15

Estructuras tubulares

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 15

ESTRUCTURAS TUBULARES

Lección 15.1: Aplicación de perfiles tubulares en estructuras de acero 1

1 INTRODUCCIÓN 4
2 PROPIEDADES MECÁNICAS Y GEOMÉTRICAS DE LOS PERFILES TUBULARES 5
2.1 Propiedades mecánicas 5
2.2 Propiedades geométricas 5
2.3 Carga de tracción 5
2.4 Carga de compresión 5
2.5 Torsión 8
2.6 Flexión 8
2.7 Fatiga (véase también la lección 14.5) 10
3 OTROS ASPECTOS DE LA APLICACIÓN DE PERFILES TUBULARES 11
3.1 Coeficiente aerodinámico 11
3.2 Protección frente a la corrosión 12
3.3 Utilización del hueco interno 13
3.3.1 Rellenado con hormigón 13
3.3.2 Protección frente al incendio mediante circulación de agua y rellenado de hormigón 13
3.3.3 Calefacción y ventilación 14
3.3.4 Otras posibilidades 14
3.3.5 Estética 14
4 FABRICACIÓN Y MONTAJE 15
4.1 Aspectos de la fabricación 15

4.2 Soldadura 15
4.3 Preparación de los extremos 17
4.4 Doblado 18
4.5 Atornillado 19
5 APLICACIONES 23
5.1 Pilares 23
5.2 Viga en celosía planas 24
5.3 Vigas de celosías multiplano 24
5.4 Estructuras espaciales 26
5.5 Estructuras mixtas 26
6 FILOSOFÍA DE DISEÑO 28
7 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UNA VIGA EN CELOSÍA DE PERFIL TUBULAR (CIRCULAR O RECTANGULAR) 30
8 RAZONES PARA UTILIZAR PERFILES TUBULARES 32
9 RESUMEN FINAL 34
10 BIBLIOGRAFÍA 34

Problema Resuelto 15.1: Uniones tubulares 35

1 RESUMEN 38
2 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA UNA VIGA EN CELOSÍA DE PERFILES TUBULARES CIRCULARES 39
2.1 Planteamiento del cálculo (A) 39
2.2 Resistencia de las uniones en el cordón inferior 41
2.3 Resistencia de las uniones en el cordón superior 43
2.4 Resistencia de las uniones en el cordón superior 44
2.5 Resumen de las uniones en K 3-11 46
2.6 Ayuda gráfica para el cálculo 46
2.7 Planteamiento de cálculo (B) 47
3 VIGA EN CELOSÍA DE PERFILES TUBULARES RECTANGULARES 49
3.1 Efecto de la excentricidad 50
3.2 Evaluación de la resistencia de la Unión 2 51
4 BIBLIOGRAFÍA 55

Lección 15.2: Comportamiento y diseño de uniones soldadas entre perfiles tubulares bajo cargas predominantes estáticas 57

1 INTRODUCCIÓN 60
2 CRITERIOS Y MODOS DE COLAPSO 61
3 MODELOS ANALÍTICOS 63
3.1 Modelo de anillo (figura 3a) 63
3.2 Modelo de corte por punzonamiento (arrancamiento) 64
3.3 Modelo de cortante 65
4 VALIDEZ DE LOS ENSAYOS 66
5 FÓRMULAS DE RESISTENCIA PARA UNIONES CARGADAS AXIALMENTE 67
6 OTROS TIPOS DE UNIONES U OTRAS CONDICIONES DE CARGA 69
6.1 Tipos especiales de uniones de perfiles tubulares circulares soldados 69
6.2 Chapa o perfil I conectado a cordones de perfil tubular circular 69
6.3 Uniones de perfiles tubulares circulares cargadas por momentos flectores 69
6.4 Uniones de perfiles tubulares circulares multiplano (uniones KK y TT) 69
7 DIAGRAMAS DE CÁLCULO 75
8 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA UNIONES DE VIGAS EN CELOSÍA 77
9 RESUMEN FINAL 78
10 BIBLIOGRAFÍA 78

Lección 15.3: Comportamiento y diseño de uniones soldadas entre perfiles tubulares rectangulares bajo cargas predominantemente estáticas 79

1 CRITERIOS Y MODOS DE COLAPSO 83
2 MODELOS ANALÍTICOS 85
2.1 Modelo de las líneas de fluencia 85
2.2 Modelo del corte por punzonamiento (arrancamiento) 86
2.3 Modelo del ancho eficaz de la barra de relleno 87

2.4 Modelo de colapso por cortante del cordón 88
2.5 Modelo de resistencia de la pared del cordón o modelo de pandeo local 89
3 VALIDEZ DE LOS ENSAYOS 90
4 FÓRMULAS DE RESISTENCIA DE UNIONES PARA UNIONES CARGADAS AXIALMENTE 92
5 OTROS TIPOS DE UNIONES U OTRAS CONDICIONES DE CARGA 98
5.1 Uniones entre barras de relleno de perfil tubular circular y cordón de perfil tubular rectangular 98
5.2 Chapa o perfil I conectado a cordón de perfil tubular rectangular .. 98
5.3 Uniones entre perfiles tubulares rectangulares cargadas por momentos flectores 98
5.4 Uniones de perfiles tubulares rectangulares multiplano (uniones en KK y TT) 98
6 DIAGRAMAS DE CÁLCULO 102
7 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA UNIONES EN VIGAS EN CELOSÍA 104
8 RESUMEN FINAL 105
9 BIBLIOGRAFÍA 105

ESDEP TOMO 15
ESTRUCTURAS TUBULARES

Lección 15.1: Aplicación de Perfiles Tubulares en Estructuras de Acero

OBJETIVOS/CONTENIDO

Obtener una visión sobre la aplicación estructural de los perfiles de sección tubular. Describir dónde y cómo utilizarlos.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 1.2:	Fabricación y Productos de Acero.
Lección 3.3:	Propiedades de los Aceros en la Ingeniería.
Lecciones 4.1:	Fabricación General de Estructuras de Acero.
Lección 13.1.2:	Introducción al Diseño de Uniones.

LECCIONES AFINES

Lecciones 14.4:	Comportamiento de la Fatiga en Secciones Huecas
Lección 15.2:	Comportamiento y Diseño de Uniones Soldadas entre Perfiles Tubulares bajo Carga Predominantemente Estática.
Lección 15.3:	Comportamiento y Diseño de Uniones Soldadas entre Perfiles Tubulares Rectangulares bajo Carga Predominantemente Estática.

RESUMEN

Los perfiles tubulares, tanto de sección circular como rectangular, tienen excelentes propiedades para soportar cargas estáticas, no solamente con respecto al pandeo, flexión biaxial y torsión, sino también en aspectos relacionados con el diseño global de elementos. Pueden ofrecer ventajas económicas en comparación con otros perfiles. En un buen diseño de estructuras mediante la utilización de perfiles tubulares se aprovechan sus propiedades específicas desde el comienzo.

NOTACIÓN

Se ha adoptado la notación del Eurocódigo 3, Anexo K [1].

1. INTRODUCCIÓN

El hombre ha aprendido a aplicar los perfiles tubulares como elementos estructurales imitando a la naturaleza. Muchos ejemplos en ella muestran, no solamente la utilización de un cilindro hueco para transportar un fluido, sino también las excelentes propiedades del perfil tubular con respecto a los esfuerzos de compresión, torsión y flexión en todas las direcciones. Estas ventajas fueron comprendidas rápidamente por nuestros antepasados, cuando convirtieron la rama del bambú en un componente ligero de construcción, así como también en una tubería para el suministro del agua potable o bien para el riego.

Los primeros métodos para la fabricación de tuberías o secciones circulares huecas fueron desarrollados en el siglo diecinueve durante el desarrollo de la fabricación del acero y de las secciones abiertas clásicas laminadas en caliente, tales como los perfiles en I, en L y en U. La producción industrial de perfiles de sección hueca rectangular no comenzó, no obstante, hasta 1952 (por Stewarts & Lloyds en el Reino Unido).

Los tubos con forma circular se fabrican a partir bien sea de un bloque sólido de acero para los tubos sin soldadura, o a partir de una pletina plana para los tubos soldados. No existe diferencia fundamental alguna entre el proceso de fabricación de un tubo de sección circular que tenga por objeto su utilización como tubería de conducción, del que tenga como finalidad un uso estructural.

Los denominados tubos de sección cuadrada, rectangular, hexagonal u octogonal, se obtienen a partir de la deformación, tanto en caliente como en frío, de un tubo circular como pieza a conformar. El tubo a conformar se hace pasar a través de unos cilindros de conformación que trabajan en serie y solamente en un sentido. Este proceso proporciona al tubo redondo origen, normalmente tras pasar a través de varios conjuntos de cilindros, la forma requerida, que habitualmente es cuadrada o rectangular.

La selección de un perfil en particular en una estructura de acero está controlada por muchos factores que incluyen aspectos como: comparación de las ventajas y las desventajas con respecto a las propiedades mecánicas, costes unitarios del material y costes de fabricación, montaje y mantenimiento. La experiencia de los arquitectos proyectistas y fabricantes interviene también en esta selección. En consecuencia, es muy importante que aquellos que estén relacionados con este campo comprendan el comportamiento de los perfiles tubulares y sus uniones.

2. PROPIEDADES MECÁNICAS Y GEOMÉTRICAS DE LOS PERFILES TUBULARES

Los perfiles tubulares de acero compiten, no solamente con el hormigón, sino que también pueden sustituir a otros perfiles de acero, debido a su superioridad con respecto a la resistencia y a la estabilidad. Las propiedades mecánicas y geométricas de los perfiles tubulares influyen en como puede conseguirse ahorro de material bajo cargas.

2.1. Propiedades Mecánicas

Los tipos de acero en que se suministran los perfiles tubulares estructurales, de acuerdo con el Eurocódigo 3 [1] se encuentran indicados en la tabla 1.

En los perfiles conformados en frío, el incremento en el límite de fluencia se podrá tener en cuenta. La tabla 2 muestra las recomendaciones y fórmulas para la aplicación de este incremento.

Para permitir la soldadura en la zona de las esquinas de las secciones de perfil hueco rectangular conformado en frío, deberán cumplirse los requisitos expuestos en la tabla 3.

2.2 Propiedades Geométricas

La selección de los perfiles tubulares depende de sus propiedades geométricas, y por tanto de la resistencia del perfil para cada caso de carga en particular. Las tolerancias de producción son, en general, inferiores a las correspondientes en las secciones abiertas.

2.3 Carga de Tracción

La resistencia de cálculo de una barra bajo una carga de tracción depende del área de la sección transversal y del límite de fluencia de cálculo, y es independiente de la forma de la sección. En principio, no existe ni ventaja ni desventaja en la utilización de perfiles tubulares desde el punto de vista de la cantidad de material necesario.

2.4 Carga de Compresión

Para las barras cargadas axialmente a compresión, la carga crítica de pandeo depende de la esbeltez λ y de la forma de la sección.

La esbeltez λ depende de la longitud de pandeo l_b y del radio de giro (i).

$$\lambda = \frac{l_b}{i}$$

Tipos de acero	Límite de fluencia f_y (N/mm^2)	Resistencia última a tracción f_u (N/mm^2)	Porcentaje mínimo de alargamiento para una longitud de $L_o = 5{,}65 \cdot \sqrt{A_o}$	
			Longitudinal	Transversal
S 235	235	340-470	26	24
S 275	275	410-560	22	20
S 355	355	490-630	22	20
S 460*	460	550-720	17	15

* de EN 10210, Parte 1 [11]

Tabla 1 Tipos de acero para aceros estructurales

El radio de giro de las secciones huecas (relativo a la masa del perfil) es generalmente mucho mayor que el correspondiente al eje débil de los perfiles abiertos. Para longitud y carga dadas, esta diferencia da lugar a una menor esbeltez para los perfiles tubulares, y por tanto a un menor peso al compararlos con los perfiles abiertos.

El comportamiento de un perfil ante el pandeo está influido por las excentricidades iniciales de las cargas, la rectitud, las tolerancias geométricas, las tensiones residuales, la no homogeneidad del acero y por la relación tensión-deformación.

Basadas en una investigación exhaustiva efectuada por la Convención Europea para la Construcción Metálica, se han establecido las "Curvas Europeas de Pandeo"(figura 1) para los distintos perfiles de acero, en los cua-

Límite elástico medio:

El límite elástico medio f_{ya} puede determinarse a partir de ensayo de perfiles a tamaño completo o como sigue:

$$f_{ya} = f_{yb} + (k \times n \times t^2/A) \times (f_u - f_{yb})$$

donde

f_{yb}, f_u	es el límite elástico especificado y la resistencia última a la tracción del material básico (N/mm2).
t	es el espesor del material (mm).
A	es el área bruta transversal de perfil (mm^2).
k	es un coeficiente que depende del tipo de conformado (k = 7 para el laminado en frío).
n	es el número de doblado a 90° en la sección con un radio interno < 5t (las fracciones de doblados de 90°, deben contarse como fracciones de n)
f_{ya}	no debe exceder f_u o 1,2 f_{yb}.

El incremento en el límite elástico causado por el conformado en frío no debe utilizarse para elementos que estén recogidos * o sometidos a calentamiento durante largo tiempo, con una alta aportación de calor después de la conformación, lo que puede dar lugar a pérdidas de resistencia.

Material básico:

El material básico son las bandas laminadas en caliente, con las que se fabrican los perfiles mediante conformación en frío.

* El recocido de atenuación de tensiones internas a más de 580° o durante más de una hora puede conducir al deterioro de las propiedades mecánicas.

Tabla 2 Incremento del límite elástico causado por la deformación en frío de los perfiles tubulares.

Tipos de acero	Espesor de la pared t (mm)	mínimo $\frac{r}{t}$
S 235	$12 < t \leq 16$	3,0
S 275	$8 < t \leq 12$	2,0
S 355	$6 < t \leq 12$	1,5
	$t \leq 6$	1,0

Tabla 3 Radios mínimos de esquinas en sección hueca rectangular

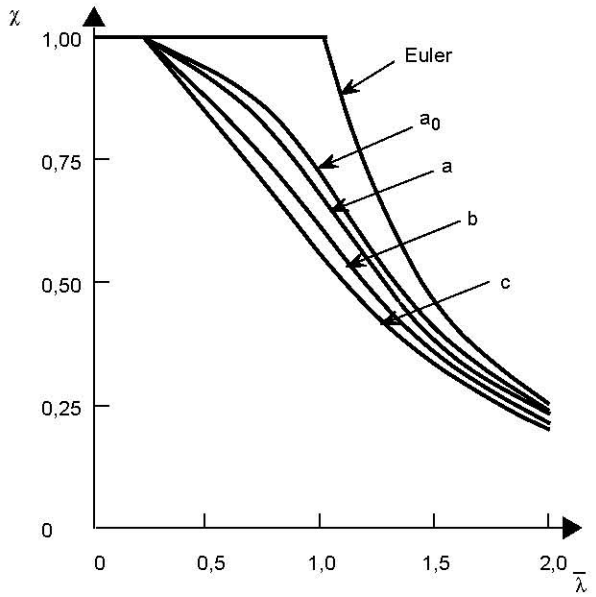


Figura 1 Curva europeas de pandeo

les se incluyen los perfiles tubulares. Estas curvas se encuentran incorporadas al Eurocódigo 3 [1].

El coeficiente de reducción χ mostrado en la figura 1 es la relación entre la resistencia N_b, R_d de cálculo a pandeo con respecto a la resistencia plástica axial N_{pl},R_d (para secciones de clase 1, 2 y 3):

$$\chi = \frac{N_{b,Rd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{f_{b,Rd}}{f_{yd}}$$

donde

$f_{b,Rd} = \frac{N_{b,Rd}}{A}$ (la tensión de pandeo de cálculo)

$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_M}$ (el límite elástico de cálculo)

γ_M es el coeficiente parcial de seguridad

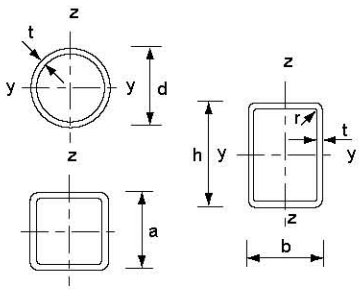
A es el área de la sección transversal

La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$ está determinada por $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_E}$

donde $\lambda_E = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ (Esbeltez de Euler).

Las curvas de pandeo para los perfiles tubulares están clasificadas de acuerdo con la tabla 4.

La mayoría de las secciones abiertas corresponden a las curvas "b" y "c". Consecuentemente, en caso de pandeo, la utilización de perfiles tubulares conformados en caliente proporciona generalmente un ahorro considerable en peso.

Sección transversal	Proceso de fabricación	Curvas de pandeo
	Conformación en caliente	a
	Conformación en frío (f_{yb} * utilizado)	b
	Conformación en frío (f_{ya} ** utilizado)	c

* f_{yb} = Límite elástico del material base sin conformar en frío.

** f_{ya} = Límite elástico del material después de la conformación en frío.

Tabla 4 Curvas europeas de pandeo de acuerdo con los procesos de fabricación

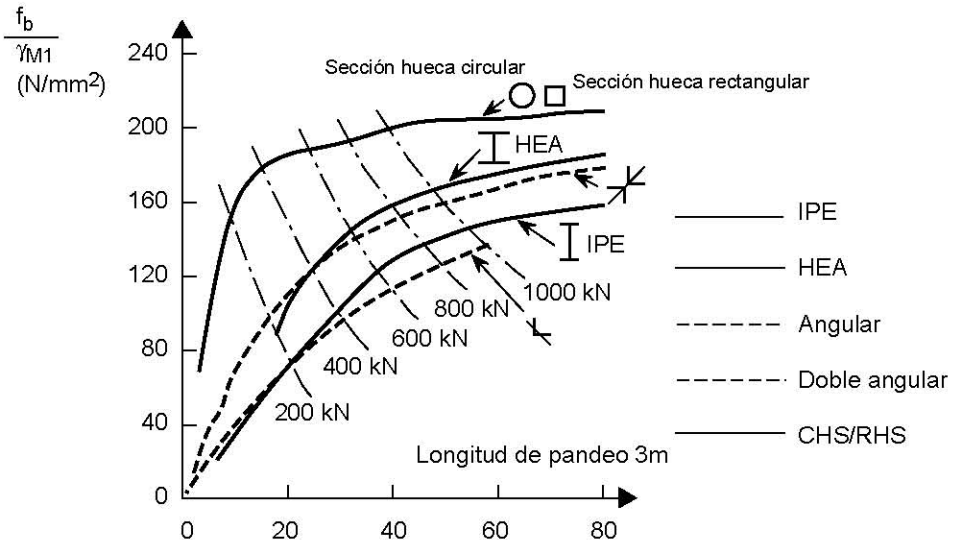


Figura 2 Comparación de los pesos de perfiles cerrados y abiertos sometidos a compresión en relación con la carga

En la figura 2 se compara el peso requerido por los perfiles de sección abierta y los perfiles tubulares para una carga de compresión centrada dada.

El comportamiento frente al pandeo global de los perfiles tubulares mejora al aumentar el diámetro o la relación entre la anchura y el espesor de la pared. No obstante, esta mejora está limitada por el pandeo local. Para impedir el pandeo local, se proporcionan los límites d/t, o bien b/t en el Eurocódigo 3 para el cálculo plástico, así como también para el elástico (tabla 7).

En el caso de secciones de pequeño espesor (clase 4), se debe considerar la interacción entre el pandeo global y el pandeo local.

Además de las ventajas frente al pandeo debidas al alto radio de giro y al uso de curvas de pandeo de cálculo menos penalizadoras, los perfiles tubulares pueden ofrecer otras ventajas en las vigas en celosía. Debido a su rigidez torsional y a la rigidez a la flexión de las barras, en combinación con cierta rigidez en la unión, la longitud de pandeo de las barras comprimidas puede ser reducida. El Eurocódigo 3 [1] recomienda las longitudes de pandeo eficaz, para perfiles tubulares en vigas en celosía, que se muestran en la tabla 5.

Los cordones comprimidos inferiores no restringidos lateralmente de las vigas de celosía tienen longitudes de pandeo reducidas, debido a la mejora de la rigidez torsional y de la rigidez a la flexión de las correas y de las uniones correa-viga en las celosías con barras de perfil tubular. Estos factores hacen que la utilización de perfiles tubulares en celosías sea incluso más favorable.

2.5 Torsión

Las secciones cerradas huecas, especialmente las circulares, tienen la sección transversal más eficaz para resistir los momentos torsores, porque el material está uniformemente distribuido alrededor del eje polar. Una comparación entre las secciones abiertas y tubulares con peso por metro lineal casi idéntico se refleja en la tabla 6, en la que se comprueba que el módulo de torsión de los perfiles de sección tubular es de 200 a 300 veces mayor que el de los perfiles de sección abierta.

2.6 Flexión

En general, las secciones IPE y IPN son más económicas bajo flexión (Imax es mayor que la de perfiles tubulares). Sólo en aquellos casos en los que la tensión de cálculo en los perfiles abiertos venga gobernado por el pandeo lateral, los perfiles tubulares podrán ofrecer ventajas. Se puede demostrar mediante cálculos que para los perfiles tubulares circulares y para los rectangulares con b/h >0,25, que son los normalmente utilizados, la inestabilidad lateral no es crítica.

Se puede obtener una gran economía en el cálculo de los perfiles tubulares en elementos sometidos a flexión utilizando el cálculo plástico.

d_0 diámetro exterior de una barra de cordón circular. d_1 diámetro exterior de una barra de arriostramiento circular. b_0 ancho exterior de una barra de cordón cuadrado. b_1 ancho exterior de una barra de arriostramiento cuadrado.	$\beta = \frac{d1}{d_0}$ o $\frac{d1}{b_0}$ o $\frac{b1}{b_0}$ =
para todo β: $l_b / l \leq 0,75$	
Cuando b < 0,6, por lo general $0,5 \leq l_b / l \leq 0,75$ se calcula con:	
Cordón CHS Barra de relleno CHS } $l_b/l = 2,20 \left(\frac{d_1^2}{l.d_0} \right)^{0,25}$	
Cordón SHS Barra de relleno CHS } $l_b/l = 2,35 \left(\frac{d_1^2}{l.d_0} \right)^{0,25}$	
Cordón SHS Barra de relleno SHS } $l_b/l = 2,30 \left(\frac{d_1^2}{l.d_0} \right)^{0,25}$	

CHS = Perfil tubular circular.
SHS = Perfil tubular cuadrado.

Tabla 5 Longitud de pandeo de una barra de arriostramiento en una viga de celosía

Para poder usar la totalidad de la sección en un cálculo plástico, los valores límites de las relaciones d/t ó b/t son los proporcionados en el Eurocódigo 3 (véase la tabla 7).

Perfil	Peso, kg/m	Módulo de torsión I_t (cm^4)
HEB 120	26,7	14,9
IPE 220	26,2	9,1
UPN 200	25,3	12,6
120 · 7	24,7	1010,0
ϕ 175 · 6	25,0	2280,0

Tabla 6 Resistencia torsional de varias secciones

Perfil	○ Compresión o flexión	□ Flexión	□ Compresión
Secciones de Clasel (cálculo plástico-plástico)	$\frac{d}{t} \le 50 \cdot \varepsilon^2$	$\frac{b_1}{t_1} \le 33 \cdot \varepsilon$	$\frac{b_1}{t_1} \le 42 \cdot \varepsilon$
Secciones de Clase 2 (cálculo elástico-plástico)	$\frac{d}{t} \le 70 \cdot \varepsilon^2$	$\frac{b_1}{t_1} \le 38 \cdot \varepsilon$	$\frac{b_1}{t_1} \le 42 \cdot \varepsilon$
Secciones de Clase 3 (cálculo elástico-elástico)	$\frac{d}{t} \le 90 \cdot \varepsilon^2$	$\frac{b_1}{t_1} \le 42 \cdot \varepsilon$	$\frac{b_1}{t_1} \le 42 \cdot \varepsilon$
Secciones de Clase 4 (cálculo elástico-elástico)	Verificación de pandeo local para perfiles con d/t mayor o relaciones b/t mayores		
$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$			

Tabla 7 Relación anchura-espesor para seleccionar tipo de cálculo en perfiles

2.7 Fatiga (véase también la lección 14.5)

El comportamiento frente a la fatiga de las uniones de perfiles tubulares está notablemente influida por el factor geométrico de concentración de tensión o de deformación unitaria (SCF o SNCF).

Una estructura compuesta por perfiles tubulares deberá estar diseñada y detallada de forma que dicho coeficiente sea bajo. Así, es posible diseñar económicamente uniones de perfiles tubulares, incluso bajo condiciones de fatiga, particularmente cuando a ello se unen bajos coeficientes aerodinámicos frente al viento y fluidos, un peso reducido y fácil protección frente a la corrosión.

3. OTROS ASPECTOS DE LA APLICACIÓN DE PERFILES TUBULARES

3.1 Coeficiente Aerodinámico

Las secciones de perfil tubular presentan importantes ventajas al utilizarlas en estructuras de edificios expuestos a las corrientes de fluidos, es decir, aire o agua.

Sus coeficientes aerodinámicos son mucho menores que los de las secciones ordinarias con bordes afilados (véase la figura 3). Los coeficientes aerodinámicos para la carga de viento en secciones huecas circulares y rectangulares se han determinado en los últimos veinte años mediante series de ensayos, [2].

Basándose en estos ensayos, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. Para todos los perfiles de bordes afilados, abiertos o cerrados (r/d < 0,025 ver figura 4), el coeficiente aerodinámico C_w es independiente del número de Reynold

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

donde

V es la velocidad del viento;

d es la anchura de la sección transversal;

ν es la viscosidad cinemática.

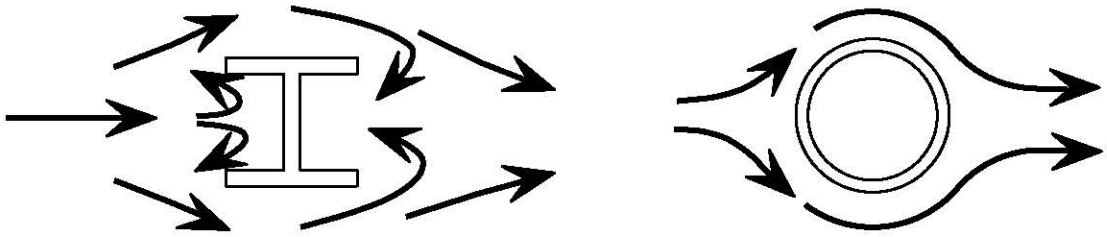


Figura 3 Comparación de las líneas de flujo de aire alrededor de perfiles abiertos y tubos circulares

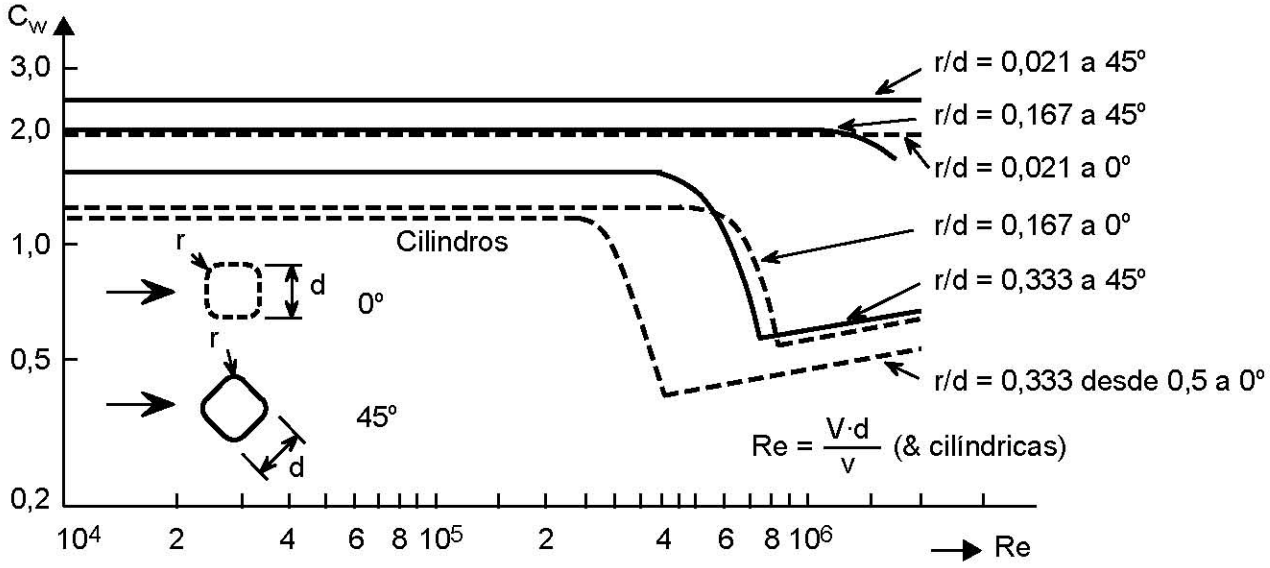


Figura 4 Curvas de coeficiente aerodinámico para barras simples de sección cuadrada (de superficie suave) con diferentes radios en las esquinas en función del número de Reynold