

**Reglamento CIRSOC 701**  
**Ministerio de Planificación Federal,**  
**Inversión Pública y Servicios**  
**Secretaría de Obras Públicas de la Nación**

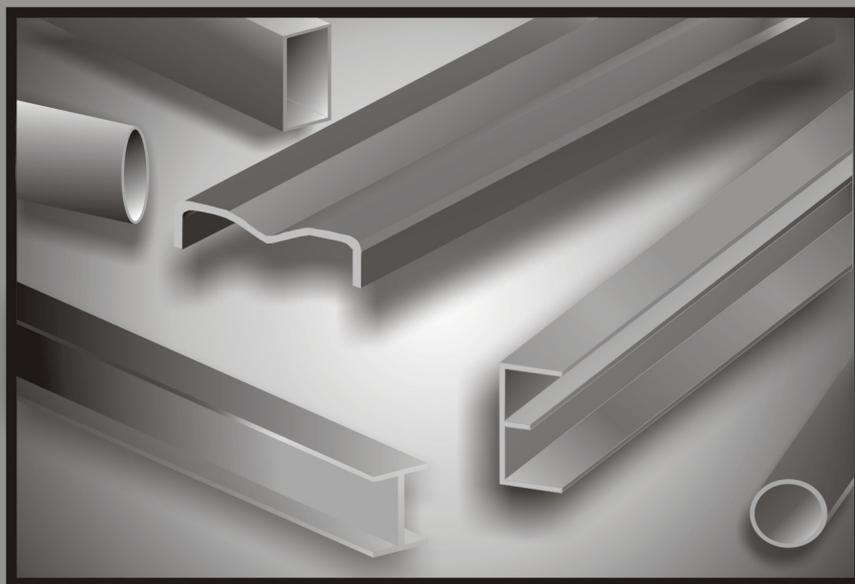
**INTI**

Instituto Nacional de  
Tecnología Industrial



**CIRSOC**

Centro de Investigación de los  
Reglamentos Nacionales de  
Seguridad para las Obras Civiles



***EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL  
REGLAMENTO ARGENTINO DE  
ESTRUCTURAS DE  
ALUMINIO***

**Julio 2010**

# ***EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO***

Autores:

***Mg.Ing. María Inés Montanaro***

***Mg. Ing. Irene Elisabet Rivas***

***Mg. Ing. María Haydée Peralta***

***Ing. María Laura Godoy***

***EDICION JULIO 2010***



**Av. Cabildo 65 Subsuelo – Ala Savio  
(C1426AAA) Buenos Aires – República Argentina  
TELEFAX. (54 11) 4779-5271 / 4779-5273**

**E-mail: [cirsoc@inti.gob.ar](mailto:cirsoc@inti.gob.ar)  
[cirsoc@ffmm.gov.ar](mailto:cirsoc@ffmm.gov.ar)**

**INTERNET: [www.inti.gob.ar/cirsoc](http://www.inti.gob.ar/cirsoc)**

*Primer Director Técnico ( † 1980): Ing. Luis María Machado*

*Directora Técnica: Inga. Marta S. Parmigiani*

*Coordinadora Area Acciones: Inga. Alicia M. Aragno*

*Area Estructuras de Hormigón: Ing. Daniel A. Ortega*

*Area Administración, Finanzas y Promoción: Lic. Mónica B. Krotz*

*Area Publicaciones y Secretarías Regionales: Néstor D. Corti*

**© 2010**

**Editado por INTI**

**INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

**Av. Leandro N. Alem 1067 – 7° piso - Buenos Aires. Tel. 4515 5000**

**Queda hecho el depósito que fija la ley 11.723. Todos los derechos, reservados. Prohibida la reproducción parcial o total sin autorización escrita del editor. Impreso en la Argentina.**

**Printed in Argentina.**

## **ORGANISMOS PROMOTORES**

Secretaría de Obras Públicas de la Nación  
Subsecretaría de Vivienda de la Nación  
Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Instituto Nacional de Prevención Sísmica  
Ministerio de Hacienda, Finanzas y Obras Públicas de la Provincia del Neuquén  
Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires  
Dirección Nacional de Vialidad  
Vialidad de la Provincia de Buenos Aires  
Consejo Interprovincial de Ministros de Obras Públicas  
Cámara Argentina de la Construcción  
Consejo Profesional de Ingeniería Civil  
Cámara Industrial de Cerámica Roja  
Asociación de Fabricantes de Cemento Pórtland  
Instituto Argentino de Normalización  
Techint  
Acindar  
Consejo Vial Federal

## **MIEMBROS ADHERENTES**

Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón  
Asociación Argentina de Hormigón Estructural  
Asociación Argentina de Hormigón Elaborado  
Asociación Argentina del Bloque de Hormigón  
Asociación de Ingenieros Estructurales  
Centro Argentino de Ingenieros  
Instituto Argentino de Siderurgia  
Telefónica de Argentina  
Transportadora Gas del Sur  
Quasdam Ingeniería  
Sociedad Central de Arquitectos  
Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica  
Colegio de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires  
Cámara Argentina del Aluminio y Metales Afines  
Cámara Argentina de Empresas de Fundaciones de Ingeniería Civil



# INDICE

<b>EJEMPLO N°1</b> .....	<b>1</b>
Barra sometida a tracción con empalme.Unión abulonada. Aplicación Capítulos C y E.	
<b>EJEMPLO N°2</b> .....	<b>5</b>
Barra sometida a tracción. Unión soldada de junta solapada. Aplicación Capítulos F y C.	
<b>EJEMPLO N°3</b> .....	<b>9</b>
Columna sometida a compresión centrada. Aplicación Capítulos A y C.	
<b>EJEMPLO N°4</b> .....	<b>16</b>
Viga sometida a flexión por acción de una carga concentrada. Aplicación Capítulos A,C y D.	
<b>EJEMPLO N°5</b> .....	<b>22</b>
Viga sometida a flexión Aplicación Capítulos A,C y D.	
<b>EJEMPLO N°6</b> .....	<b>27</b>
Viga-columna sometida a flexión y axil. Aplicación Capítulos C y D.	



## EJEMPLO N°1

Barra sometida a tracción con empalme. Unión abulonada.  
Aplicación Capítulos C y E.

### Enunciado:

Verificar la unión abulonada entre chapas planas, sometidas a tracción, y los cubrejuntas de un empalme. Las chapas y bulones utilizados son de aluminio Aleación 6061-T6. La fuerza de tracción requerida es  $T_u=50$  KN. Los bulones son de 10 mm de diámetro. Las propiedades mecánicas del aluminio de las chapas son:  $F_{yt}=240$  MPa,  $F_{ut}=290$  MPa,  $F_{yv}=138,6$  MPa,  $F_{uv}=185$  MPa. Tabla A.2-1.

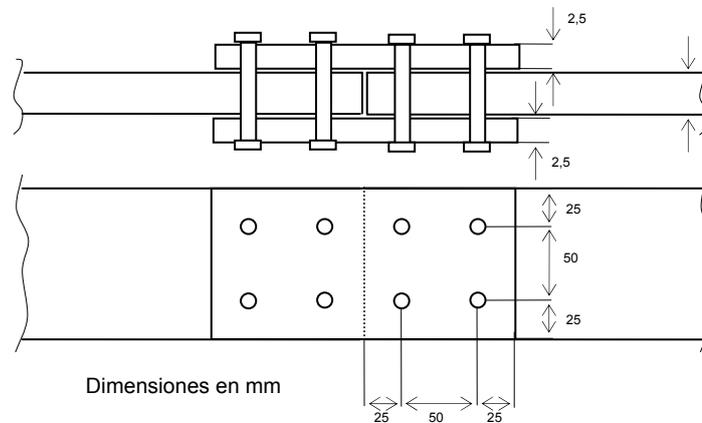


Figura Ej. 1-1

### 1) Verificación de la disposición de bulones

- Si la distancia al borde,  $d_b$  es mayor que dos veces el diámetro nominal del bulón  $d$  no es necesario efectuar ninguna reducción de la resistencia de diseño al aplastamiento. (Sección E.1.5.: Mínima distancia al borde).

$$25\text{mm} > 2 \times 10\text{mm} = 20\text{mm} \quad \text{VERIFICA}$$

- La separación entre centros de pasadores paralela  $p$  (paso) y perpendicular  $g$  (gramil) a la dirección de la fuerza, en elementos sometidos a tracción, deberá ser menor o igual que  $(75 + 20t)$  mm siendo  $t$  el espesor del componente externo. (Sección E.1.6.: Máxima separación de los pasadores).

$$50\text{mm} < (75 + 20 \times 2,5)\text{mm} = 125\text{mm} \quad \text{VERIFICA}$$

- La distancia entre los centros de los agujeros para bulones  $s$  deberá ser mayor o igual que 2,5 veces el diámetro nominal de los bulones. (Sección E.2.6.: Separación mínima de los bulones de aluminio).

$$50\text{mm} > 2,5 \times 10\text{mm} = 25\text{mm} \quad \text{VERIFICA}$$

## 2) Verificación de la chapa a tracción axial

- La resistencia de diseño de barras traccionadas axialmente  $P_d = \phi P_n$  (kN) será el menor valor obtenido de la consideración de los estados límites de (a) fluencia en la sección bruta, (b) rotura en la sección neta. (Sección C.3.: Tracción Axial).

(a) Para fluencia en la sección bruta:

$$\phi \cdot P_n = \phi_y \cdot F_{yt} \cdot A_g (10^{-1}) = 0,95 \cdot 240 \cdot 5 \cdot (10^{-1}) = 114 \text{ kN} > 50 \text{ kN} \quad (\text{C.3-1})$$

$$\phi_y = 0,95$$

El área bruta de la barra  $A_g = 10 \text{ cm} \cdot 0,5 \text{ cm} = 5 \text{ cm}^2$

(b) Para rotura en la sección neta:

$$\phi \cdot P_n = \frac{\phi_u}{K_t} \cdot F_{ut} \cdot A_e \cdot (10^{-1}) \quad (\text{C.3-2})$$

$$\phi \cdot P_n = \frac{0,85}{1} \cdot 290 \cdot 3,6 \cdot (10^{-1}) = 88,74 \text{ kN} > 50 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA}$$

$$\phi_y = 0,85$$

El área neta efectiva de la barra  $A_e = (10 \text{ cm} - 2 \cdot 1,4 \text{ cm}) \cdot 0,5 \text{ cm} = 3,6 \text{ cm}^2$

- En los extremos de barras traccionadas se deberá determinar la resistencia de diseño para el estado límite de rotura de bloque de corte  $\phi R_n$  de las uniones abulonadas. (Sección E.1.7: Rotura de bloque de corte).

$$\text{Para } F_{ut} \cdot A_{nt} \cdot (10^{-1}) \geq F_{uv} \cdot A_{nv} \cdot (10^{-1})$$

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot [(F_{yv}) \cdot A_{gv} + F_{ut} \cdot A_{nt}] \cdot (10^{-1}) \quad (\text{E.1.7-1})$$

$$\text{Para } F_{ut} \cdot A_{nt} \cdot (10^{-1}) < F_{uv} \cdot A_{nv} \cdot (10^{-1})$$

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot [F_{uv} \cdot A_{nv} + F_{yt} \cdot A_{gt}] \cdot (10^{-1}) \quad (\text{E.1.7-2})$$

El área bruta a tracción  $A_{gt}$ , el área bruta a corte  $A_{gv}$ , el área neta a tracción  $A_{nt}$  y el área neta a corte  $A_{nv}$  resultan ser:

$$A_{gt} = 5 \text{ cm} \cdot 0,5 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm}^2$$

$$A_{gv} = (7,5 \text{ cm} \cdot 0,5 \text{ cm}) \cdot 2 = 7,5 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} = (5 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm}) \cdot 0,5 \text{ cm} = 1,8 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = (7,5 \text{ cm} - 1,5 \cdot 1,4 \text{ cm}) \cdot 0,5 \text{ cm} \cdot 2 = 5,4 \text{ cm}^2$$

$$F_{ut} A_{nt} (10^{-1}) = 290 \cdot 1,8 \cdot 0,1 = 52,2 \text{ kN}$$

$$F_{uv} A_{nv} (10^{-1}) = 185 \cdot 5,4 \cdot 0,1 = 99,9 \text{ kN}$$

$$F_{ut} A_{nt} (10^{-1}) < F_{uv} \cdot A_{nv} \cdot (10^{-1})$$

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot [F_{uv} \cdot A_{nv} + F_{yt} \cdot A_{gt}] \cdot (10^{-1}) \quad (\text{E.1.7-2})$$

$$\phi \cdot R_n = 0,85 \cdot [185 \cdot 5,4 + 240 \cdot 2,5] \cdot 0,1$$

$$\phi \cdot R_n = 135,91 \text{ kN} > 50 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA}$$

### 3) Verificación de los medios de unión

- **Resistencia de diseño a corte de bulones de aluminio (Sección E.2.3)**

La resistencia de diseño al corte para un bulón de aluminio será:

(a) Para rosca excluida del plano de corte:

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot A_b \cdot F_{uv} \cdot (10^{-1}) \quad (\text{E.2.3-1})$$

$$\phi = 0,65$$

El área del cuerpo no roscado es:  $A_b = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$

$$A_b = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 0,785 \text{ cm}^2$$

La tensión de rotura al corte del bulón de aluminio,  $F_{uv}$ , se obtiene de Tabla E.2-2.

$$F_{uv} = 170 \text{ MPa}$$

$$\phi \cdot R_n = 0,65 \cdot 0,785 \cdot 170 \cdot (10^{-1}) = 8,67 \text{ kN}$$

Como se tienen 4 bulones con 2 secciones al corte cada uno,

$$\phi \cdot R_n \text{ Total} = 8,67 \text{ kN} \cdot 4 \cdot 2 = 69,39 \text{ kN} > 50 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA}$$

- **Resistencia al aplastamiento de la chapa en los agujeros (Sección E.2.5)**

La resistencia de diseño al aplastamiento de la chapa en los agujeros de bulones se determinará de la siguiente forma:

(a) Para un bulón en una unión con agujeros normales:

$$\phi \cdot R_n = 2 \cdot \phi_u \cdot F_{ut} \cdot d \cdot t_a \cdot (10^{-1}) \quad (\text{E.2.5-1})$$

Siendo:

$$\phi_u = 0,85$$

d: el diámetro nominal del bulón, en cm.

t<sub>a</sub>: el espesor de aplastamiento de la chapa, en cm.

La tensión de rotura a la tracción en la chapa, F<sub>ut</sub>

$$\phi \cdot R_n = 2 \cdot 0,85 \cdot 290 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot (10^{-1}) = 24,65 \text{ kN} > \frac{50 \text{ kN}}{4} = 12,5 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA}$$

## EJEMPLO N°2

Barra sometida a tracción. Unión soldada de junta solapada.  
Aplicación Capítulos F y C.

### Enunciado:

Determinar la resistencia de diseño de la unión soldada que se indica en la Figura. La misma está formada por dos chapas planas de aluminio de 5 mm de espesor, de Aleación 6061-T6 que se encuentran sometidas a tracción. Las propiedades mecánicas mínimas para la aleación de aluminio soldada:  $F_{ywt}=105$  MPa,  $F_{uwt}=165$  MPa,  $F_{yvw}=60,6$  MPa,  $F_{uuv}=105$  MPa. Tabla A.2-2. Alambre de aporte de aleación 4043. Tabla F.3-1.

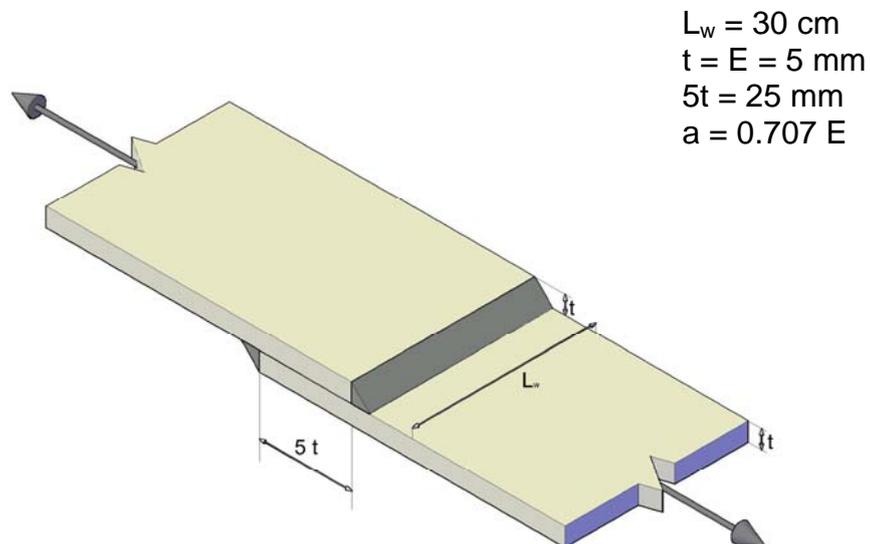


Figura Ej. 2-1

### 1) Verificación de los parámetros dimensionales

El diseño de la unión mediante soldadura de filete debe atender los siguientes requerimientos según CIRSOC 704:

- El largo mínimo de un filete ( $L_w$ ) no deberá ser menor que cuatro (4) veces el tamaño del cateto nominal. (Sección 2.3.2.3).
- En uniones de filete formando ángulos entre  $80^\circ$  y  $100^\circ$  la garganta efectiva ( $a$ ) deberá ser considerada como la distancia más corta entre la raíz del filete y la cara del mismo considerando un esquema de junta a  $90^\circ$ . (Sección 2.3.2.5)
- El largo del solape deberá ser mayor o igual que 5 veces el espesor del elemento estructural más fino, pero mayor o igual que 25 mm. (Sección 2.3.2.9)
- El máximo tamaño o cateto ( $E$ ) de una soldadura de filete en una junta de solape deberá ser 1) Igual al espesor del metal base cuando el mismo es menor que 6 mm, 2) 2mm menor que el espesor del metal base cuando el mismo es

mayor o igual que 6 mm. (Sección 2.3.2.11).

Según lo expuesto la configuración de la unión soldada cumple con lo requerido por CIRSOC 704 respecto a sus parámetros dimensionales.

## 2) Verificación de la chapa a tracción

Para determinar la resistencia de diseño a tracción de la chapa se debe analizar el estado límite de fluencia en la sección bruta, de acuerdo con la Sección C.3.

$$\phi P_n = \phi_y \cdot F_{yt} \cdot A_g \cdot (10)^{-1} \quad (C.3-1)$$

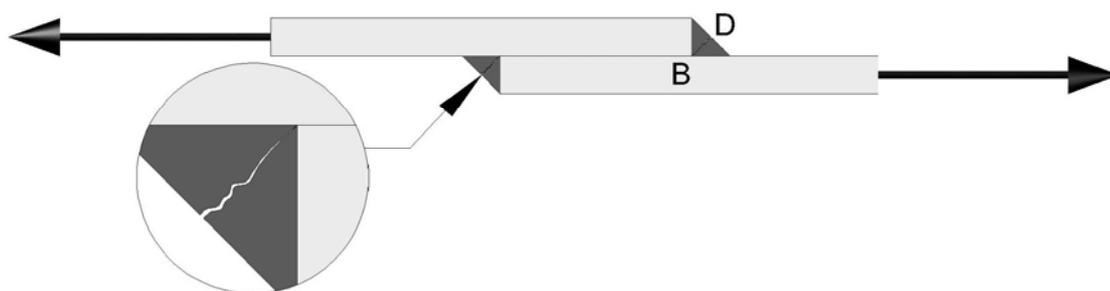
$$\phi = 0.95$$

$$\phi P_n = 0,95 \cdot 105 \cdot 30 \cdot 0,5 \cdot (10)^{-1} = 149,62 \text{ kN}$$

## 3) Verificación de la unión soldada

Según F.3.2.2 del Proyecto de Reglamento CIRSOC 701 la resistencia de diseño de una soldadura de filete se deberá considerar de corte, cualquiera sea la dirección de la carga aplicada. La resistencia de diseño de una soldadura de filete será la menor de los siguientes valores según corresponda:

### 3.1) Corte en el metal de aporte (Modo de falla según Figura Ej. 2-2)



**Figura Ej. 2-2.** Falla por corte en el metal de aporte en el plano BD

La resistencia de diseño,  $\phi V_{dw}$  se calcula con la siguiente expresión:

$$\phi V_{dw} = \phi_u \cdot F_w \cdot A_w \cdot (10)^{-1} \quad (F.3.2.2-1)$$

Siendo:

$F_w$  la resistencia nominal al corte del metal de aporte, en MPa según la Tabla F.3-1 de CIRSOC 701. Siendo en este caso, para metal de aporte 4043,  $F_w = 80$  MPa.

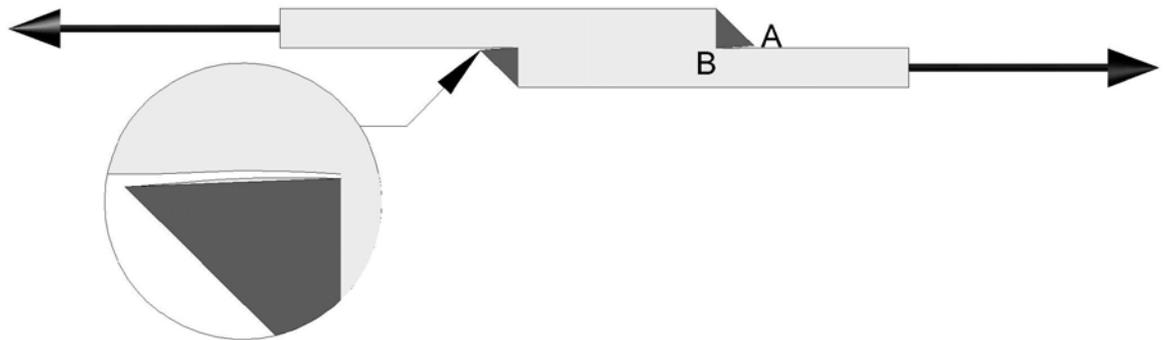
$A_w$  el área de la sección efectiva de la soldadura, en  $\text{cm}^2$ , e igual al producto entre la garganta efectiva del filete,  $a$ , y el largo efectivo del mismo,  $L_w$

$$\phi_u = 0,60$$

Por lo tanto:

$$\phi V_{dw} = 0,60 \cdot 80 \cdot a \cdot L_w \cdot (10)^{-1} = 48 \cdot a \cdot L_w \cdot (10)^{-1} = 48 \cdot 0,707 \cdot 0,5 \cdot 30 \cdot (10)^{-1} = 50,9 \text{ kN}$$

### 3.2) Corte en la unión entre la soldadura y metal base (Modo de falla según Figura Ej. 2-3)



**Figura Ej.2-3.** Falla por corte entre el metal base y la soldadura, plano BA

La resistencia de diseño,  $\phi V_{dBM}$  se calcula con la siguiente expresión:

$$\phi \cdot V_{dBM} = \phi_u \cdot F_{BM} \cdot A_{BM} \cdot (10)^{-1} \quad (\text{F.3.2.2-2})$$

Siendo:

$F_{BM}$  la resistencia nominal al corte del metal base, en MPa, según Tabla A.2-2 de CIRSOC 701. Siendo en este caso, para metal base 6061-T6,  $F_{BM} = 105$  MPa.

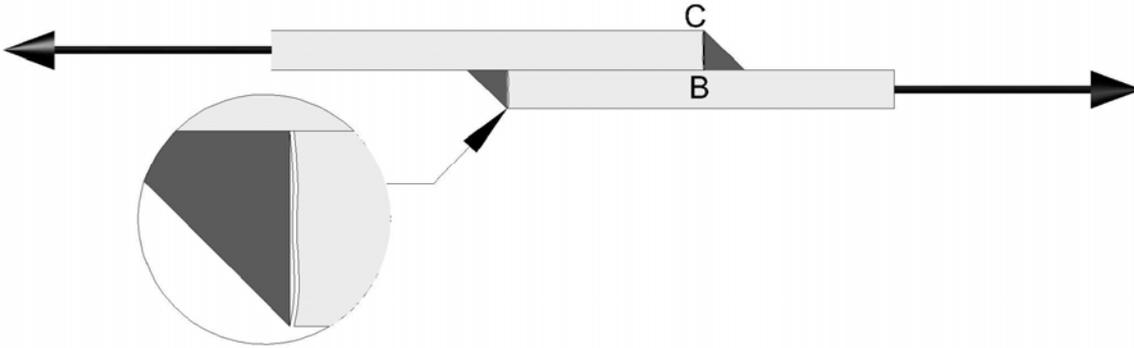
$A_{BM}$  el área de la sección transversal efectiva del metal base, en  $\text{cm}^2$ , e igual al producto entre cateto del filete,  $E$ , y el largo efectivo del mismo,  $L_w$ .

$$\phi_u = 0,60$$

$$A_{BM} = E L_w$$

$$\phi V_{dBM} = 0,60 \cdot 105 \cdot 0,5 \cdot 30 \cdot (10)^{-1} = 94,5 \text{ kN}$$

### 3.3) Tracción en la unión entre la soldadura y el metal base (Modo de falla según Figura Ej.2-4)



**Figura Ej. 2-4:** Falla por tracción entre la soldadura y el metal base, plano CB

La resistencia de diseño,  $\phi P_{dw}$  se calcula con la siguiente expresión:

$$\phi P_{dw} = \phi_u \cdot F_{BM} \cdot A_{BM} \cdot (10)^{-1} \quad (F.3.2.2-3)$$

Siendo:

$F_{BM}$  la resistencia nominal a tracción del metal base, en MPa, según Tabla A.2-2. de CIRSOC 701 Siendo en este caso, para metal base 6061-T6,  $F_{BM} = 165$  MPa.

$A_{BM}$  el área de la sección transversal efectiva del metal base, en  $\text{cm}^2$ , e igual al producto entre cateto del filete, E, y el largo efectivo del mismo,  $L_w$ .

$$\phi_u = 0,60$$

$$\phi P_{dw} = 0,60 \cdot 165 \cdot E \cdot L_w \cdot (10)^{-1} = 0,60 \cdot 165 \cdot 0,5 \cdot 30 \cdot (10)^{-1} = 148,5 \text{ kN}$$

En este ejemplo la falla está gobernada por corte en el metal de aporte, por lo tanto la resistencia de diseño será 50,9 kN.

### EJEMPLO N°3

Columna sometida a compresión centrada.  
Aplicación Capítulos A y C.

#### Enunciado:

Determinar la capacidad de diseño de una columna biarticulada de Aleación 6061-T6 constituida por perfil doble T equivalente al S12x17.3 (Tabla 11, Cap. VI del Aluminum Manual 2005). La tensión de fluencia del aluminio del perfil es:  $F_{yc}=F_{yt}=240\text{MPa}$ ,  $E= 69600\text{ MPa}$ . Tabla A.2-1.

Efectuar el análisis para columnas de:

- 2 m de longitud
- 4 m de longitud

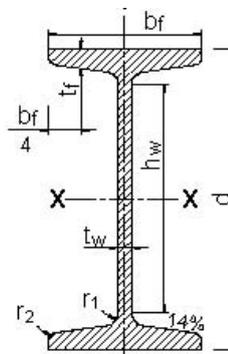


Figura Ej. 3-1

Propiedades de la sección:

$d = 30.48\text{ cm}$	Altura total
$b_f = 13.91\text{ cm}$	Ancho de ala
$I_y = 653.48\text{ cm}^4$	Momento de inercia alrededor del eje débil y-y
$r_y = 2.61\text{ cm}$	Radio de giro alrededor del eje débil y-y
$I_x = 12695.06\text{ cm}^4$	Momento de inercia alrededor del eje fuerte x-x
$r_x = 11.598\text{ cm}$	Radio de giro alrededor del eje fuerte x-x
$A_g = 94.84\text{ cm}^2$	Área bruta
$t_w = 1.75\text{ cm}$	Espesor del alma
$t_f = 1.68\text{ cm}$	Espesor del ala
$h_w = 23.495\text{ cm}$	Altura del alma

#### a) Longitud de columna: 2 m

Para determinar la resistencia de diseño de una columna sometida a esfuerzo axial de compresión se deben hallar los valores de: la tensión de diseño global  $\phi F_{ng}$  y la tensión de diseño local  $\phi F_{nLi}$  y compararlos, de acuerdo con las siguientes expresiones (Sección C.4.: Compresión axial):

$$\text{Si: } \phi \cdot F_{ng} \leq \phi \cdot F_{nLi} \qquad \phi \cdot F_{np} = \phi \cdot F_{ng} \qquad (\text{C.4-3})$$

$$\text{Si: } \phi \cdot F_{ng} > \phi \cdot F_{nLi} \quad \phi \cdot F_{np} = \frac{\sum (A_{gLi} \cdot \phi \cdot F_{nLi} + A_{gpi} \cdot \phi \cdot F_{ng})}{A_g} \quad (\text{C.4-4})$$

$\phi F_{nLi}$  la tensión de diseño local a compresión de cada uno de los elementos que componen la sección transversal, que se determina según las Secciones **C.4.5** a **C.4.9**, en MPa.

$\phi F_{ng}$  la tensión de diseño global que se determina según la Sección **C.4.1** a **C.4.4**, en MPa.

### a.1) Tensión de diseño global

Para este perfil se deben analizar: la Resistencia de Diseño a Compresión para pandeo flexional (Sección C.4.1) y la Resistencia de diseño a pandeo torsional para secciones con simetría doble (Sección C.4.3).

Para el estado límite de pandeo flexional se calcula el parámetro de esbeltez global  $\lambda_c$  con la siguiente expresión y de acuerdo a su valor entre los límites  $S_1$  y  $S_2$  se calcula la tensión de diseño global, (Sección C.4.1):

$kL/r$  de barras comprimidas deberá ser menor o igual a **200**.

$$\lambda = \left( \frac{kL}{r} \right) = \left( \frac{1 \cdot 200}{2,61} \right) = 76,63 < 200$$

$$\lambda_c = \left( \frac{kL}{r} \right) \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = \left( \frac{1 \cdot 200 \text{cm}}{2,61} \right) \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{240}{69600}} = 1,43 \quad (\text{C.4.1-4})$$

$$S_1^* = \frac{B_c - F_{yc}}{D_c^*} = \frac{269,85 - 240}{89,88} = 0,332 \quad (\text{C.4.1-6})$$

$B_c$ ,  $C_c$  y  $D_c$  constantes de pandeo cuya expresión se encuentra en Tabla C.2-2.

$$B_c = F_{yc} \left[ 1 + \left( \frac{F_{yc}}{15510} \right)^{1/2} \right] = 240 \left[ 1 + \left( \frac{240}{15510} \right)^{1/2} \right] = 269,85$$

$$D_c = \frac{B_c}{10} \cdot \left( \frac{B_c}{E} \right)^{1/2} = \frac{269,85}{10} \cdot \left( \frac{269,85}{69600} \right)^{1/2} = 1,68$$

$$D_c^* = \pi D_c \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} = \pi \cdot 1,68 \cdot \sqrt{\frac{69600}{240}} = 89,88 \quad (\text{C.4.1-5})$$

$$S_2^* = \frac{C_c}{\pi} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = \frac{65,85}{\pi} \sqrt{\frac{240}{69600}} = 1,23 \quad (\text{C.4.1-7})$$

$$C_c = 0,41 \frac{B_c}{D_c} = 0,41 \frac{269,85}{1,68} = 65,85$$

$$\text{Para } \lambda_c \geq S_2^* \quad \phi F_{ng} = \frac{\phi_{cc} F_{yc}}{\lambda_c^2} \quad (\text{C.4.1-3})$$

$$\text{Para } \lambda_c > 1,2 \quad \phi_{cc} = 0,14 \cdot \lambda_c + 0,58 = 0,14 \cdot 1,43 + 0,58 = 0,78 \leq 0,95 \quad (\text{C.4.1-9})$$

$$\phi F_{ng} = \frac{\phi_{cc} \cdot F_{yc}}{\lambda_c^2} = \frac{0,78 \cdot 240}{1,43^2} = 91,54 \text{ MPa}$$

Para analizar el pandeo torsional, en secciones doblemente simétricas, se debe calcular el parámetro de esbeltez global  $\lambda_c$  en función de la esbeltez equivalente calculada con las siguientes expresiones (Sección C.4.3):

$$\left( \frac{kL}{r} \right)_e = \pi \sqrt{\frac{E}{F_e}} = \pi \sqrt{\frac{69600}{381,34}} = 42,44 \quad (\text{C.4.3-1})$$

$$F_e = F_{et} \quad (\text{C.4.3-2})$$

$$F_{et} = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \left( G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right) \quad (\text{C.4.3-6})$$

$$F_{et} = \frac{1}{94,84 \cdot 11,87^2} \left( 26100 \cdot 92,42 + \frac{\pi^2 \cdot 69600 \cdot 156266}{(1 \cdot 200)^2} \right) = 381,34 \text{ MPa}$$

Siendo:

$$G = \frac{3 \cdot E}{8} = \frac{3 \cdot 69600}{8} = 26100 \text{ MPa} \quad (\text{C.4.3-7})$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} = \sqrt{2,61^2 + 11,58^2} = 11,87 \text{ cm} \quad (\text{C.4.3-8})$$

El módulo de torsión, de la sección transversal del perfil, se puede hallar mediante la siguiente expresión:

$$J = \frac{2 \cdot b_f \cdot t_f^3 + (d - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^3}{3} = \frac{2 \cdot 13,91 \cdot (1,68)^3 + (30,48 - 2 \cdot 1,68) \cdot 1,75^3}{3} = 92,42 \text{ cm}^4$$

El módulo de alabeo, de la sección transversal del perfil, se puede hallar mediante:

$$C_w = \frac{t_f \cdot (d - t_f)^2 \cdot b_f^3}{24} = \frac{1,68 \cdot (30,48 - 1,68)^2 \cdot 13,91^3}{24} = 156266 \text{ cm}^6$$

$$\lambda_c = \left( \frac{kL}{r} \right)_e \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = 42,44 \cdot \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{240}{69600}} = 0,79$$

Como la esbeltez reducida para el pandeo torsional  $\lambda_c = 0.79$  es menor que la esbeltez reducida para el pandeo flexional  $\lambda_c = 1.43$ , resulta que el pandeo flexional es un estado límite definitorio para determinar la resistencia de diseño de esta columna.

### a.2) Tensión de diseño local a compresión de cada uno de los elementos que componen la sección transversal

Para compresión uniforme en elementos planos se deben considerar los estados límites de pandeo local del ala (Sección C.4.5.1) y pandeo local del alma (Sección C.4.6).

De acuerdo con la Sección C.4.5.1: Compresión uniforme en elementos no rigidizados de columnas, cuyo eje de pandeo es un eje de simetría, se calcula la esbeltez local del ala como:

Considerando que  $b = \frac{b_f}{2}$

$$\frac{b}{t_f} = \frac{13,91}{2 \cdot 1,68} = 4,14$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_c} \cdot F_{yc}}{5,1 \cdot D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{5,1 \cdot 2,06} = 3,85 \quad (\text{C.4.5.1-4})$$

$B_p$  y  $D_p$  son constantes de pandeo de Tabla C.2-2,  $\phi_y = 0,95$ ,  $\phi_c = 0,85$

$$B_p = F_{yc} \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^{1/3}}{21,7} \right] = 240 \cdot \left[ 1 + \frac{240^{1/3}}{21,7} \right] = 308,73$$

$$D_p = \frac{B_p}{10} \left( \frac{B_p}{E} \right)^{1/2} = \frac{308,73}{10} \left( \frac{308,73}{69600} \right)^{1/2} = 2,06$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_p}{5,1 \cdot D_p} = \frac{0,35 \cdot 308,73}{5,1 \cdot 2,06} = 10,28 \quad (\text{C.4.5.1-5})$$

Con  $k_1 = 0,35$ , constante que se obtiene de Tabla C.2-2.

Para  $S_1 < b/t < S_2$

$$\phi F_{nL} = \phi_c \cdot \left[ B_p - 5,1 \cdot D_p \cdot \frac{b}{t} \right] = 0,85 \cdot [308,73 - 5,1 \cdot 2,06 \cdot 4,14] = 225,45 \text{ MPa} \quad (\text{C.4.5.1-2})$$

Para efectuar el análisis del alma, corresponde utilizar la Sección C.4.6: Compresión uniforme en elementos de columnas – Elementos planos apoyados en ambos bordes (elementos rigidizados).

Siendo la esbeltez local:

$$\frac{b}{t} = \frac{23,495}{1,75} = 13,43$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_c} \cdot F_{yc}}{1,6 \cdot D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{1,6 \cdot 2,06} = 12,28 \quad (\text{C.4.6-4})$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_p}{1,6 \cdot D_p} = \frac{0,35 \cdot 308,73}{1,6 \cdot 2,06} = 32,78 \quad (\text{C.4.6-5})$$

Para  $S_1 < b/t < S_2$

$$\phi F_{nL} = \phi_c \cdot \left[ B_p - 1,6 \cdot D_p \cdot \frac{b}{t} \right] = 0,85 \cdot [308,73 - 1,6 \cdot 2,06 \cdot 13,43] = 224,8 \text{ MPa} \quad (\text{C.4.6-2})$$

Si se compara la tensión de diseño global  $\phi F_{ng}$  con las tensiones de diseño locales  $\phi F_{nL}$  se puede observar que:  $\phi \cdot F_{ng} \leq \phi \cdot F_{nLi}$  por lo tanto según Sección C.4-3:

$$\phi \cdot F_{np} = \phi \cdot F_{ng}, \text{ es decir que: } \phi \cdot F_{np} = 91,54 \text{ MPa}.$$

Entonces la resistencia de diseño a compresión  $P_d$  (en kN) de la columna de 2 m de longitud es:

$$P_d = A_g \cdot \phi \cdot F_{np} (10)^{-1} = 94,84 \cdot 91,54 \cdot 0,1 = 868,16 \text{ kN} \quad (\text{C.4-2})$$

#### b) Longitud de columna: 4 m

El procedimiento es similar al efectuado en la parte a) de este ejemplo. Se determinan las resistencias de diseño a compresión para pandeo flexional y para pandeo torsional.

Las tensiones de diseño correspondientes al pandeo local tienen los mismos valores que se determinaron anteriormente en a.2).

$kL/r$  de barras comprimidas será menor o igual a **200**.

$$\lambda = \left( \frac{k \cdot L}{r} \right) = \left( \frac{1 \cdot 400}{2,61} \right) = 153,25 < 200$$

Para el estado límite de pandeo flexional se calcula el parámetro de esbeltez global  $\lambda_c$  con la siguiente expresión:

$$\lambda_c = \left( \frac{k \cdot L}{r} \right) \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = \left( \frac{1 \cdot 400 \text{cm}}{2,61} \right) \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{240}{69600}} = 2,86 \quad (\text{C.4.1-4})$$

$$S_1^* = \frac{B_c - F_{yc}}{D_c^*} = \frac{269,85 - 240}{89,88} = 0,332 \quad (\text{C.4.1-6})$$

$$S_2^* = \frac{C_c}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = \frac{65,85}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{240}{69600}} = 1,23 \quad (\text{C.4.1-7})$$

$B_c$ ,  $D_c$  y  $C_c$  son constantes de pandeo cuya expresión se encuentra en Tabla C.2-2 y fueron hallados anteriormente en este ejemplo.

$$\text{Para } \lambda_c \geq S_2^* \quad \phi F_{ng} = \frac{\phi_{cc} F_{yc}}{\lambda_c^2} \quad (\text{C.4.1-3})$$

$$\text{Para } \lambda_c > 1,2 \quad \phi_{cc} = 0,14 \cdot \lambda_c + 0,58 = 0,14 \cdot 2,86 + 0,58 = 0,98 \geq 0,95 \quad (\text{C.4.1-9})$$

se adopta  $\phi_{cc} = 0,95$

$$\phi \cdot F_{ng} = \frac{\phi_{cc} \cdot F_{yc}}{\lambda_c^2} = \frac{0,95 \cdot 240}{2,86^2} = 27,87 \text{ MPa}$$

Para analizar el pandeo torsional, en secciones doblemente simétricas, se debe calcular el parámetro de esbeltez global  $\lambda_c$  en función de la esbeltez equivalente calculada con las siguientes expresiones (Sección C.4.3):

$$\left( \frac{k \cdot L}{r} \right)_e = \pi \sqrt{\frac{E}{F_e}} = \pi \sqrt{\frac{69600}{230,72}} = 54,56 \quad (\text{C.4.3-1})$$

$$F_e = F_{et} \quad (\text{C.4.3-2})$$

$$F_{et} = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \left( G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right) \quad (C.4.3-6)$$

$$F_{et} = \frac{1}{94,84 \cdot 11,87^2} \left( 26100 \cdot 92,42 + \frac{\pi^2 \cdot 69600 \cdot 156266}{(1 \cdot 400)^2} \right) = 230,72 \text{ MPa}$$

Siendo:

$$G = \frac{3 \cdot E}{8} = \frac{3 \cdot 69600}{8} = 26100 \text{ MPa} \quad (C.4.3-7)$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} = \sqrt{2,61^2 + 11,58^2} = 11,87 \text{ cm} \quad (C.4.3-8)$$

El módulo de torsión y el módulo de alabeo de la sección transversal del perfil, fueron hallados anteriormente para la columna de 2 m de longitud.

$$\lambda_c = \left( \frac{kL}{r} \right)_e \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = 54,56 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{240}{69600}} = 1,02$$

Como la esbeltez reducida para el pandeo torsional  $\lambda_c = 1,02$  es menor que la esbeltez reducida para el pandeo flexional  $\lambda_c = 1,43$ , resulta que el pandeo flexional es un estado límite definitorio para determinar la resistencia de diseño de esta columna.

Si se compara la tensión de diseño global  $\phi F_{ng}$  con las tensiones de diseño locales  $\phi F_{nL}$  se puede observar que:  $\phi F_{ng} \leq \phi F_{nLi}$  por lo tanto según Sección C.4-3:

$\phi F_{np} = \phi F_{ng}$ , es decir que:  $\phi F_{np} = 27,87 \text{ MPa}$ .

Entonces la resistencia de diseño a compresión  $P_d$  (en kN) de la columna de 4 m de longitud es:

$$P_d = A_g \cdot \phi \cdot F_{np} (10)^{-1} = 94,84 \cdot 27,87 \cdot 0,1 = 264,32 \text{ kN} \quad (C.4-2)$$



## EJEMPLO N°4

Viga sometida a flexión por acción de una carga concentrada.  
Aplicación Capítulos A, C y D.

### Enunciado:

Verificar una viga simplemente apoyada de 1 m de longitud que soporta una carga de 14 kN en el centro del vano. La misma está constituida por un perfil tubular cuadrado de 3" de lado x 0.125" de espesor. Aleación 6061-T6. Las propiedades mecánicas del aluminio del perfil son:  $F_{yt}=240\text{MPa}$ ,  $F_{ut}= 260\text{MPa}$ ,  $F_{yc} = 240\text{MPa}$ ,  $F_{yv}=138,6 \text{ MPa}$ ,  $F_{uv}=165 \text{ MPa}$ .  $E= 69600 \text{ MPa}$ . Tabla A.2-1.

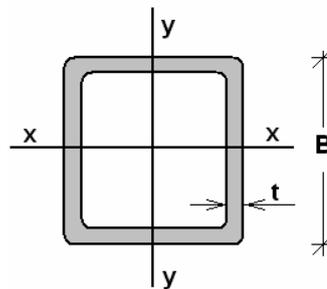


Figura Ej. 4-1

Propiedades de la sección:

$B = 7.62 \text{ cm}$	lado del tubo
$t = 0.32 \text{ cm}$	espesor del tubo
$A_g = 9.29 \text{ cm}^2$	área transversal
$I_x = I_y = 82.41 \text{ cm}^4$	momento de inercia
$S_x = S_y = 21.63 \text{ cm}^3$	módulo resistente
$r_x = r_y = 2.97 \text{ cm}$	radio de giro

Para la viga considerada:

Resistencia requerida a flexión  $M_u = 3,5 \text{ kNm}$

Resistencia requerida a corte  $V_u = 7 \text{ kN}$

### 1) Estados límites por Flexión

La resistencia de diseño a flexión de la viga  $\phi M_n$  será el menor de los valores obtenidos para los siguientes estados límites últimos.

#### 1.a) Plastificación de la fibra extrema traccionada

El momento de diseño  $\phi M_n$  será el menor de los determinados con las siguientes expresiones (Sección C.5.1.1: Elementos planos de perfiles estructurales y tubos rectangulares en flexión sometidos a tracción uniforme).

$$(a) \phi \cdot M_n = \phi_y \cdot F_{yt} \cdot S_{gt} \cdot (10)^{-3} = 0,95 \cdot 240 \cdot 21,63 \cdot 10^{-3} = 4,93 \text{ kNm} \quad (\text{C.5.1.1-1})$$

$$(b) \phi \cdot M_n = \frac{\phi_u}{K_t} \cdot F_{ut} \cdot S_{nt} \cdot (10)^{-3} = \frac{0,85}{1} \cdot 260 \cdot 21,63 \cdot 10^{-3} = 4,78 \text{ kNm} \quad (\text{C.5.1.1-2})$$

$$\phi_y = 0,95$$

$$\phi_u = 0,85$$

$S_{gt} = S_x$  : es el módulo resistente elástico de la sección bruta referida al eje de flexión y correspondiente a la fibra extrema del ala traccionada.

$S_{nt} = S_x$  : es el módulo resistente elástico de la sección neta referida al eje de flexión y correspondiente a la fibra extrema del ala traccionada.

$K_t$  es un coeficiente cuyo valor se encuentra en Tabla C.1-2.

#### 1.b) Pandeo lateral torsional

No es aplicable, entre otras, a barras flexadas con secciones tubulares cuadradas (Sección C.5.2).

#### 1.c) Pandeo local del ala uniformemente comprimida

Para determinar el valor del momento de diseño  $\phi M_n$  se aplica la Sección C.5.3.3. que corresponde a elementos planos apoyados en ambos bordes (rigidizados).

$$\text{Relación } \frac{b}{t} = \frac{(7,62 - 2 \cdot 0,32)}{0,32} = 21,81$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_b} \cdot F_{yc}}{1,6 \cdot D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{1,6 \cdot 2,06} = 12,28 \quad (\text{C.5.3.3-4})$$

$B_p$  y  $D_p$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_p = F_{yc} \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^{1/3}}{21,7} \right] = 240 \left[ 1 + \frac{\sqrt[3]{240}}{21,7} \right] = 308,73$$

$$D_p = \frac{B_p}{10} \cdot \left( \frac{B_p}{E} \right)^{1/2} = \frac{308,73}{10} \sqrt{\frac{308,73}{69600}} = 2,06$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_p}{1,6 \cdot D_p} = \frac{0,35 \cdot 308,73}{1,6 \cdot 2,06} = 32,78 \quad (\text{C.5.3.3-5})$$

$k_1 = 0.35$  constante que se obtiene de Tabla C.2-2.

Para  $S_1 < b/t < S_2$  resulta

$$\phi M_n = \phi_b \left[ B_p - 1,6 D_p \frac{b}{t} \right] S_c (10)^{-3} \quad (\text{C.5.3.3-2})$$

$$\phi_b = 0,85$$

$S_c$  = módulo resistente elástico de la sección relativo al eje de flexión y correspondiente a la fibra extrema comprimida.

$$\phi \cdot M_n = 0,85 \cdot [308,73 - 1,6 \cdot 2,06 \cdot 21,81] \cdot 21,63 \cdot (10)^{-3}$$

$$\phi \cdot M_n = 4,35$$

#### 1.d) Pandeo local del alma

Para determinar el valor del momento de diseño  $\phi M_n$  se aplica la Sección C.5.4.1 que corresponde a elementos planos apoyados en ambos bordes (rigidizados).

$$\frac{h}{t} = \frac{(7,62 - 2 \cdot 0,32)}{0,32} = 21,81$$

$$S_1 = \frac{B_{br} - 1,3 \cdot \frac{\phi_y}{\phi_b} \cdot F_{yc}}{m \cdot D_{br}} = \frac{457,78 - 1,3 \cdot \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{0,65 \cdot 4,54} = 36,96 \quad (\text{C.5.4.1-4})$$

$B_{br}$  y  $D_{br}$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_{br} = 1,3 \cdot F_{yc} \cdot \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^{1/3}}{13,3} \right] = 1,3 \cdot 240 \cdot \left[ 1 + \frac{\sqrt[3]{240}}{13,3} \right] = 457,78$$

$$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \left( \frac{6 \cdot B_{br}}{E} \right)^{1/2} = \frac{457,78}{20} \sqrt{\frac{6 \cdot 457,78}{69600}} = 4,54$$

$$c_c = -\frac{B}{2} \quad c_o = \frac{B}{2}$$

$$\text{Para: } \frac{c_o}{c_c} = -1 \quad m = \frac{1,3}{1 - \frac{c_o}{c_c}} = \frac{1,3}{1 - (-1)} = 0,65 \quad (\text{C.5.4.1-7})$$

$k_1 = 0.50$  constante que se obtiene de Tabla C.2-2.

Para  $b/t < S_1$  resulta:

$$\phi M_n = 1,3 \cdot \phi_y F_{yc} \cdot S_c \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.4.1-1})$$

$$\phi M_n = 1,3 \cdot 0,95 \cdot 240 \cdot 21,63 \cdot (10)^{-3} = 6,41 \text{ kNm}$$

El menor valor de  $\phi M_n$  corresponde al estado límite de pandeo local del ala. Por lo tanto resulta:

$$\phi M_n = 4,35 \text{ kNm} > M_u = 3,5 \text{ kNm} \quad \therefore \text{ VERIFICA}$$

## 2) Estados límite por Corte

Para almas planas apoyadas en ambos bordes, sin rigidizadores se aplica lo establecido en la Sección C.6.1. La resistencia de diseño al corte  $V_d$  (kN) es:

$$V_d = \phi F_{vL} A_w (10)^{-1} \quad (\text{C.6.1-1})$$

$$\frac{h}{t} = \frac{(7,62 - 2 \cdot 0,32)}{0,32} = 21,81$$

$$S_1 = \frac{B_v - \frac{F_{yt} \cdot \phi_y}{\phi_{vp} \cdot \sqrt{3}}}{1,25 \cdot D_v} = \frac{179,07 - \frac{240 \cdot 0,95}{0,9 \cdot \sqrt{3}}}{1,25 \cdot 0,91} = 28,84 \quad (\text{C.6.1-5})$$

$B_v$  y  $D_v$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$\phi_y = 0,95 ; \quad \phi_v = 0,80 ; \quad \phi_{vp} = 0,90$$

$$B_v = \frac{F_{yt}}{\sqrt{3}} \cdot \left[ 1 + \frac{\left( \frac{F_{yt}}{\sqrt{3}} \right)^{1/3}}{17,7} \right] = \frac{240}{\sqrt{3}} \cdot \left[ 1 + \frac{\left( \frac{240}{\sqrt{3}} \right)^{1/3}}{17,7} \right] = 179,07$$

$$D_v = \frac{B_v}{10} \cdot \left( \frac{B_v}{E} \right)^{1/2} = \frac{179,07}{10} \cdot \left( \frac{179,07}{69600} \right)^{1/2} = 0,91$$

Para  $h/t < S_1$

$$\phi \cdot F_{VL} = \frac{\phi_y \cdot F_{yt}}{\sqrt{3}} = \frac{0,95 \cdot 240}{\sqrt{3}} = 131,63 \text{ MPa} \quad (\text{C.6.1-2})$$

La resistencia de diseño al corte será:

$$V_d = \phi \cdot F_{VL} \cdot A_w (10)^{-1} = 131,63 \cdot 4,46 \cdot 0,1 = 58,7 \text{ kN}$$

$A_w$  es el área del alma o almas,  $A_w = 2 \cdot (7,62 - 2 \cdot 0,32) \cdot 0,32 = 4,46 \text{ cm}^2$

$$V_d = 58,7 \text{ kN} > V_u = 7 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA}$$

### 3) Estados límites por cargas concentradas

De acuerdo con la Sección D.9. correspondiente a pandeo localizado de almas planas se debe efectuar las siguientes verificaciones:

3.a) Para reacciones y cargas concentradas interiores:

$$\phi \cdot P_n = \frac{\phi_w \cdot C_{wa} \cdot (N + C_{w1})}{C_{wb}} \quad (\text{D.9-1})$$

$$C_{wa} = t_w^2 \cdot \text{sen } \theta \cdot (0,46 \cdot F_{yc} + 0,02 \cdot \sqrt{E F_{yc}}) \cdot (10)^{-1} \quad (\text{D.9-3})$$

$$C_{wa} = (0,64)^2 \cdot \text{sen}(90^\circ) \cdot (0,46 \cdot 240 + 0,02 \cdot \sqrt{69600 \cdot 240}) \cdot (10)^{-1} = 7,87 \text{ kN}$$

Se considera una longitud de carga de la fuerza concentrada  $N = 7 \text{ cm}$

$$C_{wb} = C_{w3} + R_i (1 + \cos \theta) = 1 + 0 \cdot (1 + \cos 90^\circ) = 1 \text{ cm} \quad (\text{D.9-4})$$

$R_i = 0$  para perfiles extruidos,  $C_{w1} = 14 \text{ cm}$ ,  $C_{w3} = 1 \text{ cm}$ ,  $\phi_w = 0,90$

$$\phi \cdot P_n = \frac{0,9 \cdot 7,87 \cdot (7 + 14)}{1} = 148,74 \text{ kN}$$

$$\phi P_n = 148,74 \text{ kN} > P_u = 14 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA}$$

3b) Para reacciones y cargas concentradas en los extremos:

$$\phi P_n = \frac{1,2 \cdot \phi_w \cdot C_{wa} \cdot (N + C_{w2})}{C_{wb}} \quad (\text{D.9-2})$$

$$C_{w2} = 3,3 \text{ cm}$$

$$\phi P_n = \frac{1,2 \cdot 0,9 \cdot 7,87 \cdot (7 + 3,3)}{1} = 87,54 \text{ kN}$$

$$\phi P_n = 87,54 \text{ kN} > P_u = 7 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA}$$

## EJEMPLO N°5

Viga sometida a flexión  
Aplicación Capítulos A y C.

### Enunciado:

Determinar la capacidad de diseño a flexión de una viga simplemente apoyada de 3 m de longitud. La misma está formada por un perfil doble T equivalente al S12x17.3 (Tabla 11, Cap. VI del Aluminum Manual 2005) de Aleación 6061-T6. Las propiedades del aluminio del perfil son:  $F_{yt}=240\text{MPa}$ ,  $F_{ut}=260\text{MPa}$ ,  $F_{yc}=240\text{MPa}$ . Tabla A.2-1.

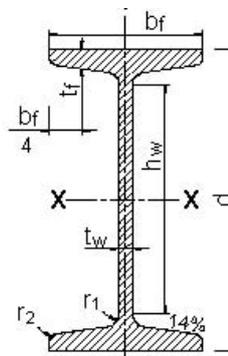


Figura Ej. 5-1

Propiedades de la sección:

$d = 30.48 \text{ cm}$	Altura total
$b_f = 13.91 \text{ cm}$	Ancho de ala
$t_w = 1.75 \text{ cm}$	Espesor del alma
$t_f = 1.68 \text{ cm}$	Espesor del ala
$h_w = 23.495 \text{ cm}$	Altura del alma
$A = 94.84 \text{ cm}^2$	Área de la sección transversal
$I_y = 653.48 \text{ cm}^4$	Momento de inercia con respecto al eje débil y-y
$r_y = 2.61 \text{ cm}$	Radio de giro con respecto al eje débil y-y
$S_y = 94.06 \text{ cm}^3$	Módulo Resistente relativo al eje débil y-y
$I_x = 12695.06 \text{ cm}^4$	Momento de inercia con respecto al eje fuerte x-x
$r_x = 4.56 \text{ in} = 11.598 \text{ cm}$	Radio de giro con respecto al eje fuerte x-x
$S_x = 832.46 \text{ cm}^3$	Módulo Resistente relativo al eje fuerte x-x

### 1) Estados límites por Flexión

De acuerdo con lo establecido en la Sección C.5, la Resistencia de diseño a flexión de la viga ( $\phi M_n$ ) será el menor de los valores obtenidos para los siguientes estados límites últimos:

### 1.a) Plastificación de la fibra extrema traccionada

El momento de diseño  $\phi M_n$  será el menor de los determinados con las siguientes expresiones (Sección C.5.1.1: Elementos planos de perfiles estructurales y tubos rectangulares en flexión sometidos a tracción uniforme).

$$(a) \phi \cdot M_n = \phi_y \cdot F_{yt} \cdot S_{gt} \cdot (10)^{-3} = 0,95 \cdot 240 \cdot 832,46 \cdot (10)^{-3} = 189,8 \text{ kNm} \quad (C.5.1.1-1)$$

$$(b) \phi \cdot M_n = \frac{\phi_u}{K_t} \cdot F_{ut} \cdot S_{nt} \cdot (10)^{-3} = \frac{0,85}{1} \cdot 260 \cdot 832,46 \cdot (10)^{-3} = 183,97 \text{ kNm} \quad (C.5.1.1-2)$$

$$\phi_y = 0,95$$

$$\phi_u = 0,85$$

$K_t = 1$  coeficiente de Tabla C.1-2.

$S_{gt} = S_{nt}$  módulos resistentes elásticos de la sección bruta y neta, respectivamente, relativos al eje de flexión y correspondientes a la fibra extrema traccionada.

### 1.b) Pandeo lateral torsional

Se determina el momento de diseño  $\phi M_n$  para el tipo de sección adoptado, en este caso se aplica la Sección C.5.2.1., que corresponde a perfiles de una sola alma flexando alrededor del eje fuerte, procediendo como sigue:

La longitud no arriostrada  $L_b$  es igual a la longitud de la viga.  
Se adopta de forma conservadora  $C_b = 1$ .

$$\frac{L_b}{r_y \cdot \sqrt{C_b}} = \frac{300}{2,61 \cdot \sqrt{1}} = 114,94$$

$$S_1 = \frac{1,2 \left( B_c - \frac{\phi_y \cdot F_{yc}}{\phi_b} \right)}{D_c} = \frac{1,2 \cdot \left( 269,85 - \frac{0,95 \cdot 240}{0,85} \right)}{1,68} = 1,15 \quad (C.5.2.1-4)$$

$$S_2 = 1,2 C_c = 79,02 \quad (C.5.2.1-5)$$

$B_c$ ,  $C_c$  y  $D_c$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$\phi_y = 0,95$$

$$\phi_b = 0,85$$

$$B_c = F_{yc} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{F_{yc}}{15510} \right)^{1/2} \right] = 240 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{240}{15510} \right)^{1/2} \right] = 269,85$$

$$D_c = \frac{B_c}{10} \cdot \left( \frac{B_c}{E} \right)^{1/2} = \frac{269,85}{10} \cdot \left( \frac{269,85}{69600} \right)^{1/2} = 1,68$$

$$C_c = 0,41 \cdot \frac{B_c}{D_c} = 0,41 \cdot \frac{269,85}{1,68} = 65,85$$

$$\frac{L_b}{r_y \cdot \sqrt{C_b}} \geq S_2$$

$$\phi \cdot M_n = \frac{\phi_b \cdot C_b \cdot \pi^2 \cdot E}{\left( \frac{L_b}{1,2 \cdot r_y} \right)^2} \cdot S_c \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.2.1-3})$$

Donde  $S_c$  es el módulo resistente elástico referido a la fibra comprimida de la sección bruta.

$$S_c = S_x = 832,46 \text{ cm}^3$$

$$\phi \cdot M_n = \frac{0,85 \cdot 1 \cdot \pi^2 \cdot 69600}{\left( \frac{300}{1,2 \cdot 2,61} \right)^2} \cdot 832,46 \cdot (10)^{-3} = 52,97 \text{ kNm}$$

### 1.c) Pandeo local del ala uniformemente comprimida

El momento de diseño  $\phi M_n$  se determina aplicando la Sección C.5.3.2, que corresponde a elementos planos apoyados en un borde (no rigidizados).

$$\frac{b}{t} = \frac{13,91}{1,68} = 4,14$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_b} \cdot F_{yc}}{5,1 \cdot D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{5,1 \cdot 2,06} = 3,85 \quad (\text{C.5.3.2-4})$$

$B_p$  y  $D_p$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_p = F_{yc} \cdot \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^{1/3}}{21,7} \right] = 240 \cdot \left[ 1 + \frac{240^{1/3}}{21,7} \right] = 308,73$$

$$D_p = \frac{B_p}{10} \cdot \left( \frac{B_p}{E} \right)^{1/2} = \frac{308,73}{10} \cdot \left( \frac{308,73}{69600} \right)^{1/2} = 2,06$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_p}{5,1 D_p} = \frac{0,35 \cdot 308,73}{5,1 \cdot 2,06} = 10,28 \quad (\text{C.5.3.2-5})$$

$k_1 = 0,35$  constante que se obtiene de Tabla C.2-2

Para:  $S_1 < b/t < S_2$  :

$$\phi \cdot M_n = \phi_b \cdot \left[ B_p - 5,1 \cdot D_p \cdot \frac{b}{t} \right] \cdot S_c \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.3.2-2})$$

$$\phi_b = 0,85$$

$$\phi \cdot M_n = 0,85 \cdot [308,73 - 5,1 \cdot 2,06 \cdot 4,14] \cdot 832,46 \cdot (10)^{-3} = 187,68 \text{ kNm}$$

#### 1.d) Pandeo local del alma

El momento de diseño  $\phi M_n$  se determina aplicando la Sección C.5.4.1. que corresponde a elementos planos apoyados en ambos bordes.

$$\frac{h}{t} = \frac{23,495}{1,75} = 13,43$$

$$S_1 = \frac{B_{br} - 1,3 \cdot \frac{\phi_y}{\phi_b} F_{yc}}{m \cdot D_{br}} = \frac{457,78 - 1,3 \cdot \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{0,65 \cdot 4,54} = 36,96 \quad (\text{C.5.4.1-4})$$

$$c_c = -\frac{B}{2} \quad c_o = \frac{B}{2}$$

$$\text{Para: } \frac{c_o}{c_c} = -1 \quad m = \frac{1,3}{1 - \frac{c_o}{c_c}} = \frac{1,3}{1 - (-1)} = 0,65 \quad (\text{C.5.4.1-7})$$

$B_{br}$  y  $D_{br}$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_{br} = 1,3 \cdot F_{yc} \cdot \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^{1/3}}{13,3} \right] = 1,3 \cdot 240 \cdot \left[ 1 + \frac{240^{1/3}}{13,3} \right] = 457,78$$

$$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \cdot \left( \frac{6 \cdot B_{br}}{E} \right)^{1/2} = \frac{457,78}{20} \cdot \left( \frac{6 \cdot 457,78}{69600} \right)^{1/2} = 4,54$$

Para  $h/t \leq S_1$ :

$$\phi \cdot M_n = 1,3 \phi_y F_{yc} S_c (10)^{-3} = 1,3 \cdot 0,95 \cdot 240 \cdot 832,46 \cdot (10)^{-3} = 246,74 \text{ kNm}$$

$$\phi_y = 0,95$$

De los estados límites últimos analizados para flexión se puede observar que el estado límite determinante es el correspondiente al pandeo lateral torsional con un valor de:

$$\phi M_n = 52,97 \text{ kNm}$$



## EJEMPLO N°6

Viga-columna sometida a flexión y axil.  
Aplicación Capítulos C y D.

### Enunciado:

Verificar una viga simplemente apoyada de 1,80 m de longitud, sometida a flexión por la acción de una carga distribuida de 95 kN/m y a compresión por una carga axil de 110 kN. La misma está formada por un Perfil C con alas rigidizadas. Considerar Aleación 6061-T6. La tensión de fluencia del aluminio del perfil es:  $F_{yc}=F_{yt}= 240\text{MPa}$ , la tensión de fluencia del aluminio del perfil es:  $F_{ut}=260\text{MPa}$  y el módulo de elasticidad longitudinal es  $E= 69600\text{ MPa}$ . Tabla A.2-1.

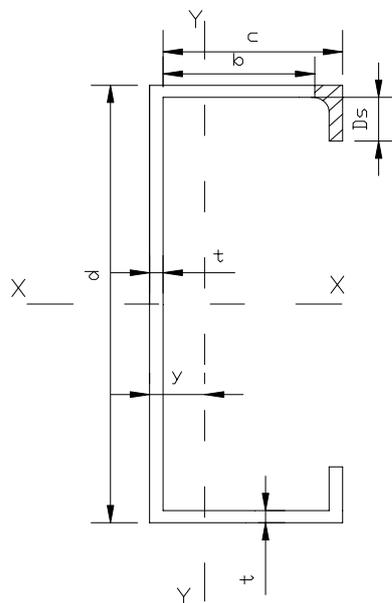


Figura Ej. 6-1

Propiedades de la sección:

$d= 26\text{ cm}$	Altura total
$b= 11\text{ cm}$	Ancho
$c= 14,5\text{ cm}$	Ancho total
$t= 0,5\text{ cm}$	Espesor
$D_s= 5,2\text{ cm}$	Longitud del labio rigidizado
$r_s= 2,68\text{ cm}$	Radio interno
$y= 5,88\text{ cm}$	Baricentro
$I_y= 1126,32\text{ cm}^4$	Momento de inercia de la sección respecto del eje débil
$S_y= 123,5\text{cm}^3$	Módulo Resistente respecto del eje débil
$r_y= 5,87\text{ cm}$	Radio de giro respecto del eje débil
$I_x= 3611,16\text{ cm}^4$	Momento de inercia de la sección respecto del eje fuerte
$S_x= 277,78\text{ cm}^3$	Módulo Resistente respecto del eje fuerte

$r_x = 10,51 \text{ cm}$	Radio de giro respecto del eje fuerte
$A = 32,7 \text{ cm}^2$	Área
$e = 7,94$	Distancia al centro de corte
$C_w = 197695,8 \text{ cm}^6$	Módulo de alabeo transversal
$J = 2,7 \text{ cm}^4$	Módulo de torsión

Resistencia requerida a compresión  $P_u = 110 \text{ kN}$

Resistencia requerida a flexión  $M_u = 38,48 \text{ kNm}$

### 1) Estados Límites por compresión

Para determinar la resistencia de diseño de una columna sometida a esfuerzo axial de compresión se deben hallar los valores de: la tensión de diseño global  $\phi F_{ng}$  y la tensión de diseño local  $\phi F_{nLi}$ , de acuerdo con la Sección C.4: Compresión axial.

$$\text{Si: } \phi \cdot F_{ng} \leq \phi \cdot F_{nLi} \quad \phi \cdot F_{np} = \phi \cdot F_{ng} \quad (\text{C.4-3})$$

$$\text{Si: } \phi \cdot F_{ng} > \phi \cdot F_{nLi} \quad \phi \cdot F_{np} = \frac{\sum (A_{gLi} \cdot \phi \cdot F_{nLi} + A_{gpi} \cdot \phi \cdot F_{ng})}{A_g} \quad (\text{C.4-4})$$

$\phi F_{nLi}$  tensión de diseño local a compresión de cada uno de los elementos que componen la sección transversal, que se determina según las Secciones **C.4.5 a C.4.9**, en MPa.

$\phi F_{ng}$  tensión de diseño global que se determina según la Sección **C.4.1 a C.4.4**, en MPa.

Siendo la resistencia de diseño  $P_d$  igual a:

$$P_d = A_g \cdot \phi F_{np} \cdot (10)^{-1} \quad (\text{C.4-2})$$

#### 1.a) Tensión de diseño global ( $\phi F_{ng}$ )

Se deben determinar los valores de: Resistencia de Diseño a Compresión para pandeo flexional (Sección C.4.1) y Resistencia de diseño a pandeo flexo-torsional para secciones con simetría simple (Sección C.4.3).

- Para el estado límite de pandeo flexional se calcula el parámetro de esbeltez global  $\lambda_c$  con la siguiente expresión (Sección C.4.1):

**$kL/r$**  de barras comprimidas deberá ser menor o igual a **200**.

$$\lambda = \left( \frac{kL}{r} \right) = \left( \frac{1 \cdot 180}{5,87} \right) = 30,66 < 200$$

$$\lambda_c = \left( \frac{kL}{r} \right) \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = \left( \frac{1 \cdot 180 \text{cm}}{5,87} \right) \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{240}{69600}} = 0,57 \quad (\text{C.4.1-4})$$

$$S_1^* = \frac{B_c - F_{yc}}{D_c^*} = \frac{269,85 - 240}{89,88} = 0,332 \quad (\text{C.4.1-6})$$

$B_c$ ,  $D_c$  y  $C_c$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_c = F_{yc} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{F_{yc}}{15510} \right)^{1/2} \right] = 240 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{240}{15510} \right)^{1/2} \right] = 269,85$$

$$D_c = \frac{B_c}{10} \cdot \left( \frac{B_c}{E} \right)^{1/2} = \frac{269,85}{10} \left( \frac{269,85}{69600} \right)^{1/2} = 1,68$$

$$D_c^* = \pi \cdot D_c \cdot \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} = \pi \cdot 1,68 \cdot \sqrt{\frac{69600}{240}} = 89,88 \quad (\text{C.4.1-5})$$

$$S_2^* = \frac{C_c}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = \frac{65,85}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{240}{69600}} = 1,23 \quad (\text{C.4.1-7})$$

$$C_c = 0,41 \frac{B_c}{D_c} = 0,41 \frac{269,85}{1,68} = 65,85$$

- Para secciones con simetría simple, sujetas a pandeo flexo-torsional,  $kL/r$  deberá ser el mayor valor entre: la mayor relación de esbeltez global para pandeo flexional, y la relación de esbeltez equivalente para flexotorsional (Sección C.4.3.) determinada de la siguiente forma:

$$\left( \frac{kL}{r} \right)_e = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{F_e}} \quad (\text{C.4.3-1})$$

Para secciones de simple simetría donde  $x$  (eje fuerte) es el eje de simetría (pandeo flexo-torsional)

$$F_e = F_{ef} = \frac{1}{2\beta} \left[ (F_{ex} + F_{et}) - \sqrt{(F_{ex} + F_{et})^2 - 4\beta F_{ex} F_{et}} \right] \quad (\text{C.4.3-3})$$

Siendo:

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left( \frac{k_x \cdot L}{r_x} \right)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 69600}{\left( \frac{1 \cdot 180}{10,51} \right)^2} = 234190 \text{ MPa} \quad (\text{C.4.3-5})$$

Donde  $k_x$  es el factor de longitud efectiva para pandeo respecto del eje x, resultando igual a 1 para las condiciones de borde de la viga en estudio.

$$F_{et} = \frac{1}{A r_o^2} \cdot \left( G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t L_t)^2} \right) \quad (C.4.3-6)$$

$$F_{et} = \frac{1}{32,7 \cdot (18,33)^2} \left( 26100 \cdot 2,7 + \frac{\pi^2 \cdot 69600 \cdot 197695,8}{(1 \cdot 180)^2} \right) = 387,90 \text{ MPa}$$

$$G = \frac{3E}{8} = \frac{3 \cdot 69600}{8} = 26100 \quad (C.4.3-7)$$

$$x_o = e + y = 7,94 + 5,88 = 13,82$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} = \sqrt{10,51^2 + 5,88^2 + 13,82^2} = 18,33 \quad (C.4.3-8)$$

$k_t = 1$  factor de longitud efectiva para pandeo torsional  
 $L_t = L$  longitud de la barra no arriostrada

$$\beta = 1 - \left( \frac{x_o}{r_o} \right)^2 = 1 - \left( \frac{13,82}{18,33} \right)^2 = 0,43 \quad (C.4.3-9)$$

$$F_e = \frac{1}{2 \cdot 0,43} \left[ (2341,90 + 387,90) - \sqrt{(2341,90 + 387,90)^2 - 4 \cdot 0,43 \cdot 2341,90 \cdot 387,90} \right]$$

$$F_e = F_{ef} = 352,33 \text{ MPa}$$

La esbeltez equivalente será:

$$\left( \frac{kL}{r} \right)_e = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{F_e}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{69600}{352,33}} = 44,15 \quad (C.4.3-1)$$

y la esbeltez reducida:

$$\lambda_c = \left( \frac{kL}{r} \right)_e \cdot \left( \frac{1}{\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} = 44,15 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{240}{69600}} = 0,83 \quad (C.4.1-3)$$

De las dos esbelteces reducidas  $\lambda_c$  se adopta la mayor (0,83), que en este caso corresponde al pandeo flexo-torsional. Con ese valor se calcula la tensión de diseño global.

$$\text{para } \lambda_c < 1,2 \quad \phi_{cc} = 1 - 0,21 \cdot \lambda_c = 1 - 0,21 \cdot 0,83 = 0,83 \leq 0,95 \quad (C.4.1-8)$$

Como  $S_1^* < \lambda_c < S_2^*$

$$\phi F_{ng} = \phi_{cc} \cdot (B_c - D_c^* \cdot \lambda_c) = 0,83 \cdot (269,85 - 89,88 \cdot 0,83) = 162,06 \text{ MPa} \quad (\text{C.4.1-2})$$

## 1.b) Tensión de diseño local

Para verificar localmente los elementos de la sección, se deben considerar: el rigidizador (Sección C.4.5.2.), el alma (Sección C.4.6.) y el ala (Sección C.4.7.).

### 1.b.1) Rigidizador

Según Sección C.4.5.2. Correspondiente a compresión uniforme en elementos no rigidizados de columnas, cuyo eje de pandeo no es un eje de simetría.

$$\frac{b}{t} = \frac{D_s - r_s}{t} = \frac{5,2 - 2,68}{0,5} = 5,04$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_c} F_{yc}}{5,1 D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{5,1 \cdot 2,06} = 3,85 \quad (\text{C.4.5.2-4})$$

$$\phi_c = 0,85$$

$$\phi_y = 0,95$$

$B_p$ ,  $D_p$  y  $C_p$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_p = F_{yc} \cdot \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^2}{21,7} \right] = 240 \cdot \left[ 1 + \frac{240^{1/3}}{21,7} \right] = 308,73$$

$$D_p = \frac{B_p}{10} \cdot \left( \frac{B_p}{E} \right)^{1/2} = \frac{308,73}{10} \cdot \left( \frac{308,73}{69600} \right)^{1/2} = 2,06$$

$$C_p = 0,41 \cdot \frac{B_p}{D_p} = 0,41 \cdot \frac{308,73}{2,06} = 61,45$$

$$S_2 = \frac{C_p}{5,1} = 12,05 \quad (\text{C.4.5.2-5})$$

Para  $S_1 < b/t < S_2$

$$\phi \cdot F_{nL1} = \phi_c \cdot \left[ B_p - 5,1 \cdot D_p \cdot \frac{b}{t} \right] \quad (C.4.5.2-2)$$

$$\phi F_{nL1} = 0,85 \cdot [308,73 - 5,1 \cdot 2,06 \cdot 5,04] = 217,41 \text{ MPa}$$

### 1.b.2) Alma

Según Sección C.4.6. Correspondiente a compresión uniforme en elementos de columnas – elementos planos apoyados en ambos bordes (elementos rigidizados)

$$\frac{b}{t} = \frac{d - 2 \cdot t}{t} = \frac{26 - 2 \cdot 0,5}{0,5} = 50$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_c} \cdot F_{yc}}{1,6 \cdot D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{1,6 \cdot 2,06} = 12,29 \quad (C.4.6-4)$$

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{1,6 D_p} = \frac{0,35 \cdot 308,73}{1,6 \cdot 2,06} = 32,78 \quad (C.4.6-5)$$

$k_1$  y  $k_2$  constantes de Tabla C.2-2

Para  $b/t \geq S_2$

$$\phi F_{nL3} = \frac{\phi_c \cdot k_2 \cdot \sqrt{B_p \cdot E}}{1,6 \cdot \frac{b}{t}} = \frac{0,85 \cdot 2,27 \cdot \sqrt{308,73 \cdot 69600}}{1,6 \cdot 50} = 111,8 \text{ MPa} \quad (C.4.6-3)$$

### 1.b.3) Ala

Según Sección C.4.7. Correspondiente a compresión uniforme en elementos de columnas – elementos planos apoyados en un borde y con rigidizador en el otro

Los requisitos de la Sección C.4.7 se aplican cuando  $D_s/b \leq 0,8$

$D_s/b = 5,2/11 = 0,46 < 0,8$  por lo tanto se cumple la condición

La tensión de diseño para pandeo local  $\phi F_{nL}$  (MPa) es el menor de los valores que se obtengan de las expresiones (a) y (b):

$$(a) \quad \phi \cdot F_{nL} = \phi_y \cdot F_{yc} \quad (C.4.7-1)$$

$$(b) \quad \phi \cdot F_{nL} = F_{UT} + (F_{ST} - F_{UT}) \cdot \rho_{ST} \leq F_{ST} \quad (C.4.7-2)$$

$F_{UT}$  es la tensión de diseño  $\phi \cdot F_{nL}$ , en MPa, de acuerdo con la Sección C.4.5 despreciando el rigidizador.

$F_{ST}$  es la tensión de diseño  $\phi F_{nL}$ , en MPa, de acuerdo con la Sección C.4.6.

Aplicando lo expresado en la sección C.4.5.2

$$\frac{b}{t} = \frac{c - r_s - t}{t} = \frac{14,5 - 2,68 - 0,5}{0,5} = 22,64$$

$S_1 = 3.85$  y  $S_2 = 12.05$  Valores obtenidos en el punto 1.b.1)

Para:  $\frac{b}{t} > S_2$

$$\phi \cdot F_{nL} = F_{UT} = \frac{\phi_c \cdot \pi^2 \cdot E}{\left(5,1 \cdot \frac{b}{t}\right)^2} = \frac{0,85 \cdot \pi^2 \cdot 69600}{(5,1 \cdot 22,64)^2} = 43.80 \text{ MPa} \quad (\text{C.4.5.2-3})$$

Aplicando lo expresado en la sección C.4.6

$$\frac{b}{t} = \frac{11.32}{0.5} = 22.64$$

$S_1 = 12.29$  y  $S_2 = 32.78$  Valores ya obtenidos en el punto 1.b.2)

Para:  $S_1 < b/t < S_2$

$$\phi \cdot F_{nL} = \phi_c \cdot \left[ B_p - 16 \cdot D_p \cdot \frac{b}{t} \right] \quad (\text{C.4.6-2})$$

$$\phi F_{nL} = F_{ST} = 0,85 \cdot \left[ 308,7 - 1,6 \cdot 2,06 \cdot \frac{11,32}{0,5} \right] = 198,97 \text{ MPa}$$

$\rho_{ST}$  es una relación a determinar de la siguiente forma:

$$S = 1,28 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} = 1,28 \cdot \sqrt{\frac{69600}{240}} = 21,8 \quad (\text{C.4.7-7})$$

$$2 \cdot S = 43,6$$

$$\frac{b}{t} = \frac{11.32}{0.5} = 22.64$$

para  $S < b/t < 2 S$

$$\rho_{ST} = \frac{r_s}{1,5 t \left( \frac{b/t}{S} + 3 \right)} = \frac{2,68}{1,5 \cdot 0,5 \cdot \left( \frac{22,64}{21,8} + 3 \right)} = 0,89 \leq 1 \quad (\text{C.4.7-5})$$

**(a)**  $\phi \cdot F_{nL} = \phi_y \cdot F_{yc} = 0,95 \cdot 240 = 228 \text{ MPa}$

**(b)**  $\phi \cdot F_{nL} = F_{UT} + (F_{ST} - F_{UT}) \cdot \rho_{ST} = 43,80 + (198,97 - 43,80) \cdot 0,89 = 181,90 \text{ MPa}$

Entonces  $\phi \cdot F_{nL} = 181,90 \text{ MPa}$

$\phi F_{nL}$  no deberá ser mayor que la tensión de diseño para el rigidizador de acuerdo con la Sección C.4.5. Por lo tanto se cumple dicho requisito:

$$181,90 \text{ MPa} < 217,48 \text{ MPa}$$

El valor de la tensión de diseño a compresión axial, de acuerdo con lo establecido por la Sección C.4. resulta:

Para:  $\phi F_{ng} > \phi F_{nLi}$  , 
$$\phi F_{np} = \frac{\sum (A_{gLi} \phi F_{nLi} + A_{gpi} \phi F_{ng})}{A_g} \quad (\text{C.4-4})$$

Donde:

$$\phi F_{ng} = 162.06 \text{ MPa}$$

$$A_g = 32,7 \text{ cm}^2$$

$A_{gLi}$  es el área bruta de cada uno de los elementos de la sección transversal que pandean localmente

$A_{gpi}$  es el área bruta de cada uno de los elementos de la sección transversal que no pandean localmente

Las áreas brutas de cada uno de los elementos de la sección transversal y las tensiones de diseño correspondientes son:

*Rigidizador*  $\rightarrow \phi \cdot F_{nL1} = 217,48 \text{ MPa}$

*Alma*  $\rightarrow \phi \cdot F_{nL2} = 111,80 \text{ MPa}$  ;  $A_{g2} = (d - 2 \cdot t) \cdot t = (26 - 2 \cdot 0,5) \cdot 0,5 = 12,5 \text{ cm}^2$

*Ala*  $\rightarrow \phi \cdot F_{nL3} = 181,90 \text{ MPa}$

El alma es el único elemento que pandea localmente, por lo que la tensión de diseño será:

$$\phi F_{np} = \frac{(A_{gL2} \cdot \phi F_{nL2} + (A_g - A_{gL2}) \cdot \phi F_{ng})}{A_g}$$

$$\phi F_{np} = \frac{(12,5 \cdot 111,80 + (32,7 - 12,5) \cdot 162,06)}{32,7} = 142,84 \text{ MPa}$$

Por lo tanto la resistencia de diseño a compresión axial resultante es:

$$P_d = A_g \cdot \phi F_{np} \cdot (10)^{-1} = 32,7 \cdot 142,84 \cdot (10)^{-1} = 467,08 \text{ kN} \geq 110 \text{ kN} \quad (\text{C.4-2})$$

∴ VERIFICA A COMPRESIÓN AXIAL

## 2) Verificación a Flexión

La resistencia de diseño a flexión de la viga  $\phi M_n$  (kNm) es el menor de los valores que se obtengan a continuación en 2.a), 2.b), 2.c) y 2.d). (Sección C.5)

**2.a)** Para el estado límite de **plastificación de la fibra extrema traccionada** según Sección C.5.1. y particularmente para elementos planos de perfiles estructurales en flexión, sometidos a tracción uniforme, corresponde seguir los lineamientos establecidos en la Sección C.5.1.1.

El momento de diseño  $\phi M_n$  (kNm) es el menor de los valores que se obtengan de las expresiones (a) y (b). Se considera que el módulo resistente elástico de la sección bruta es igual al módulo resistente elástico de la sección neta, ambos relativos al eje de flexión y correspondientes a la fibra extrema del ala traccionada.

$$(a) \quad \phi \cdot M_n = \phi_y \cdot F_{yt} \cdot S_{gt} \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.1.1-1})$$

$$\phi_y = 0,95$$

$$\phi M_n = 0,95 \cdot 240 \cdot 277,78 \cdot (10)^{-3} = 63,33 \text{ kNm}$$

$$(b) \quad \phi \cdot M_n = \frac{\phi_u}{K_t} \cdot F_{ut} \cdot S_{nt} \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.1.1-2})$$

$$\phi_y = 0,85$$

$$\phi \cdot M_n = \frac{0,85}{1} \cdot 260 \cdot 277,78 \cdot (10)^{-3} = 61,39 \text{ kNm}$$

$K_t$  coeficiente que se obtiene de Tabla C.1-2.

Entonces:  $\phi \cdot M_{n1} = 61,39 \text{ kNm} > 38,48 \text{ kNm} \quad \therefore \text{VERIFICA}$

**2.b)** Para el estado límite de **pandeo lateral torsional**, según Sección C.5.2., y particularmente para perfiles de una sola alma flexando alrededor del eje fuerte corresponde seguir los lineamientos establecidos en la Sección C.5.2.1.

$$\frac{L_b}{r_y \cdot \sqrt{C_b}} = \frac{180}{5,87 \cdot \sqrt{1,13}} = 28,85$$

$$S_1 = \frac{1,2 \left( B_c - \frac{\phi_y \cdot F_{yc}}{\phi_b} \right)}{D_c} = \frac{1,2 \cdot \left( 269,85 - \frac{0,95 \cdot 240}{0,85} \right)}{1,68} = 1,15 \quad (\text{C.5.2.1-4})$$

$$\phi_b = 0,85$$

$B_c$ ,  $C_c$  y  $D_c$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_c = F_{yc} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{F_{yc}}{15510} \right)^{1/2} \right] = 240 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{240}{15510} \right)^{1/2} \right] = 269,85$$

$$D_c = \frac{B_c}{10} \cdot \left( \frac{B_c}{E} \right)^{1/2} = \frac{269,85}{10} \cdot \left( \frac{269,85}{69600} \right)^{1/2} = 1,68$$

$$C_c = 0,41 \cdot \frac{B_c}{D_c} = 0,41 \cdot \frac{269,85}{1,68} = 65,85$$

$$S_2 = 1,2 \cdot C_c = 1,2 \cdot 65,85 = 79,02 \quad (\text{C.5.2.1-5})$$

El valor del coeficiente  $C_b$  se determina de acuerdo a lo que establece la Sección C.5.2.3.3. En primer lugar se debe hallar la relación  $I_{cy}/I_y$ . Siendo  $I_{cy}$  el momento de inercia del ala comprimida respecto del eje del alma.

$$I_{cy} = \frac{t \cdot c^3}{12} + (c \cdot t) \cdot \left( \frac{c}{2} + \frac{t}{2} \right)^2 = \frac{0,5 \cdot 14,5^3}{12} + (14,5 \cdot 0,5) \cdot \left( \frac{14,5}{2} + \frac{0,5}{2} \right)^2 = 534,84$$

$$\frac{I_{cy}}{I_y} = \frac{534,84}{1126,32} = 0,47$$

Si para el caso de una viga simplemente apoyada, sometida a la acción de una carga uniformemente distribuida en la totalidad del tramo, se cumple (como en el presente Ejemplo) que:

$$\frac{I_{cy}}{I_y} > 0.1 \quad \text{y} \quad \frac{I_{cy}}{I_y} < 0.9$$

se deberá considerar que  $C_b = 1.13$ .

La longitud no arriostrada  $L_b$  es igual a la longitud de la viga.

$$\text{Para: } S_1 < \frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} < S_2$$

$$\phi \cdot M_n = \phi_b \cdot \left[ B_c - \frac{D_c \cdot L_b}{1.2 \cdot r_y \cdot \sqrt{C_b}} \right] \cdot S_c \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.2.1-2})$$

$$\phi \cdot M_n = 0.85 \cdot \left[ 269.85 - \frac{1.68 \cdot 1.80}{1.2 \cdot 5.87 \cdot \sqrt{1.13}} \right] \cdot 227.78 \cdot (10)^{-3} = 52.17 \text{ KNm}$$

Entonces:  $\phi M_{n2} = 52.17 > 38.48 \quad \therefore \quad \text{VERIFICA}$

**2.c)** El momento de diseño para el estado límite de **pandeo local del ala uniformemente comprimida** se determina de acuerdo con la Sección C.5.3. Particularmente, para elementos planos apoyados en un borde y con rigidizador en el otro, corresponde aplicar la Sección C.5.3.5.

Los requisitos de la mencionada Sección se aplican cuando, como en este caso, se cumple con la siguiente condición:

$$\frac{D_s}{b} = \frac{5.2}{11} = 0.47 < 0.8$$

La resistencia de diseño a flexión  $\phi M_n$  (kNm) será el menor de los siguientes valores (a) o (b):

$$(a) \quad \phi \cdot M_n = \phi_y \cdot F_{yc} \cdot S_c \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.3.5-1})$$

$$(b) \quad \phi \cdot M_n = (\phi \cdot M_{UT} + (\phi \cdot M_{ST} - \phi \cdot M_{UT}) \cdot \rho_{ST}) \leq \phi \cdot M_{ST} \quad (\text{C.5.3.5-2})$$

$\phi M_{UT}$  es la resistencia de diseño a flexión, en kNm, determinada de acuerdo con la Sección C.5.3.2 despreciando la existencia del rigidizador, o sea con el elemento no rigidizado.

$\phi M_{ST}$  es la resistencia de diseño a flexión, en kNm, determinada de acuerdo con la Sección C.5.3.3, o sea considerando el elemento como rigidizado.

Aplicando lo indicado en la Sección C.5.3.2, correspondiente a elementos planos apoyados en un borde (no rigidizados) para la obtención de  $\phi M_{UT}$ , se tiene que:

$$\frac{b}{t} = \frac{11}{0,5} = 22$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_b} \cdot F_{yc}}{5,1 \cdot D_p} \quad (C.5.3.2-4)$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_p}{5,1 \cdot D_p} \quad (C.5.3.2-5)$$

$B_p$ ,  $D_p$  y  $C_p$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_p = F_{yc} \cdot \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^{\frac{1}{3}}}{21,7} \right] = 240 \cdot \left[ 1 + \frac{240^{\frac{1}{3}}}{21,7} \right] = 308,73$$

$$D_p = \frac{B_p}{10} \cdot \left( \frac{B_p}{E} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{308,73}{10} \left( \frac{308,73}{69600} \right)^{\frac{1}{2}} = 2,06$$

$$C_p = 0,41 \cdot \frac{B_p}{D_p} = 0,41 \cdot \frac{308,73}{2,06} = 61,45$$

$k_1$  y  $k_2$  son constantes de Tabla C.2-2

$$k_1 = 0,50 \quad k_2 = 2,04$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_b} \cdot F_{yc}}{5,1 \cdot D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{5,1 \cdot 2,06} = 3,85 \quad (C.5.3.2-4)$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_p}{5,1 \cdot D_p} = \frac{0,50 \cdot 308,73}{5,1 \cdot 2,06} = 14,69 \quad (C.5.3.2-5)$$

Para  $b/t \geq S_2$

$$\phi \cdot M_{ut} = \frac{\phi_b \cdot k_2 \cdot \sqrt{B_p \cdot E}}{5,1 \cdot \frac{b}{t}} \cdot S_c \cdot (10)^{-3} \quad (C.5.3.2-3)$$

$$\phi \cdot M_{ut} = \frac{0,85 \cdot 2,04 \cdot \sqrt{308,73 \cdot 69600}}{5,1 \cdot 22} \cdot 277,78 \cdot (10)^{-3} = 19,9 \text{ KNm}$$

Aplicando lo indicado en la Sección C.5.3.3, correspondiente a elementos planos apoyados en ambos bordes (rigidizados) se tiene que:

$$\frac{b}{t} = \frac{11}{0,5} = 22$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_b} \cdot F_{yc}}{1,6 \cdot D_p} = \frac{308,73 - \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{1,6 \cdot 2,06} = 12,29 \quad (\text{C.5.3.3-4})$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_p}{1,6 \cdot D_p} = \frac{0,5 \cdot 308,73}{1,6 \cdot 2,06} = 46,83 \quad (\text{C.5.3.3-5})$$

$$S_1 < b/t < S_2$$

$$\phi \cdot M_{st} = \phi_b \cdot \left[ B_p - 1,6 \cdot D_p \cdot \frac{b}{t} \right] \cdot S_C \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.5.3.3-2})$$

$$\phi \cdot M_{st} = 0,85 \cdot [308,73 - 1,6 \cdot 2,06 \cdot 22] \cdot 277,78 \cdot (10)^{-3} = 55,77 \text{ KNm}$$

De la Sección C.5.3.5. correspondiente a elementos planos apoyados en un borde y con rigidizador en el otro, se tiene que:

$$\frac{b}{t} = \frac{11}{0,5} = 22$$

$$S = 1,28 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} = 1,28 \cdot \sqrt{\frac{69600}{240}} = 21,8 \quad (\text{C.5.3.5-7})$$

$$2 \cdot S = 43,6$$

para  $S < b/t < 2S$

$$\rho_{ST} = \frac{r_s}{1,5 \cdot t \cdot \left( \frac{b/t}{S} + 3 \right)} = \frac{2,68}{1,5 \cdot 0,5 \cdot \left( \frac{11/0,5}{21,8} + 3 \right)} = 0,89 \leq 1,0 \quad (\text{C.5.3.5-5})$$

Reemplazando en las ecuaciones anteriores:

$$\text{a) } \phi \cdot M_n = \phi_y \cdot F_{yc} \cdot S_C \cdot (10)^{-3}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,95 \cdot 240 \cdot 277,78 \cdot (10)^{-3} = 63,33 \text{ KNm}$$

$$b) \quad \phi \cdot M_n = (\phi M_{UT} + (\phi M_{ST} - \phi M_{UT}) \rho_{ST}) \leq \phi M_{ST}$$

$$\phi \cdot M_n = (19,9 + (55,77 - 19,9) \cdot 0,89) = 51,82 \leq \phi \cdot M_{ST} = 55,77 \quad \therefore \text{ VERIFICA}$$

El menor valor es:

$$\phi \cdot M_{n3} = 51,82 \text{ kNm} > 38,48 \quad \therefore \text{ VERIFICA}$$

Para un rigidizador recto de espesor constante, la resistencia de diseño  $\phi M_n$  no deberá ser mayor que la resistencia de diseño a flexión  $\phi M_n = \phi F_{nL} \cdot S_c \cdot (10)^{-3}$  siendo,  $\phi F_{nL}$  la tensión de diseño para pandeo local del rigidizador, determinada de acuerdo con la Sección C.4.5.2. Esta Sección corresponde a compresión uniforme en elementos no rigidizados de columnas, cuyo eje de pandeo NO es un eje de simetría (cálculo realizado en el punto 1.b.1.;  $\phi \cdot F_{nL} = 217,41 \text{ MPa}$ ).

$$\phi \cdot M_n = \phi \cdot F_{nL} \cdot S_c \cdot (10)^{-3} = 217,41 \cdot 277,78 \cdot (10)^{-3} = 60,39 \text{ KNm} > 51,82 \quad \therefore \text{ VERIFICA}$$

**2.d)** Para el estado límite de **pandeo local del alma**, según Sección C.5.4., y particularmente para elementos planos apoyados en ambos bordes, corresponde seguir los lineamientos establecidos en la Sección C.5.4.1.

$$\frac{h}{t} = \frac{25}{0,5} = 50$$

$$S_1 = \frac{B_{br} - 1,3 \frac{\phi_y}{\phi_b} F_{yc}}{m D_{br}} \quad (C.5.4.1-4)$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_{br}}{m \cdot D_{br}} \quad \text{faltaba} \quad (C.5.4.1-5)$$

$B_{br}$  y  $D_{br}$  son constantes de pandeo cuya expresión se obtiene de Tabla C.2-2.

$$B_{br} = 1,3 \cdot F_{yc} \cdot \left[ 1 + \frac{(F_{yc})^{1/3}}{13,3} \right] = 1,3 \cdot 240 \cdot \left[ 1 + \frac{(240)^{1/3}}{13,3} \right] = 457,78$$

$$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \cdot \left( \frac{6 \cdot B_{br}}{E} \right)^{1/2} = \frac{457,78}{20} \cdot \left( \frac{6 \cdot 457,78}{69600} \right)^{1/2} = 4,55$$

$$\text{Para: } \frac{c_o}{c_c} = -1 \qquad m = \frac{1,3}{1 - \frac{c_o}{c_c}} = \frac{1,3}{1 - (-1)} = 0,65 \qquad (\text{C.5.4.1-7})$$

$$S_1 = \frac{B_{br} - 1,3 \frac{\phi_y}{\phi_b} F_{yc}}{m D_{br}} = \frac{457,78 - 1,3 \cdot \frac{0,95}{0,85} \cdot 240}{0,65 \cdot 4,55} = 36,88 \qquad (\text{C.5.4.1-4})$$

$k_1$  y  $k_2$  son constantes de Tabla C.2-2

$$k_1 = 0,50 \qquad k_2 = 2,04$$

$$S_2 = \frac{k_1 \cdot B_{br}}{m \cdot D_{br}} = \frac{0,5 \cdot 457,78}{0,65 \cdot 4,55} = 77,39$$

$$\text{Para } S_1 < h/t < S_2 \qquad \phi \cdot M_n = \phi_b \cdot \left[ B_{br} - m \cdot D_{br} \cdot \frac{h}{t} \right] \cdot S_c \cdot (10)^{-3} \qquad (\text{C.5.4.1-2})$$

$$\phi \cdot M_n = 0,85 \cdot \left[ 457,78 - 0,65 \cdot 4,55 \cdot \frac{25}{0,5} \right] \cdot 277,78 \cdot (10)^{-3} = 73,17 \text{ KNm} > 38,48$$

Entonces:  $\phi \cdot M_{n4} = 73,17 \text{ KNm} > 38,48 \therefore \text{VERIFICA}$

De la comparación de las resistencias de diseño a flexión se adopta el menor valor, resultando:

$$\phi \cdot M_n = 51,82 \text{ KNm} > 38,48 \quad \text{Verifica a flexión}$$

### 3) Verificación a combinación de carga axial y flexión

La Sección D.1.2. es aplicable a barras sometidas a la acción combinada de compresión axial y flexión. Las resistencias requeridas:  $P_u$ ,  $M_{ux}$  y  $M_{uy}$  deben satisfacer la siguiente ecuación de interacción:

$$\frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1,0 \qquad (\text{D.1.2-1})$$

$$\frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} = \frac{110}{467,08} + \frac{38,48}{51,82} = 0,98$$

