

Reglamento CIRSOC 303
Ministerio de Planificación Federal,
Inversión Pública y Servicios
Secretaría de Obras Públicas de la Nación

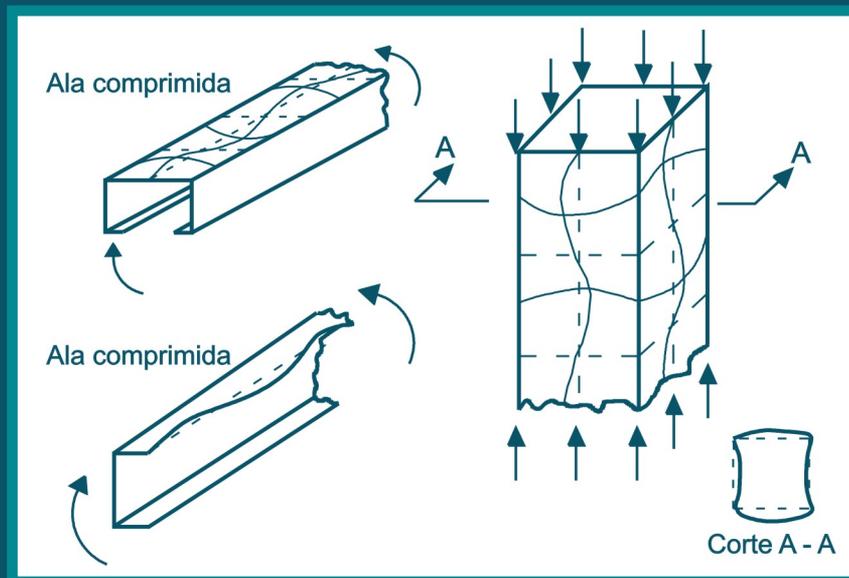
INTI

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
ELEMENTOS ESTRUCTURALES
DE ACERO DE SECCIÓN ABIERTA
CONFORMADOS EN FRÍO***

Julio 2009

***EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL
REGLAMENTO ARGENTINO
DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES DE ACERO
DE SECCIÓN ABIERTA
CONFORMADOS EN FRÍO***

***Ing. Gabriel Troglia
Ing. Gustavo Darin
Ing. Daniel Troglia***

EDICION JULIO 2009



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

**E-mail: cirsoc@inti.gob.ar
cirsoc@ffmm.gov.ar**

INTERNET: www.inti.gob.ar/cirsoc

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

Directora Técnica: Inga. Marta S. Parmigiani

Coordinadora Área Acciones: Inga. Alicia M. Aragno

Área Estructuras de Hormigón: Ing. Daniel A. Ortega

Área Administración, Finanzas y Promoción: Lic. Mónica B. Krotz

Área Venta de Publicaciones: Sr. Néstor D. Corti

© 2009

Editado por INTI

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

Av. Leandro N. Alem 1067 – 7° piso - Buenos Aires. Tel. 4515-5000/5001

**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

Reconocimiento Especial

El INTI-CIRSOC agradece muy especialmente a las Autoridades del *American Iron Steel Construction (AISI)*, por habernos permitido adoptar como base para el desarrollo de este Reglamento, el documento *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Member*”, Edición 1996, como así también a las Autoridades del Comité Técnico conjunto integrado por *AISI, Canadian Standards Association* y la *Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO)* por permitirnos utilizar parte de las especificaciones que constituyen el documento conocido como *AISI Standard North American Specification for the Design of Cold Formed Steel Structural Members – 2001 Edition*.

COMISION PERMANENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO DE INTI-CIRSOC

Coordinador

Ing. Gabriel R. Troglia UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, DEPARTAMENTO ESTRUCTURAS, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FISICAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA, FACULTAD DE ARQUITECTURA URBANISMO Y DISEÑO

Integrantes:

Ing. Francisco Pedrazzi INSTITUTO ARGENTINO DE SIDERURGIA

Ing. Horacio Rezk UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Arnaldo Mallamaci UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN, FACULTAD DE INGENIERIA

Ing. Alejandro Sesin TECHINT S.A.

Ing. Gustavo Darin UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, FACULTAD DE INGENIERÍA - U.T.N. FACULTAD REGIONAL BS. AS. - ASOCIACIÓN DE INGENIEROS ESTRUCTURALES

Ing. Juan C. Reimundin UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA

Inga. Nora Moncada UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERIA Y AGRIM., PROFESORA TITULAR CONSTRUCCIONES METÁLICAS II

Ing. Juan Carlos Piter UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL, FACULTAD REGIONAL CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

Ing. Hector Auad UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA

Ing. Alejandro Giuliano INPRES - INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCIÓN SÍSMICA

COMISION PERMANENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO DE INTI-CIRSOC

(*continuación*)

Ing. Fructuoso Berganza	CÁMARA DE FABRICANTES DE CAÑOS Y TUBOS DE ACERO
Ing. Adrián Puente Vergara Ing. Osvaldo R. Arario Ing. Faustino Amelong	ACINDAR S. A.
Ing. Daniel García Gei	UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL, FACULTAD REGIONAL MENDOZA
Ing. Pablo Alra	TENARIS-SIDERCA
Ing. Raul Cardoso	MARBY S.A.
Ing. Pablo Ruival	M. ROYO S.A.
Ing. Heriberto Martin	TUBOS ARGENTINOS S.A.
Ing. Oliva Hernández	IRAM
Ing. Oscar Troviano	MINISTERIO DE HACIENDA, FINANZAS Y OBRAS PÚBLICAS DE LA PROVINCIA DEL NEUQUEN, SUBSECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
Ing. Enrique Trivelli	TUBHIER S.A.
Ing. Francisco Crisafulli	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO, FACULTAD DE INGENIERIA
Ing. José M Vidmar	INVITADO ESPECIAL
Ing. Antonio Coloccini	INVITADO ESPECIAL
Ing. Bruno Coloccini	INVITADO ESPECIAL
Ing. Eduardo Asta	INVITADO ESPECIAL

INDICE

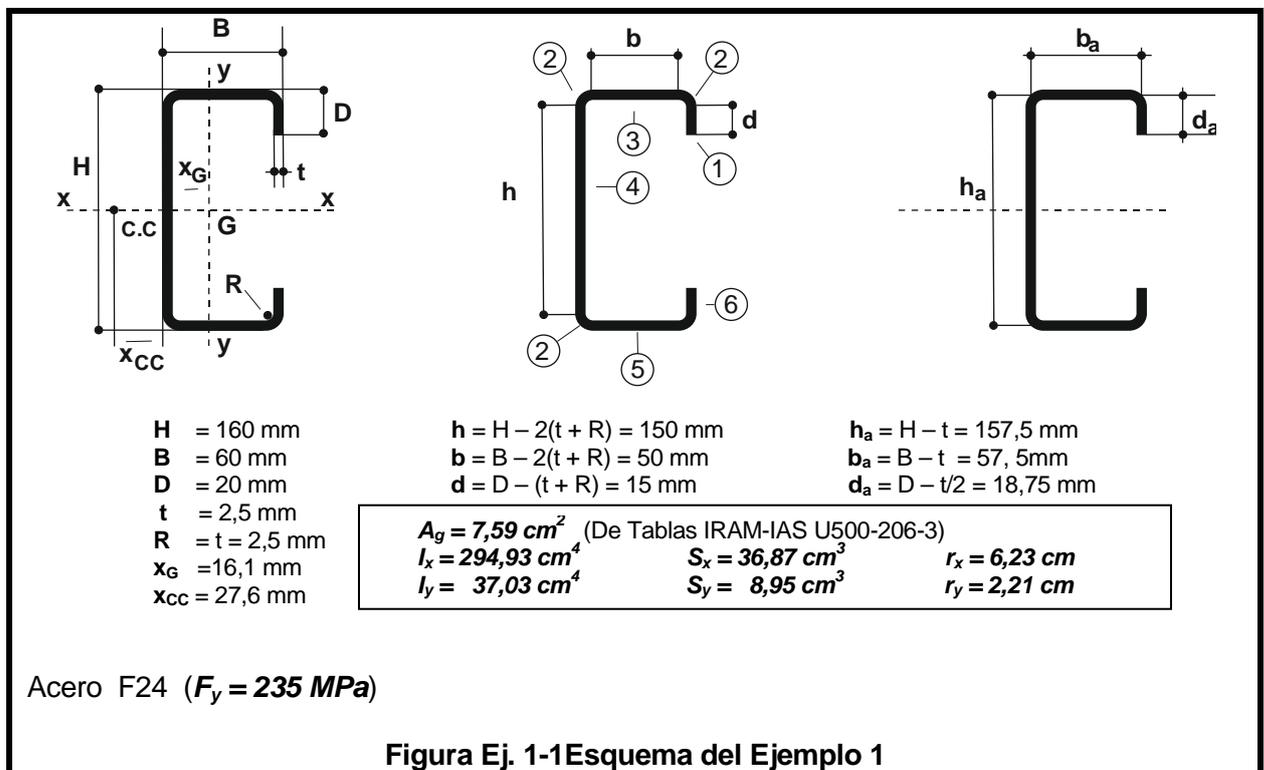
EJEMPLO N° 1	1
PERFIL C	
Resistencia de diseño a flexión y a corte. Resistencia de diseño a carga concentrada. Flexión alrededor del eje fuerte (x-x).	
PC 160 x 60 x 20 x 2,5 según IRAM-IAS U500-206-3:2006.	
EJEMPLO N° 2	11
PERFIL C	
Resistencia de diseño a flexión y a corte. Resistencia de diseño a carga concentrada. Flexión alrededor del eje débil (y-y).	
PC 160 x 60 x 20 x 2,5 según IRAM-IAS U500-206-3:2006.	
EJEMPLO N° 3	21
PERFIL C	
Como correa de cubierta sometido a flexión disimétrica.	
PC 160 x 60 x 20 x 2,5 según IRAM-IAS U500-206-3:2006.	
EJEMPLO N° 4	27
PERFIL C	
Resistencia a compresión axil.	
PC 160 x 60 x 20 x 2,5 según IRAM-IAS U500-206-3:2006.	

EJEMPLO N°1

PERFIL C

Resistencia de diseño a flexión y a corte.
Resistencia de diseño a carga concentrada
Flexión alrededor del eje fuerte (x-x).

PC 160 x 60 x 20 x 2,5 según IRAM-IAS U500-206-3 :2006.



(1) VERIFICACIÓN RELACIONES DE ESBELTEZ

- relaciones máximas entre ancho plano y espesor de elementos comprimidos (artículo B.1.1.(a))

Ala $b/t = 50/2,5 = 20 < 60$ (elemento comprimido rigidizado vinculado al alma y a un labio) **OK**

Labio $d/t = 15/2,5 = 6 < 60$ (elemento no rigidizado) **OK**

- **máxima relación entre altura del alma y su espesor** (artículo **B.1.2**)

$$h/t = 150/2,5 = 60 < 200 \quad (\text{almas no rigidizadas})$$

OK

(2) DETERMINACIÓN DE ANCHOS EFECTIVOS DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS PARA RESISTENCIA

- Elemento ① (Elemento rigidizador de borde con tensiones variables) (artículo **B.3.2.(a)**)

Se supone $f_3 = F_y = 235 \text{ MPa}$ (Figura **B.4-2**) Del artículo B.2.1 (a) con $k = 0,43$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 0,43 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{1,5}\right)^2 = 2159 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. B.2.1-5})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{235}{2159}} = 0,33 \quad (\text{Exp. B.2.1-4})$$

siendo $\lambda = 0,33 < 0,673 \Rightarrow b_e = b$ **labio totalmente efectivo** (Ej 1-1)

- Elemento ② es **todo efectivo** por ser el pliegue de la sección transversal
- Elemento ③ (Elemento uniformemente comprimido con rigidizador de borde) (**Ala**) (artículo **B.4.2**)

Se considera que la tensión del ala comprimida f (Figura B.4-2) es $f = F_y = 235 \text{ MPa}$

$$S = 1,28\sqrt{E/f} = 1,28\sqrt{200000/235} = 37,34 \quad (\text{Exp. B.4-1})$$

$$(b/t) = (50 / 2,5) = 20 > 0,328 S = 0,328 \times 37,34 = 12,24 \quad (\text{Ej 1-2})$$

siendo:

I_s = Momento de inercia del labio rigidizador respecto de su eje baricéntrico paralelo al ala

$$I_s = (0,25 \times 1,5^3) / 12 = 0,0703125 \text{ cm}^4$$

I_a = Momento de inercia necesario del labio rigidizador

$$I_a = 399 t^4 \left[\frac{b/t}{S} - 0,328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{b/t}{S} + 5 \right] \quad (\text{Exp. B.4.2-10})$$

$$I_a = 399 \times 0,25^4 \left[\frac{50/2,5}{37,34} - 0,328 \right]^3 = 0,014 \text{ cm}^4 < 0,26 = 0,25^4 \left[115 \frac{50/2,5}{37,34} + 5 \right]$$

$$(R_l) = I_s / I_a = 0,0703125 / 0,014 = 5,04 > 1 \Rightarrow R_l = 1 \quad (\text{Exp. B.4.2-9})$$

$$(D/b) = 20/50 = 0,4 \quad 0,25 < (D/b) = 0,4 < 0,8$$

$$n = \left[0,582 - \frac{b/t}{4S} \right] \geq \frac{1}{3} \quad n = \left[0,582 - \frac{50/2,5}{4 \times 37,34} \right] = 0,448 > 0,333 \quad (\text{Exp. B.4.2-11})$$

luego de la Tabla **B.4-1** $k = \left(4,82 - \frac{5D}{b} \right) (R_t)^n + 0,43 \leq 4$

$$k = \left(4,82 - \frac{5 \times 20}{50} \right) (1)^{0,448} + 0,43 = 3,25 < 4$$

El ancho efectivo del ala se obtiene según el artículo **B.2.1** con $k = 3,25$

$$F_{cr} = 3,25 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{5} \right)^2 = 1468,7 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{235}{1468,7}} = 0,400 < 0,673 \Rightarrow b_e = b \text{ (ala totalmente efectiva)} \quad (\text{Ej 1-3})$$

De (Ej 1-2) resulta:

$$b_{e1} = (b_e / 2) \cdot (R_t) \quad (\text{ver Figura B.4-2}) \quad b_{e1} = (5/2) \times 1 = 2,5 \text{ cm} \quad (\text{Exp. B.4.2-5})$$

$$b_{e2} = b_e - b_{e1} \quad (\text{ver Figura B.4-2}) \quad b_{e2} = 5 - 2,5 = 2,5 \text{ cm} \quad (\text{Exp. B.4.2-6})$$

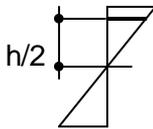
Para el labio rigidizador de (Ej 1-1) el ancho efectivo del labio $d'_s = 1,5 \text{ cm}$.

El ancho efectivo reducido del labio $d_s = d'_s (R_t) = 1,5 \times 1 = 1,5 \text{ cm}$ (Exp. B.4.2-7) (Ej 1-4)

- Elemento (4) (Elemento rigidizado con tensiones linealmente variables) (**Alma**) (artículo **B.2.3.(1)**)

Siendo flexión simple resulta $f_1 = f_2$ (Ver Figura **B.2-2**) $\psi = f_2 / f_1 = 1$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) = 4 + 2(1+1)^3 + 2(1+1) = 24 \quad (\text{Exp. B.2.3-2})$$



Siendo la tensión en la fibra extrema F_y , la tensión de compresión f_1 a $(h/2) = 7,5 \text{ cm}$ es:
 $f_1 = 235 (7,5 / 8) = 220,3 \text{ MPa}$.

$$F_{cr} = 24 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{15} \right)^2 = 1205,08 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{220,3}{1205,08}} = 0,428 < 0,673 \Rightarrow b_{ee} = h \text{ (alma totalmente efectiva)} \quad (\text{Ej 1-5})$$

siendo $(h_o/b_o) = 16/6 = 2,67 < 4$ resulta

$$b_{e1} = b_{ee} / (3 + \psi) = 15 / (3+1) = 3,75 \text{ cm} \quad (\text{Exp. B.2.3-3})$$

$$b_{e2} = b_{ee} / 2 = 15/2 = 7,5 \text{ cm} \quad \text{con } \psi = 1 > 0,236 \quad (\text{Exp. B.2.3-4})$$

Adicionalmente $b_{e1} + b_{e2} = 3,75 + 7,5 = 11,25 \text{ cm}$ debe *ser menor* que $(h/2) =$ porción comprimida del alma en base a la sección efectiva pues por (Ej 1-2), (Ej 1-3), (Ej 1-4) y (Ej 1-5)

la sección es totalmente efectiva

(3) DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL NECESARIOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE DISEÑO A FLEXIÓN

- Módulo resistente elástico de la sección efectiva S_{ex} .
Siendo toda la sección efectiva resulta igual al módulo resistente elástico de la sección bruta.

$$S_{ex} = S_x = 36,87 \text{ cm}^3$$

- Momento de inercia de la parte comprimida de la sección con respecto al eje baricéntrico paralelo al alma, utilizando la sección bruta

$$I_{yc} = I_y / 2 = 37,03 / 2 = 18,515 \text{ cm}^4$$

- Módulo de Torsión de Saint Venant de la sección transversal (de Manual AISI)

$$J = (t^3/3) [h + 2b + 2u + \alpha (2d + 2u)]$$

$$u = \text{longitud eje del pliegue} = \pi.R/2 = \pi \times 0,25/2 = 0,589 \text{ cm} \quad \text{Para Sección C: } \alpha = 1$$

$$J = (0,25^3/3)[15 + 2 \times 5 + 2 \times 0,589 + 1(2 \times 1,5 + 2 \times 0,589)] = 0,1581 \text{ cm}^4$$

- Módulo de alabeo de la sección transversal (de Manual AISI)

$$C_w = \frac{h_a^2 \cdot b_a^2 \cdot t}{12} \left[\frac{2h_a^3 b_a + 3h_a^2 b_a^2 + \alpha \left(48d_a^4 + 112b_a d_a^3 + 8h_a d_a^3 + 48h_a b_a d_a^2 + 12h_a^2 d_a^2 + 12h_a^2 b_a d_a + 6h_a^3 d_a \right)}{6h_{a2} b_a + (h_a + 2\alpha d_a)^3 - 24\alpha h_a d_a^2} \right]$$

$$\text{con } h_a = 15,75 \text{ cm} \quad b_a = 5,75 \text{ cm} \quad d_a = 1,875 \text{ cm} \quad \text{resulta } C_w = 1747,95 \text{ cm}^6$$

- Distancia entre el centro de corte y el centro de gravedad.

$$x_o = x_{cc} + x_G + t/2 = 2,76 + 1,61 + 0,25/2 = 4,495 \text{ cm}$$

- Radio de giro polar de la sección transversal respecto del centro del corte.

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} = \sqrt{6,23^2 + 2,21^2 + 4,495^2} = 7,994 \text{ cm} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-12})$$

(4) RESISTENCIA DE DISEÑO A FLEXIÓN

(a) Para viga lateralmente arriostrada en forma continua (artículo C.3.1.1)

Se determina la resistencia nominal sólo en base a la **iniciación de la fluencia (Procedimiento I)** pues suponemos que la viga no va a estar lateralmente arriostrada en forma continua (formará parte de una cubierta con arriostramientos discretos). Por ello al estar sometida a pandeo lateral no podrá considerarse la reserva de capacidad flexional inelástica (Procedimiento II)

De acuerdo a lo determinado en (3) **la sección es totalmente efectiva**. Siendo la sección transversal simétrica con respecto al eje de flexión en ambas fibras extremas (comprimida y traccionada se alcanza F_y).

$$M_n = S_e \cdot F_y \cdot (10)^3 \quad (\text{Exp. C.3.1.1-1})$$

$$M_n = 36,87 \times 235 \times 10^{-3} = \mathbf{8,66 \text{ kNm}}$$

Teniendo la sección transversal el ala comprimida rigidizada resulta $\phi_b = 0,95$

La resistencia de diseño resulta:

$$M_d = \phi_b \cdot M_n = 0,95 \times 8,66 = \mathbf{8,23 \text{ kNm}} \quad (\text{Ej 1-6})$$

(b) Resistencia al pandeo lateral torsional (artículo C.3.1.2.1)

Se aplican las directivas del artículo indicado pues el perfil se utilizará con arriostramientos discretos, flexando alrededor del eje fuerte y su ala traccionada no estará unida al revestimiento.

Para determinar la resistencia de diseño a pandeo lateral es necesario conocer la longitud lateralmente no arriostrada de la viga (L_b) tanto a desplazamiento lateral ($k_y L_y$) como a torsión ($k_t L_t$).

Para el ejemplo se supondrán 3 casos con igual condición de vínculo ($k_y = 1$; $k_t = 1$):

(1) $(k_y L_y) = (k_t L_t) = 4,50 \text{ m}$ (luz total de la viga; impedidos desplazamiento lateral y giro en apoyos).

(2) $(k_y L_y) = (k_t L_t) = 2,25 \text{ m}$ (arriostramiento en el centro del tramo).

(3) $(k_y L_y) = (k_t L_t) = 1,50 \text{ m}$ (arriostramiento a los tercios de la luz).

Se supondrá carga uniformemente repartida \Rightarrow diagrama de momento flector parabólico.

• **Determinación de la tensión crítica a pandeo lateral (F_c)**

- **Tensión crítica elástica a pandeo lateral (F_e) según el artículo C.3.1.2.1 (a)** (Sección de simetría simple; flexión alrededor del eje de simetría).

$$C_b = \frac{12,5 M_{m\acute{a}x}}{2,5 M_{m\acute{a}x} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-10})$$

En diagrama parabólico: $M_{m\acute{a}x} = 1$ $M_A = M_C = 0,75$ $M_B = 1$

$$C_b = \frac{12,5 \times 1}{2,5 \times 1 + 3 \times 0,75 + 4 \times 1 + 3 \times 0,75} = 1,136$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k_y \cdot L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(k_y \cdot L_y / 2,21)^2} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-8})$$

Resulta para $(k_y L_y) = 450 \text{ cm}$ $\sigma_{ey} = 47,61 \text{ MPa}$
 $(k_y L_y) = 225 \text{ cm}$ $\sigma_{ey} = 190,44 \text{ MPa}$
 $(k_y L_y) = 150 \text{ cm}$ $\sigma_{ey} = 428,48 \text{ MPa}$

$$\sigma_t = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \left[G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right] = \frac{1}{7,59 \times 7,994^2} \left[77200 \times 0,1581 + \frac{\pi^2 \times 200000 \times 1747,95}{(k_t \cdot L_t)^2} \right] \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-9})$$

Resulta para $(k_t L_t) = 450 \text{ cm}$ $\sigma_t = 60,29 \text{ MPa}$
 $(k_t L_t) = 225 \text{ cm}$ $\sigma_t = 165,98 \text{ MPa}$
 $(k_t L_t) = 150 \text{ cm}$ $\sigma_t = 341,32 \text{ MPa}$

$$F_e = \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = \frac{C_b \times 7,994 \times 7,59}{36,87} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-5})$$

S_f = Módulo elástico de la sección bruta respecto de la fibra comprimida $S_x = 36,87 \text{ cm}^3$

Resulta para

$$L_b = 450 \text{ cm} \quad F_e = 100,16 \text{ MPa} < 0,56 F_y \Rightarrow F_c = F_e = 100,16 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-4})$$

$$L_b = 225 \text{ cm} \quad F_e = 332,37 \text{ MPa} \quad 2,78 > F_e > 0,56 F_y \Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) =$$

$$= 209,83 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-3})$$

$$L_b = 150 \text{ cm} \quad F_e = 714,92 \text{ MPa} > 2,78 F_y \Rightarrow F_c = F_y = 235 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-2})$$

$$2,78 F_y = 2,78 \times 235 = 653,3 \text{ MPa} \quad 0,56 F_y = 0,56 \times 235 = 131,6 \text{ MPa}$$

La longitud lateralmente no arriostrada para que el pandeo lateral no sea crítico es de acuerdo con los (Comentarios al Capítulo C):

$$L_u = \left\{ \frac{G.J}{2C_1} + \left[\frac{C_2}{C_1} + \left(\frac{G.J}{2C_1} \right)^2 \right]^{0,5} \right\}^{0,5} = 157,18 \text{ cm} \quad (\text{C-C.3.1.2.1-11})$$

con:

$$C_1 = \frac{7,72}{A.E} \left[\frac{k_y \cdot F_y \cdot S_f}{C_b \cdot \pi \cdot r_y} \right]^2 = 6,1374 \quad (\text{C-C.3.1.2.1-12})$$

$$C_2 = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t)^2} = 345031500,3 \quad (\text{C-C.3.1.2.1-14})$$

- Tensión crítica elástica a pandeo lateral (F_e) según el artículo C.3.1.2.1 (b) (Sección C de simetría simple; flexión alrededor del eje baricéntrico perpendicular al alma)

$$F_e = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot d \cdot I_{yc}}{S_f (k_y \cdot L_y)^2} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \times 200000 \times 16 \times 18,515}{36,87 \times (k_y \cdot L_y)^2} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-14})$$

Resulta para

$$L_b = 450 \text{ cm} \quad F_e = 88,97 \text{ MPa} < 0,56 F_y \Rightarrow F_c = F_e = 88,97 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-4})$$

$$L_b = 225 \text{ cm} \quad F_e = 355,89 \text{ MPa} \quad 2,78 > F_e > 0,56 F_y \Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) = 213,22$$

MPa

(Exp. C.3.1.2.1-3)

$$L_b = 150 \text{ cm} \quad F_e = 800,75 \text{ MPa} > 2,78 F_y \Rightarrow F_c = F_y = 235 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-2})$$

$$2,78 F_y = 2,78 \times 235 = 653,3 \text{ MPa} \quad 0,56 F_y = 0,56 \times 235 = 131,6 \text{ MPa}.$$

La longitud lateralmente no arriostrada para que el pandeo lateral no sea crítico es de acuerdo a los (Comentarios al Capítulo C):

$$L_u = \left[\frac{0,36 C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot d \cdot I_{yc}}{F_y \cdot S_f} \right]^{0,5} = 166,13 \text{ cm} \quad (\text{C-C.3.1.2.1-15})$$

- **Determinación de la Resistencia de diseño a pandeo lateral torsional**

Según lo determinado en los puntos anteriores existen diferencias en la tensión crítica determinada según los artículos **C.3.1.2.1(a)** y **C.3.1.2.1(b)** tanto para pandeo en zona elástica como inelástica y en la longitud lateralmente no arriostrada límite L_u . Estas diferencias están en el orden del $\pm 10\%$.

El procedimiento simplificado indicado en el artículo **C.3.1.2.1(b)** es operativamente más simple y resulta conservador para zona elástica.

Adoptando los valores de F_c obtenidos del artículo **C.3.1.2.1(b)** resultan las siguientes resistencias de diseño:

$$M_n = S_c \cdot F_c \cdot (10)^3 \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-1})$$

$$\phi_b = 0,90$$

$S_c = S_x$ por ser la **sección totalmente efectiva**

Para $L_b = 450 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 36,87 \times 88,97 \times (10)^3 = \underline{2,95 \text{ kNm}}$ **(Ej 1-7)**

Para $L_b = 225 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 36,87 \times 213,22 \times (10)^3 = \underline{7,07 \text{ kNm}}$ **(Ej 1-8)**

Para $L_b = 150 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 36,87 \times 235 \times (10)^3 = \underline{7,80 \text{ kNm}}$ **(Ej 1-9)**

De la comparación del (Ej 1-6), (Ej 1-7), (Ej 1-8) y (Ej 1-9) se observa la influencia que el arriostramiento a pandeo lateral tiene en la Resistencia de diseño a flexión de los perfiles C.

(5) RESISTENCIA DE DISEÑO AL CORTE (artículo **C.3.2.1**)

$$h/t = 150/2,5 = 60 < 67,41 = \sqrt{200000 \times 5,34 / 235} = \sqrt{E \cdot k_v / F_y} \quad (\text{alma no rigidizada})$$

$$k_v = 5,34$$

Resulta $F_v = 0,60 F_y = 0,6 \times 235 = 141 \text{ MPa}$ **(Exp. C.3.2.1-2)**

$$V_n = A_w \cdot F_v \cdot (10)^1 = h \cdot t \cdot F_v \cdot (10)^1 = 15 \times 0,25 \times 141 \times 10^1 = 52,87 \text{ kN} \quad (\text{Exp. C.3.2.1-1})$$

La resistencia de diseño al corte V_d es: $V_d = \phi_v \cdot V_n \quad \phi_v = 0,95$

$$V_d = 0,95 \times 52,87 = 50,23 \text{ kN} \quad \text{Ej 1-10}$$

(6) RESISTENCIA DE DISEÑO A PANDEO LOCALIZADO DEL ALMA (artículo **C.3.4.1**)
(Cargas concentradas)

$$P_n = C \cdot t^2 \cdot F_y \cdot \text{sen } \theta \cdot \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \cdot (10)^1 \quad (\text{Exp. C.3.4.1-1})$$

Corresponde a la utilización de la Tabla **C.3-3** (Secciones **C** de alma simple).

- Para **Reacción de apoyo**

- Reacción sobre un ala.
Suponemos una longitud de apoyo $N = 4 \text{ cm} > 2 \text{ cm}$ (verifica)
- Distancia desde borde de apoyo y extremo de la barra $< 1,5 h = 22,5 \text{ cm} \Rightarrow$ Carga extrema.
Se supone el ala unida al apoyo

Verificación de las condiciones de aplicación de la Tabla:

$$\theta = 90^\circ ; (h/t) = 60 < 200 ; (N/t) = 4/0,25 = 16 < 210 ; (N/h) = 4/15 = 0,27 < 2 \quad (\text{verifica})$$

Para ala rigidizada y unida al apoyo y carga extrema sobre un ala, resultan de la Tabla:

$$C = 4 \quad C_R = 0,14 \quad C_N = 0,35 \quad C_h = 0,02 \quad \phi_w = 0,85 \quad R/t = 1 < 9$$

$$P_n = 4 \times 0,25^2 \times 235 \times \text{sen } 90 \left(1 - 0,14 \sqrt{\frac{0,25}{0,25}} \right) \left(1 + 0,35 \sqrt{\frac{4}{0,25}} \right) \left(1 - 0,02 \sqrt{\frac{15}{0,25}} \right) \times (10)^{-1}$$

$$P_n = 10,25 \text{ kN}$$

$$\text{La resistencia de diseño } P_d = \phi_w \cdot P_n = 0,85 \times 10,25 = \underline{8,71 \text{ kN}} \quad (\text{Ej 1-11})$$

- Para **Carga concentrada en el tramo**

Suponemos la carga actuando a una distancia del apoyo de 30 cm

$$\text{Suponemos una longitud de carga } N = 5 \text{ cm} > 2 \text{ cm} \quad (\text{verifica})$$

Distancia desde borde de apoyo y extremo de la barra $> 1,5 h = 22,5 \text{ cm} \Rightarrow$ Carga interna.

Se supone el ala unida al apoyo.

Verificación condiciones de aplicación de la Tabla:

$$\theta = 90^\circ ; (h/t) = 60 < 200 ; (N/t) = 5/0,25 = 20 < 210 ; (N/h) = 5/15 = 0,33 < 2 \quad (\text{verifica})$$

Para ala rigidizada y unida al apoyo y carga interna sobre un ala resultan de la Tabla:

$$C = 13 \quad C_R = 0,23 \quad C_N = 0,14 \quad C_h = 0,01 \quad \phi_w = 0,90 \quad R/t = 1 < 5$$

$$P_n = 13 \times 0,25^2 \times 235 \times \text{sen } 90 \left(1 - 0,23 \sqrt{\frac{0,25}{0,25}} \right) \left(1 + 0,14 \sqrt{\frac{5}{0,25}} \right) \left(1 - 0,01 \sqrt{\frac{15}{0,25}} \right) \times (10)^{-1}$$

$$P_n = 22,05 \text{ kN}$$

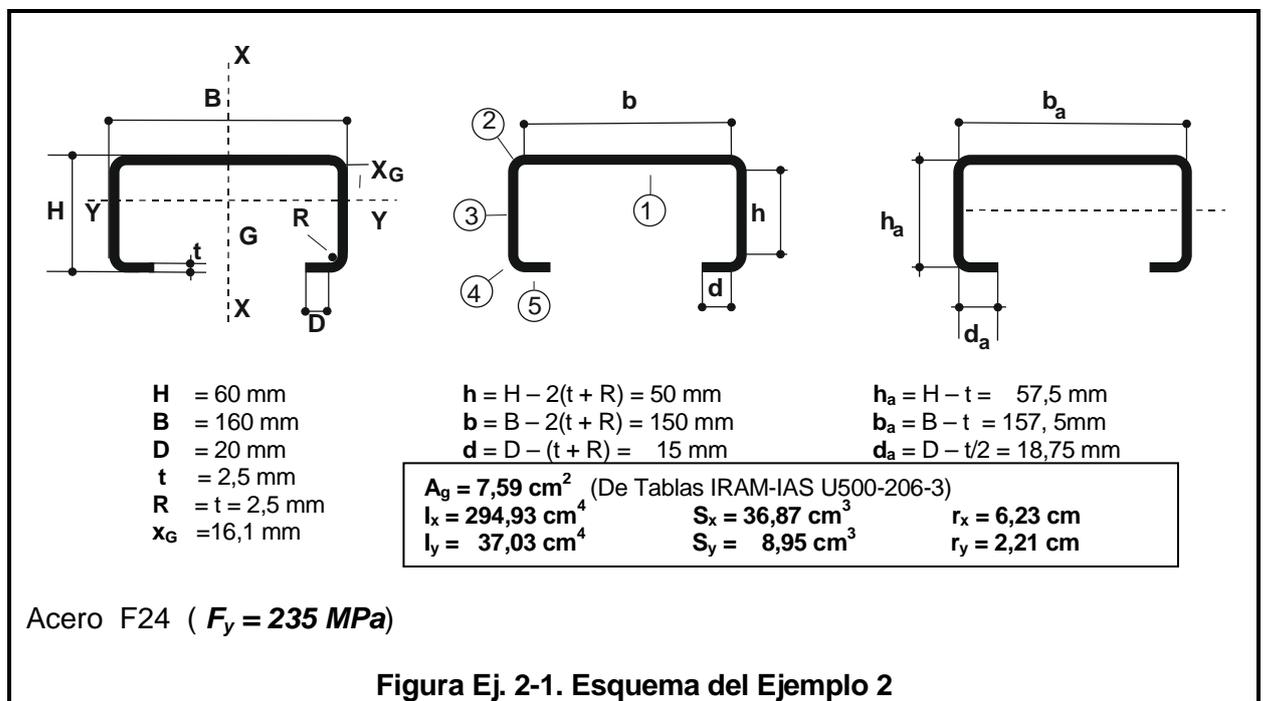
$$\text{La resistencia de diseño } P_d = \phi_w \cdot P_n = 0,85 \times 22,05 = \underline{18,74 \text{ kN}} \quad (\text{Ej 1-12})$$

EJEMPLO N°2

PERFIL C

Resistencia de diseño a flexión y a corte.
Resistencia de diseño a carga concentrada.
Flexión alrededor del eje débil (*y-y*).

PC 160 x 60 x 20 x 2,5 según IRAM-IAS U500-206-3 :2006.



(1) VERIFICACIÓN RELACIONES DE ESBELTEZ

- relaciones máximas entre ancho plano y espesor de elementos comprimidos (artículo **B.1.1.(a)**)

Ala $b/t = 150/2,5 = 60 < 500$ (elemento comp. rigidizado con ambos bordes laterales vinculados a otros elementos rigidizados) **OK**

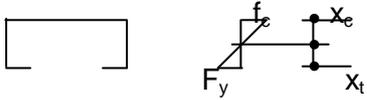
- máxima relación entre altura del alma y su espesor (artículo **B.1.2**)

$h/t = 50/2,5 = 20 < 200$ (almas no rigidizadas) **OK**

(2) DETERMINACIÓN DE ANCHOS EFECTIVOS DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS PARA RESISTENCIA

- Elementos (2) (4) (5) **totalmente efectivos** por ser pliegue o estar traccionados (Ej 2-1).
- Elemento (3) se supone **totalmente efectivo** y se verificará después.
- Elemento (1) (Elemento rigidizado uniformemente comprimido) (artículo B.2.1.(a)).

(a) Con inicio de la fluencia en ala traccionada



MPa

$$x_c = x_G + t = 16,1 + 2,5 = 18,6 \text{ mm} = 1,86 \text{ cm}$$

$$x_t = H - x_c = 60 - 18,6 = 41,4 \text{ mm} = 4,14 \text{ cm}$$

$$f_c = (x_c / x_t) \cdot F_y = (1,86 / 4,14) \times 235 = 105,58$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 4 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{15} \right)^2 = 200,9 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. B.2.1-5})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{105,58}{200,9}} = 0,725 \quad (\text{Exp. B.2.1-4})$$

siendo:

$$\lambda = 0,725 > 0,673 \Rightarrow b_e < b \text{ elemento parcialmente efectivo}$$

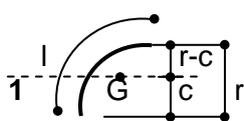
$$\rho = (1 - 0,22 / \lambda) / \lambda = (1 - 0,22 / 0,725) / 0,725 = 0,96 \quad (\text{Exp. B.2.1-3})$$

$$b_e = \rho \cdot b = 0,96 \times 15 = 14,41 \text{ cm} < b$$

- Nueva posición del centro de gravedad de la **sección efectiva**.

Se utiliza el método de la línea media (método lineal).

Para los pliegues (Elementos (2) y (4))



$$I = (\pi/2) \cdot r \quad c = 0,637 r \quad I_1 = 0,149 r^3$$

$$r = R + t/2 = 2,5 + 2,5/2 = 3,75 \text{ mm}$$

$$I = 5,89 \text{ mm} = 0,589 \text{ cm} \quad c = 2,39 \text{ mm} = 0,239 \text{ cm}$$

$$r - c = 1,36 \text{ mm} = 0,136 \text{ cm}$$

CUADRO 1

Elementos	Longitud (l)	Distancia a fibra superior (x)	l.x	l.x ²
	mm	mm	mm ²	mm ³
1	144,1	2,5/2 = 1,25	180,125	
2	2x5,89	1,36+2,5/2=2,61	30,746	
3	2x50	50/2+2,5+2,5=30	3000,000	
4	2x5,89	2,39+50+2,5+2,5=57,39	676,054	
5	2x15	60-2,5/2=58,75	1762,500	
Sumatoria	297,66		5649,425	

Distancia del centro de gravedad a la fibra extrema $x_c = 5649,425/297,66 = 18,98 \text{ mm} = 1,898 \text{ cm}$.

Tensión fibra extrema comprimida $f_c = (x_c / x_i) \cdot F_y = (1,898 / 6 - 1,898) \times 235 = 108,73 \text{ MPa}$.

Resulta $f_c = 108,73 \text{ MPa} > 105,58 \text{ MPa}$ *supuesto*.

Se debe realizar un nuevo tanteo.

Se adopta una tensión de compresión algo mayor $f_c = 109 \text{ MPa}$.

El ancho efectivo resulta:

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{109}{200,9}} = 0,7366 \quad (\text{Exp. B.2.1-4})$$

siendo:

$$\begin{aligned} \lambda = 0,7366 > 0,673 &\Rightarrow b_e < b \text{ elemento parcialmente efectivo} \\ \rho = (1 - 0,22 / \lambda) / \lambda &= (1 - 0,22/0,7366) / 0,7366 = 0,952 \quad (\text{Exp. B.2.1-3}) \\ b_e = \rho \cdot b = 0,952 \times 15 &= 14,28 \text{ cm} < b \quad (\text{Ej 2-2}) \end{aligned}$$

- Nueva posición del centro de gravedad de la **sección efectiva**

CUADRO 2

Elementos	Longitud (l)	Distancia a fibra superior (x)	l.x	l.x ²
	mm	mm	mm ²	mm ³
1	142,8	2,5/2 = 1,25	178,5	223,125
2	2x5,89	1,36+2,5/2=2,61	30,746	80,247
3	2x50	50/2+2,5+2,5=30	3000,00	90000,00
4	2x5,89	2,39+50+2,5+2,5=57,39	676,054	38798,74
5	2x15	60-2,5/2=58,75	1762,5	103546,875
Sumatoria	296,36		5647,80	232648,987

Distancia del centro de gravedad a la fibra extrema $x_c = 5647,80/296,36 = 19,06 \text{ mm} = 1,906 \text{ cm}$.

Tensión fibra extrema comprimida $f_c = (x_c / x_i) \cdot F_y = (1,906 / 6 - 1,906) \times 235 = 109,3 \text{ MPa}$.

Resulta $f_c = 109,3 \text{ MPa} \cong 109 \text{ MPa}$ (*supuesto*).

Luego **con inicio de la fluencia en el ala traccionada resulta** para el elemento ①

$$b_e = 14,28 \text{ cm} \quad f_c = 109,3 \text{ MPa} \quad \text{(Ej 2-3)}$$

(b) Con tensión de fluencia en fibra extrema del ala comprimida.

$$f = F_y = 235 \text{ MPa} \quad F_{cr} = 4 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{15} \right)^2 = 200,9 \text{ MPa} \quad \text{(Exp. B.2.1-5)}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{235}{200,9}} = 1,082 \quad \text{(Exp. B.2.1-4)}$$

siendo

$$\begin{aligned} \lambda = 1,082 > 0,673 &\Rightarrow b_e < b \text{ elemento parcialmente efectivo} \\ \rho = (1 - 0,22/\lambda)/\lambda &= (1 - 0,22/1,082)/1,082 = 0,737 \quad \text{(Exp. B.2.1-3)} \\ b_e = \rho \cdot b &= 0,737 \times 15 = 11,05 \text{ cm} < b \end{aligned}$$

Luego **para tensión de fluencia en fibra extrema del ala comprimida resulta** para el elemento ①:

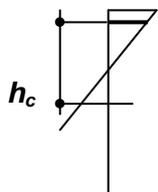
$$b_e = 11,05 \text{ cm} \quad \text{(Ej 2-4)}$$

- Elemento ③ (Elemento rigidizado con tensiones linealmente variables) (*Alma*) (artículo B.2.3.(1))

Se verifica la hipótesis realizada de alma totalmente efectiva con las tensiones determinadas para la situación de **inicio de la fluencia en ala traccionada**.

Las tensiones extremas del alma resultan. (Ver la Figura B.2-2)

Con $f_c = 109,3 \quad f_t = 235 \text{ MPa}$



Siendo la tensión en la fibra extrema, F_y , la tensión de compresión

$$f_1 a (19,06 - 2,5 \times 2) = 14,6 \text{ mm es: } f_1 = 109,3 (14,6 / 19,6) = 79,75 \text{ MPa}$$

$$f_2 a (60 - 19,06 - 2,5 \times 2) = 35,94 \text{ mm es: } f_2 = 235 (35,94 / 40,94) = 206,3 \text{ MPa}$$

$$\psi = f_2 / f_1 = 206,3 / 79,75 = 2,59$$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi) = 4 + 2(1 + 2,59)^3 + 2(1 + 2,59) = 103,7 \quad \text{(Exp. B.2.3-2)}$$

$$F_{cr} = 103,7 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{5} \right)^2 = 46862 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{79,75}{46862}} = 0,041 < 0,673 \Rightarrow b_{ee} = h \text{ (alma totalmente efectiva)} \quad (\text{Ej 2-5})$$

siendo

$$(h_o/b_o) = 6/16 = 0,375 < 4$$

Resulta

$$b_{e1} = b_{ee} / (3 + \psi) = 5 / (3 + 2,59) = 0,89 \text{ cm} \quad (\text{Exp. B.2.3-3})$$

$$b_{e2} = b_{ee} / 2 = 5/2 = 2,5 \text{ cm} \quad \text{con } \psi = 2,59 > 0,236 \quad (\text{Exp. B.2.3-4})$$

Adicionalmente $b_{e1} + b_{e2} = 0,89 + 2,5 = 3,39 \text{ cm} > h_c = 1,46 \text{ cm} =$ porción comprimida del alma en base a la sección efectiva

Luego: **el alma es totalmente efectiva.**

(3) DETERMINACIÓN DEL MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN EFECTIVA PARA INICIO DE LA FLUENCIA EN ALA TRACCIONADA (I_{yG})

Se desprecian los momentos de inercia propios de los elementos 1, 2, 4 y 5.

De CUADRO 2	
$\Sigma I . x^2 . t = 232648,987 \times 2,5$	581.622,47 mm ⁴
Momento de Inercia de elemento (3) respecto de su eje baricéntrico $2 \times (50)^3 \times 2,5 / 12$	<u>52.083,33 mm⁴</u>
Momento de Inercia de la sección efectiva respecto a fibra superior I_{ys}	633.705,80 mm ⁴

Sección efectiva $A_e = \Sigma I . t$

Distancia del centro de gravedad a la fibra comprimida $x_c = x_{G1} = 19,06 \text{ mm} = 1,906 \text{ cm}$

Momento de Inercia de la sección efectiva respecto de su eje baricéntrico (Por Steiner)

$$I_{yG} = I_{ys} - A_e \cdot x_{G1}^2 = 633.705,8 - (296,36 \times 2,5) \times 19,06^2 = 364.549 \text{ mm}^4 = 36,455 \text{ cm}^4 \quad (\text{Ej 2-6})$$

(4) RESISTENCIA NOMINAL A FLEXIÓN

(4 A) Procedimiento I. En base a la iniciación de la fluencia. (artículo C.3.1.1(a))

Se inicia la fluencia en la fibra extrema traccionada.

El módulo resistente elástico de la sección efectiva con respecto a la fibra traccionada es:

$$S_{eyt} = I_{yG} / x_t = 36,45 / (6 - 1,906) = 8,904 \text{ cm}^3$$

$$M_n = S_{eyt} \cdot F_y \cdot (10)^3 \quad (\text{Exp. C.3.1.1-1})$$

Luego por Procedimiento I $M_n = 8,904 \times 235 \times 10^{-3} = 2,09 \text{ kNm}$ (Ej 2-7)

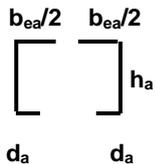
(4 B) Procedimiento II. En base a la reserva de capacidad flexional inelástica. (artículo C.3.1.1(b))

Se puede utilizar el **Procedimiento II** por las siguientes razones:

- (1) La barra **no** está solicitada a **torsión** ni a **pandeo lateral** (flexión alrededor del eje **débil**).
- (2) No se incluye el efecto de conformación en frío en el límite de fluencia F_y (Se adoptó el de la chapa base).
- (3) Se verificará que la relación entre la altura de la parte comprimida del alma y su espesor es menor o igual a λ_1 .
- (4) Se supone que el esfuerzo de corte requerido de la barra $V_u \leq 0,60 F_y \cdot (\Sigma h \cdot t) \cdot 10^1$.
- (5) El ángulo entre las almas y la vertical es $0^\circ < 30^\circ$.

Para simplificar el análisis se supone la sección transversal como lineal con las esquinas cuadradas. Se considera para el ala comprimida el **ancho efectivo** determinado para la tensión de fluencia F_y (Ej 2-4) $b_e = 11,05 \text{ cm}$.

La sección considerada es:



$$b_{ea} = B - t - (b - b_e) = 16 - 0,25 - (15 - 11,05) = 11,8 \text{ cm}$$

$$h_a = 5,75 \text{ cm} \quad d_a = 1,875 \text{ cm}$$

Determinación de la deformación específica máxima:

$$\lambda_2 = 1,28 / \sqrt{F_y / E} = 1,28 / \sqrt{235 / 200000} = 37,34$$

$$b/t = 15/0,25 = 60 > 37,34 \Rightarrow C_y = 1 \Rightarrow \text{deformación específica fibra superior} = \epsilon_y$$

La sección efectiva y los diagramas de deformaciones y tensiones se indican en la Figura Ej 2-2:

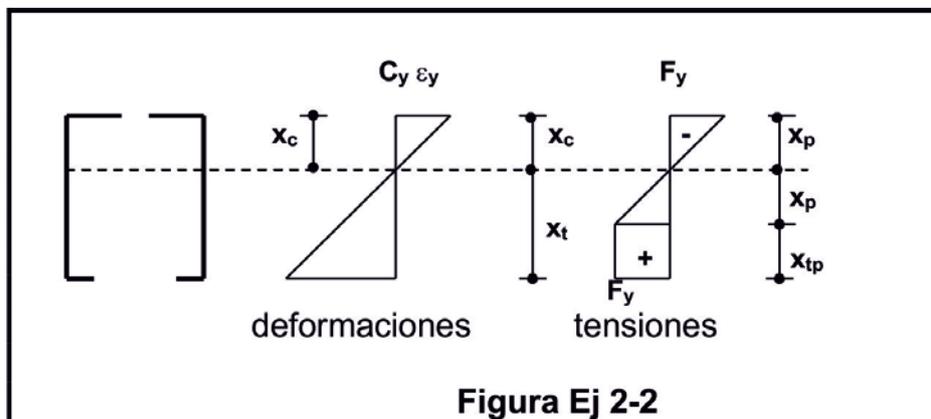


Figura Ej 2-2

Igualando las áreas de tensiones de tracción y de compresión resulta:

$$x_c = (2 d_a - b_{ea} + 2 h_a) / 4 = (2 \times 1,875 - 11,8 + 2 \times 5,75) / 2 = 0,8625 \text{ cm}$$

$$x_t = h_a - x_c = 5,75 - 0,8625 = 4,8875 \text{ cm}$$

$$x_p = x_c / (C_y \cdot \varepsilon_y / \varepsilon_y) = x_c / (1 \cdot \varepsilon_y / \varepsilon_y) = x_c = 0,8625 \text{ cm}$$

$$x_{cp} = 0 \quad x_{tp} = x_t - x_p = 4,8875 - 0,8625 = 4,025 \text{ cm}$$

Se debe verificar que la relación entre la altura de la parte comprimida del alma y su espesor es menor o igual a λ_1 .

$$x_c / t = 0,8625 / 0,25 = 3,45 < \lambda_1 = 1,11 / \sqrt{F_y / E} = 1,11 / \sqrt{235 / 200000} = 32,38 \quad (\text{verifica})$$

El momento nominal resulta:

$$M_n = F_y \cdot t [b_{ea} \cdot x_c + 2x_{cp} (x_p + x_{cp}/2) + 4/3 x_p^2 + 2 x_{tp} (x_p + x_{tp}/2) + 2 d_a \cdot x_t] =$$

$$M_n = 235 \times 0,25 \times (10) [11,8 \times 0,8625 + 2 \times 0(0,8625 + 0/2) + 4/3 \times 0,8625^2 + 2 \times 4,025(0,8625 + 4,025/2) + 2 \times 1,875 \times 4,8875] = 3,093 \text{ kNm.}$$

Resulta M_n (Procedimiento II) = **3,093 kNm** > **2,613 kNm** = 1,25 x 2,09 (Procedimiento I).

Luego se debe adoptar *por Procedimiento II* $M_n = 2,613 \text{ kNm}$ (Ej 2-8)

(5) RESISTENCIA DE DISEÑO A FLEXIÓN

De la comparación de la (Ej 2-7) y (Ej 2-8) la mayor resistencia nominal a flexión resulta del Procedimiento II.

$$M_n = 2,613 \text{ kNm}$$

Siendo la sección con el ala comprimida rigidizada el factor de resistencia es $\phi_b = 0,95$

La resistencia de diseño $M_d = \phi_b M_n = 0,95 \times 2,613 = 2,482 \text{ kNm}$ (Ej 2-9)

(6) RESISTENCIA DE DISEÑO AL CORTE (artículo C.3.2.1)

$$h/t = 50/2,5 = 20 < 67,41 = \sqrt{200000 \times 5,34 / 235} = \sqrt{E \cdot k_v / F_y} \quad (\text{alma no rigidizada})$$

$$k_v = 5,34$$

Resulta $F_v = 0,60 F_y = 0,6 \times 235 = 141 \text{ MPa}$ (Exp. C.3.2.1-2)

$$V_n = A_w \cdot F_v \cdot (10)^{-1} = 2 h \cdot t \cdot F_v \cdot (10)^{-1} = 2 \times 5 \times 0,25 \times 141 \times 10^{-1} = 35,25 \text{ kN}$$
 (Exp. C.3.2.1-1)

La resistencia de diseño al corte V_d es: $V_d = \phi_v \cdot V_n \quad \phi_v = 0,95$

$$V_d = 0,95 \times 35,25 = 33,49 \text{ kN} \quad (\text{Ej 2-10})$$

(6) RESISTENCIA DE DISEÑO A PANDEO LOCALIZADO DEL ALMA (artículo **C.3.4.1**)
(Cargas concentradas)

La resistencia nominal **para un alma** es:

$$P_n = C \cdot t^2 \cdot F_y \cdot \text{sen } \theta \cdot \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \cdot (10)^{-1} \quad (\text{Exp. C.3.4.1-1})$$

Corresponde utilización de la Tabla **C.3-5** (Secciones Galera; alma doble)

- Para **reacción de apoyo**:

Reacción sobre un ala.

Suponemos una longitud de apoyo $N = 4 \text{ cm} > 2 \text{ cm}$ (verifica).

Distancia desde el borde de apoyo y extremo de la barra $< 1,5 h = 7,5 \text{ cm} \Rightarrow$ Carga extrema.

Se supone el ala unida al apoyo.

Verificación de las condiciones de aplicación de la Tabla:

$\theta = 90^\circ$; $(h/t) = 20 < 200$; $(N/t) = 4/0,25 = 16 < 210$; $(N/h) = 4/5 = 0,8 < 2$ (verifica).

Para ala unida al apoyo y carga extrema sobre un ala resultan de la Tabla

$C = 4$ $C_R = 0,25$ $C_N = 0,68$ $C_h = 0,04$ $\phi_w = 0,75$ $R/t = 1 < 5$

$$P_n = 4 \times 0,25^2 \times 235 \times \text{sen } 90 \left(1 - 0,25 \sqrt{\frac{0,25}{0,25}} \right) \left(1 + 0,68 \sqrt{\frac{4}{0,25}} \right) \left(1 - 0,04 \sqrt{\frac{5}{0,25}} \right) \times (10)^{-1}$$

$P_{n1} = 13,46 \text{ kN}$ (Para un alma).

Para las dos almas $P_n = 2 \times 13,46 = 26,92 \text{ kN}$.

La resistencia de diseño $P_d = \phi_w \cdot P_n = 0,75 \times 26,92 = \underline{20,19 \text{ kN}}$ (Ej 2-11)

- Para **carga concentrada en el tramo**

Suponemos la carga actuando a una distancia del apoyo de 30cm.

Suponemos una longitud de carga $N = 5 \text{ cm} > 2 \text{ cm}$ (verifica).

Distancia desde borde de apoyo y extremo de la barra $> 1,5 h = 7,5 \text{ cm} \Rightarrow$ Carga interna.

Se supone el ala unida al apoyo.

Verificación condiciones de aplicación de la Tabla:

$$\theta = 90^\circ ; (h/t) = 20 < 200 ; (N/t) = 4/0,25 = 16 < 210 ; (N/h) = 5/5 = 1 < 2 \quad (\text{verifica}).$$

Para ala unida al apoyo y carga interna sobre un ala resultan de la Tabla:

$$C = 17 \quad C_R = 0,13 \quad C_N = 0,13 \quad C_h = 0,04 \quad \phi_w = 0,80 \quad R/t = 1 < 10$$

$$P_n = 17 \times 0,25^2 \times 235 \times \sin 90 \left(1 - 0,13 \sqrt{\frac{0,25}{0,25}} \right) \left(1 + 0,13 \sqrt{\frac{5}{0,25}} \right) \left(1 - 0,04 \sqrt{\frac{5}{0,25}} \right) \times (10)^{-1}$$

$$P_{n1} = 28,21 \text{ kN (Para un alma)}$$

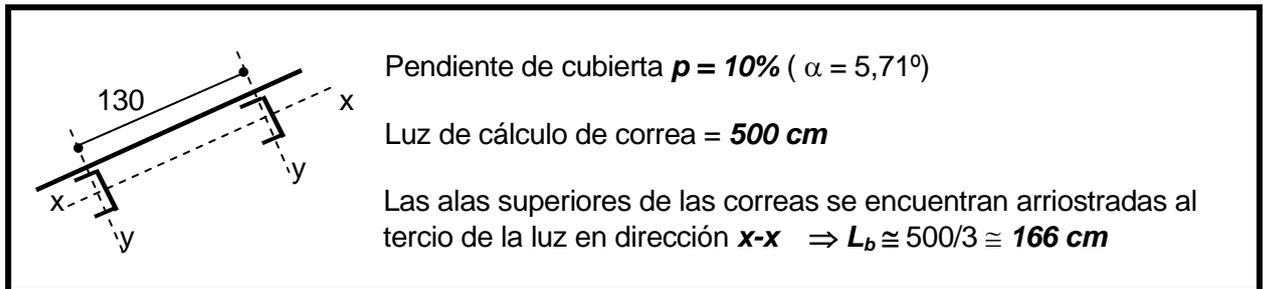
$$\text{Para las dos almas } P_n = 2 \times 28,21 = 56,42 \text{ kN kN}$$

$$\text{La resistencia de dise\u00f1o } P_d = \phi_w \cdot P_n = 0,80 \times 56,42 = \underline{45,13 \text{ kN}} \quad (\text{Ej 2-12})$$

EJEMPLO N°3

PERFIL C como correa de cubierta sometido a flexión disimétrica.

PC 160x60x20x2,5 según IRAM-IAS U500-206-3 :2006.



(1) ACCIONES GRAVITATORIAS

- Peso chapa y elementos de fijación = $0,09 \text{ kN/m}^2$.
- Peso propio correa = $0,06 \text{ kN/m}$.
- Sobrecarga útil (de Reglamento CIRSOC 101-2005) para pendiente $p = 10\%$ y área tributaria $< 20 \text{ m}^2$.
 $L_r = 0,95 \text{ kN/m}^2$ (de proyección horizontal).
- Carga concentrada de montaje (del Reglamento CIRSOC 101/2005) $P_{Lr} = 1 \text{ kN}$.

(2) CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA SOBRE CORREA

$$\begin{aligned} D \quad \text{Chapa y elementos de fijación: } 1,30 \times 0,09 &= \mathbf{0,12 \text{ kN/m}} \\ \text{Peso propio} &= \mathbf{0,06 \text{ kN/m}} \\ D &= \mathbf{0,18 \text{ kN/m}} \\ L_r \quad 0,95 \times 1,30 \times \cos 5,71^\circ &= \mathbf{1,229 \text{ kN/m}} \end{aligned}$$

(3) SOLICITACIONES REQUERIDAS

(a) En mantenimiento

$$q_u = 1,2 D + 1,6 L_r = 1,2 \times 0,18 + 1,6 \times 1,229 = 2,182 \text{ kN/m.}$$

$$q_{ux} = q_u \cdot \cos 5,71^\circ = 2,182 \times \cos 5,71^\circ = 2,171 \text{ kN/m.}$$

$$q_{uy} = q_u \cdot \sin 5,71^\circ = 2,182 \times \sin 5,71^\circ = 0,217 \text{ kN/m.}$$

$$M_{ux} = q_{ux} \cdot L^2/8 = 2,171 \times 5^2/8 = \mathbf{6,785 \text{ kNm}}$$

$$M_{uy} \cong q_{uy} \cdot (L/3)^2/8 = 0,217 \times (5/3)^2/8 = \mathbf{0,075 \text{ kNm.}}$$

$$V_{ux} = q_{ux} \cdot L/2 = 2,171 \times 5/2 = \mathbf{5,43 \text{ kN}}$$

$$V_{uy} \cong q_{ux} \cdot (L/3)/2 = 0,217 \times (5/3)/2 = \mathbf{0,181 \text{ kN.}}$$

(b) En montaje

$$q_u = 1,2 D = 1,2 \times 0,18 = 0,216 \text{ kN/m}$$

$$q_{ux} = q_u \cdot \cos 5,71^\circ = 0,216 \times \cos 5,71^\circ = 0,215 \text{ kN/m}$$

$$q_{uy} = q_u \cdot \sin 5,71^\circ = 0,216 \times \sin 5,71^\circ = 0,021 \text{ kN/m}$$

$$P_{Lru} = 1,6 \cdot P_{Lr} = 1,6 \times 1 = 1,6 \text{ kN}$$

$$P_{Lrux} = P_{Lru} \cdot \cos 5,71^\circ = 1,6 \times \cos 5,71^\circ = 1,592 \text{ kN}$$

$$P_{Lruy} = P_{Lru} \cdot \sin 5,71^\circ = 1,6 \times \sin 5,71^\circ = \mathbf{0,159 \text{ kN}}$$

$$M_{ux} = q_{ux} \cdot L^2/8 + P_{Lrux} \cdot L/4 = \mathbf{2,662 \text{ kNm}}$$

$$M_{uy} \cong q_{uy} \cdot (L/3)^2/8 + P_{Lruy} \cdot (L/3)/4 = \mathbf{0,074 \text{ kNm}}$$

$$V_{ux} = q_{ux} \cdot L/2 + P_{Lrux} = \mathbf{2,13 \text{ kN}}$$

$$V_{uy} \cong q_{uy} \cdot (L/3)/2 + P_{Lruy} = \mathbf{0,177 \text{ kN}}$$

Resulta crítico el estado (a) con sobrecarga de mantenimiento

(4) VERIFICACIÓN A FLEXIÓN DISIMÉTRICA (artículo C.5)

Corresponde aplicación de la expresión (C.5.2.1-1) con $P_u = 0$

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1,00 \quad \text{con } P_u = 0 \quad (\text{Exp. C.5.2.1-1})$$

La resistencia de diseño $\phi_b M_{nx}$ se puede obtener del Ejemplo N° 1 (expresión **(Ej 1-9)**) pues la longitud lateralmente arriostrada, $L_b = \mathbf{166 \text{ cm}}$, es prácticamente igual a la longitud lateralmente no arriostrada límite para que el pandeo lateral no sea crítico, ($L_u = \mathbf{166,13 \text{ cm}}$, Ejemplo N° 1, página 7):

$$\phi_b M_{nx} = \mathbf{7,80 \text{ kNm}}$$

La resistencia de diseño $\phi_b M_{ny}$ se puede obtener del Ejemplo N° 2 (expresión **(Ej 2-9)**)

$$\phi_b M_{ny} = \mathbf{2,482 \text{ kNm}}$$

Las resistencias requeridas son $M_{ux} = 6,785 \text{ kNm}$ $M_{uy} = 0,075 \text{ kNm}$

$$\frac{6,785}{7,80} + \frac{0,075}{2,482} = 0,90 < 1,0 \quad \text{(Verifica)}$$

(5) VERIFICACIÓN A CORTE (artículo C.3.2)

Se verifica el esfuerzo de corte $V_{ux} = 5,43 \text{ kN}$.

De Ejemplo N° 1 (expresión (Ej 1-10)) la resistencia de diseño a corte del perfil para flexión alrededor de $x-x$ es:

$$V_{dx} = 50,23 \text{ kN} > 5,43 \text{ kN} = V_{ux} \quad \text{(Verifica).}$$

Se verifica el esfuerzo de corte $V_{uy} = 0,181 \text{ kN}$.

De Ejemplo N° 2 (expresión (Ej 2-10)) la resistencia de diseño a corte del perfil para flexión alrededor de $y-y$ es:

$$V_{dy} = 33,49 \text{ kN} > 0,181 \text{ kN} = V_{uy} \quad \text{(Verifica).}$$

(6) VERIFICACIÓN A FLEXIÓN Y CORTE COMBINADOS (artículo C.3.3)

Se verifica para la flexión alrededor de $x-x$ (alma paralela a $y-y$) para el Estado (a):

Siendo la correa una viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida las solicitaciones máximas a flexión y a corte no ocurren en la misma sección. Se verifica en la sección transversal ubicada al cuarto de la luz.

$$M_{ux1} = 0,75 M_{ux} = 0,75 \times 6,785 = 5,09 \text{ kNm}$$

$$V_{ux1} = 0,5 V_{ux} = 0,5 \times 5,43 = 2,715 \text{ kN}$$

Como se trata de *alma no rigidizada* se debe verificar:

$$\left(\frac{M_u}{\phi_b M_{nxo}} \right)^2 + \left(\frac{V_u}{\phi_v V_n} \right)^2 \leq 1 \quad \text{(Exp. C.3.3-1)}$$

$$\left(\frac{5,09}{7,80} \right)^2 + \left(\frac{2,715}{50,23} \right)^2 = 0,43 < 1 \quad \text{(Verifica)}$$

(7) VERIFICACIÓN A PANDEO LOCALIZADO DEL ALMA (artículo C.3.4)

Se verifica para la flexión alrededor de $x-x$ (alma paralela a $y-y$) para el Estado (a):

Reacción de apoyo.

$$R_{ux} = V_{ux} = 5,43 \text{ kN} < 8,71 \text{ kN} = P_d \text{ (De (Ej 1-11), Ejemplo N}^\circ \text{ 1) (Verifica)}$$

(8) VERIFICACIÓN A FLEXIÓN Y PANDEO LOCALIZADO DEL ALMA COMBINADOS
(artículo **C.3.5**)

Para el estado de carga **(a)** en la sección de apoyo el momento flector es nulo por lo que no es necesaria la verificación.

Para el estado de carga **(b)** se podría realizar la verificación en la sección central donde el momento flector es máximo y está aplicada la carga concentrada, pero siendo las solicitaciones de momento y carga concentrada para ese estado pequeñas la misma no se realiza.

(9) VERIFICACIÓN EN ESTADO DE SERVICIO (Deformaciones) (artículo **A.4.4**)

Se verifica con carga de servicio para el estado de carga **(a)**

$$q_s = D + L_r = 0,18 + 1,229 = 1,409 \text{ kN/m}$$

$$q_{xs} = q_s \cdot \cos 5,71^\circ = 1,409 \times \cos 5,71^\circ = 1,402 \text{ kN/m}$$

$$q_{ys} = q_s \cdot \sin 5,71^\circ = 1,409 \times \sin 5,71^\circ = 0,140 \text{ kN/m}$$

Determinación de los momentos de inercia para el cálculo de deformaciones.

- Para la flexión alrededor de **x-x**

Siendo la **sección totalmente efectiva** (Ejemplo N° 1, Página 4) el momento de inercia es el de la sección bruta

$$I_{xs} = 294,93 \text{ cm}^4$$

- Para la flexión alrededor de **y-y**

Corresponde determinar el ancho efectivo del elemento **1** (ver Ejemplo N° 2, página 12) para el estado de servicio (artículo **B.2.1 (b), Procedimiento I**). En forma conservadora se puede adoptar el momento de inercia resultante para el estado último pues la tensión en la fibra extrema comprimida será menor en estado de servicio y el momento de inercia determinado para estado último (expresión **(Ej 2-6)**) difiere muy poco del correspondiente a la sección bruta. Por lo tanto:

$$I_{ys} = 36,455 \text{ cm}^4$$

Las flechas resultan:

$$f_x = \frac{5 q_{xs} \cdot L^4}{384 E \cdot I_{xs}} = \frac{5 \cdot 0,01402 \times 500^4}{384 \cdot 200000 \times 294,93} \times 10 = 1,94 \text{ cm}$$

$$f_y \cong \frac{5}{384} \frac{q_{ys} \cdot L^4}{E \cdot I_{ys}} = \frac{5}{384} \frac{0,00140 \times 166^4}{200000 \times 36,455} \times 10 = 0,02 \text{ cm}$$

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = \sqrt{1,94^2 + 0,02^2} = 1,94 \text{ cm} = L/257 < f_{adm} = L/200$$

(Tabla A-L.4-1, Reglamento CIRSOC 301-2005)

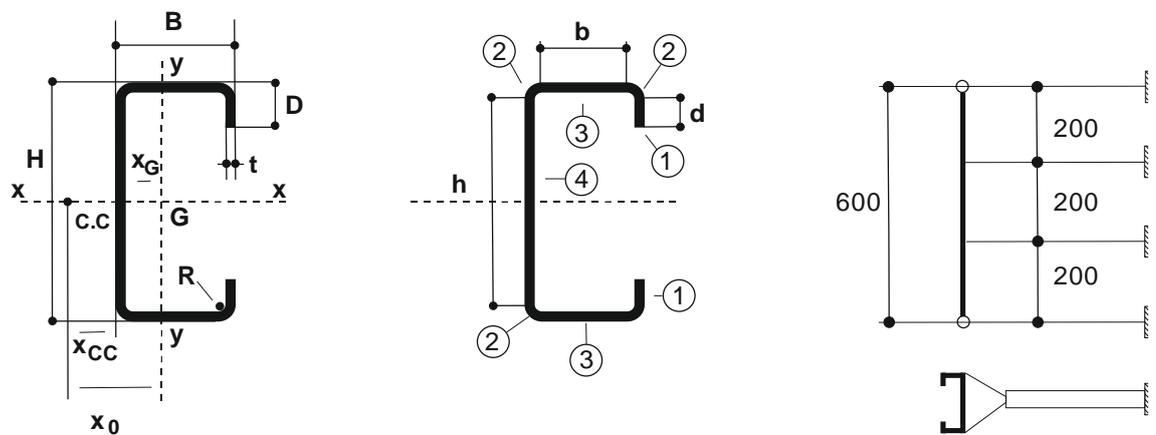
(Verifica)

EJEMPLO N°4

PERFIL C

Resistencia a compresión axial

PC 160 x 60 x 20 x 2,5 según IRAM-IAS U500-206-3 :2006.



$H = 160 \text{ mm}$
 $B = 60 \text{ mm}$
 $D = 20 \text{ mm}$
 $t = 2,5 \text{ mm}$
 $R = t = 2,5 \text{ mm}$
 $x_G = 16,1 \text{ mm}$
 $x_{CC} = 27,6 \text{ mm}$
 $x_o = 4,495 \text{ mm}$

$h = H - 2(t + R) = 150 \text{ mm}$
 $b = B - 2(t + R) = 50 \text{ mm}$
 $d = D - (t + R) = 15 \text{ mm}$

$k_x L_x = 600 \text{ cm}$
 $k_y L_y = 200 \text{ cm}$
 $k_t L_t = 200 \text{ cm}$

(Arriostamiento de ambas alas)

$A_g = 7,59 \text{ cm}^2$ (De Tablas IRAM-IAS U500-206-3)		
$I_x = 294,93 \text{ cm}^4$	$r_x = 6,23 \text{ cm}$	$J = 0,1581 \text{ cm}^4$
$I_y = 37,03 \text{ cm}^4$	$r_y = 2,21 \text{ cm}$	$C_w = 1748 \text{ cm}^6$

Acero F24 ($F_y = 235 \text{ MPa}$)

Figura Ej. 4-1

(1) VERIFICACIÓN RELACIONES DE ESBELTEZ

- relaciones máximas entre ancho plano y espesor de elementos comprimidos (artículo B.1.1.(a))

Ala $b/t = 50/2,5 = 20 < 60$ (elemento comprimido. rigidizado vinculado al alma y a un labio) **OK**

Labio $d/t = 15/2,5 = 6 < 60$ (elemento no rigidizado) **OK**

Alma $h/t = 150/2,5 = 60 < 500$ (elemento comprimido rigidizado vinculado con ambos bordes longitudinales a otros elementos rigidizados) **OK**

(2) DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE COMPRESIÓN DE LOS ELEMENTOS

Se toma $f = F_n$ con F_n determinado de acuerdo con el artículo C.4.

(2a) Tensión de pandeo elástico flexional alrededor del eje y-y (eje principal normal al de simetría) (artículo C.4.1.)

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k_y \cdot L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(200 / 2,21)^2} = 241,02 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.4.1-1}) \quad (\text{Ej 4-1})$$

(2b) Tensión de pandeo elástico flexotorsional alrededor del eje x-x (eje de simetría) (artículo C.4.2.)

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k_x \cdot L_x / r_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(600 / 6,23)^2} = 212,81 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-7})$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} = \sqrt{6,23^2 + 2,21^2 + 4,495^2} = 7,99 \text{ cm} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-12})$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \left[G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right] = \frac{1}{7,59 \times 7,99^2} \left[77200 \times 0,1581 + \frac{\pi^2 \times 200000 \times 1748}{(200)^2} \right] = 203,21 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. C.3.1.2.1-9})$$

$$\beta = 1 - (x_o / r_o)^2 = 1 - (4,495 / 7,99)^2 = 0,6835 \quad (\text{Exp. C.4.2-3})$$

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (\text{Exp. C.4.2-1})$$

$$F_e = \frac{1}{2 \times 0,6835} \left[(212,81 + 203,21) - \sqrt{(212,81 + 203,21)^2 - 4 \times 0,6835 \times 212,81 \times 203,21} \right]$$
$$F_e = 133,02 \text{ MPa} \quad (\text{Ej 4-2})$$

De comparar (2a) y (2b) se adopta la menor de las tensiones elásticas de (Ej 4-2):

$$F_e = 133,02 \text{ MPa}$$

(2c) Determinación de F_n (artículo C.4(a))

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} = \sqrt{\frac{235}{133,02}} = 1,329 < 1,5 \quad (\text{Exp. C.4-4})$$

$$\text{Para } \lambda < 1,5 \quad F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y = (0,658^{1,329^2}) \times 235 = 112,1 \text{ MPa} \quad (\text{Ej 4-3})$$

(3) DETERMINACIÓN DE ANCHOS EFECTIVOS DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS PARA RESISTENCIA

- Elemento ① (Elemento no rigidizado uniformemente comprimido) (artículo B.3.1.(a))

$$k = 0,43 \quad f = 112,1 \text{ MPa}$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 0,43 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{1,5}\right)^2 = 2159 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. B.2.1-5})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{112,1}{2159}} = 0,227 \quad (\text{Exp. B.2.1-4})$$

siendo

$$\lambda = 0,227 < 0,673 \Rightarrow b_e = b \text{ labio totalmente efectivo} \quad (\text{Ej 4-4})$$

- Elemento ② es **todo efectivo** por ser el pliegue de la sección transversal (Ej 4-5)
- Elemento ③ (Elemento uniformemente comprimido con rigidizador de borde) (Ala) (artículo B.4.2)

$$f = 112,1 \text{ MPa}$$

$$S = 1,28\sqrt{E/f} = 1,28\sqrt{200000/112,1} = 54,06 \quad (\text{Exp. B.4-1})$$

$$(b/t) = (50 / 2,5) = 20 > 0,328 S = 0,328 \times 54,06 = 17,73 \quad (\text{Ej 4-6})$$

I_s = Momento de inercia del labio rigidizador respecto de su eje baricéntrico paralelo al ala.

$$I_s = (0,25 \times 1,5^3) / 12 = 0,0703125 \text{ cm}^4.$$

I_a = Momento de inercia necesario del labio rigidizador.

$$I_a = 399 t^4 \left[\frac{b/t}{S} - 0,328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{b/t}{S} + 5 \right] \quad (\text{Exp. B.4.2-10})$$

$$I_a = 399 \times 0,25^4 \left[\frac{50/2,5}{54,06} - 0,328 \right]^3 = 0,00012 \text{ cm}^4 < 0,186 = 0,25^4 \left[115 \frac{50/2,5}{54,06} + 5 \right]$$

$$(R_l) = I_s / I_a = 0,0703125 / 0,00012 = 610 > 1 \Rightarrow R_l = 1 \quad (\text{Exp. B.4.2-9})$$

$$(D/b) = 20/50 = 0,4 \quad 0,25 < (D/b) = 0,4 < 0,8$$

$$n = \left[0,582 - \frac{b/t}{4S} \right] \geq \frac{1}{3} \quad n = \left[0,582 - \frac{50/2,5}{4 \times 54,06} \right] = 0,490 > 0,333 \quad (\text{Exp. B.4.2-11})$$

luego de la Tabla **B.4-1** $k = \left(4,82 - \frac{5D}{b} \right) (R_1)^n + 0,43 \leq 4$

$$k = \left(4,82 - \frac{5 \times 20}{50} \right) (1)^{0,49} + 0,43 = 3,25 < 4$$

El ancho efectivo del ala se obtiene según el artículo **B.2.1.** con $k = 3,25$

$$F_{cr} = 3,25 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{5} \right)^2 = 1468,7 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{112,1}{1468,7}} = 0,276 < 0,673 \Rightarrow b_e = b \text{ (ala totalmente efectiva)} \quad (\text{Ej 4-7})$$

De (Ej 4-7) resulta:

$$b_{e1} = (b_e / 2) \cdot (R_1) \text{ (ver Figura B.4-2)} \quad b_{e1} = (5/2) \times 1 = 2,5 \text{ cm} \quad (\text{Exp. B.4.2-5})$$

$$b_{e2} = b_e - b_{e1} \text{ (ver Figura B.4-2)} \quad b_{e2} = 5 - 2,5 = 2,5 \text{ cm} \quad (\text{Exp. B.4.2-6})$$

Luego Elemento (3) es **totalmente efectivo** (Ej 4-8)

- Elemento (4) (Elemento rigidizado uniformemente comprimido) (**Alma**) (artículo **B.2.1.(a)**)

$$k = 4 \quad F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2 = 4 \frac{\pi^2 \times 200000}{12(1 - 0,3^2)} \left(\frac{0,25}{15} \right)^2 = 200,9 \text{ MPa} \quad (\text{Exp. B.2.1-5})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{112,1}{200,9}} = 0,747 \quad (\text{Exp. B.2.1-4})$$

siendo:

$$\lambda = 0,747 > 0,673 \Rightarrow b_e < b \text{ elemento parcialmente efectivo}$$

$$\rho = (1 - 0,22 / \lambda) / \lambda = (1 - 0,22 / 0,747) / 0,747 = 0,944 \quad (\text{Exp. B.2.1-3})$$

$$b_{e4} = \rho \cdot h = 0,944 \times 15 = 14,16 \text{ cm} < b_4 \quad (\text{Exp. B.2.1-2}) \quad (\text{Ej 4-9})$$

(4) DETERMINACIÓN DEL ÁREA EFECTIVA

De (Ej 4-4), (Ej 4-5), (Ej 4-8) y (Ej 4-9) el área efectiva para la tensión F_n resulta:

$$A_e = A_g - (b_4 - b_{e4}) \cdot t = 7,59 - (15 - 14,165) \times 0,25 = \mathbf{7,381 \text{ cm}^2}$$

(5) RESISTENCIA DE DISEÑO A COMPRESIÓN AXIL

$$P_d = \phi_c P_n = \phi_c \cdot A_e \cdot F_n \cdot (10)^{-1} \quad \phi_c = 0,85 \quad (\text{Exp. C.4-1})$$

$$P_d = 0,85 \times 7,381 \times 112,1 \times (10)^{-1} = \mathbf{70,33 \text{ kN}}$$

