

ESTUDIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LA RELACIÓN DE INERCIA I_x/I_y EN LA RESISTENCIA AL PANDEO LATERAL TORSIONAL DE PERFILES DE SECCIÓN ABIERTA CONFORMADAS EN FRÍO CONSIDERANDO LA INFLUENCIA DEL TIPO DE CONEXIÓN AL CERRAMIENTO Y A LA ESTRUCTURA PRINCIPAL. PARTE 2. APLICACION NUMERICA

Daniel O. Troglia¹; Juan Emilio Fernández¹, María Dolores Roca Garbiglia¹, Víctor E. De Napoli¹

¹Ing. Civil, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba

daniel.osvaldo.troglia@unc.edu.ar, j.e.fernandez@unc.edu.ar, maria.roca@unc.edu.ar,
victor.de.napoli@unc.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo (Parte 2) es la aplicación numérica de la Fórmula del artículo C.3.1.3. del Reglamento CIRSOC 303-2009 (basado en el Art. I6.2.1. de la Especificación AISI-S100-16 (*North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members*). “*Vigas con el ala traccionada unida en forma fija y continua a un tablero o revestimiento*” en diferentes perfiles para visualizar la practicidad de la formulación y el aumento de la capacidad respecto a la no posibilidad de aplicación. Esta formulación constituye el ELU que suele controlar el dimensionado de la barra en muchos casos y si nos circunscribimos a las condiciones planteadas en el Reglamento CIRSOC 303-2009 (basados en los Ensayos y formulaciones de la AISI-S100-16), no sería válida su aplicación. El haber ensayado y verificado la aplicabilidad de dicha formulación constituye un aumento de la capacidad del perfil sin necesidad de arriostramientos inferiores (necesarios sin la aplicabilidad de dicha formulación) y la facilidad operativa que podremos visualizarlo en los diferentes ejemplos numéricos planteados.

ABSTRACT

The objective of this work (Part 2) is the numerical application of the Formula of article C.3.1.3. of the CIRSOC Regulation 303-2009 (based on Art. I6.2.1. of the AISI-S100-16 Specification (*North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members*). “*Beams with the tension flange fixedly joined and continuous to a board or coating*” in different profiles to visualize the practicality of the formulation and the increase in capacity compared to the non-possibility of application. This formulation constitutes the ELU that usually controls the sizing of the bar in many cases and if we limit ourselves to the conditions set out in the CIRSOC Regulation 303-2009 (based on the Tests and formulations of the AISI-S100-16), it would not be valid. your application. Having tested and verified the applicability of said formulation constitutes an increase in the capacity of the profile without the need for lower bracing (necessary without the applicability of said formulation) and the operational ease that we can visualize in the different numerical examples presented.

1 INTRODUCCIÓN

Entre los diferentes estados límites últimos que puede estar solicitada una barra de sección abierta conformada en frío (SCF) se destaca, por su gran influencia en el diseño, el estado límite por pandeo lateral torsional (PLT), ya que en este tipo de barras de sección abierta realizadas con chapa de poco espesor y para luces de flexión 20 a 30 veces el alto de la viga el PLT suele ser el modo de falla que arroja las resistencias de diseño más reducidas. En particular analizamos la situación de los paneles de techo y laterales de cerramiento en donde por la succión del viento la flexión se produce compresión en su ala libre no arriostrada. El ala traccionada es la que está conectada por medio de tornillos autorroscantes cada 250 mm aproximadamente al cerramiento.

Las prescripciones y métodos de cálculo para este tipo de paneles estructurales que resisten cargas perpendiculares a su superficie son muy difundidas. En particular nos referiremos a las especificaciones realizadas por la *American Iron and Steel Institute (AISI)*, institución que ha desarrollado las *North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members* cuyo contenido ha sido tomado como documento de referencia para la redacción del Reglamento Argentino CIRSOC 303-2009: "Reglamento Argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío".

Para la determinación del momento crítico nominal por PLT en este tipo de perfiles y en las condiciones descriptas, la especificación original ofrece una fórmula de Resistencia Nominal:

$$M_d = \phi_b M_n = \phi_b S_c \cdot F_c \cdot (10)^{-3} \quad (\text{C.3.1.3-1}) - \text{Cirsoc 303} \quad (01)$$

Simple Span		
Member Depth Range, in. (mm)	Profile	R
$d \leq 6.5$ (165)	C or Z	0.70
6.5 (165) $< d \leq 8.5$ (216)	C or Z	0.65
8.5 (216) $< d \leq 12$ (305)	Z	0.50
8.5 (216) $< d \leq 12$ (305)	C	0.40
Continuous Span		
Profile	R	
C	0.60	
Z	0.70	

Tabla N°1: I6.2.1-1 AISI-S100-16. C or Z Section R Values (izquierda).

Valores de R para secciones C o Z de un solo tramo

Altura (mm)	Sección	R
$d \leq 165$	C o Z	0,70
$165 < d \leq 216$	C o Z	0,65
$216 < d \leq 292$	Z	0,50
$216 < d \leq 292$	C	0,40

Tabla N°2: Tabla C.3.1. Valores de R según Cirsoc 303

Esta formulación fue validada por Ensayos que se describen en la Parte I del trabajo de investigación

El objetivo de este trabajo es la aplicación numérica de la Fórmula del artículo C.3.1.3. del Reglamento CIRSOC 303-2009 para las condiciones de uso habituales en nuestro medio en los perfiles ensayados y mostrar la facilidad operativa y el aumento de capacidad de los mismos en primera instancia y el ahorro (material y mano de obra de ejecución) en el caso de tener que utilizar arriostramientos laterales puntuales para lograr capacidades similares

2 PERFILES ENSAYADOS. DATOS

a. Perfiles conformados en frío con cincado en caliente (las medidas seccionales fueron relevadas):

- C140 x 60 x 22 x 2
 - C160 x 61 x 20 x 2
- } Ambos califican como "totalmente efectivos a flexión".

Las características mecánicas de la chapa que constituye estos perfiles se determinaron mediante el ensayo a tracción de probetas cortadas con chorro de agua según las medidas especificadas por la norma de ensayo: IRAM U500-102. Como resultado de estos se asignó al acero los valores de $F_y = 270$ MPa y $F_u = 360$ MPa.

b. Chapas conformadas de cierre tipo T101 BWG N° 25:

Esta chapa fue caracterizada mediante un ensayo de tracción realizado sobre una probeta cortada con chorro de agua (como en el caso de los perfiles), cuyos resultados arrojaron valores del acero de la chapa de $F_y = 380$ MPa y $F_u = 430$ MPa

c. Tornillos autorroscantes autoperforantes N°12 cabeza hexagonal con arandela forjada en la cabeza y arandela de neoprene.

d. Los bulones para apoyo de las correas son de calidad A325N

Las propiedades mecánicas de los perfiles son:

Designación de Perfil	A	B	C	t=R	Area de la sección nominal A_g	Masa por metro nominal M	Distancia al centro de Gravedad xG		Momentos de inercia		Módulo resistente		Radios de Giro		Módulo de Torsión J	Módulo de Alabeo C_w
								x_0	I_x	I_y	S_x	S_y	r_x	r_y		
	mm	mm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm	cm ⁴	cm ⁶
PC 140x60x22x2	140	60	22	2	5.82	4.57	1.94	-4.92	178.36	30.55	25.48	7.72	5.54	2.29	0.078	1410
PC 160x61x20x2	160	61	20	2	6.18	4.85	1.80	-4.64	243.49	31.92	30.44	7.61	6.28	2.27	0.082	1775

Tabla N°3: Propiedades mecánicas de Perfiles C140 y C160

3 PERFILES ENSAYADOS. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos para los dos tipos de perfiles ensayados

Para el perfil como correa C140:

- La carga fue tal que generó momentos externos superiores a $0.70M_y$
- El colapso de la viga por PLT no se verificó como un hecho marcado y súbito.
- El proceso de carga se interrumpió al alcanzar valores de “grandes flechas” en el centro de la viga, habiendo llegado a relaciones $f/L \sim 1/70$ para C140-1 y $f/L \sim 1/130$ en C140-2.
- El giro de la sección central alcanzó valores de hasta $\sim 15^\circ$ para C140-1 y C140-3.
- El proceso de descarga demuestra que no experimenta deformaciones permanentes.

Para el perfil como correa C160:

- La carga fue tal que generó momentos externos del orden de $0.60M_y$ en C160-1, C160-2 y de $0.70M_y$ en C160-3
- El colapso de la viga por PLT no se verificó como un hecho marcado y súbito.
- El proceso de carga se interrumpió al alcanzar valores de “grandes deflexiones” en el centro de la viga, habiendo llegado hasta relaciones $f/L \sim 1/150$ en C160-1, C160-2 y de $f/L \sim 1/70$ en C160-3
- El giro de la sección central alcanzó valores de hasta $\sim 18^\circ$.
- El proceso de descarga demuestra que no experimenta deformaciones permanentes.

Las luces de cálculo de ambos perfiles fueron para C140 y C160: 591 cm

4 MOMENTOS DE DISEÑO.

Se determina a continuación los momentos de diseño de los perfiles ensayados para cuatro (4) casos:

- a. Considerando la aplicación de la formula (C.3.1.3-1)
- b. Aplicando la formulación general de pandeo lateral
 - b.1.- Sin arriostramiento
 - b.2.- Considerando el arriostramiento al centro de la luz
 - b.3.- Considerando el arriostramiento al tercio de la luz

a) Momento nominal $M_n = R S_e F_y (10)^{-3}$ (02)

b) Momento Nominal para PLT ((Sección 16.2.2.1.)

Procedimiento (I): Tensión crítica elástica a pandeo lateral (F_e) según Sección C.3.1.2.1 (a) del CIRSOC 303-EL. (Sección de simetría simple; flexión alrededor del eje de simetría)

De Ecuación (16-39)
$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$
 (03)

Ecuación (16-37)
$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k_y \cdot L_y / r_y)^2}$$
 (04)

Ecuación (16-38):
$$\sigma_t = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \left[G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right]$$
 (05)

De Ecuación (16-34)
$$F_e = \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$$
 (06)

Procedimiento (II): Tensión crítica elástica a pandeo lateral (F_e) Según Sección C.3.1.2.1 (b) Del CIRSOC 303-EL (Sección C de simetría simple; flexión alrededor del eje baricéntrico perpendicular al alma)

De Ecuación (16-42)
$$F_e = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{yc}}{S_f (k_y \cdot L_y)^2}$$
 (07)

De Ecuación (16-30)
$$M_n = S_c \cdot F_c \cdot (10)^{-3} \quad \phi_b = 0,90$$
 (08)

$S_c = S_x$ por ser la sección totalmente efectiva

F_c = Tensión crítica determinada de la siguiente manera (MPa)

- Para $F_e \geq 2,78 F_y$ $F_c = F_y$ (09)

- Para $2,78 F_y > F_e > 0,56 F_y$ $F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right)$ (10)

- Para $F_e \leq 0,56 F_y$ $F_c = F_e$ (11)

F_e = Tensión crítica elástica de pandeo lateral-torsional calculado con (I) o (II) (MPa)

Aplicando las ecuaciones anteriores para los perfiles ensayados

Perfil C140x60x22x2

a) Aplicando (02) $M_n = 0.7 \times 25.48 \times 270 \times 0.001 = 4.82 \text{ kN.m}$

b) Aplicamos las formulaciones indicadas

Procedimiento (I):

En diagrama parabólico ($L_b = 591 \text{ cm}$): $M_{\max} = 1$ $M_A = M_C = 0,75$ $M_B = 1$

Aplicando (03) $C_b = \frac{12,5 \times 1}{2,5 \times 1 + 3 \times 0,75 + 4 \times 1 + 3 \times 0,75} = 1,136$

En diagrama semiparabólico ($L_b = 295.5 \text{ cm}$): $M_{\max} = 1$ $M_A = 0,438$ $M_B = 0,75$ $M_C = 0,938$

Aplicando (03) $C_b = \frac{12,5 \times 1}{2,5 \times 1 + 3 \times 0,438 + 4 \times 0,75 + 3 \times 0,938} = 1,29$

En tramo central de arriostramiento a los tercios de la luz ($L_b = 198.3 \text{ cm}$)

$C_b \cong 1$

Aplicando Ecuación (04) $\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k_y \cdot L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(k_y \cdot L_y / 2,63)^2}$

Resulta para $(k_y L_y) = 591 \text{ cm}$ $\sigma_{ey} = 29.7 \text{ MPa}$

$(k_y L_y) = 295.5 \text{ cm}$ $\sigma_{ey} = 118.7 \text{ MPa}$

$(k_y L_y) = 197 \text{ cm}$ $\sigma_{ey} = 267 \text{ MPa}$

Aplicando Ecuación (05)

$$\sigma_t = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \left[G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right] = \frac{1}{5.82 \times 7.80^2} \left[77200 \times 0.078 + \frac{\pi^2 \times 200000 \times 1410}{(k_t \cdot L_t)^2} \right]$$

Resulta para $(k_t L_t) = 591 \text{ cm}$ $\sigma_t = 40 \text{ MPa}$
 $(k_t L_t) = 295.5 \text{ cm}$ $\sigma_t = 108.3 \text{ MPa}$
 $(k_t L_t) = 197 \text{ cm}$ $\sigma_t = 222.2 \text{ MPa}$

Aplicando Ecuación (06) $F_e = \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = \frac{C_b \times 7.80 \times 5.82}{25.48} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$

S_f = Módulo elástico de la sección bruta respecto de fibra comprimida

$S_f = S_x = 25.48 \text{ cm}^3$

Aplicando Ecuaciones (09) , (10) y (11) según corresponda resulta para:

$L_b = 591 \text{ cm}$ $F_e = 69.3 \text{ MPa} < 0.56 F_y \Rightarrow F_c = F_e = 69.3 \text{ MPa}$

$L_b = 295 \text{ cm}$ $F_e = 259 \text{ MPa}$ $2.78 F_y > F_e > 0.56 F_y$

$\Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) = 213 \text{ MPa}$

$L_b = 198 \text{ cm}$ $F_e = 431.4, 15 \text{ MPa}$ $2.78 F_y > F_e > 0.56 F_y$

$\Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) = 248 \text{ MPa}$

$2.78 F_y = 2.78 \times 270 = 750.6 \text{ MPa}$ $0.56 F_y = 0.56 \times 270 = 151.2 \text{ MPa}$

Procedimiento (II): Tensión crítica elástica a pandeo lateral (F_e)

Aplicando Ecuación (07) $F_e = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{yc}}{S_f (k_y \cdot L_y)^2} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \times 200000 \times 14 \times 15.275}{25.48 (k_y \cdot L_y)^2}$

Resulta para $(k_t L_t) = 591 \text{ cm}$ $C_b = 1.136$ $F_e = 53.9 \text{ MPa}$
 $(k_t L_t) = 295.5 \text{ cm}$ $C_b = 1.29$ $F_e = 244.8 \text{ MPa}$
 $(k_t L_t) = 197 \text{ cm}$ $C_b = 1$ $F_e = 426.9 \text{ MPa}$

$L_b = 591 \text{ cm}$ $F_e = 69.3 \text{ MPa} < 0.56 F_y \Rightarrow F_c = F_e = 69.3 \text{ MPa}$

$L_b = 295 \text{ cm}$ $F_e = 259 \text{ MPa}$ $2.78 F_y > F_e > 0.56 F_y$

$$\Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) = 208 \text{ MPa}$$

$$L_b = 197 \text{ cm} \quad F_e = 431.4,15 \text{ MPa} \quad 2,78 F_y > F_e > 0,56 F_y$$

$$\Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) = 247 \text{ MPa}$$

$$2,78 F_y = 2,78 \times 270 = 750.6 \text{ MPa} \quad 0,56 F_y = 0,56 \times 270 = 151.2 \text{ MPa}$$

Según lo determinado en los puntos anteriores existen diferencias en la tensión crítica determinada según **(Procedimiento (I) y (Procedimiento (II))** del Reglamento CIRSOC 303-EL, tanto para pandeo en zona elástica como inelástica.

El procedimiento simplificado indicado en la Sección **C.3.1.2.1(b)** del Reglamento CIRSOC 303-EL **(Procedimiento (b))** es operativamente mas simple y resulta conservador para zona elástica.

Aplicando la formulación validada en los ensayos y adoptando los valores de F_c obtenidos por el Procedimiento 1 resultan las Resistencias de Diseño siguientes:

De las Ecuaciones (02) y (08)	$M_n = R.S_c.F_y.(10)^{-3}$	$\phi_b = 0,90$
	$M_n = S_c.F_c.(10)^{-3}$	$\phi_b = 0,90$

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

De (01) y (02) resulta $M_d = 0,9 \times 4.82 \text{ kN.m} = \underline{\underline{4.34 \text{ kNm}}}$

Y de (08) para cada L_b

Para $L_b = 591 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 25.48 \times 69.3 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{1.59 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 295 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 25.48 \times 213 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{4.89 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 197 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 25.48 \times 248 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{5.69 \text{ kNm}}}$

Además las Resistencias de Diseño obtenidas corresponden a CARGAS APLICADAS QUE PASEN POR EL CENTRO DE CORTE.

Para cargas QUE NO PASAN POR EL CENTRO DE CORTE se debe aplicar un factor de reducción R_o que considera la torsión producida entre puntos lateralmente arriostrados (Sección 16.9., ⁽³⁾ para la situación de FLEXIÓN SIMPLE)

Si suponemos **la carga aplicada en el plano del alma** resulta para las situaciones de arriostramiento analizadas:

(1) $L_b = 591 \text{ cm}$

$$R_o = \frac{H.S_y}{H.S_y + 2m.S_x} = \frac{14 \times 7,72}{14 \times 7,72 + 2 \times 2,88 \times 25,48} = \mathbf{0,424} \quad (12)$$

$$(2) L_b = 295,5 \text{ cm}$$

$$R_o = \frac{2H.S_y}{2H.S_y + m.S_x} = \frac{2 \times 14 \times 7,72}{2 \times 14 \times 7,72 + 2,88 \times 25,48} = \mathbf{0,747} \quad (13)$$

$$(3) L_b = 197 \text{ m}$$

$$R_o = \frac{H.S_y}{H.S_y + 0,2m.S_x} = \frac{14 \times 7,72}{14 \times 7,72 + 0,2 \times 2,88 \times 25,48} = \mathbf{0,88} \quad (14)$$

Las Resistencias de Diseño para cargas aplicadas en el plano del alma en flexión simple resultan

$$\text{Para } L_b = 591 \text{ cm} \quad M_d = 0,424 \times 1,59 = \mathbf{0,674 \text{ kNm}}$$

$$\text{Para } L_b = 295,5 \text{ cm} \quad M_d = 0,747 \times 4,89 = \mathbf{3,65 \text{ kNm}}$$

$$\text{Para } L_b = 197 \text{ cm} \quad M_d = 0,880 \times 5,69 = \mathbf{5,01 \text{ kNm}}$$

Perfil C160x61x20x2

a) Aplicando (02) $M_n = 0,7 \times 30,44 \times 270 \times 0,001 = 5,753 \text{ kN.m}$

b) Aplicamos las formulaciones indicadas del **Procedimiento (I)**:

$$\text{Ecuación (04)} \quad \sigma_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k_y \cdot L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(k_y \cdot L_y / 2,27)^2}$$

$$\text{Resulta para } (k_y L_y) = 591 \text{ cm} \quad \sigma_{ey} = 29,2 \text{ MPa}$$

$$(k_y L_y) = 295,5 \text{ cm} \quad \sigma_{ey} = 116,8 \text{ MPa}$$

$$(k_y L_y) = 197 \text{ cm} \quad \sigma_{ey} = 262,7 \text{ MPa}$$

Aplicando Ecuación (05)

$$\sigma_t = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \left[G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(k_t \cdot L_t)^2} \right] = \frac{1}{6,18 \times 8,10^2} \left[77200 \times 0,082 + \frac{\pi^2 \times 200000 \times 1775}{(k_t \cdot L_t)^2} \right]$$

$$\text{Resulta para } (k_t L_t) = 591 \text{ cm} \quad \sigma_t = 40,1 \text{ MPa}$$

$$(k_t L_t) = 295,5 \text{ cm} \quad \sigma_t = 113,7 \text{ MPa}$$

$$(k_t L_t) = 197 \text{ cm} \quad \sigma_t = 236,5 \text{ MPa}$$

$$\text{Aplicando Ecuación (06)} \quad F_e = \frac{C_b \cdot r_o \cdot A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = \frac{C_b \times 8,10 \times 6,18}{30,44} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$$

S_f = Módulo elástico de la sección bruta respecto de fibra comprimida

$$S_f = S_x = 30.44 \text{ cm}^3$$

Aplicando Ecuaciones (09) , (10) y (11) según corresponda resulta para:

$$L_b = 591 \text{ cm} \quad F_e = 64.1 \text{ MPa} < 0,56 F_y \Rightarrow F_c = F_e = 64.1 \text{ MPa}$$

$$L_b = 295 \text{ cm} \quad F_e = 245.4 \text{ MPa} \quad 2,78 F_y > F_e > 0,56 F_y$$

$$\Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) = 208 \text{ MPa}$$

$$L_b = 198 \text{ cm} \quad F_e = 411.5 \text{ MPa} \quad 2,78 F_y > F_e > 0,56 F_y$$

$$\Rightarrow F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_e} \right) = 245 \text{ MPa}$$

Aplicando la formulacion validada en los ensayos y adoptando los valores de F_c obtenidos por el Procedimiento 1 resultan las Resistencias de Diseño siguientes:

$$\text{De las Ecuaciones (02) y (08)} \quad M_n = R \cdot S_c \cdot F_y \cdot (10)^{-3} \quad \phi_b = 0,90$$

$$M_n = S_c \cdot F_c \cdot (10)^{-3} \quad \phi_b = 0,90$$

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

$$\text{De (01) y (02) resulta} \quad M_d = 0,9 \times 5.753 \text{ kN.m} = \underline{\underline{5.18 \text{ kNm}}}$$

De (08) para cada longitud L_b

$$\text{Para } L_b = 591 \text{ cm} \quad M_d = 0,9 \times 30.44 \times 64.1 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{1.76 \text{ kNm}}}$$

$$\text{Para } L_b = 295 \text{ cm} \quad M_d = 0,9 \times 30.44 \times 208 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{5.70 \text{ kNm}}}$$

$$\text{Para } L_b = 198 \text{ cm} \quad M_d = 0,9 \times 30.44 \times 245 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{6.71 \text{ kNm}}}$$

Además las Resistencias de Diseño obtenidas corresponden a CARGAS APLICADAS QUE PASEN POR EL CENTRO DE CORTE.

Para cargas QUE NO PASAN POR EL CENTRO DE CORTE se debe aplicar un factor de reducción R_o

Si suponemos **la carga aplicada en el plano del alma** resulta para las situaciones de arriostramiento analizadas, aplicando las ecuaciones (12), (13) y (14)

$$(1) L_b = 591 \text{ cm}$$

$$R_o = \frac{H \cdot S_y}{H \cdot S_y + 2m \cdot S_x} = \frac{16 \times 7.61}{16 \times 7.61 + 2 \times 2.74 \times 30.44} = 0,422$$

$$(2) L_b = 295.5 \text{ cm}$$

$$R_o = \frac{2H.S_y}{2H.S_y + m.S_x} = \frac{2 \times 16 \times 7,61}{2 \times 16 \times 7,61 + 2,74 \times 30,44} = 0,745$$

$$(3) L_b = 197m$$

$$R_o = \frac{H.S_y}{H.S_y + 0,2m.S_x} = \frac{16 \times 7,61}{16 \times 7,61 + 0,2 \times 2,74 \times 30,44} = 0,88$$

Las Resistencias de Diseño para cargas aplicadas en el plano del alma en flexión simple resultan

Para $L_b = 591 \text{ cm}$ $M_d = 0,422 \times 1,76 = \underline{0,743 \text{ kNm}}$

Para $L_b = 295,5 \text{ cm}$ $M_d = 0,745 \times 5,70 = \underline{4,25 \text{ kNm}}$

Para $L_b = 197 \text{ cm}$ $M_d = 0,880 \times 6,71 = \underline{5,91 \text{ kNm}}$

Para agrandar la muestra de aplicación numerica, utilizamos las ecuaciones tambien para los perfiles ensayados en la primera etapa del ensayo (trabajo presentado como numero 014 en las Jornadas 26AIE, realizada en forma virtual en el año 2021), los perfiles C120x51.7x15.5x2.1 y C101.5x45x10.6x2; estos fueron ensayados para luces de 5.14 mts y sus propiedades resultan

Designación de Perfil	A	B	C	t=R	Area de la sección nominal A _g	Masa por metro nominal M	Distancia al centro de Gravedad xG	Momentos de inercia			Módulo resistente		Radios de Giro		Módulo de Torsión J	Módulo de Alabeo C _w
								x ₀	I _x	I _y	S _x	S _y	r _x	r _y		
	mm	mm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm	cm ⁴	cm ⁶
PC 120x51.7x15.5x2.1	120	51.7	15.5	2.1	5.05	3.97	1.56	-3.96	113.41	18.25	18.90	5.21	4.74	1.90	0.074	571
PC 101.5x45x10.6x2	101.5	45	10.6	2	3.99	3.13	1.28	-3.26	64.18	10.14	12.65	3.25	4.01	1.59	0.053	213

Tabla N°4: Propiedades mecanicas de Perfiles C100 y C120

Perfil C120x60x22x2

a) Aplicando (02) $M_n = 0.7 \times 18.9 \times 270 \times 0.001 = 3.57 \text{ kN.m}$ (XX)

b) Aplicamos las formulaciones (3), (4), (5) y (6) indicadas del **Procedimiento (I)**:
Resulta para

$$(k_y L_y) = 514 \text{ cm}$$

$$\sigma_{ey} = 27 \text{ MPa}, \sigma_t = 47.3 \text{ Mpa}, F_e = 70.1 \text{ Mpa}, F_c = 70.1 \text{ Mpa}$$

$$(k_y L_y) = 257 \text{ cm}$$

$$\sigma_{ey} = 108 \text{ Mpa}, \sigma_t = 108 \text{ Mpa}, F_e = 240.6 \text{ Mpa}, F_c = 206 \text{ Mpa}$$

$$(k_y L_y) = 171.3 \text{ cm}$$

$$\sigma_{ey} = 243 \text{ Mpa}, \sigma_t = 209.2 \text{ Mpa}, F_e = 389.3 \text{ Mpa}, F_c = 242 \text{ Mpa}$$

De (02) resulta $M_d = 0,9 \times 3.57 \text{ kN.m} = \underline{\underline{3.213 \text{ kNm}}}$

Aplicando ecuación (08) para cada L_b

Para $L_b = 514 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 18.9 \times 70.1 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{1.192 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 257 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 18.9 \times 206 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{3.51 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 171 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 18.9 \times 242 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{4.12 \text{ kNm}}}$

De (12), (13) y (14) con cargas aplicadas en el plano del alma (corrección con R_o)

Para $L_b = 514 \text{ cm}$ $M_d = 0,419 \times 1.192 = \underline{\underline{0,50 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 257 \text{ cm}$ $M_d = 0,742 \times 3.51 = \underline{\underline{2,604 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 171 \text{ cm}$ $M_d = 0,878 \times 4.12 = \underline{\underline{3,62 \text{ kNm}}}$

Perfil C100x60x22x2

a) Aplicando (02) $M_n = 0.7 \times 12.65 \times 270 \times 0.001 = 2.39 \text{ kN.m}$

b) Aplicamos las formulaciones (3), (4), (5) y (6) indicadas del **Procedimiento (I)**:
Resulta para

$(k_y L_y) = 514 \text{ cm}$

$\sigma_{ey} = 19 \text{ MPa}$, $\sigma_t = 48.7 \text{ MPa}$, $F_e = 59 \text{ Mpa}$, $F_c = 59 \text{ Mpa}$

$(k_y L_y) = 257 \text{ cm}$

$\sigma_{ey} = 76 \text{ Mpa}$, $\sigma_t = 89.6 \text{ MPa}$, $F_e = 181.6 \text{ Mpa}$, $F_c = 176 \text{ Mpa}$

$(k_y L_y) = 171.3 \text{ cm}$

$\sigma_{ey} = 171 \text{ Mpa}$, $\sigma_t = 158 \text{ MPa}$, $F_e = 280 \text{ Mpa}$, $F_c = 220 \text{ Mpa}$

De (02) resulta $M_d = 0,9 \times 2.39 \text{ kN.m} = \underline{\underline{2.15 \text{ kNm}}}$

Aplicando ecuación (08) para cada L_b

Para $L_b = 514 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 12.65 \times 59 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{0.672 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 257 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 12.65 \times 176 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{2.0 \text{ kNm}}}$

Para $L_b = 171 \text{ cm}$ $M_d = 0,9 \times 12.65 \times 220 \times (10)^{-3} = \underline{\underline{2.51 \text{ kNm}}}$

De (12), (13) y (14) con cargas aplicadas en el plano del alma (corrección con R_o)

Para $L_b = 514 \text{ cm}$ $M_d = 0,41 \times 0.672 = \underline{\underline{0,28 \text{ kNm}}}$
 Para $L_b = 257 \text{ cm}$ $M_d = 0,735 \times 2.0 = \underline{\underline{1.47 \text{ kNm}}}$
 Para $L_b = 171 \text{ cm}$ $M_d = 0,874 \times 2.51 = \underline{\underline{2.19 \text{ kNm}}}$

5 COMPARATIVA.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el punto anterior se realizó el siguiente gráfico.

Siendo:

Caso 1: Utilización de formulación validada $M_d = 0.9 \times M_N$, con $M_n = R S_e F_y (10)^{-3}$

Casos 2, 3 y 4 utilización de formulación general de PLT sin arriostramiento puntual, con arriostramiento al centro y al tercio.

Casos 5, 6 y 7: Formulación general con corrección de cargas no aplicadas en el Centro de corte.

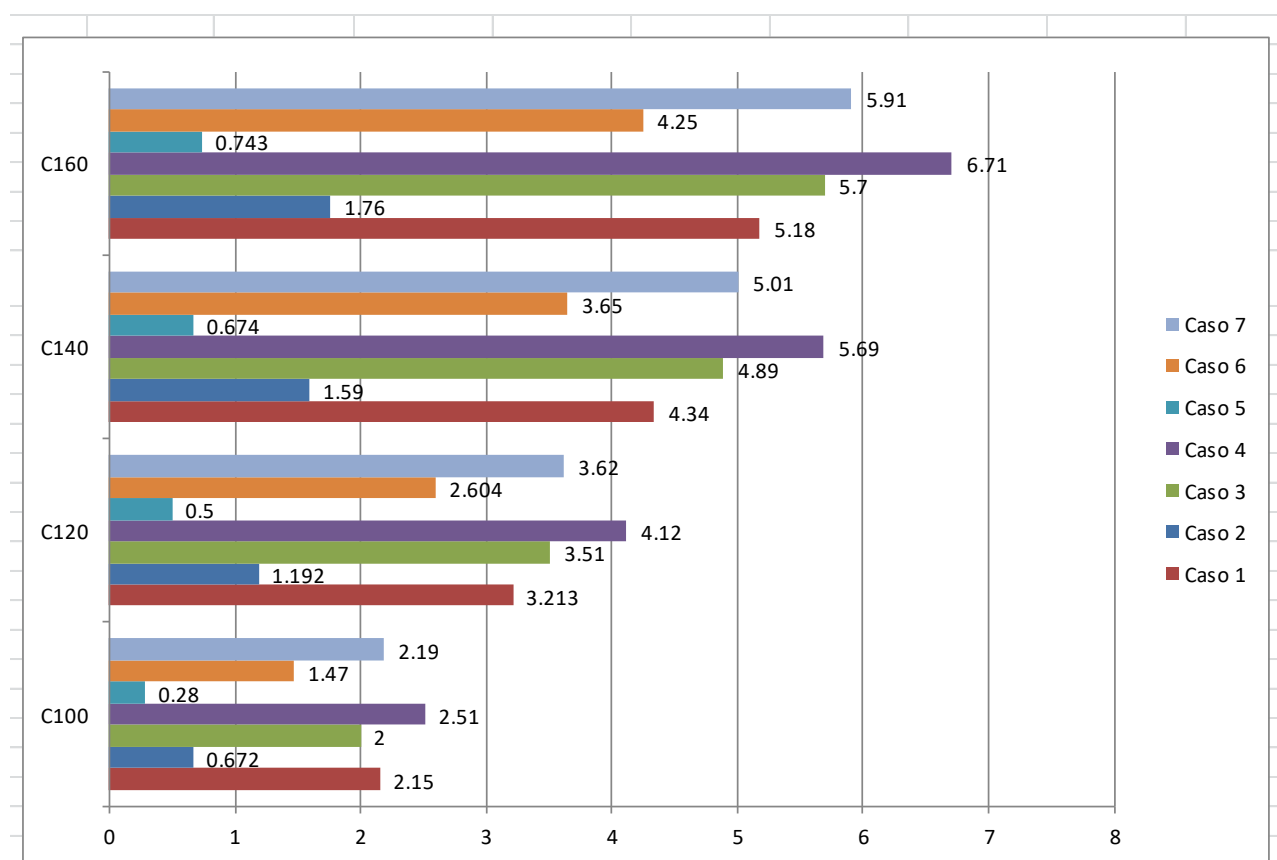


Figura N°5: Comparativa de Momentos de diseño (kN.m) para PLT para cada caso y de cada tipo de perfil

Perfil	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
C100	2.15	0.672	2	2.51	0.28	1.47	2.19
C120	3.213	1.192	3.51	4.12	0.5	2.604	3.62
C140	4.34	1.59	4.89	5.69	0.674	3.65	5.01
C160	5.18	1.76	5.7	6.71	0.743	4.25	5.91

Tabla N°6. Valores de Momentos de Diseño en kN.m. para las diferentes casos y perfiles

Puede observarse que la validacion de la formulacion (caso 1) le otorga a los diferentes perfiles C una capacidad a flexion debido al estado de PLT similar o mayor a la formulacion general con arriostramiento puntal al centro (caso 3 y caso 6 según se corrija o no por carga no aplicada en el centro de corte sin necesidad de colocar ese arriostramiento, que genera un mayor costo de material y de mano de obra. (ver figuras N°5 y N°7 y tabla N°6)

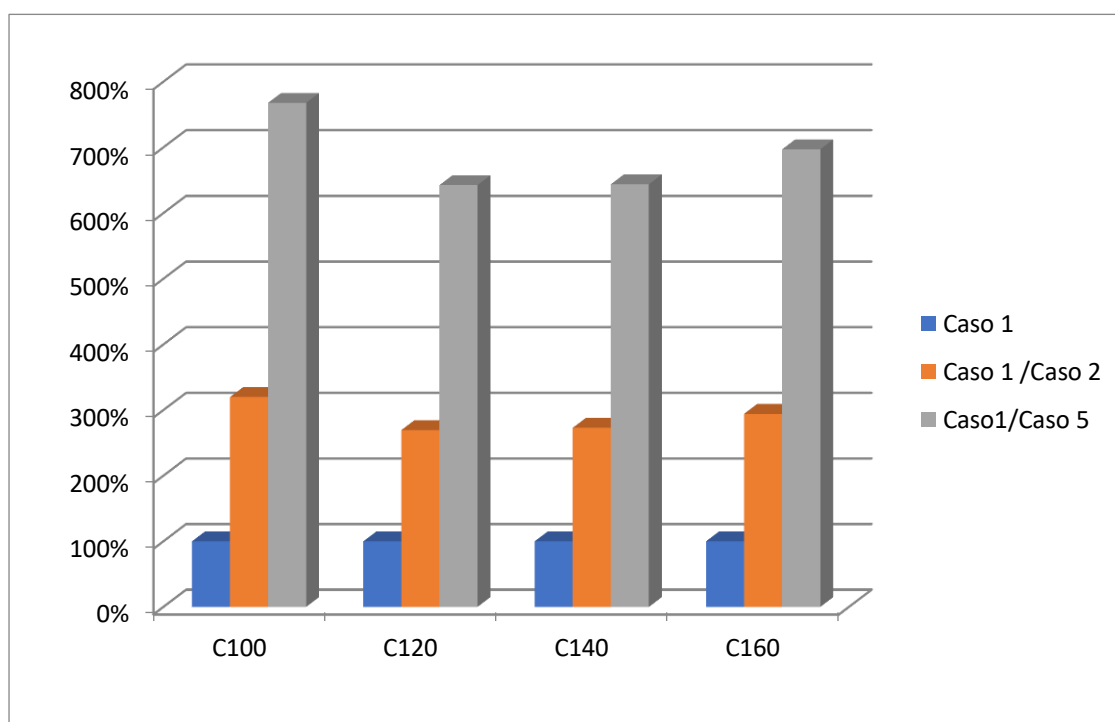
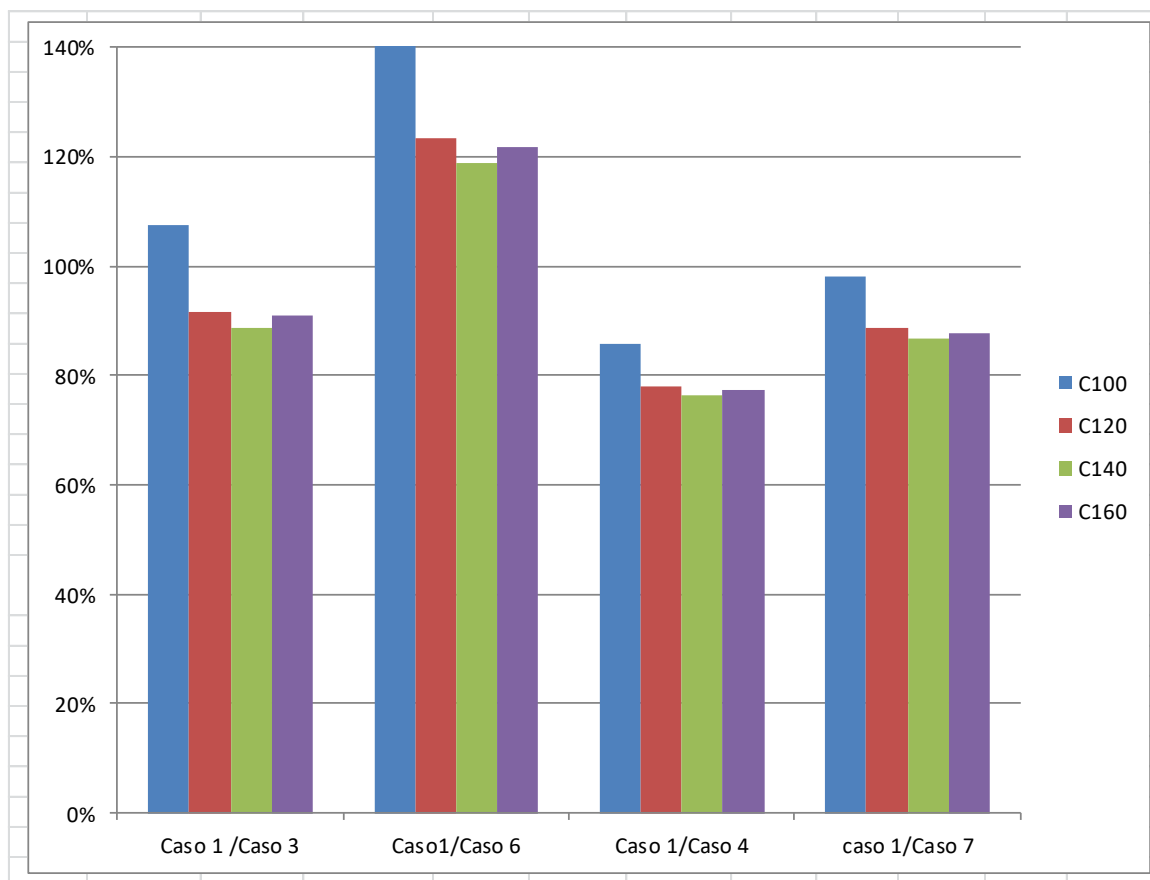


Figura N°7: Relacion de momentos de Diseño para PLT entre el valor de la formulacion validada y la formula general sin arriostramiento lateral

Tambien puede verse que de necesitarse mayor capacidad para casos donde la formulacion validada no verifique el perfil analizado respecto a la resistencia requerida, sera necesario arriostrar puntualmente a los tercios (casos 4 y 7) para obtener una resistencia de diseño a flexion mayor. (ver figura N°8);



Fifura N°8: Relacion de momentos de Diseño para PLT entre el valor de la formulacion validada y los valores para la formulacion general con diferentes arriostramientos

6 CONCLUSIONES FINALES.

Este trabajo que constituye la segunda parte de un trabajo de investigacion, pone de manifiesto la aplicación numerica de los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

La aplicación numerica se ejecuto sobre los perfiles ensayados en las dos etapas del trabajo de investigacion.

La validación de la Fórmula del artículo C.3.1.3. Del Reglamento CIRSOC 303-2009 (basado en el Art. I6.2.1. de la Especificación AISI-S100-16 (*North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members*). “*Vigas con el ala traccionada unida en forma fija y continua a un tablero o revestimiento*” en diferentes perfiles C permite aumentar la capacidad a flexión para el estado límite de PLT respecto a la formulación general.

Que la formula sea validada define una optimización de los recursos en la obra, al no necesitarse en muchos casos el arriostramiento puntual para el aumento de

capacidad a PLT, lo cual produce un ahorro de recursos humanos y económicos.

También puede visualizarse que la aplicación de la fórmula es extremadamente simple, y puede ser aplicada por idóneos en la materia para el predimensionado en una oficina comercial.

Si es muy importante que se cumplan las características de fijación (tipo de tornillos, separación y diámetros) utilizados en los ensayos para que sean válidos los resultados obtenidos y que se pueda aplicar dicha formulación.

7 BIBLIOGRAFÍA.

- ⁽¹⁾ Reglamento Argentino de Elementos Estructurales de Acero de Sección Abierta Conformados en Frio. CIRSOC 303- 2009
- ⁽²⁾ Ejemplos de Aplicación del Reglamento Argentino de Elementos Estructurales de Acero de Sección Abierta Conformados en Frio. Ing. Gabriel Troglia. Ing. Gustavo Darin. Ing. Daniel Troglia. . CIRSOC 303- 2009
- ⁽³⁾ Libro Estructuras de Acero, con tubos y secciones abiertas conformadas en Frio. Proyecto por Estados Límites. Autor: Ing. Gabriel Troglia. Tomos 1 y 2. 2010.

8 AGRADECIMIENTOS.

Este proyecto de investigación pudo realizarse gracias al importante aporte de materiales y mano de obra de las siguientes entidades y personas:

- DONADIO S.A., por los materiales
- LABORATORIO DE ESTRUCTURAS: el Laboratorio de Estructuras dependiente del Departamento de Estructuras de la FCEFyN proporcionó el espacio necesario para el ensayo, parte de la mano de obra para la realización de estos, colocación de dispositivos de medición tipo comparadores, uso del puente grúa, etc.
- ING. PEDRO COVASSI: Ing. Pedro Covassi proporcionó los dispositivos y tecnología denominados clinómetros que fueron usados para medir el giro de la sección de los perfiles en el centro del vano.