


HOJA DE CÁLCULO 	Ref. Documento	<i>SX022a-ES-EU</i>	Hoja	1	de	8
	Título	<i>Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión</i>				
	Eurocódigo Ref	EN 1993-1-3				
	Hecho por	V. Ungureanu, A. Ruff	Fecha	Dic 2005		
	Revisado por	D. Dubina	Fecha	Dic 2005		

Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión

Este ejemplo contempla el cálculo de las propiedades efectivas para una sección en C con reborde, sometida a flexión alrededor del eje principal.

En el diseño práctico de secciones de espesor delgado relativas a EN1993, los proyectistas utilizan normalmente un software o la información del fabricante. Este ejemplo se presenta con fines ilustrativos

Datos básicos

Las dimensiones de la sección transversal y las propiedades del material son:

Altura total $h = 200 \text{ mm}$

Anchura total del ala en compresión $b_1 = 74 \text{ mm}$

Anchura total del ala en tracción $b_2 = 66 \text{ mm}$

Anchura total del pliegue del borde $c = 20,8 \text{ mm}$

Radio interno $r = 3 \text{ mm}$

Espesor nominal $t_{\text{nom}} = 2 \text{ mm}$

Espesor de la chapa de acero $t = 1,96 \text{ mm}$

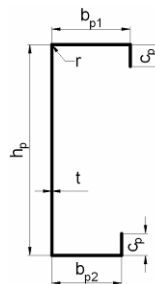
Límite elástico $f_{yb} = 350 \text{ N/mm}^2$

Módulo de elasticidad $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

Módulo de Poisson $\nu = 0,3$

Factor parcial: $\gamma_{M0} = 1,00$

Las dimensiones de la sección central son:




[EN1993-1-3](#)

[§ 3.2.4\(3\)](#)

[EN1993-1-3](#)

[§ 2\(3\)](#)

HOJA DE CÁLCULO 	Ref. Documento	<i>SX022a-ES-EU</i>	Hoja	2	de	8
	Título	<i>Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión</i>				
	Eurocódigo Ref	<i>EN 1993-1-3</i>				
	Hecho por	<i>V. Ungureanu, A. Ruff</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		
	Revisado por	<i>D. Dubina</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		

Verificación de las proporciones geométricas

El método de diseño de EN1993-1-3 se puede aplicar si se satisfacen las siguientes condiciones: [EN1993-1-3](#)

$$b/t \leq 60 \quad b_1/t = 74/1,96 = 37,75 < 60 \quad - \text{Correcto}$$

$$c/t \leq 50 \quad c/t = 20,8/1,96 = 10,61 < 50 \quad - \text{Correcto}$$

$$h/t \leq 500 \quad h/t = 200/1,96 = 102,04 < 500 \quad - \text{Correcto}$$

Con el fin de proporcionar suficiente rigidez y evitar el pandeo primario del rigidizador, el tamaño del rigidizador debe estar dentro del siguiente rango:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6 \quad c/b_1 = 20,8/74 = 0,28 \quad 0,2 < 0,28 < 0,6 \quad - \text{Correcto}$$

$$c/b_2 = 20,8/66 = 0,32 \quad 0,2 < 0,32 < 0,6 \quad - \text{Correcto}$$

La influencia del redondeo de las esquinas es despreciable si:

$$r/t \leq 5 \quad r/t = 3/1,96 = 1,53 < 5 \quad - \text{Correcto}$$

$$r/b_p \leq 0,10 \quad r/b_{p1} = 3/72 = 0,04 < 0,10 \quad - \text{Correcto}$$

$$r/b_{p2} = 3/64 = 0,05 < 0,10 \quad - \text{Correcto}$$

Propiedades de la sección bruta


$$A_{br} = t(2c_p + b_{p1} + b_{p2} + h_p) = 1,96 \times (2 \times 19,8 + 72 + 64 + 198) = 732 \text{ mm}^2$$

Posición del eje neutro con respecto al ala en compresión:

$$z_{b1} = \frac{[c_p(h_p - c_p/2) + b_{p2}h_p + h_p^2/2 + c_p^2/2]t}{A_{br}} = 96,88 \text{ mm}$$

Propiedades de la sección efectiva del ala y del reborde en compresión

El procedimiento general (iterativo) se aplica para calcular las propiedades efectivas del ala en compresión y el reborde (elemento plano con rigidizadores de borde). El cálculo debe efectuarse en tres pasos: [EN1993-1-3](#)
[§ 5.5.3.2](#)

HOJA DE CÁLCULO 	Ref. Documento	SX022a-ES-EU	Hoja	3	de	8
	Título	Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión				
	Eurocódigo Ref	EN 1993-1-3				
	Hecho por	V. Ungureanu, A. Ruff	Fecha	Dic 2005		
	Revisado por	D. Dubina	Fecha	Dic 2005		

Paso 1:

Obtener una sección transversal efectiva para el rigidizador, utilizando anchuras efectivas del ala determinada, asumiendo que el ala en compresión está doblemente apoyada, el rigidizador proporciona restricción total ($K = \infty$) y que la resistencia de cálculo no se reduce ($\sigma_{\text{com,Ed}} = f_{yb} / \gamma_{M0}$).

[EN1993-1-3](#)[§ 5.5.3.2\(3\)](#)Anchura efectiva del ala en compresión

La relación de tensión: $\psi = 1$ (compresión uniforme), luego el factor de pandeo es: $k_{\sigma} = 4$ para compresión interna del elemento.

[EN1993-1-3](#)[§ 5.5.2](#)

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yb}}$$

y

[EN1993-1-5](#)

La esbeltez relativa:

[§ 4.4](#)

$$\bar{\lambda}_{p,b} = \frac{b_{p1}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{72/1,96}{28,4 \times \sqrt{235/350} \times \sqrt{4}} = 0,789$$

El factor de reducción de anchura es:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,b} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b}^2} = \frac{0,789 - 0,055 \times (3 + 1)}{0,789^2} = 0,914$$

La anchura efectiva es:

$$b_{\text{eff}} = \rho b_{p1} = 0,914 \times 72 = 65,8 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}} = 0,5 \times 65,8 = 32,9 \text{ mm}$$

Anchura efectiva del pliegue de borde

El factor de pandeo es:

[EN1993-1-3](#)

$$\text{si } b_{p,c}/b_{p1} \leq 0,35: \quad k_{\sigma} = 0,5$$

[§ 5.5.3.2\(5a\)](#)

$$\text{si } 0,35 < b_{p,c}/b_{p1} \leq 0,6: \quad k_{\sigma} = 0,5 + 0,83 \sqrt{(b_{p,c}/b_{p1} - 0,35)^2}$$


$$b_{p,c}/b_{p1} = 19,8/72 = 0,275 < 0,35 \quad \text{luego: } k_{\sigma} = 0,5$$

La esbeltez relativa:

[EN1993-1-5](#)

$$\bar{\lambda}_{p,c} = \frac{c_p/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{19,8/1,96}{28,4 \times \sqrt{235/350} \times \sqrt{0,5}} = 0,614$$

[§ 4.4](#)

HOJA DE CÁLCULO 	Ref. Documento	<i>SX022a-ES-EU</i>	Hoja	4	de	8
	Título	<i>Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión</i>				
	Eurocódigo Ref	<i>EN 1993-1-3</i>				
	Hecho por	<i>V. Ungureanu, A. Ruff</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		
	Revisado por	<i>D. Dubina</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		

El factor de reducción de anchura es:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p,c}^2} = \frac{0,614 - 0,188}{0,614^2} = 1,13$$

pero $\rho \leq 1$ luego $\rho = 1$

La anchura efectiva es:

$$c_{\text{eff}} = \rho c_p = 1 \times 19,8 = 19,8 \text{ mm}$$

El área efectiva del rigidizador de borde:

$$A_s = t(b_{e2} + c_{\text{eff}}) = 1,96 \times (32,9 + 19,8) = 103,3 \text{ mm}^2$$

Paso 2:

Utilizar la sección transversal efectiva inicial del rigidizador para determinar el factor de reducción, teniendo en cuenta los efectos de restricción de resorte continuo

La tensión de pandeo crítica elástica para el rigidizador de borde es

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K E I_s}}{A_s}$$

donde

K es la rigidez de resorte por unidad de longitud:

$$K = \frac{E t^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_p + b_1^3 + 0,5 b_1 b_2 h_p k_f}$$

con:

b_1 – distancia desde el alma al centro del área efectiva del rigidizador en compresión (ala superior)

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} t b_{e2} / 2}{(b_{e2} + c_{\text{eff}}) t} = 72 - \frac{32,9 \times 1,96 \times 32,9 / 2}{(32,9 + 19,8) \times 1,96} = 61,73 \text{ mm}$$

$k_f = 0$ para flexión alrededor del eje y - y

$$K = 0,439 \text{ N/mm}$$

[EN1993-1-3](#)

[§ 5.5.3.2\(5a\)](#)

[§ 5.5.3.2\(6\)](#)

[EN1993-1-3](#)


[§ 5.5.3.2\(3\)](#)

[EN1993-1-3](#)

[§ 5.5.3.2\(7\)](#)

[EN1993-1-3](#)

[§ 5.5.3.1\(5\)](#)

HOJA DE CÁLCULO 	Ref. Documento	<i>SX022a-ES-EU</i>	Hoja	5	de	8
	Título	<i>Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión</i>				
	Eurocódigo Ref	EN 1993-1-3				
	Hecho por	V. Ungureanu, A. Ruff	Fecha	Dic 2005		
	Revisado por	D. Dubina	Fecha	Dic 2005		

I_s es el momento de inercia del área del rigidizador:

$$I_s = \frac{b_{e2} t^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 t}{12} + b_{e2} t \left[\frac{c_{eff}^2}{2(b_{e2} + c_{eff})} \right]^2 + c_{eff} t \left[\frac{c_{eff}}{2} - \frac{c_{eff}^2}{2(b_{e2} + c_{eff})} \right]^2$$

$$I_s = 3663 \text{ mm}^4$$

por lo tanto, la tensión de pandeo crítica elástica para el rigidizador de borde es

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \times \sqrt{0,439 \times 210000 \times 3663}}{103,3} = 355,78 \text{ N/mm}^2$$

Coefficiente de reducción del espesor χ_d para el rigidizador de borde

La esbeltez relativa:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} = \sqrt{350 / 355,78} = 0,992$$

El coeficiente de reducción será:

$$\text{si } \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad \chi_d = 1,0$$

$$\text{si } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d$$

$$\text{si } \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad \chi_d = 0,66 / \bar{\lambda}_d$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,992 < 1,38 \quad \text{luego: } \chi_d = 1,47 - 0,723 \times 0,992 = 0,753$$

Paso 3:

Como el coeficiente de reducción por pandeo del rigidizador es $\chi_d < 1$, iterar para precisar el valor del coeficiente de reducción para pandeo del rigidizador.

Las iteraciones se hicieron sobre los valores modificados de ρ obtenidos utilizando:

$$\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb} / \gamma_{M0} \quad \text{y} \quad \bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}$$

La iteración se detiene cuando el factor de reducción χ converge.

[EN1993-1-3](#)

[§ 5.5.3.2\(3\)](#)

[Figura 5.10d](#)

[EN1993-1-3](#)

[§ 5.5.3.1\(7\)](#)

[EN1993-1-5](#)

[§ 4.4\(2\)](#)


[EN1993-1-3](#)

[§ 5.5.3.2\(3\)](#)

[Figura 5.10e](#)

[EN1993-1-3](#)

[§ 5.5.3.2 \(10\)](#)

HOJA DE CÁLCULO 	Ref. Documento	<i>SX022a-ES-EU</i>	Hoja	6	de	8
	Título	<i>Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión</i>				
	Eurocódigo Ref	<i>EN 1993-1-3</i>				
	Hecho por	<i>V. Ungureanu, A. Ruff</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		
	Revisado por	<i>D. Dubina</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		

Valores iniciales (iteración 1):

$$\chi_d = 0,753$$

$$b_{e2} = 32,9 \text{ mm}$$

$$c_{\text{eff}} = 19,8 \text{ mm}$$

Valores finales (iteración n):

$$\chi_d = \chi_{d,n} = 0,737$$

$$b_{e2} = b_{e2,n} = 35,9 \text{ mm}$$

$$c_{\text{eff}} = c_{\text{eff},n} = 19,8 \text{ mm}$$

Los valores finales de las propiedades efectivas para el ala y el reborde son:

$$\chi_d = 0,737 \quad b_{e2} = 35,9 \text{ mm} \quad c_{\text{eff}} = 19,8 \text{ mm}$$

$$\text{y } b_{e1} = 32,9 \text{ mm}$$

$$t_{\text{red}} = t\chi_d = 1,96 \times 0,737 = 1,44 \text{ mm}$$

[EN1993-1-3](#)
[§ 5.5.3.2\(12\)](#)

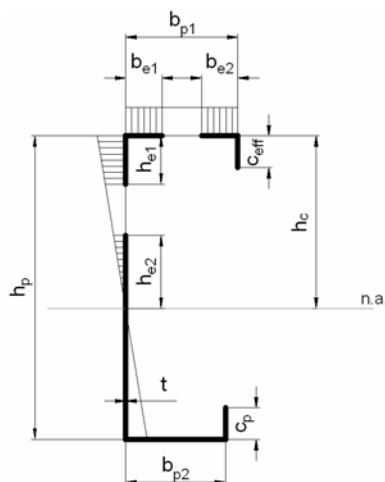
Propiedades de la sección efectiva del alma


La posición del eje neutro con respecto al ala en compresión:


$$h_c = \frac{c_p(h_p - c_p/2) + b_{p2}h_p + h_p^2/2 + c_{\text{eff}}^2\chi_d/2}{c_p + b_{p2} + h_p + b_{e1} + (b_{e2} + c_{\text{eff}})\chi_d} \quad h_c = 101,6 \text{ mm}$$

La razón de tracción:

$$\psi = \frac{h_c - h_p}{h_c} = \frac{101,6 - 198}{101,6} = -0,949$$



<p style="text-align: center;">HOJA DE CÁLCULO</p> 	Ref. Documento	<i>SX022a-ES-EU</i>	Hoja	7 de 8	
	Título	<i>Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión</i>			
	Eurocódigo Ref	<i>EN 1993-1-3</i>			
	Hecho por	<i>V. Ungureanu, A. Ruff</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>	
	Revisado por	<i>D. Dubina</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>	
<p>El factor de pandeo:</p> $k_{\sigma} = 7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2 \quad k_{\sigma} = 22,58$ <p>La esbeltez relativa:</p> $\bar{\lambda}_{p,h} = \frac{h_p/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{198/1,96}{28,4 \times \sqrt{235/350} \times \sqrt{22,58}} = 0,914$ <p>El factor de reducción de anchura es:</p> $\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,h} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,h}^2} = \frac{0,914 - 0,055 \times (3 - 0,949)}{0,914^2} = 0,959$ <p>La anchura efectiva de la zona en compresión del alma es:</p> $h_{\text{eff}} = \rho h_c = 0,959 \times 101,6 = 97,5 \text{ mm}$ <p>Cerca al ala en compresión:</p> $h_{e1} = 0,4h_{\text{eff}} = 0,4 \times 97,5 = 39 \text{ mm}$ <p>Cerca al eje neutro:</p> $h_{e2} = 0,6h_{\text{eff}} = 0,6 \times 97,5 = 58,5 \text{ mm}$ <p>La anchura efectiva del alma es:</p> <p>Cerca al ala en compresión:</p> $h_1 = h_{e1} = 39 \text{ mm}$ <p>Cerca al ala en tensión:</p> $h_2 = h_p - (h_c - h_{e2}) = 198 - (101,6 - 58,5) = 154,9 \text{ mm}$ <p>Propiedades de la sección efectiva</p> <p>Área efectiva de la sección transversal:</p> $A_{\text{eff}} = t[c_p + b_{p2} + h_1 + h_2 + b_{e1} + (b_{e2} + c_{\text{eff}})\chi_d]$ $A_{\text{eff}} = 1,96 \times [19,8 + 64 + 39 + 154,9 + 32,9 + (35,9 + 19,8) \times 0,737]$ $A_{\text{eff}} = 689,2 \text{ mm}^2$					
				<p>EN1993-1-5</p> <p>§ 4.4</p> <p>(Tabla 4.1)</p>	

HOJA DE CÁLCULO 	Ref. Documento	<i>SX022a-ES-EU</i>	Hoja	8	de	8
	Título	<i>Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión</i>				
	Eurocódigo Ref	<i>EN 1993-1-3</i>				
	Hecho por	<i>V. Ungureanu, A. Ruff</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		
	Revisado por	<i>D. Dubina</i>	Fecha	<i>Dic 2005</i>		

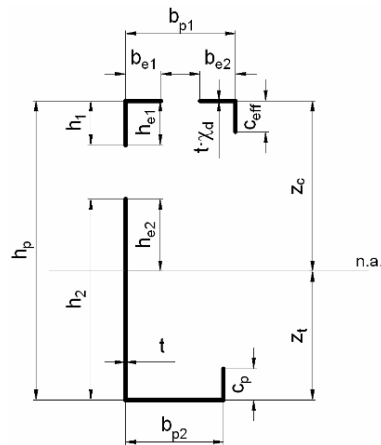
Posición del eje neutro con respecto al ala en compresión:

$$z_c = \frac{t \left[c_p (h_p - c_p / 2) + b_{p2} h_p + h_2 (h_p - h_2 / 2) + h_1^2 / 2 + c_{\text{eff}}^2 \chi_d / 2 \right]}{A_{\text{eff}}}$$

$$z_c = 102,3 \text{ mm}$$

Posición del eje neutro con respecto al ala en tensión:

$$z_t = h_p - z_c = 198 - 102,3 = 95,7 \text{ mm}$$



Momento de inercia del área:

$$I_{\text{eff},y} = \frac{h_1^3 t}{12} + \frac{h_2^3 t}{12} + \frac{b_{p2} t^3}{12} + \frac{c_p^3 t}{12} + \frac{b_{e1} t^3}{12} + \frac{b_{e2} (\chi_d t)^3}{12} + \frac{c_{\text{eff}}^3 (\chi_d t)}{12} + c_p t (z_t - c_p / 2)^2 + b_{p2} t z_t^2 + h_2 t (z_t - h_2 / 2)^2 + h_1 t (z_c - h_1 / 2)^2 + b_{e1} t z_c^2 + b_{e2} (\chi_d t) z_c^2 + c_{\text{eff}} (\chi_d t) (z_c - c_{\text{eff}} / 2)^2$$

$$I_{\text{eff},y} = 4140000 \text{ mm}^4$$

Módulo de sección efectivo:

- con respecto al ala en compresión

$$W_{\text{eff},y,c} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_c} = \frac{4140000}{102,3} = 40460 \text{ mm}^3$$

- con respecto al ala en tensión

$$W_{\text{eff},y,t} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_t} = \frac{4140000}{95,7} = 43260 \text{ mm}^3$$



Registro de calidad

TÍTULO DEL RECURSO	Ejemplo: Cálculo de las propiedades de la sección efectiva para secciones en C con reborde conformadas en frío sometidas a flexión		
Referencia(s)			
DOCUMENTO ORIGINAL			
	Nombre	Compañía	Fecha
Creado por	V. Ungureanu, A. Ruff	BRITT Ltd. Timisoara, Rumanía	5/12/05
Contenido técnico revisado por	D. Dubina	BRITT Ltd. Timisoara, Rumanía	8/12/05
Contenido editorial revisado por			
Contenido técnico respaldado por los siguientes socios de STEEL:			
1. Reino Unido	G W Owens	SCI	12/04/06
2. Francia	A Bureau	CTICM	12/04/06
3. Suecia	B Uppfeldt	SBI	11/04/06
4. Alemania	C Müller	RWTH	11/04/06
5. España	J Chica	Labein	12/04/06
Recurso aprobado por el Coordinador técnico	G W Owens	SCI	19/09/06
DOCUMENTO TRADUCIDO			
Traducción realizada y revisada por:		eTeams International Ltd.	20/06/06
Recurso de traducción aprobado por:	J Chica	Labein	10/07/06