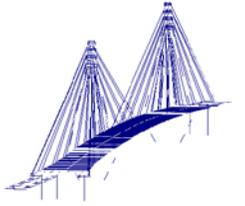


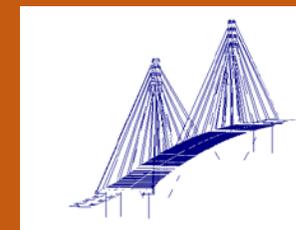
# Cátedra de Construcción



**Curso  
2018-19**

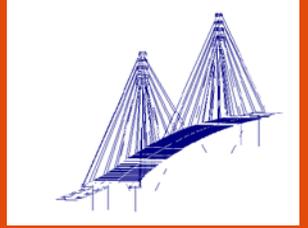
**PANDEO LOCAL**

**CLASIFICACION  
DE SECCIONES**



# CLASIFICACIÓN DE SECCIONES

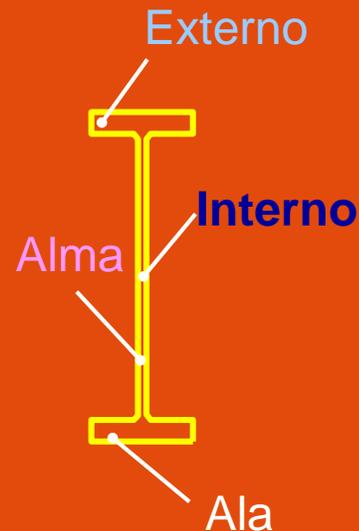
# Bases de la clasificación de secciones



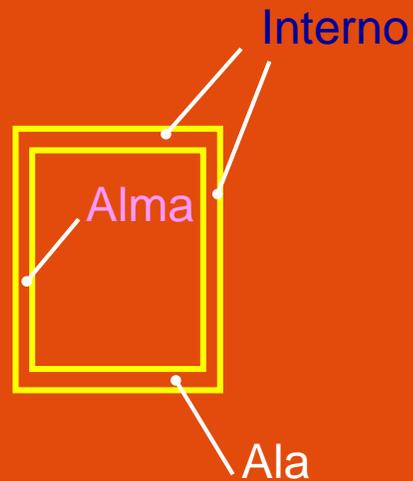
Las secciones laminadas o armadas, pueden ser consideradas como un conjunto de elementos planos individuales

Algunas son **internas**  
- almas de las vigas abiertas  
- alas de las vigas cajón

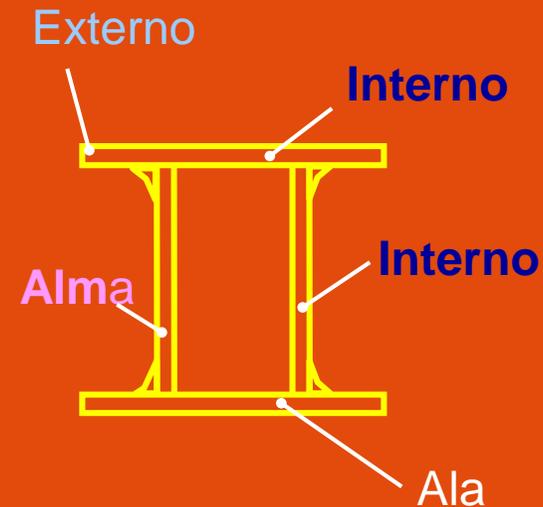
Algunas son **externas**  
- alas de vigas en I  
- alas de los angulares y Tes



Sección I laminada

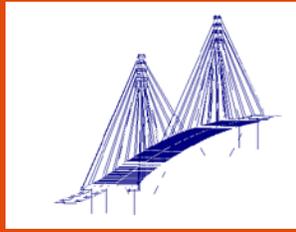


Sección hueca



Sección cajón soldada

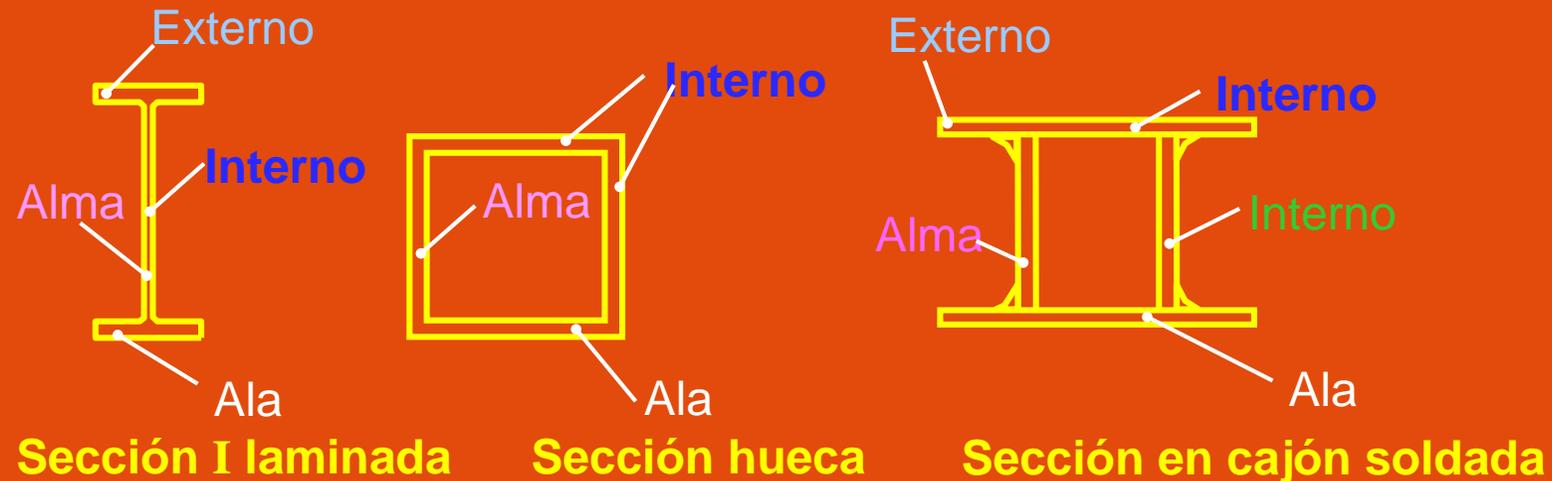
# Bases de la clasificación de secciones



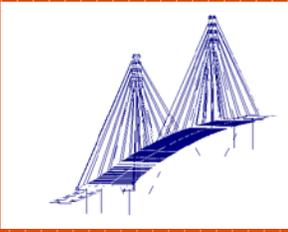
Como las chapas son relativamente delgadas, cuando se comprimen pueden sufrir **pandeo local**.

La tendencia al pandeo de una chapa dentro de la sección transversal, puede **limitar su capacidad axial de carga** o su **resistencia a flexión**, al impedir que se alcance el límite elástico.

Es posible evitar que aparezca **un fallo prematuro** debido a los efectos del pandeo local, **limitando la relación ancho-espesor** para cada chapa individual que constituye la sección transversal.



# Clasificación.



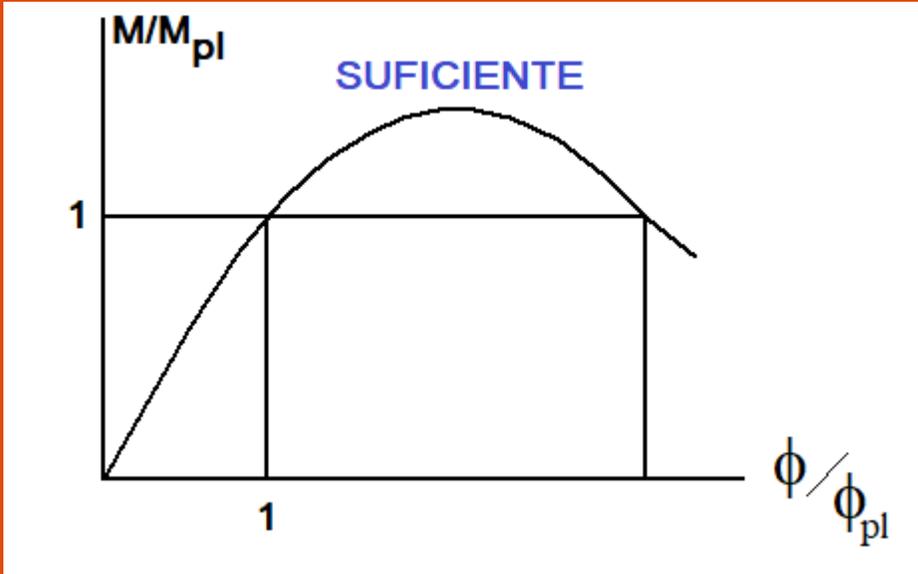
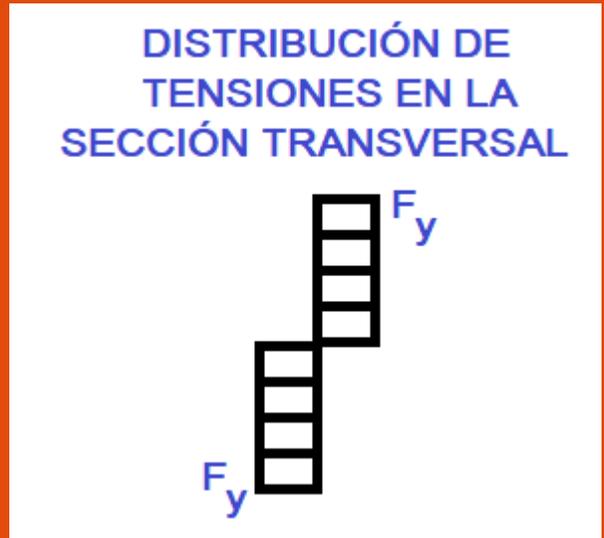
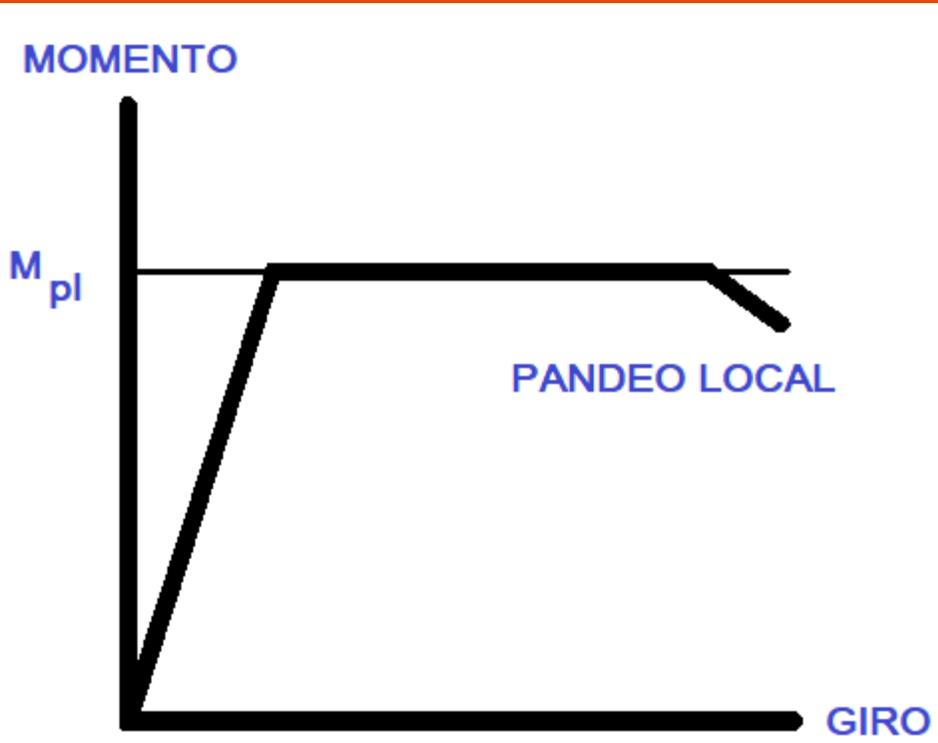
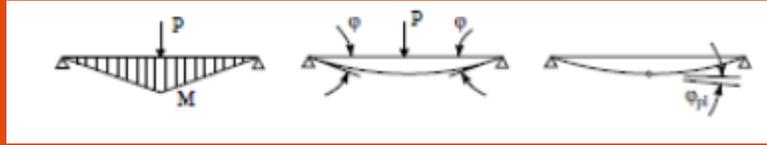
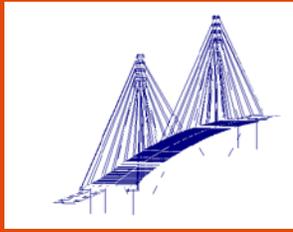
El EC3 define **cuatro clases** de sección transversal.

La clase en la que una sección particular falla depende de: **la esbeltez** de cada elemento (definida mediante una relación ancho-espesor).

**la distribución de tensiones** de compresión.

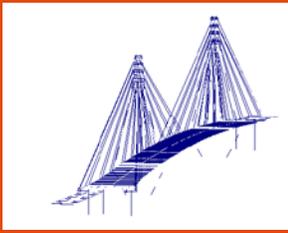
Las clases se definen en términos de sus **requerimientos** de resistencia a los **momentos flectores**.

# Secciones transversales Clase 1.

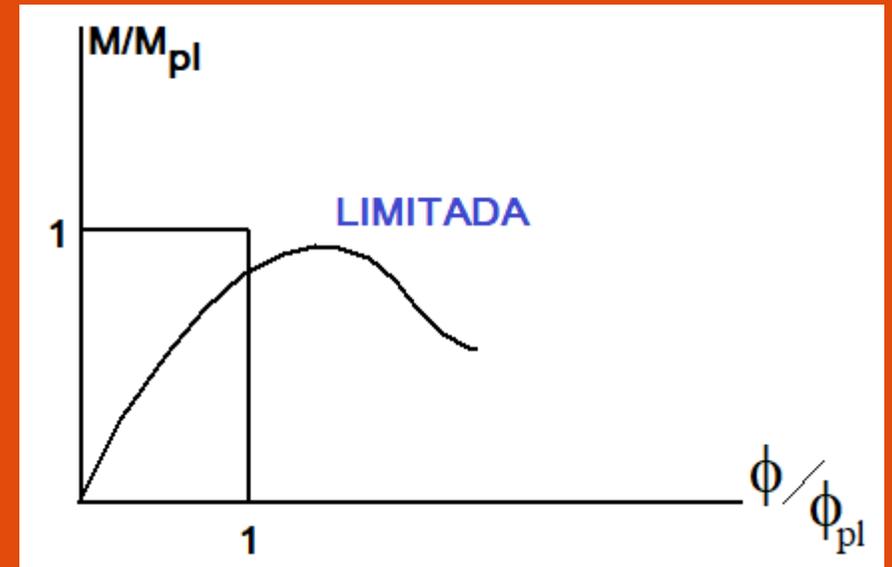
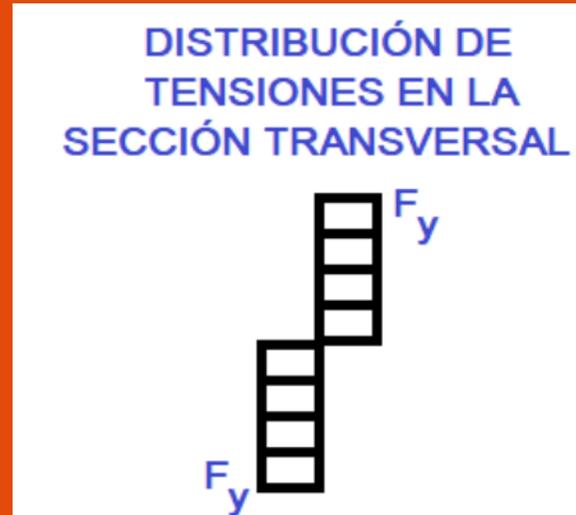
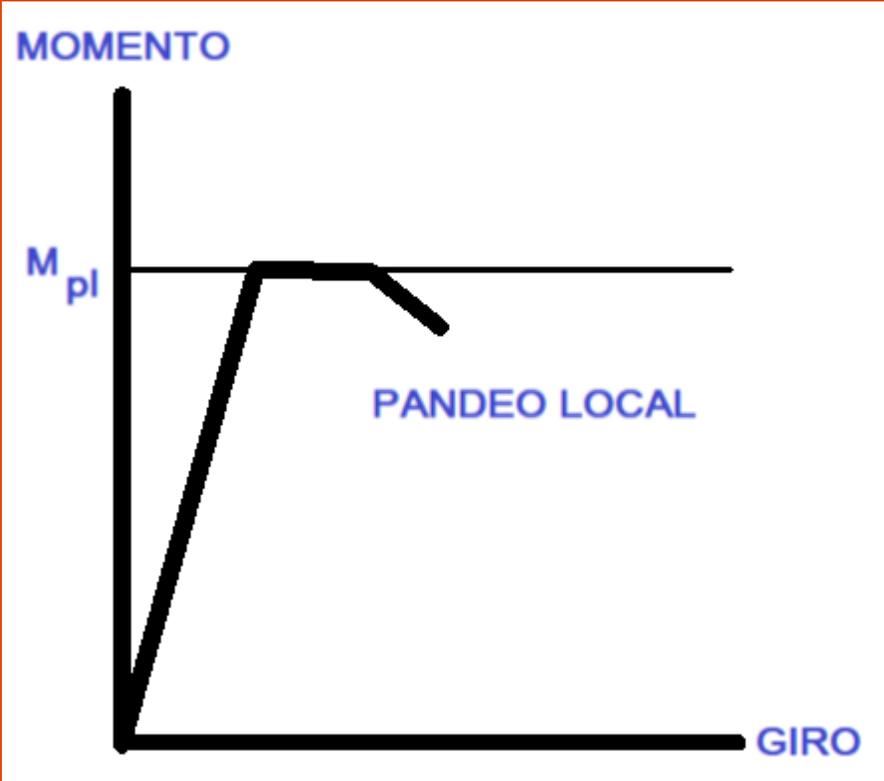


Modelo de comportamiento

Capacidad de rotación

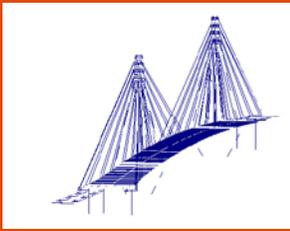


# Secciones transversales Clase 2.

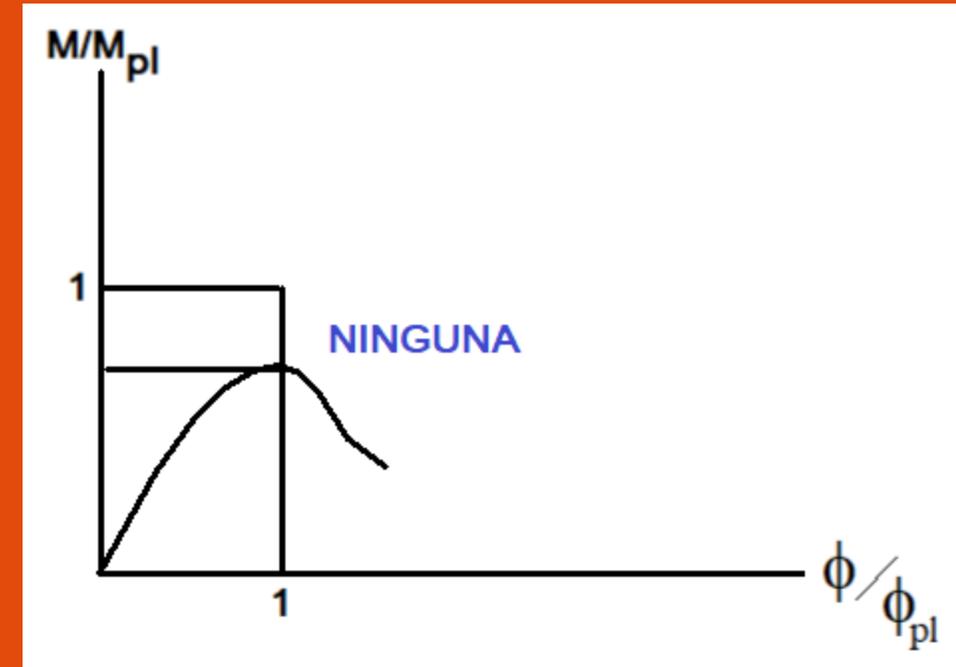
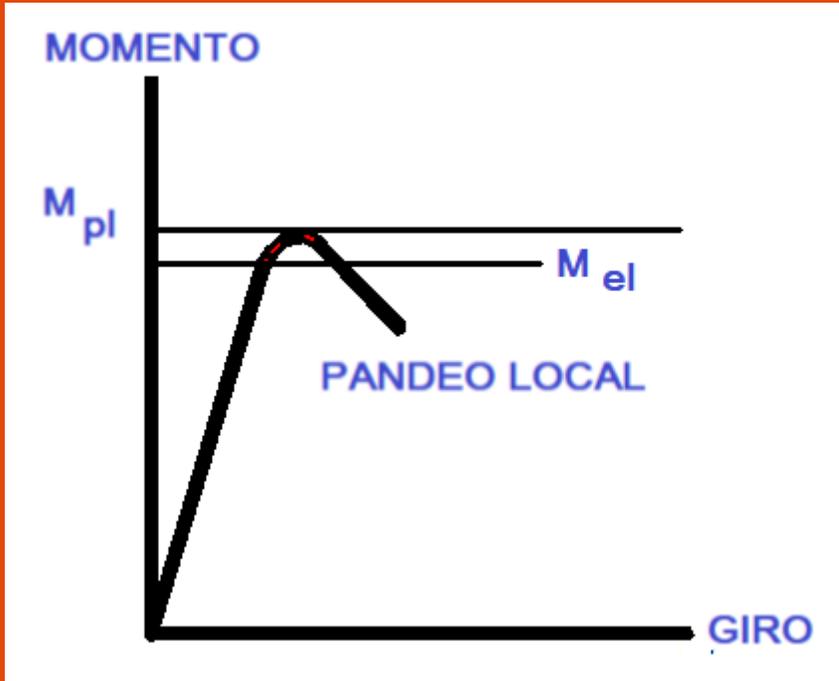


Modelo de comportamiento

Capacidad de rotación



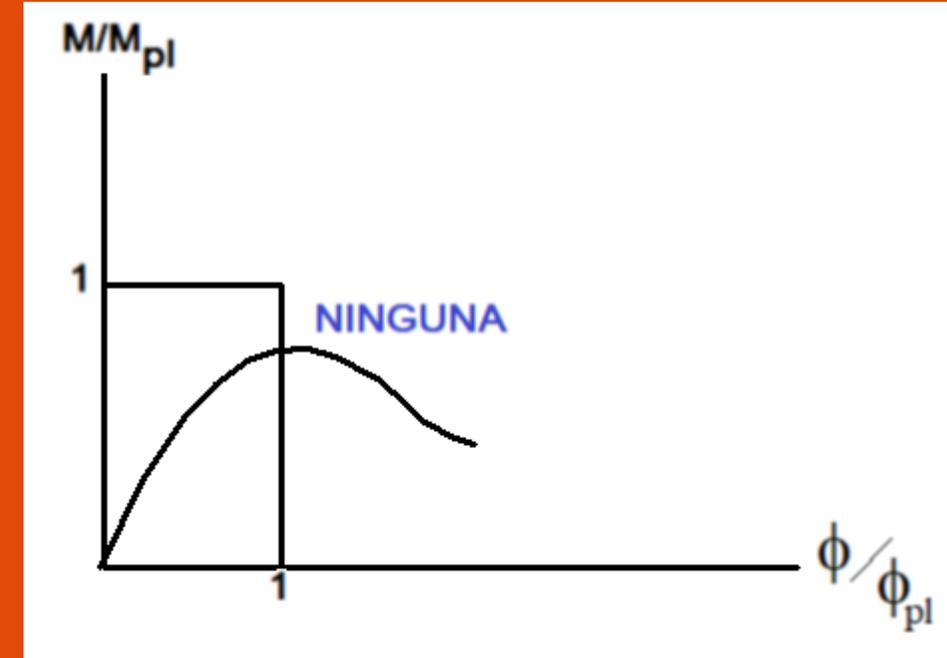
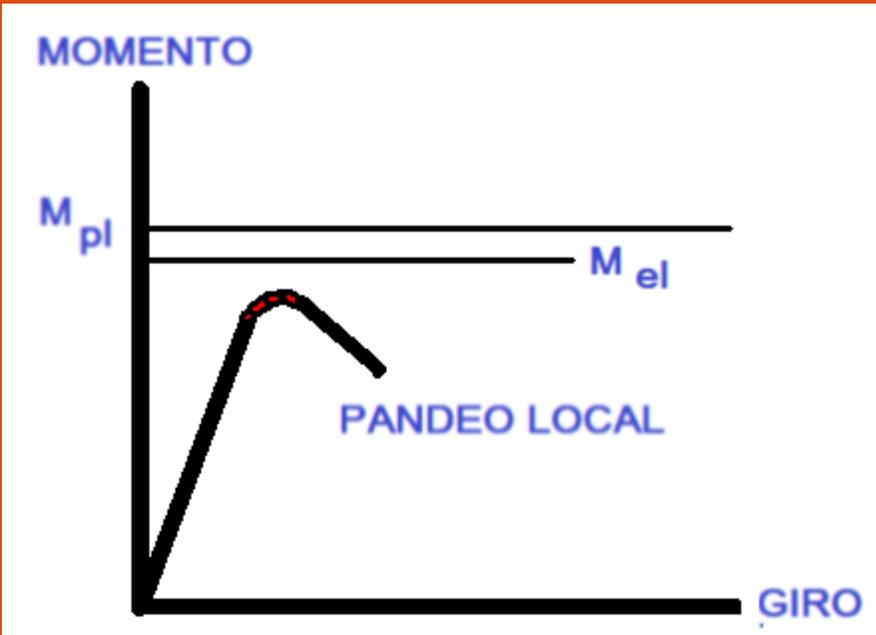
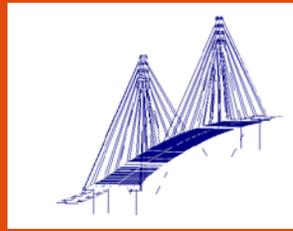
# Secciones transversales Clase 3.



Modelo de comportamiento

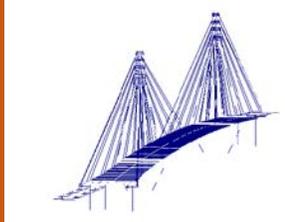
Capacidad de rotación

# Secciones transversales Clase 4.

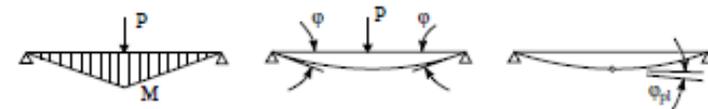


Modelo de comportamiento

Capacidad de rotación



Modelo de comportamiento	Resistencia al momento	Capacidad de rotación	Clase
	Momento plástico en la sección completa: 		1
	Momento plástico en la sección completa: 		2
	Momento elástico en la sección completa: 		3
	Momento elástico en la sección efectiva: 		4



Las resistencias al momento de las cuatro clases definidas arriba son:

Clases 1 y 2: el momento plástico es ( $M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$ )

Clase 3: el momento elástico es ( $M_{el} = W_{el} \cdot f_y$ )

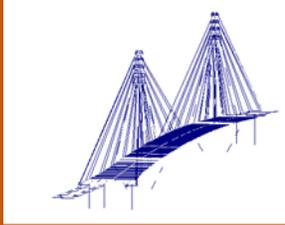
Clase 4: el momento de pandeo local es ( $M_o < M_{el}$ ).

La respuesta de las distintas clases de secciones transversales sometidas a flexión se representa eficazmente mediante curvas de momento-rotación adimensionados.

Las cuatro clases antedichas se refieren a secciones de vigas en flexión. Para barras cargadas en compresión axial, las clases 1, 2 y 3 se hacen una sola, y en ausencia de pandeo general, se denominan "compactas"; en este caso, la clase 4 se denomina "esbelta".



- Clase 1 Secciones plásticas: aquellas que pueden desarrollar una rótula plástica con suficiente capacidad de rotación para redistribuir momentos de flexión en la estructura.
- Clase 2 Secciones compactas: aquellas que pueden desarrollar resistencia al momento plástico, pero el pandeo local impide la rotación siendo constante el momento de la estructura.
- Clase 3 Secciones semicompactas: aquellas en las que la tensión de las fibras extremas debe limitarse hasta la fluencia porque el pandeo local impediría el desarrollo de la resistencia al momento plástico de la sección.
- Clase 4 Secciones esbeltas: aquellas cuyas fibras extremas no pueden llegar a la fluencia debido al pandeo local prematuro.

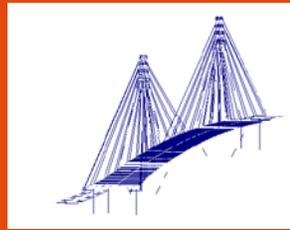


Modelo	Método de análisis global (cálculo de esfuerzos internos y momentos)	Cálculo de resistencia de la sección de la pieza
I	Plástico	Plástico
II	Elástico	Plástico
III	Elástico	Elástico
IV	Elástico	Pandeo elástico de la chapa



# PANDEO LOCAL

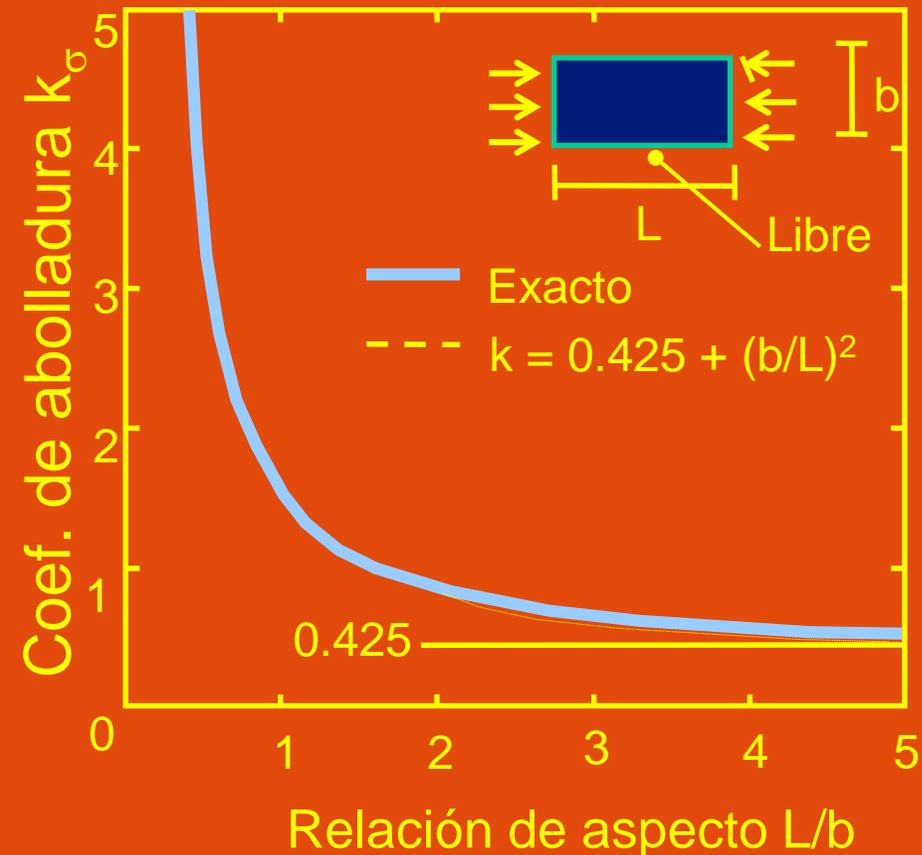
# Comportamiento de elementos placa en compresión

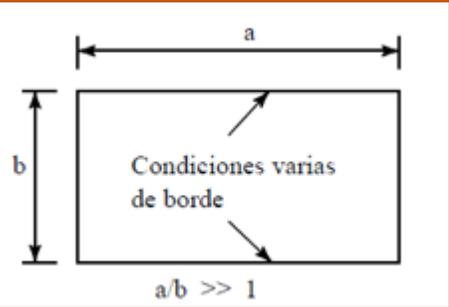
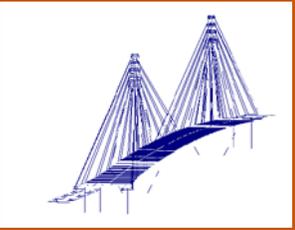


Una placa **rectangular plana y delgada**, sometida a compresión en sus bordes menores, presenta una tensión de abolladura crítica ( $\sigma_{cr}$ ) dada por:

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\sigma} \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2$$

$k_{\sigma}$  es el **coeficiente de abolladura** de la placa que tiene en cuenta la **vinculación de los bordes**, la **distribución de tensiones** y la relación de aspecto de la placa





En un elemento de chapa cuya **relación de forma o de aspecto**  $a = a/b$  (longitud-anchura) es mayor de alrededor de 0.8, la tensión crítica de pandeo elástico (tensión de pandeo de Euler) viene dada por:

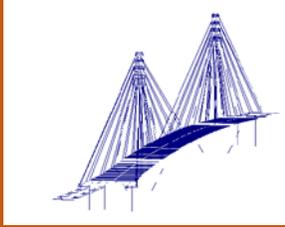
$$\sigma_{cr} = k_{\sigma} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Siendo

$k_{\sigma}$  el factor de pandeo de la chapa o coeficiente de abolladura

$\nu$  el coeficiente de Poisson

$E$  el módulo de Young.



El factor  $k_{\sigma}$  coeficiente de pandeo elástico dimensional depende de las condiciones de apoyo del borde, de la distribución de tensiones y de la relación de aspecto longitud-anchura ( $a/b$ ), y para compresión uniforme vale:

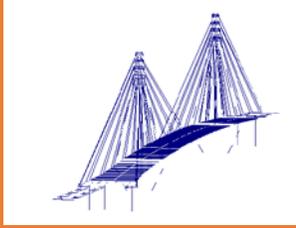
Condiciones de apoyos en el borde largo	Factor de pandeo $k_{\sigma}$
Empotramiento + empotramiento	6,97
Empotramiento + apoyo simple	5,41
Apoyo simple + apoyo simple	4,00
Empotramiento + libre	1,25
Apoyo simple + libre	0,43
Libre + libre	$(b/a)^2$ ( $- > 0$ )

Condiciones varias de borde

$a/b \gg 1$

Factor de pandeo elástico  $k_{\sigma}$

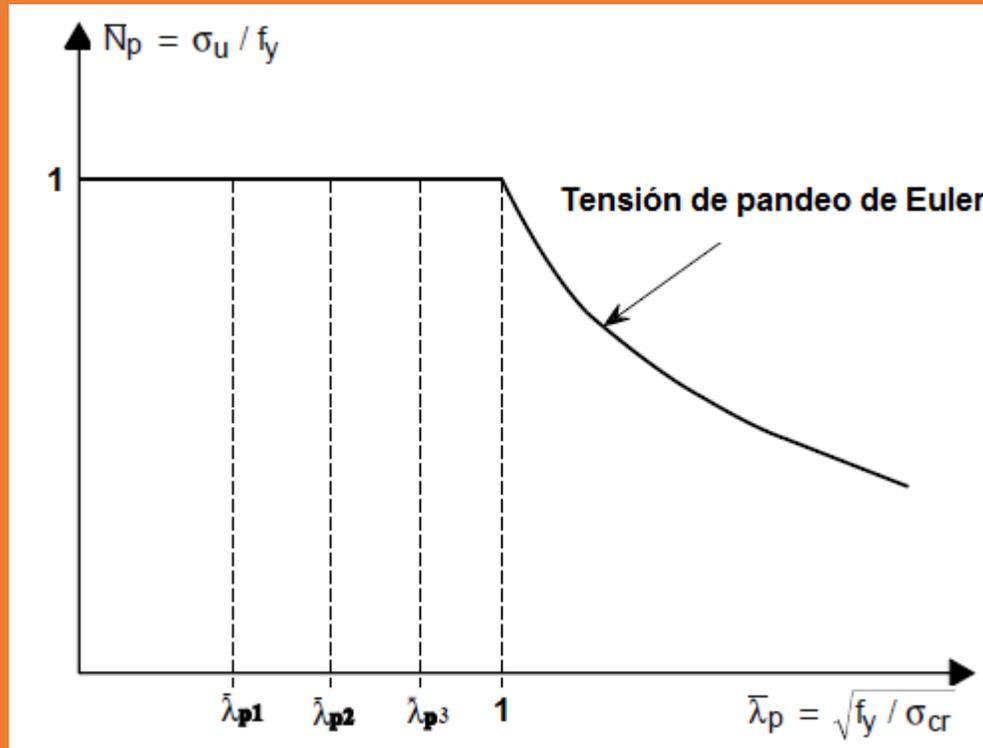


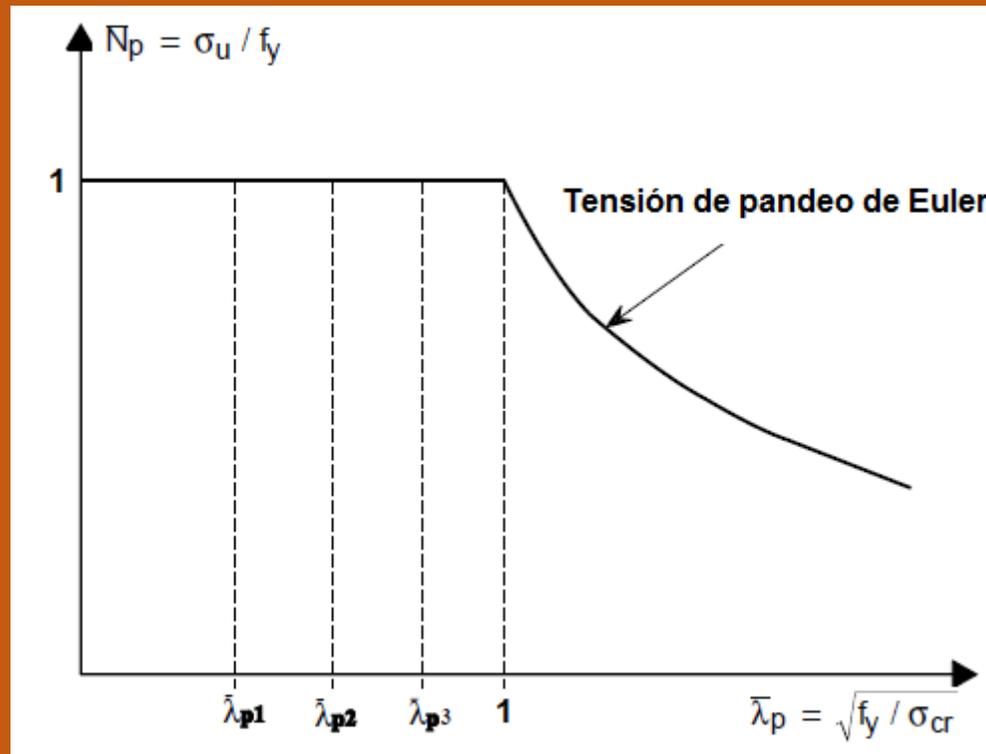
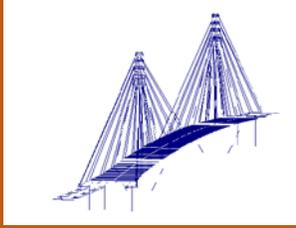
El comportamiento ideal elastoplástico de un elemento de chapa perfecto sometido a compresión uniforme se puede representar por un diagrama carga-esbeltez normalizado, en que la carga de rotura normalizada:

$$\bar{N}_p = \sigma_u / f_y$$

Y la esbeltez normalizada de la chapa:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}}$$



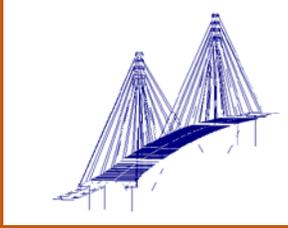


Para  $\lambda_p < 1$ ,  $N_p = 1$ , lo que significa que el elemento de chapa puede desarrollar su carga de aplastamiento  $\sigma_u = f_y$

Para  $\lambda_p > 1$ ,  $N_p$  se reduce a medida que la esbeltez de la chapa aumenta, siendo  $\sigma_u$  igual a  $\sigma_{cr}$ .

Sustituyendo por el valor de  $\sigma_{cr}$  en la anterior, y tomando  $\nu = 0,3$  tenemos:

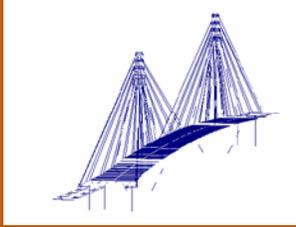
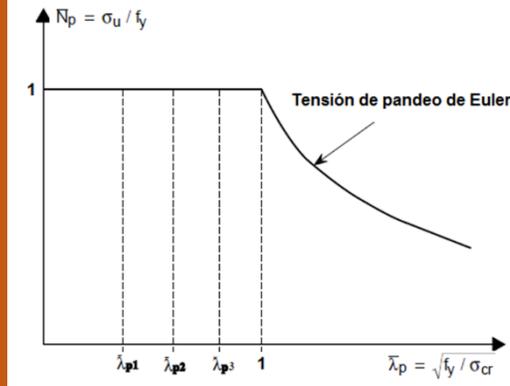
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{f_y \cdot 12(1-\nu)^2}{\pi^2 \cdot E \cdot k_\sigma} \left(\frac{b}{t}\right)^2} = 1,5 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E \cdot k_\sigma}}$$



Quando los elementos de chapa se someten a cualquier tipo de sollicitación directa que no sea compresión uniforme hay que modificar el factor de pandeo  $k_\sigma$  incluyendo el gradiente de la tensión dado por la relación de tensión  $\psi$ .

		I	II	III			
		$\sigma_2 =$ fuerza máxima de compresión y $\sigma_2$ es positiva $\psi = \sigma_2/\sigma_1$					
		$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Factor de pandeo $k_\sigma$	Caso I elemento interno		4,0	$\frac{8,02}{1,05+\psi}$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9
	Caso II elemento externo		0,43	$\frac{0,578}{\psi+0,34}$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8
	Caso III elemento externo		0,43	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	0,57	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	0,85

Factores de pandeo y reparto de tensiones



El comportamiento real es algo distinto del comportamiento elastoplástico ideal representado en la Figura, debido a:

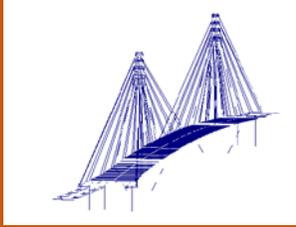
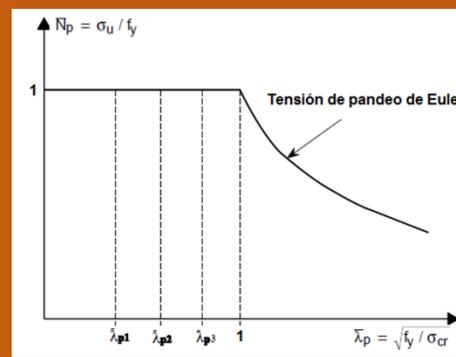
- i. imperfecciones iniciales, geométricas y del material
- ii. endurecimiento por deformación del material Las imperfecciones iniciales producen

El pandeo de la chapa, que ocurre cuando  $\lambda_p < 1$ .

La correspondiente esbeltez límite de la chapa  $\lambda_{p3}$ , para secciones Clase 3, difiere considerablemente de un país a otro debido a la variación estadística de las imperfecciones y a las propiedades de los materiales que no se conocen lo suficiente para cuantificarlas con exactitud.

Un examen de los códigos nacionales principales indica que fluctúa de 0,5 a 0,9 aproximadamente.

El EC 3 ha adoptado  $\lambda_{p3} = 0,74$  como límite de esbeltez de la chapa de los elementos Clase 3 en compresión y  $\lambda_{p3} = 0,9$  para elementos en flexión en los que las fibras extremas de la sección puedan alcanzar la tensión de fluencia.



Una sección Clase 1 debe desarrollar un momento de resistencia igual a su capacidad plástica y mantenerla a lo largo de deformaciones inelásticas relativamente largas.

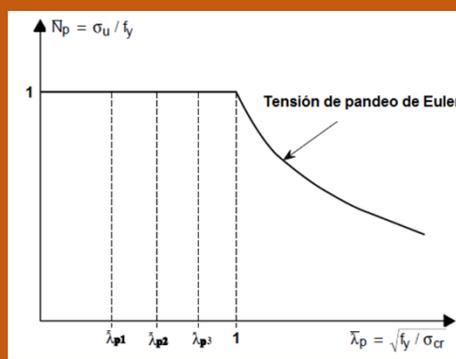
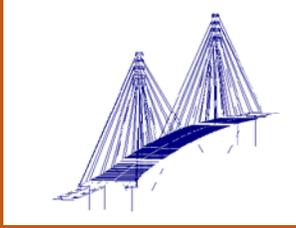
Para cumplir estas condiciones sin pandeo, todo el elemento de placa ha de estar en fluencia y el material deformado en la región de deformación endurecimiento esto sólo es posible en los elementos con poca esbeltez de referencia ( $\lambda_p < \lambda_{p1}$ ).

Basándose en ciertos planteamientos teóricos varias normas proponen valores de  $\lambda_{p1}$  entre 0,46 y 0,6. La diferencia se explica por la elección de la cantidad de capacidad de rotación necesaria.

Un valor de  $\lambda_{p1} = 0,6$  corresponde a una capacidad de rotación reducida que se estima suficiente en el cálculo plástico habitual (vigas continuas, pórticos sin desplazamiento lateral, etc.).

El valor propuesto por el Eurocódigo 3 es:

$$\lambda_{p1} = 0,5$$



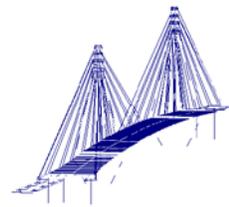
La sección Clase 2 (o sección compacta) es la que puede llegar justo a la resistencia al momento plástico, pero en ese punto sus resistencias disminuyen rápidamente

El elemento de chapa está en fluencia y el material deformado en el campo plástico; esto ocurre en los elementos con una esbeltez media de referencia de  $\lambda_{p2}$ , donde:

$$\lambda_{p1} < \lambda_{p2} < \lambda_{p3}$$

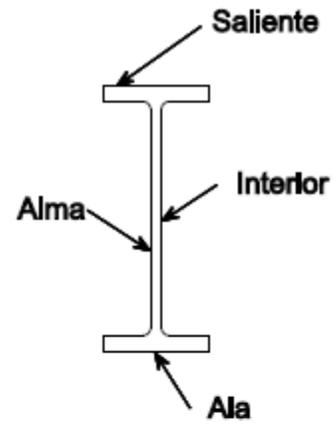
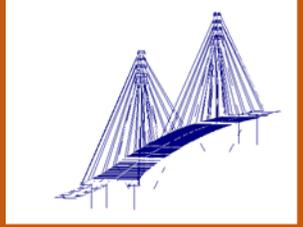
El valor propuesto por el EC 3 es:

$$\lambda_{p1} = 0,6$$

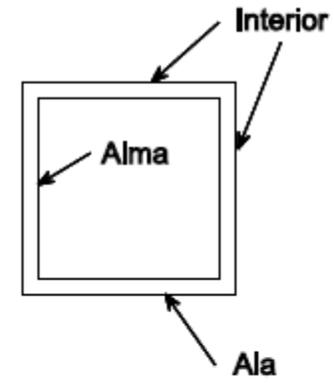


	Elemento	Sección Clase 1	Sección Clase 2	Sección Clase 3		
				Fórmula	$k_{\sigma}$	$b^*/t$ ó $d/t_w$
	Ala <sup>(1)</sup> ( $b^*/t$ )	$9 \epsilon$	$10 \epsilon$	$21\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$	0,43	$14 \epsilon$ <sup>(1)</sup>
	Alma en compresión $d/t_w$	$33 \epsilon$	$38 \epsilon$	$21\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$	1,0	$42 \epsilon$
	Alma en flexión para $d/t_w$	$72 \epsilon$	$83 \epsilon$	$25,4 \epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$	23,9	$124 \epsilon$
	$f_y$	235	275	355		
$\epsilon = \sqrt{f_y / 235}$	$\epsilon$	1,0	0,92	0,81		

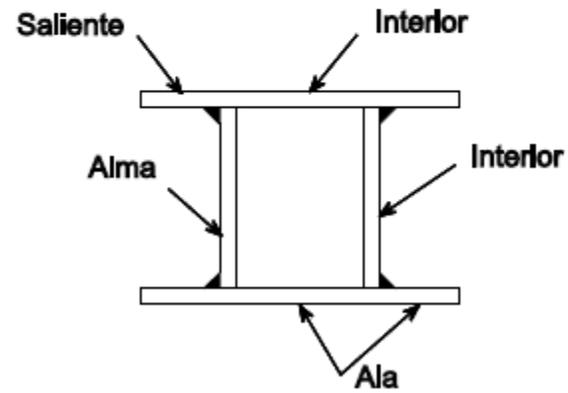
<sup>(1)</sup> En la práctica se considera la mitad del ancho del ala,  $b$ , en lugar de  $b^*$ . Por esta razón, los valores en "Essentials of Eurocode 3" son  $b = 15 \epsilon > b^*$ .



(a) Perfiles en I-laminados



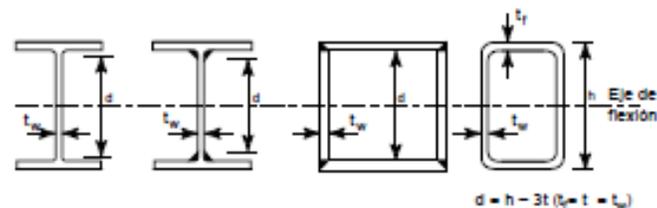
(b) Secciones tubulares



(c) Secciones tubulares armadas

Tabla 1 Relaciones máximas anchura-espesor para elementos en compresión

a. Almas (elementos internos perpendiculares al eje de flexión)



Clase	Alma sujeta a flexión	Alma sujeta a compresión	Alma sujeta a flexión y compresión	
Distribución de tensiones en elemento (compresión positiva)				
1	$d/t_w \leq 72 \epsilon$	$d/t_w \leq 33 \epsilon$	cuando $\alpha > 0,5$ : $d/t_w \leq 396 \epsilon / (13\alpha - 1)$ cuando $\alpha \leq 0,5$ : $d/t_w \leq 36 \epsilon / \alpha$	
2	$d/t_w \leq 83 \epsilon$	$d/t_w \leq 38 \epsilon$	cuando $\alpha > 0,5$ : $d/t_w \leq 456 \epsilon / (13\alpha - 1)$ cuando $\alpha \leq 0,5$ : $d/t_w \leq 41,5 \epsilon / \alpha$	
Distribución de tensiones en elemento (compresión positiva)				
3	$d/t_w \leq 124 \epsilon$	$d/t_w \leq 42 \epsilon$	cuando $\psi > -1$ : $d/t_w \leq 42 \epsilon / (0,67 + 0,33 \psi)$ cuando $\psi \leq -1$ : $d/t_w \leq 62 \epsilon (1 - \psi) \sqrt{(-\psi)}$	
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y$	235	275	355
	$c$	1	0,92	0,81

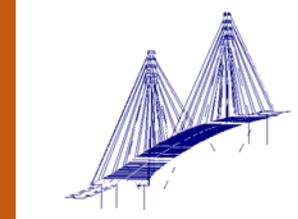
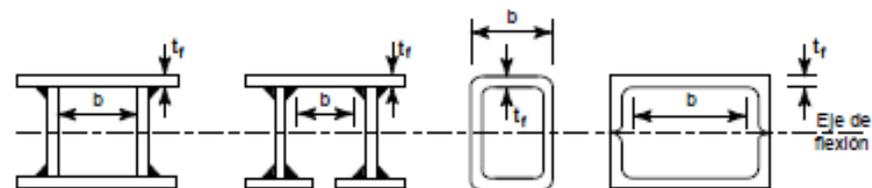


Tabla 2 Relaciones máximas anchura-espesor para elementos en compresión

b. Elementos internos del ala: (Elementos internos paralelos al eje o a la flexión)



Clase	Tipo	Sección en flexión	Sección en compresión	
Distribución de tensiones en elemento y a lo largo de la sección (compresión positiva)				
1	Sección hueca laminada Otras	$(b-3t_f)t_f \leq 33c$ $b/t_f \leq 33c$	$(b-3t_f)t_f \leq 42c$ $b/t_f \leq 42c$	
2	Sección hueca laminada Otras	$(b-3t_f)t_f \leq 38c$ $b/t_f \leq 38c$	$(b-3t_f)t_f \leq 42c$ $b/t_f \leq 42c$	
Distribución de tensiones en elemento y a lo largo de la sección (compresión positiva)				
3	Sección hueca laminada Otras	$(b-3t_f)t_f \leq 42c$ $b/t_f \leq 42c$	$(b-3t_f)t_f \leq 42c$ $b/t_f \leq 42c$	
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y$	235	275	355
	$c$	1	0,92	0,81

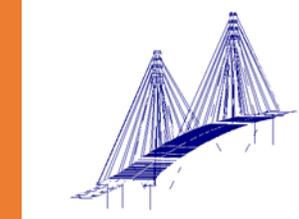
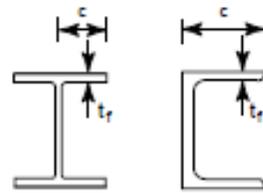
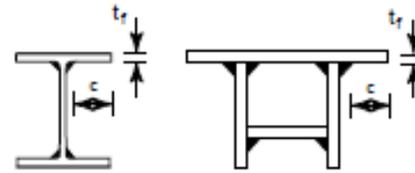


Tabla 3 Relaciones máximas anchura-espesor para elementos en compresión

c. Alas exteriores:



Secciones laminadas



Secciones soldadas

Clase	Tipo de perfil	Ala sujeta a compresión	Ala sujeta a compresión y flexión	
			Punta en compresión	Punta en tensión
Distribución de tensiones en elemento (compresión positiva)				
1	Laminado	$ct_f \leq 10 \epsilon$	$c / t_f \leq \frac{10 E}{\alpha}$	$c / t_f \leq \frac{10 E}{\alpha \sqrt{\alpha}}$
	Soldado	$ct_f \leq 9 \epsilon$	$c / t_f \leq \frac{9 E}{\alpha}$	$c / t_f \leq \frac{9 E}{\alpha \sqrt{\alpha}}$
2	Laminado	$ct_f \leq 11 \epsilon$	$c / t_f \leq \frac{11 E}{\alpha}$	$c / t_f \leq \frac{11 E}{\alpha \sqrt{\alpha}}$
	Soldado	$ct_f \leq 10 \epsilon$	$c / t_f \leq \frac{10 E}{\alpha}$	$c / t_f \leq \frac{10 E}{\alpha \sqrt{\alpha}}$
Distribución de tensiones en elemento (compresión positiva)				
3	Laminado	$ct_f \leq 15 \epsilon$	$ct_f \leq 23 \epsilon \sqrt{k_{\sigma}}$ $ct_f \leq 21 \epsilon \sqrt{k_{\sigma}}$ para $k_{\sigma}$ ver tabla 5.3.3	
	Soldado	$ct_f \leq 14 \epsilon$		
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y$	235	275	355
	$\epsilon$	1	0,92	0,81

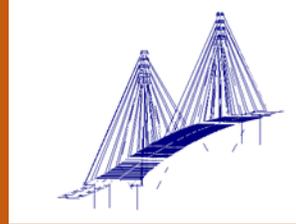
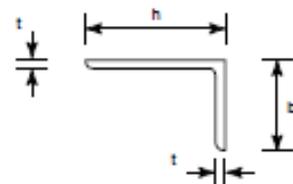


Tabla 4 Relaciones máximas anchura-espesor para elementos en compresión

d. Angulos

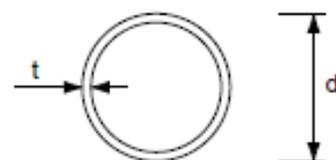


Véase también (c)  
"Alas exteriores"  
(Tabla 3)

(No se aplica a los angulares en contacto contiguo con otras piezas)

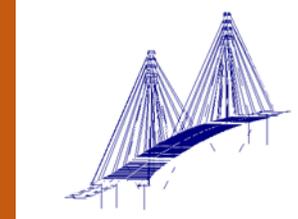
Clase	Sección en compresión
3	$ht \leq 15 \epsilon$ ; $(b + h)/2t \leq 11,5 \epsilon$

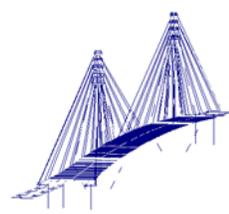
e. Secciones tubulares:



Clase	Sección en flexión y/o compresión
1	$dt \leq 50 \epsilon^2$
2	$dt \leq 70 \epsilon^2$
3	$dt \leq 90 \epsilon^2$

$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	$f_y$	235	275	355
	$\epsilon$	1	0,92	0,81
	$\epsilon^2$	1	0,85	0,66





#### Propiedades efectivas de las secciones transversales de la Clase 4.

Las propiedades efectivas de las secciones transversales de la Clase 4 se deben basar en la anchura eficaz de los elementos estructurales comprimidos de esta, para permitir la tolerancia necesaria para afrontar la reducción de su resistencia debido al pandeo local.

Los anchos eficaces de los elementos planos comprimidos se obtienen de la tabla 6.4., en el caso de elementos (alas) con bordes rigidizados y de la tabla 6.5 si tienen un borde libre o volador.

El coeficiente de reducción  $\rho$  se puede obtener de forma aproximada de la siguiente manera :

$$\text{Cuando } \lambda_p \leq 0.673 : \quad \rho = 1$$

$$\text{Cuando } \lambda_p > 0.673 : \quad \rho = (\lambda_p - 0.22) / \lambda_p^2$$

$$\text{en donde } \lambda_p \text{ es la esbeltez de la chapa dada por : } \lambda_p = \frac{\sqrt{\sigma_e}}{\sqrt{\sigma_E}} = \frac{b/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_c}}$$

siendo :

**t** = espesor de la chapa

$\sigma_E$  = es la tensión crítica de abolladura de la placa

$k_c$  = el coeficiente de pandeo correspondiente al valor de  $\psi$  de la relación de tensiones que se obtiene de la tabla 6.4., o de la tabla 6.5. según sea procedente.

$$\varepsilon = \sqrt{235 / \sigma_e} \text{ si } \sigma_e \text{ se expresa en MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{2400 / \sigma_e} \text{ si } \sigma_e \text{ se expresa en Kp/cm}^2$$

$$\varepsilon = \sqrt{34.11 / \sigma_e} \text{ si } \sigma_e \text{ se expresa en Kp/pie}^2$$

**b** = ancho apropiado de acuerdo a la tabla 6.3., obtenido de la siguiente forma :

**b** = h en el caso de almas

**b** = b en el caso de alas con bordes rigidizados (excepto perfiles laminados en caliente o RHS, Rolled Hot Sections)

**b** = b - 3t para alas de tubos rectangulares

**b** = c para alas voladas o libres

**b** = (b + h) / 2 en el caso de angulares de lados iguales

**b** = h ó (b + h) / 2 en el caso de angulares de lados desiguales

Para determinar las anchuras eficaces de aquellos elementos con alas, se emplea la sección bruta para establecer la relación de tensiones  $\psi$  de las tablas 6.4.y.6.5..

Para establecer el ancho eficaz de un alma, la relación de tensiones  $\psi$  de la tabla 6.4. se obtiene empleando el área eficaz del ala comprimida y el área bruta del alma.

En general el eje neutro de la sección transversal eficaz se desplaza una distancia **e** con relación al eje neutro de la sección transversal total, lo que ha de considerarse cuando se calculen las propiedades de la sección transversal eficaz, ver figura 6.8..

Igualmente cuando la sección este sometida a un esfuerzo axial N se debe considerar el momento adicional  $\Delta M = N e_n$ , siendo  $e_n$  el desplazamiento de la fibra neutra.

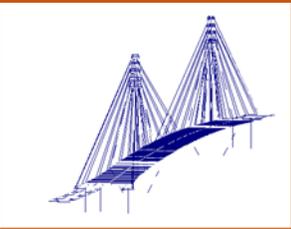
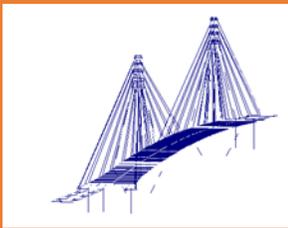


Tabla 6.4. Elementos internos sometidos a compresión						
Distribución de tensiones (compresión positiva)			Ancho eficaz $b_{eff}$			
			<u><math>\psi = 1</math></u>			
			$b_{eff} = \rho b$ $b_{e1} = 0.5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.5 b_{eff}$			
			<u><math>1 &gt; \psi \geq 0</math></u>			
			$b_{eff} = \rho b$ $b_{e1} = \frac{2b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$			
			<u><math>\psi &lt; 0</math></u>			
			$b_{eff} = \rho b_c = \rho b / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0.4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6 b_{eff}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -2$
Coefficiente de pandeo $k_\sigma$	4.0	$\frac{8.2}{1.05 - \psi}$	7.81	$7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2$	23.9	$5.98(1 - \psi)^2$
Alternativamente para $1 \geq \psi \geq -1$ $k_\sigma = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0.112(1 - \psi)^2]^{0.5} + (1 + \psi)}$						



**Tabla 6.5. Elementos volados sometidos a compresión**

Distribución de tensiones (compresión positiva)		Ancho eficaz $b_{eff}$			
		<u><math>1 &gt; \psi \geq 0</math></u>			
		$b_{eff} = \rho c$			
		<u><math>\psi &lt; 0</math></u>			
		$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	0	-1	$1 > \psi > -1$	
Coefficiente de pandeo $k_c$	0.43	0.57	0.85	$0.57 - 0.21\psi + 0.07\psi^2$	
		<u><math>1 &gt; \psi \geq 0</math></u>			
		$b_{eff} = \rho c$			
		<u><math>\psi &lt; 0</math></u>			
		$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficiente de pandeo $k_c$	0.43	$\frac{0.578}{\psi + 0.34}$	1.70	$1.7 - 5\psi + 17.1\psi^2$	23.9

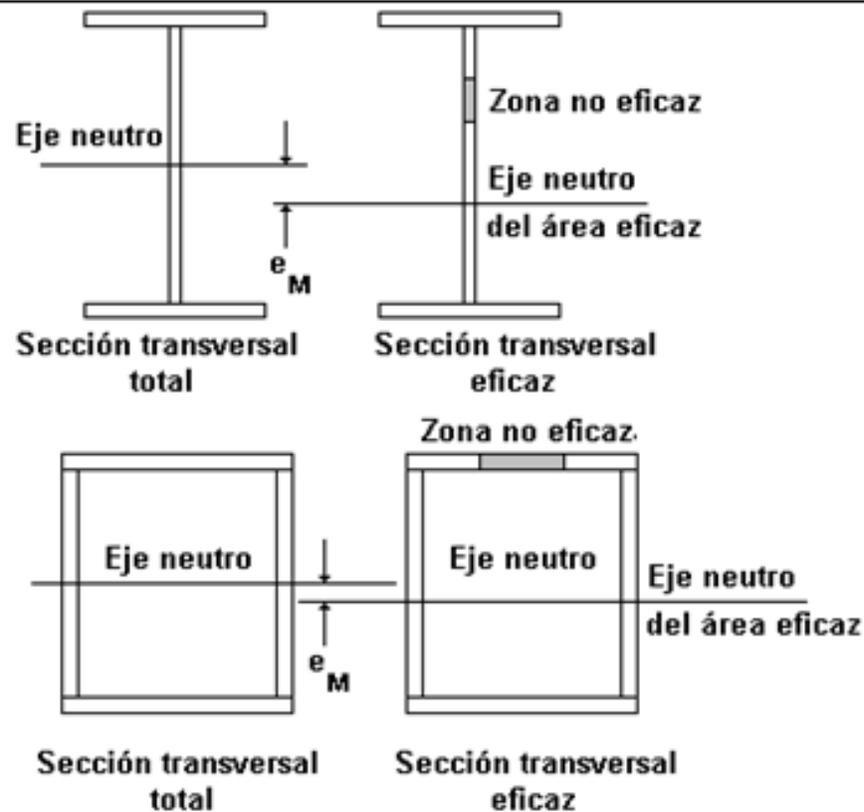
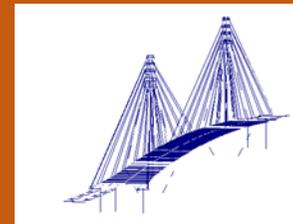


Figura 6.8. Sección transversal de Clase 4 - Momento flector

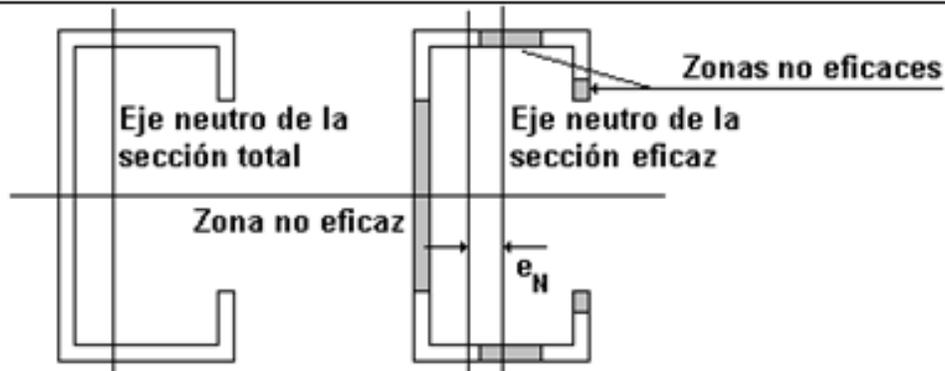


Figura 6.8. Sección transversal de Clase 4 - Esfuerzo axial