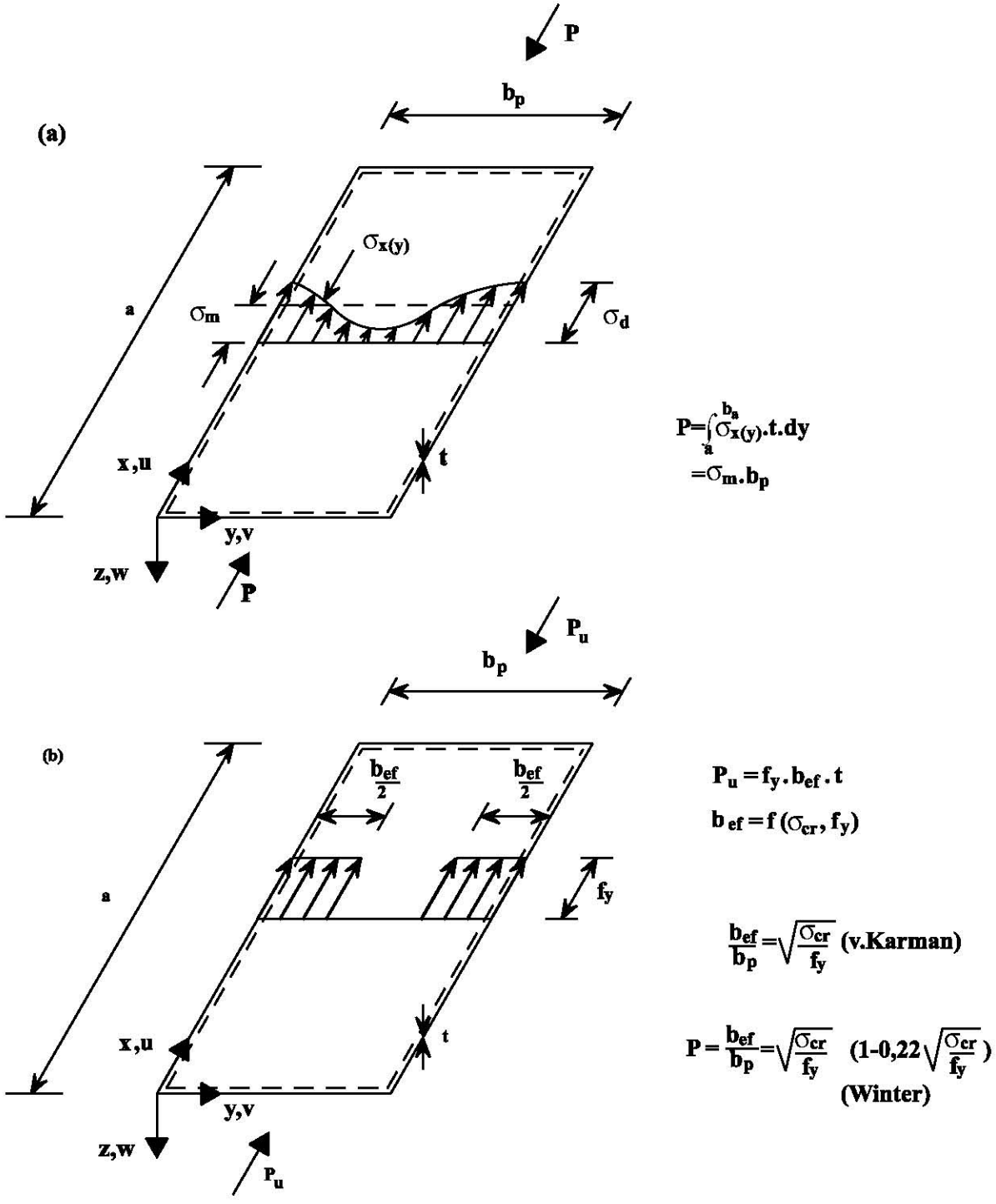


Figura 13 Distribución de las tensiones: (a) a lo largo de una chapa doblemente apoyada, y (b) enfoque de la anchura eficaz

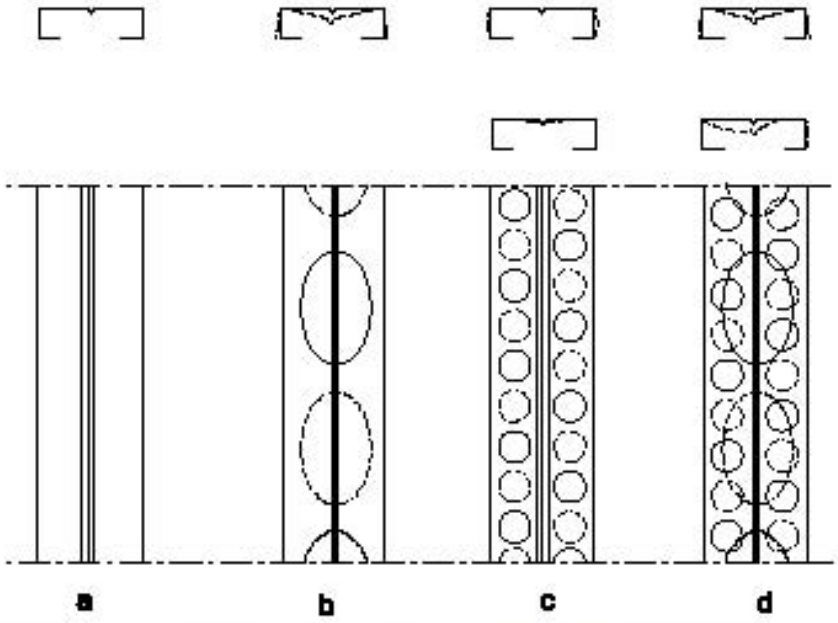


Figura 14 Interacción del pandeo local y global, según la acción del rigidizador y los elementos planos adyacentes

Observando la distribución de las tensiones de una banda de chapa libremente apoyada y sometida a esfuerzos normales (véase la figura 13a), es evidente que en la fase posterior a la abolladura los esfuerzos se concentran a lo largo de los apoyos de la chapa. Así, la carga límite puede determinarse a partir de una distribución uniforme de las tensiones dentro de una anchura eficaz b_{ef}, que depende de la tensión de abolladura crítica (σ_{cr} = tensión crítica) y la tensión de fluencia (f_y) del material de la chapa. La expresión b_{ef} facilitada por Von Karman, ha sido posteriormente modificada por Winter con una reserva para imperfecciones geométricas imprevistas (véase la figura 13b).

La "Fórmula Winter"

$$\rho = \frac{b_{ef}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}}\left(1 - 0{,}22\sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}}\right)$$

implica que $b_{ef} = 0{,}78\, b_p$, cuando $\sigma_{cr} = f_y$.

Sustituyendo σ_{cr}, la esbeltez relativa $\overline{\lambda}_p$ viene dada por:

$$\overline{\lambda}_p = \frac{1{,}052}{\sqrt{k_\sigma}} \cdot \frac{b_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

y

$$\rho = \frac{1}{\overline{\lambda}_p}\left(1 - \frac{0{,}22}{\overline{\lambda}_p}\right)$$

es decir, $\rho = 1{,}0$ si $\overline{\lambda}_p \leq 0{,}673$.

Si el factor de pandeo k_σ para la tensión crítica es conocido, puede calcularse la anchura eficaz b_{ef}; por ejemplo, $b_{ef} = b_p$ para un elemento de chapa en doble apoyo sometido a una tensión normal constante con $k_\sigma = 4$, si $b_p/t \leq 1{,}33\ E/f_y$; o para un elemento de chapa con un solo apoyo $k_\sigma = 0{,}43$ si $b_p/t \leq 0{,}42\ E/f_y$. Suponiendo una tensión de fluencia $f_y = 320 N/mm^2$, los elementos son plenamente eficaces si $b_p/t \leq 34$ o $b_p/t \leq 11$ respectivamente.

Cuando resulte apropiado, estas anchuras eficaces reducidas deben tenerse en consideración utilizando los valores efectivos de las magnitudes geométricas de la sección, es decir, el área eficaz (A_{ef}), el módulo resistente de la sección (W_{ef}), y el momento de inercia (I_{ef}). En (1) se facilitan los valores correspondientes de k_σ.

3.1 Elementos con apoyo doble y simple

Los elementos de una sección tienen apoyo doble (alas o almas de chapa trapezoidal) o simple (alas de perfiles en U o L). Los elementos con apoyo doble son mucho más resistentes, especialmente cuando tienen proporciones anchura/espesor bajas; esto puede conseguirse mediante rigidizadores de canto transversales (rebordes, curvaturas, pliegues) y/o mediante rigidizadores intermedios en V, U o trapezoidales (véanse las figuras 1, 2). Estos rigidizadores, situados en la zona comprimida, están sujetos a esfuerzos normales y, puesto que trabajan como pilares cargados excéntricamente sobre cimientos elásticos, son susceptibles a abolladura. Este

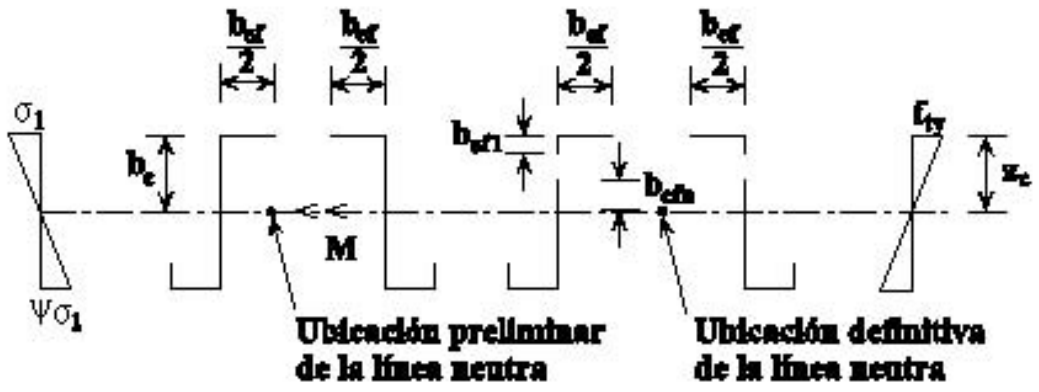


Figura 15 Sección eficaz bajo flexión

comportamiento proporciona la base para un modelo de diseño simplificado en el que el rigidizador y las partes adyacentes de los elementos planos se tratan como vigas sobre cimientos elásticos, con una rigidez elástica que depende de las condiciones del contorno del elemento.

La modalidad y la carga de abolladura dependen del área eficaz y de la rigidez del rigidizador. Si el rigidizador tiene una rigidez adecuada, se le puede considerar como un apoyo rígido para el elemento plano adyacente; los reglamentos de práctica facilitan criterios aproximados para valorar este aspecto. Según la carga de pandeo del rigidizador, puede producirse una interacción del pandeo local y el global, tal como se muestra en la figura 14.

3.2 Secciones transversales eficaces

El primer paso cuando se analiza el comportamiento en carga y se estima la carga de rotura de una pieza conformada en frío consiste en evaluar la anchura eficaz de los elementos comprimidos de la sección, sobre la base de la correspondiente distribución de tensiones sobre la sección; el paso siguiente consiste en calcular las características geométricas de la sección eficaz, teniendo en cuenta el desplazamiento de la línea neutra causado al desestimar las partes ineficaces de la sección. A partir de ahí el proceso de cálculo es el mismo que para las secciones de pequeño espesor. En general, la resistencia de una sección transversal eficaz de pequeño espesor está limitada por la tensión de fluencia en cualquier parte de la sección, basada en un análisis elástico. Las desviaciones respecto a esta regla sólo se admiten en casos especiales.

A continuación, sólo se utilizan reglas básicas de cálculo para explicar el proceso de concepción; la interacción de efectos diferentes, que provoca distribuciones biaxiales de las tensiones, sigue los mismos principios que para los elementos laminados en caliente.

En términos generales, la resistencia de cálculo se basa en el valor f_y/γ_M, siendo γ_M un coeficiente parcial de seguridad de resistencia (normalmente $\gamma_M = 1{,}1$).

Si la pieza no experimenta pandeo, el momento de resistencia viene dado por:

$$R_M = W_{eff} \cdot f_y/\gamma_M$$

siendo W_{eff} el módulo resistente de la sección eficaz. Para evitar un procedimiento reiterativo, las partes eficaces del alma pueden basarse en $\chi = \sigma_2/\sigma_1$, que se obtiene suponiendo que el ala comprimida se reduce, pero el alma es plenamente eficaz (véase la figura 15).

Cuando se produce la fluencia por primera vez en el lado que trabaja a tracción, pueden utilizarse las reservas plásticas de la zona traccionada hasta que el esfuerzo de compresión alcanza f_y. Normalmente esto conllevará cálculos reiterativos.

Si la misma sección resulta afectada por un esfuerzo normal que actúa en el centro de gravedad de la sección transversal, la sección

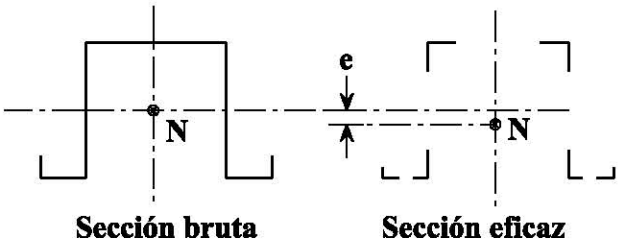


Figura 16 Sección eficaz bajo compresión

eficaz debe determinarse respecto a los esfuerzos de compresión en cada elemento. Como se muestra en la figura 16, puede ocurrir que el centro de gravedad de la sección eficaz se desplace, causando un momento flector adicional (M = Ne). Esto significa que debe comprobarse la compresión y la flexión de las secciones transversales en las que el eje neutro eficaz se ha desplazado.

3.3 Pandeo y aplastamiento del alma

El pandeo del alma puede ser causado por tensiones de flexión en compresión o por tensiones tangenciales por encima de la resistencia crítica al pandeo. En ambos casos la resistencia al pandeo depende de la esbeltez del alma (s_w/t). Para una tensión de fluencia de aproximadamente f_y = 320N/mm^2, las almas pueden experimentar pandeo si s_w/t > 80 en flexión pura y s_w/t > 60 en cizallamiento puro. No obstante, el pandeo no implica necesariamente un estado límite de la estructura si se puede confiar en el equilibrio pos-crítico (figura 17).

El aplastamiento es un fenómeno asociado con la carga local de alta intensidad perpendicular al plano del alma. Resulta más evi-

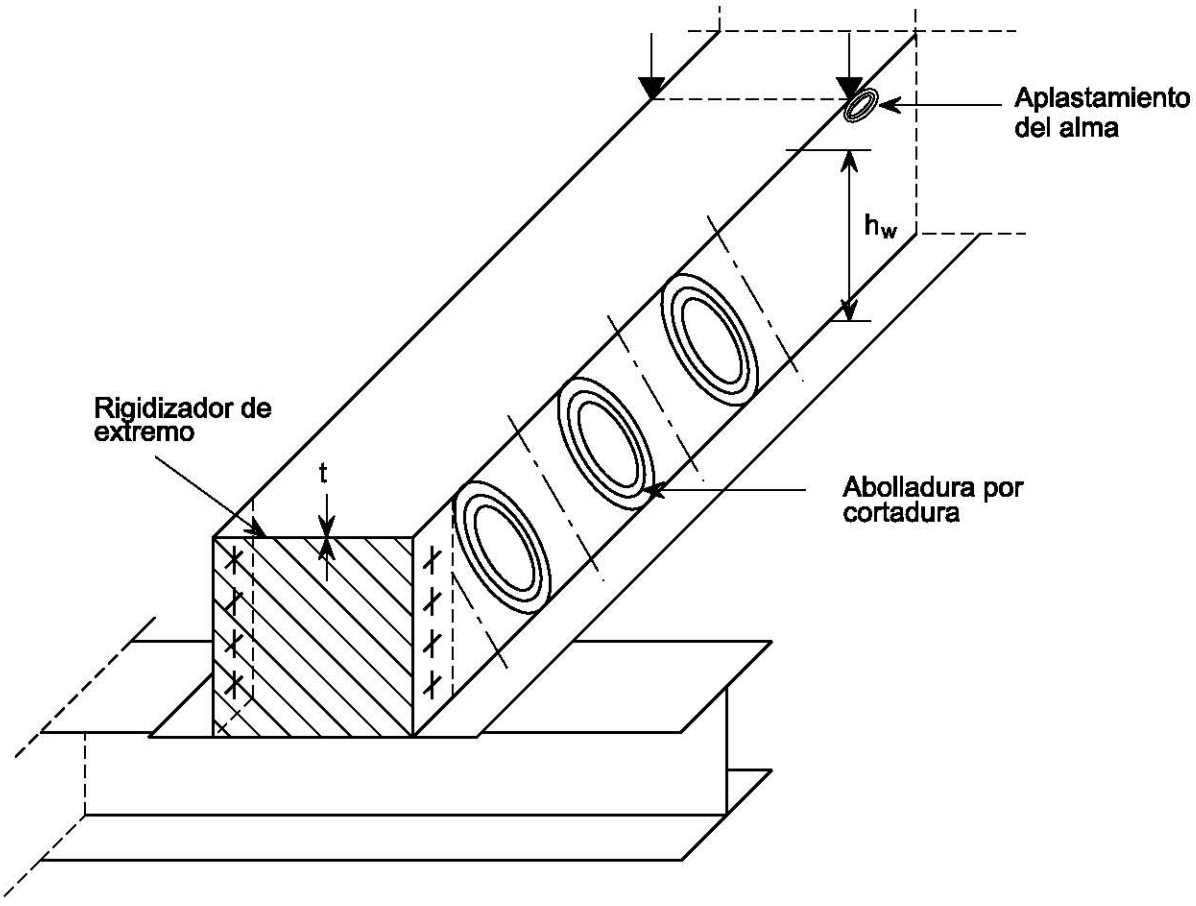


Figura 17 Efecto de cortadura y carga concentrada

dente en el caso de una carga concentrada (figura 17) o en apoyos intermedios de vigas continuas. Es a menudo más severa que el pandeo del alma, puesto que el aplastamiento reduce la altura eficaz de una sección y no existe ninguna resistencia pos-crítica. Según la excentricidad del alma en relación con la dirección de la carga y según la categoría de las cargas, (véase más abajo), pueden esperarse varios valores de resistencia al aplastamiento del alma (figura 18).

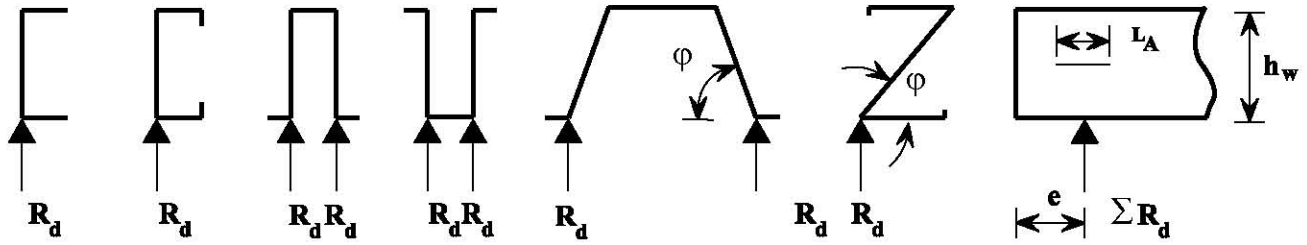
Las cargas de la primera categoría incluyen apoyos extremos de vigas, cargas cerca de los extremos de una ménsula y cargas aplicadas tan cerca de un apoyo que la distancia del apoyo al borde más cercano de la carga, medida paralelamente al eje de la viga, es inferior a 1,5 s_w.

Las cargas de la segunda categoría incluyen apoyos intermedios y cargas situadas a más de 1,5 s_w de un apoyo o de un extremo de una ménsula.

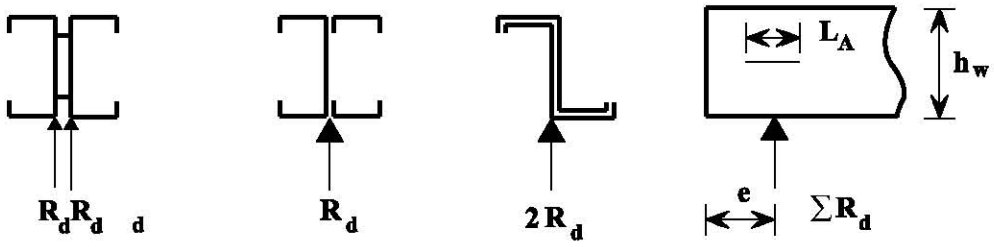
Debe señalarse que las expresiones facilitadas en los reglamentos son semiempíricas.

3.4 Pandeo lateral por torsión

Por lo general, los elementos sin fijaciones que trabajan a flexión son susceptibles al pandeo lateral por torsión; este tipo de fallo es más probable si la sección está sometida a torsión debido a la inclinación del eje principal respecto a la dirección de la carga, o si el centro de esfuerzos cortantes de la sección no se encuentra en el eje de la carga.



(a) Almas excéntricas en relación a la dirección de la carga



(b) Almas concéntricas en relación a la dirección de la carga

Figura 18 Almas bajo carga concentrada, propensión al aplastamiento del alma

Para reducir al mínimo estos efectos, se han desarrollado variedades de secciones en Z y en C (véanse las figuras 19 y 20).

La susceptibilidad de las secciones abiertas de pequeño espesor a la torsión y al pandeo lateral por torsión pueden neutralizarse eficazmente mediante los embridados que proporcionan los elementos adyacentes del edificio, por ejemplo, chapa metálica conectada a las secciones por tornillos autoperforantes o autorroscantes.

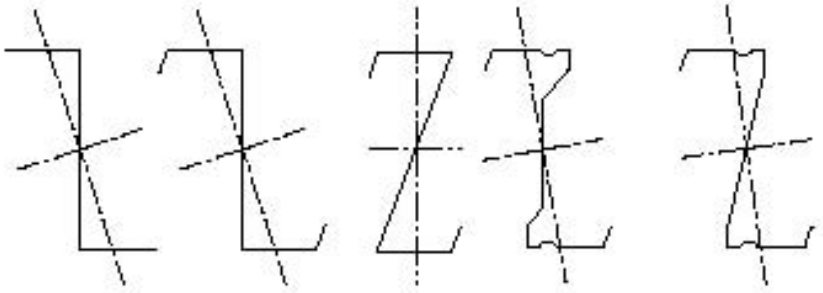


Figura 20 Variedades de secciooones en Z para evitar la abolladura y para ajustar la inclinación del eje principal

En caso de que se utilicen correas en Z para estructuras de cubierta, normalmente el ala inferior puede girar libremente mientras que el ala superior está unida al cerramiento. La rigidez del cerramiento en el plano evita un desplazamiento lateral del ala superior y la distancia entre las uniones y los cantos de la sección proporciona el brazo de palanca para la fijación torsional. La rigidez elástica al giro $C\upsilon$ [Nm/rad] depende de la rigidez a la flexión del cerramiento ($C\upsilon_m$), la deformación de la sección ($C\upsilon_p$) y la rigidez de la unión entre el cerramiento y la correa ($C\upsilon_A$); el último valor debe estimarse mediante ensayos.

A partir de $\frac{1}{C\upsilon} = \frac{1}{C\upsilon_m} + \frac{1}{C\upsilon_p} + \frac{1}{C\upsilon_A}$

puede derivarse el valor efectivo de $C\upsilon$.

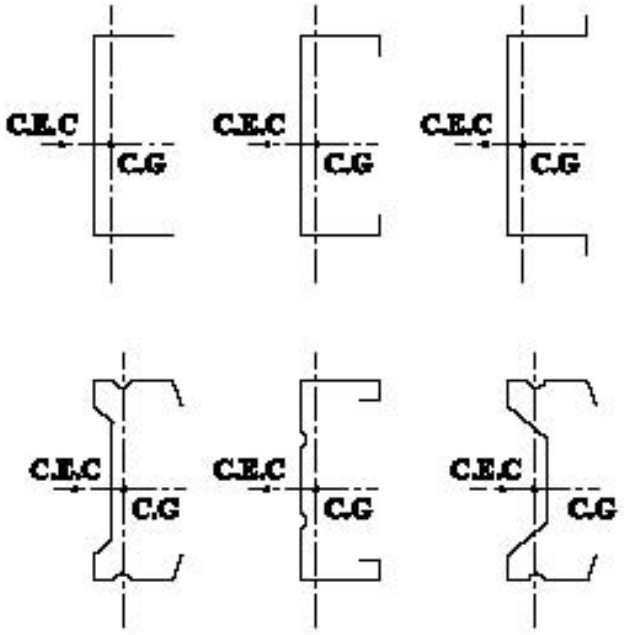


Figura19 Variedades de secciones en C para evitar la abolladura y para acercar el centro de esfuerzos cortantes a la sección

La solución analítica exacta del problema del pandeo lateral de las vigas continuas es demasiado complicada para un uso práctico; no obstante, el modelo de viga sobre cimiento elástico puede ayudar a resolver el problema.

3.5 Interacción del pandeo local y el pandeo global

Es evidente que el pandeo local afecta a la resistencia a la carga de una sección sometida a carga axial. Con la ayuda del método de la anchura eficaz, debe tenerse en cuenta el área reducida (efectiva) A_{ef} al calcular la esbeltez del pilar $\left(\frac{l}{i_{ef}}\pi\right)(A_{ef}/Ag)^{1/2}$ y al determinar la resistencia proyectada $N_d = k\, A_{ef}\, f_y/\gamma_M$. El coeficiente de pandeo k se obtiene en las correspondientes curvas de pandeo europeas (a-d) para el valor propiado de $\bar{\lambda}$. La clasificación de los tipos de secciones indica que deben evitarse los elementos sin rigidizadores en los extremos, ya que la resistencia a la carga es relativamente baja (véase también la lección 11.2)

4. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

4.1 Notas para una buena práctica

Puesto que los perfiles en frío se caracterizan por unos espesores de pared relativamente pequeños y/o una alta relación anchura/espesor, debe tenerse en cuenta:

- la abolladura que puede producirse en el estado de utilidad.
- requisitos especiales relativos a la protección contra la corrosión.
- protección contra deformaciones inaceptables durante el transporte y el montaje de la estructura.

Los elementos y las estructuras deben diseñarse de forma que:

- las deformaciones en el estado de utilidad se sitúen dentro de límites aceptables con respecto a los requisitos funcionales.
- se opte preferiblemente por perfiles simétricos (simétricos dobles, sencillos o de punto).
- el área eficaz de la sección se encuentre lo más próxima posible al área bruta (esto puede conseguirse añadiendo rigidizadores intermedios en las partes planas de la sección comprimida).
- las uniones y empalmes tengan suficiente rigidez y capacidad de giro.
- los fenómenos de inestabilidad local se eviten mediante rigidizadores adecuados.
- los fenómenos de inestabilidad global tales como el pandeo lateral o el incremento de esfuerzos por la torsión de la sección puedan evitarse mediante fijaciones externas adecuadas (por ejemplo, efectuando uniones a elementos del edificio tales como cerramientos o arriostramientos).
- las partes esenciales de apoyo de la estructura queden protegidas de las cargas de impacto.
- se evite la corrosión debida a detalles incorrectos, por ejemplo detalles que permitan la acumulación de agua.

4.2 Influencia de la flexibilidad de la unión

Si hay elementos de pequeño espesor unidos entre sí mediante uniones mecánicas, la rigidez de las uniones se ve afectada por el deslizamiento y los efectos de abolladura en la parte delantera de las piezas de unión; esto último puede ocurrir si se utilizan tornillos para transmitir fuerzas relativamente altas; otro posible problema aparece cuando la rigidez disminuye por grandes reducciones de las áreas eficaces dentro de la unión. La flexibilidad de la unión puede afectar a la distribución y la redistribución de los momentos flectores y cortantes dentro de la estructura, así como al cálculo de la resistencia a la carga. Estos efectos deben estudiarse adecuadamente, mediante ensayos si fuera necesario.