

# 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 1: ESTUDIO EXPERIMENTAL

Fragueiro, Agustín<sup>1</sup>, Crespi, Lucas Emanuel<sup>1</sup>; Narciso Novillo<sup>1</sup>, José P. Angulo Bocco<sup>1</sup>

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

[afragueiro@unc.edu.ar](mailto:afragueiro@unc.edu.ar), [lcrespi@unc.edu.ar](mailto:lcrespi@unc.edu.ar), [narciso.novillo@unc.edu.ar](mailto:narciso.novillo@unc.edu.ar)  
[joseangulo@unc.edu.ar](mailto:joseangulo@unc.edu.ar)

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es ampliar y ratificar el trabajo 014 ya presentado en la 26JAIE respecto a corroborar la validez 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 perfiles utilizados como correas sobre techos y cerramientos laterales en nuestro medio. Continuando con el trabajo de investigación anterior relacionado a la aplicabilidad de dicha formulación se ensayaron perfiles de correa (SCF) de mayor tamaño (C140 y C160) y se estudió la incidencia de la relación  $I_x/I_y$  en los resultados y especialmente en la degradación de la rigidez a flexión que se convierte en una "rigidez efectiva" menor que la teórica debido a la interacción entre la flexión alrededor del eje fuerte y el giro de la sección que genera el pandeo lateral torsional haciendo participar la flexión alrededor del eje de menor inercia. Se realizaron 9 ensayos en escala natural y se obtuvieron las conclusiones correspondientes.

## ABSTRACT

*The objective of this work is to expand and validate the work 014 previously presented at the 26th JAIE regarding corroborating the validity of the Formula in article C.3.1.3. of CIRSOC Regulation 303-2009 based on Art. I6.2.1. of Specification AISI-S100-16 (North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members). "Flexural members having one flange through-fastened to deck or sheathing" in profiles used as purlins on roofs and side enclosures in our environment. Continuing with the previous research work related to the applicability of said formulation, larger purlin profiles (C140 and C160) were tested and the impact of the  $I_x/I_y$  ratio on the results was studied, especially on the degradation of bending stiffness, which becomes a lower "effective stiffness" than the theoretical one due to the interaction between bending around the major axis and the rotation of the section that generates lateral torsional buckling involving bending around the minor axis of inertia. 9 tests were conducted at full scale, and the corresponding conclusions were obtained.*

Organiza:

## A. INTRODUCCION

En la convocatoria SECyT 2018-2019 se trabajó en el proyecto Estimular denominado: “*Estudio de la resistencia al pandeo lateral torsional de perfiles de sección abierta conformados en frío considerando la influencia del tipo de conexión al cerramiento y a la estructura principal.*” (33720180100096CB). En particular se analizó la situación de los paneles de techo y laterales de cerramiento compuestos por la chapa de cerramiento y las correas atornilladas a ella en donde, por la succión del viento, la flexión de la correa se produce comprimiendo su ala libre no arriostrada (ver Figura 1).

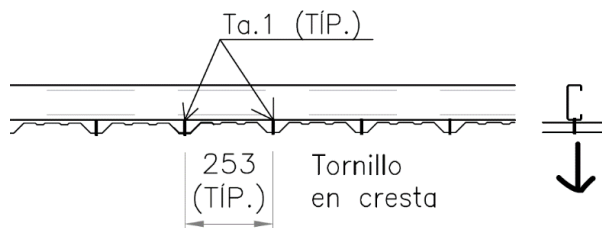


Figura 1. Tipo de fijación y carga analizado.

El ala traccionada es la que queda conectada en forma intermitente al cerramiento por medio de tornillos autorroscantes colocado en cada cresta de la chapa de cerramiento.

En lo relativo a resistencia, con los ensayos del período 2018-2019, se pudo validar, para correas C100 y C120, la expresión de la Tabla I6.2.1-1 del Momento Crítico Nominal Resistente que, para esta situación particular, estipula la especificación norteamericana AISI-S100-16 (*North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members*). Esta especificación AISI es el texto usado como base para el desarrollo del Reglamento Argentino CIRSOC 303-2009 “*Reglamento Argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío*”. La Tabla I6.2.1-1 se muestra a continuación:

| 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 1 – (I6.2.1-1) AISI-S100-16. C or Z Section R Values.

Para esta configuración y con secciones efectivas a flexión, es decir, sin posibilidad

Organiza:

de pandeo local, el Reglamento CIRSOC 303-2009 especifica como Momento Crítico Nominal resistente al siguiente:

$$M_n = R S_e F_y (10)^{-3} \quad (1)$$

$$\phi_b = 0,90$$

Con  $S_e$  y  $F_y$  definidos en Artículo C.3.1.1 del Reglamento CIRSOC 303-2009.

Entre los diferentes estados límites últimos que puede experimentar una barra de sección conformada en frío de sección abierta (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 esta, el PLT suele ser el modo de falla que arroja las resistencias de diseño más reducidas cuando el ala comprimida queda libre de arriostramiento. En la Figura 2 se muestra el dispositivo de ensayo empleado.

Posteriormente, en la convocatoria SECyT 2020-2022 se trabajó en el proyecto Estimular denominado: “*Determinación de la incidencia de la relación  $I_x/I_y$  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.*” Código: 33720190300010CB

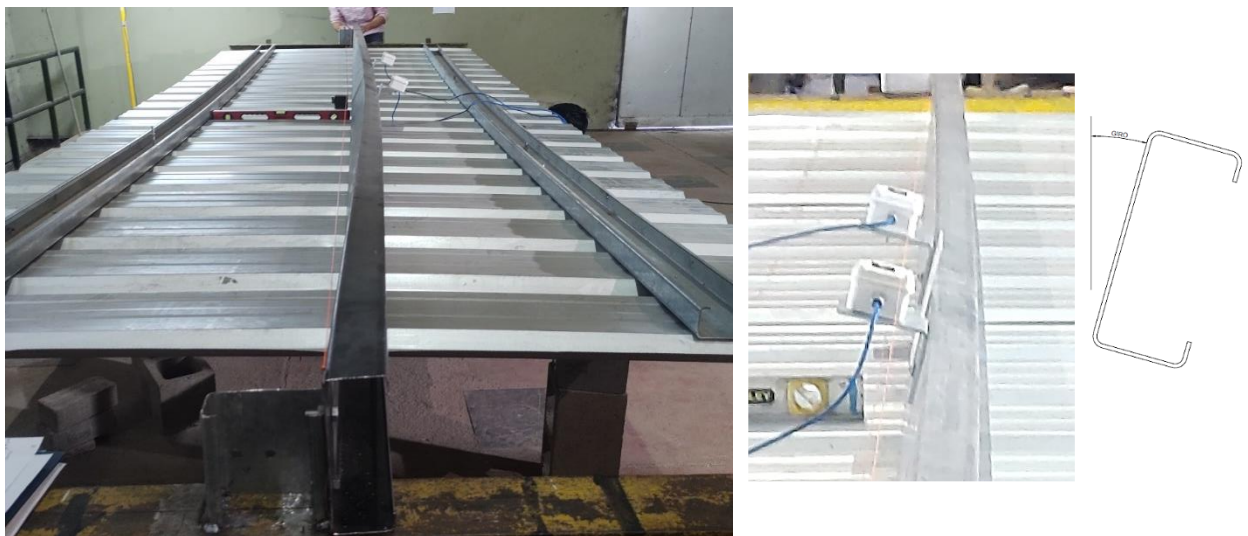


Figura 2. Dispositivo de ensayo 2020-2022. Clinómetros instalados. Giro medido

El objetivo de este trabajo complementario al 2018-2019 fue verificar nuevamente la validez de la Fórmula del artículo C.3.1.3. del Reglamento CIRSOC 303-2009 para las condiciones de uso habituales en nuestro medio pero esta vez para perfiles correa (SCF) de mayor tamaño (C140 y C160) e indagar sobre la incidencia de la relación  $I_x/I_y$  en los resultados y especialmente en la degradación de la rigidez a flexión que se convierte en una “rigidez efectiva” menor que la teórica debido a la interacción de la flexión alrededor del eje fuerte y el giro, y consecuente flexión alrededor del eje de menor inercia, que genera el pandeo lateral torsional.

Organiza:

## B. MATERIALES

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

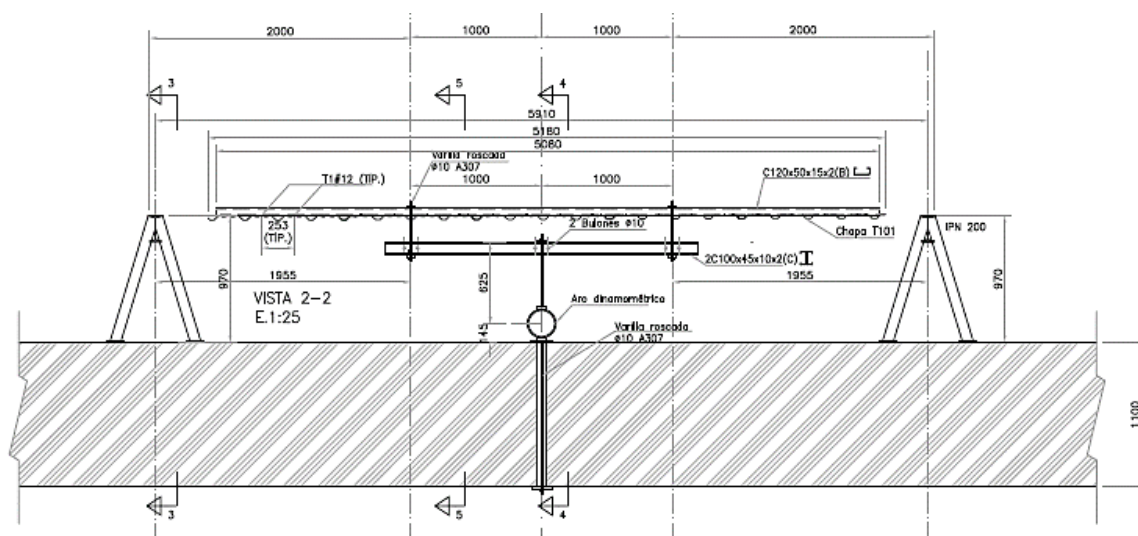
c. Tornillos autorroscantes autoperforantes N°12 cabeza hexagonal con arandela forjada en la cabeza y arandela de neoprene.

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

## C. DISPOSITIVO DE ENSAYO

En la Figura 3 y 4 se muestra el dispositivo del ensayo, el cual se dispuso sobre dos caballetes en el que se colocaron perfiles soldados con agujeros para alojar los bulones que materializan el apoyo tipo “horquilla” de las correas.

Dos aros dinamométricos anclados al piso (sobre la losa reactiva del Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN de la UNC) sirven para fijar varillas roscadas. Luego con un sistema de ajuste a rosca se generaba el tiro vertical descendente sobre los perfiles auxiliares distribuidores, los cuales en sus extremos tenían su conexión con el conjunto perfiles-chapa, transmitiendo así la carga a los perfiles laterales fijados a la chapa, tal como se muestra en la Figura 4.



Organiza:

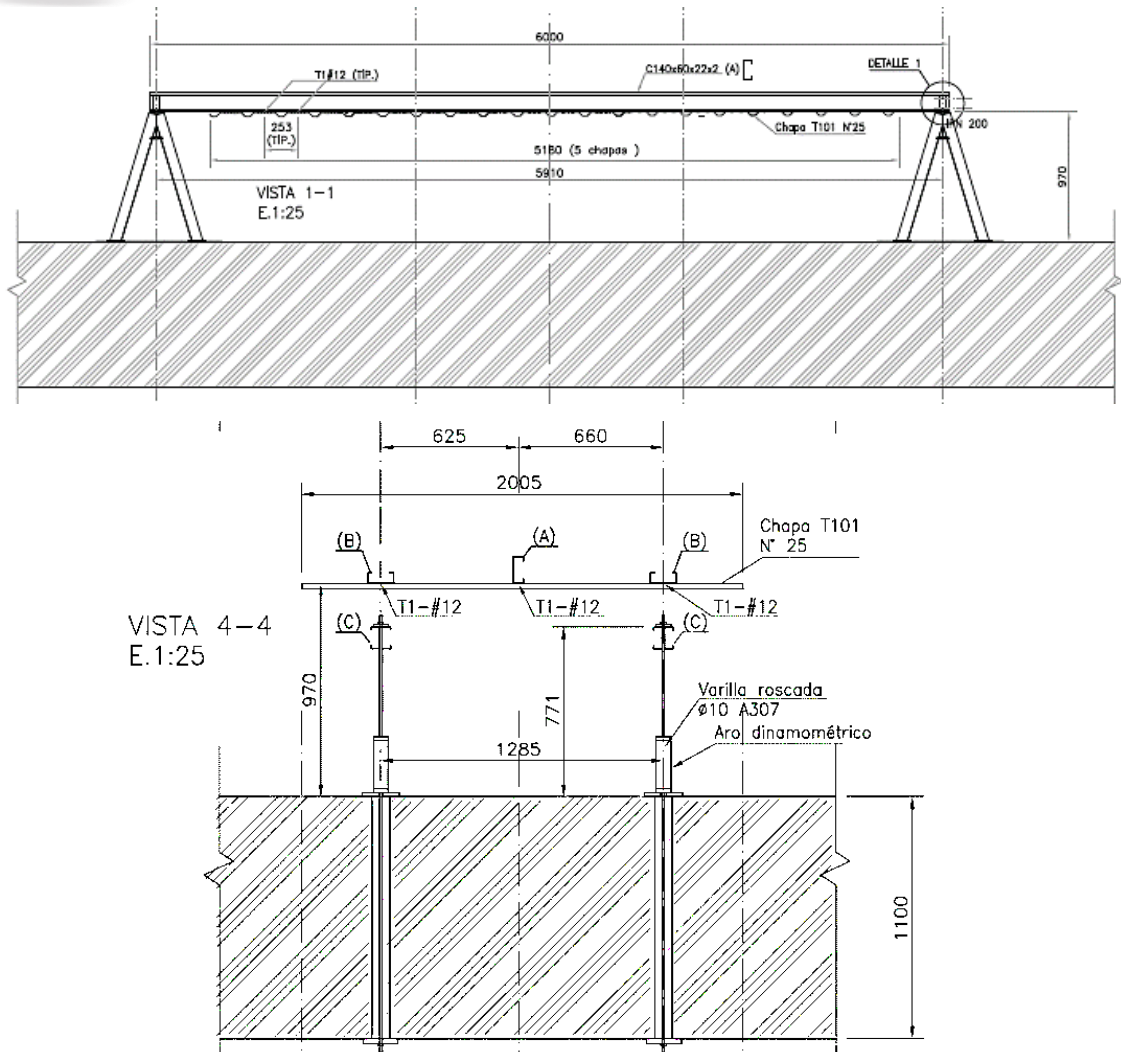


Figura 3. Planos generales del dispositivo de ensayo.



Figura 4. Imagen del proceso de carga a través de aros dinamométricos.

Organiza:

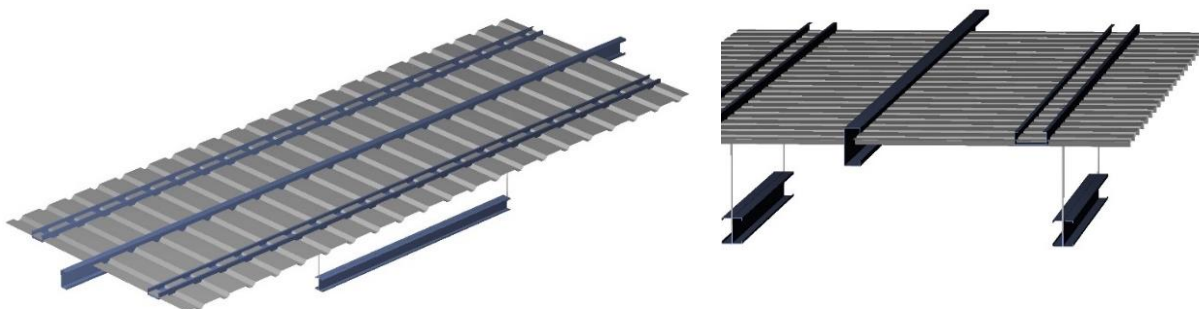
Los diversos tipos de ensayos realizados se definieron en función de la vinculación chapa-correa adoptada, que se muestra en Figura 5.



*Figura 5. Imagen de la chapa en contacto con perfil por medio de tornillos y chapa separada de perfil.*

Con el objeto de evidenciar el progreso de Pandeo Lateral Torsional (PLT) desde el estado inicial de carga, hasta su valor máximo, y luego durante el proceso de descarga y hasta la finalización del ensayo, se propusieron diferentes saltos de carga donde se realizaron inspecciones visuales y mediciones de giros y descensos en el centro de la correa en estudio. Los giros de la sección se registraron mediante dos clinómetros, tomando como resultado el promedio de ellos (a la milésima de grado), mientras que los descensos se observaron con un comparador digital con precisión centesimal de milímetros.

El procedimiento del ensayo indicado se realizó en un total de siete muestras, tres para el módulo con correas C140 y cuatro para el módulo con correas C160. Paralelamente a los ensayos materiales se realizó un modelo en el software de análisis estructural RAM Elements (Bentley) a fin de obtener el comportamiento teórico elástico del perfil sin la incidencia del PLT. Los modelos son muy ajustados al dispositivo de ensayo de modo que los resultados son oponibles a los resultados de los ensayos. En la Figura 6 se muestran imágenes generales del modelo desarrollado.



*Figura 6. Imágenes del modelo realizado en RAM Elements.*

## D. RESULTADOS

En las Figuras 7 a 11 se presentan los resultados obtenidos tanto para flechas (deflexión vertical) como para giros, para cada correa C140 y C160, y el tipo de ensayo (chapa ajustada contra la correa por tornillos y chapa tomada con tornillos, pero separada de la correa).

Módulos con correa C140:

- La carga fue tal que generó momentos externos superiores a 0.70M<sub>y</sub> en C140-1.

Organiza:

- El colapso de la viga por PLT no se verificó como un hecho súbito, sino que se manifestó progresivamente desde el inicio de carga.
- El proceso de carga se interrumpió al alcanzar valores de “grandes flechas” en el centro de la viga, habiendo llegado a relaciones  $f/L \approx 1/70$  para C140-1 y  $f/L \approx 1/130$  en C140-2.
- El giro de la sección central alcanzó valores de hasta  $\approx 15^\circ$  para C140-1 y C140-3.
- El proceso de descarga demuestra que no experimenta deformaciones permanentes.

#### Módulos con correa C160:

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

#### a. Curva de perfiles C140

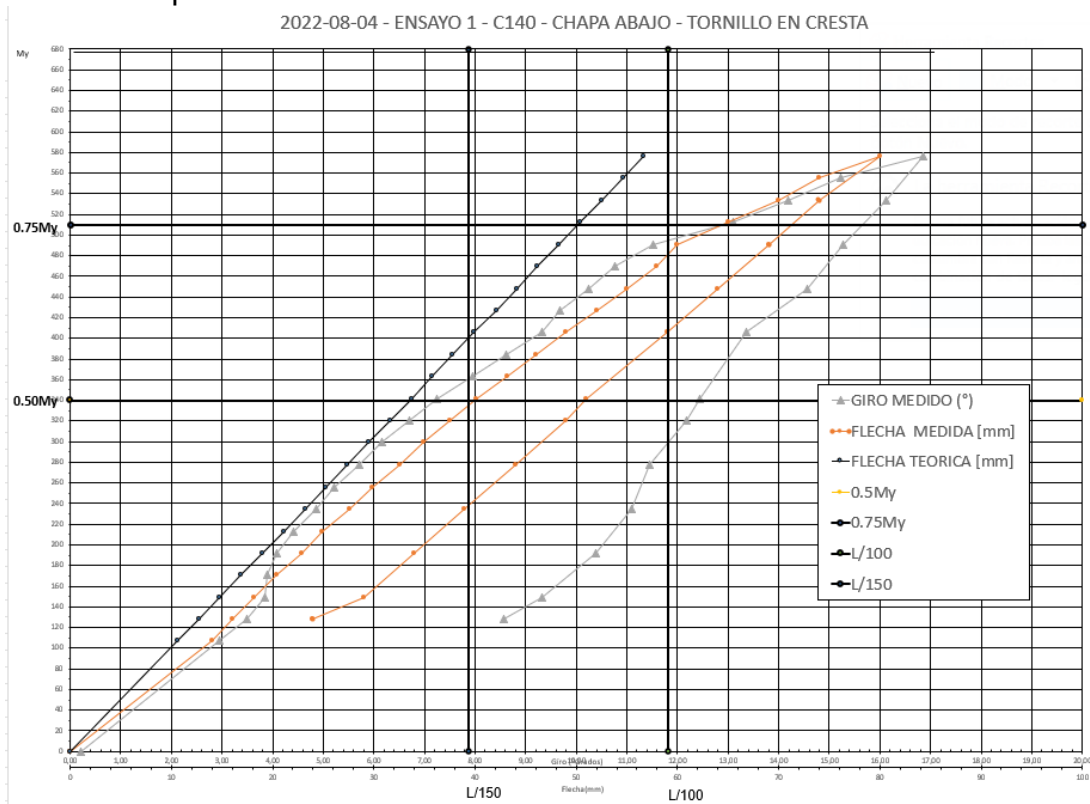


Figura 7. Curvas carga vs. flecha/giro en sección central de correa C140-1.

Organiza:

2022-09-07 - ENSAYO 2 - C140 - CHAPA ABAJO

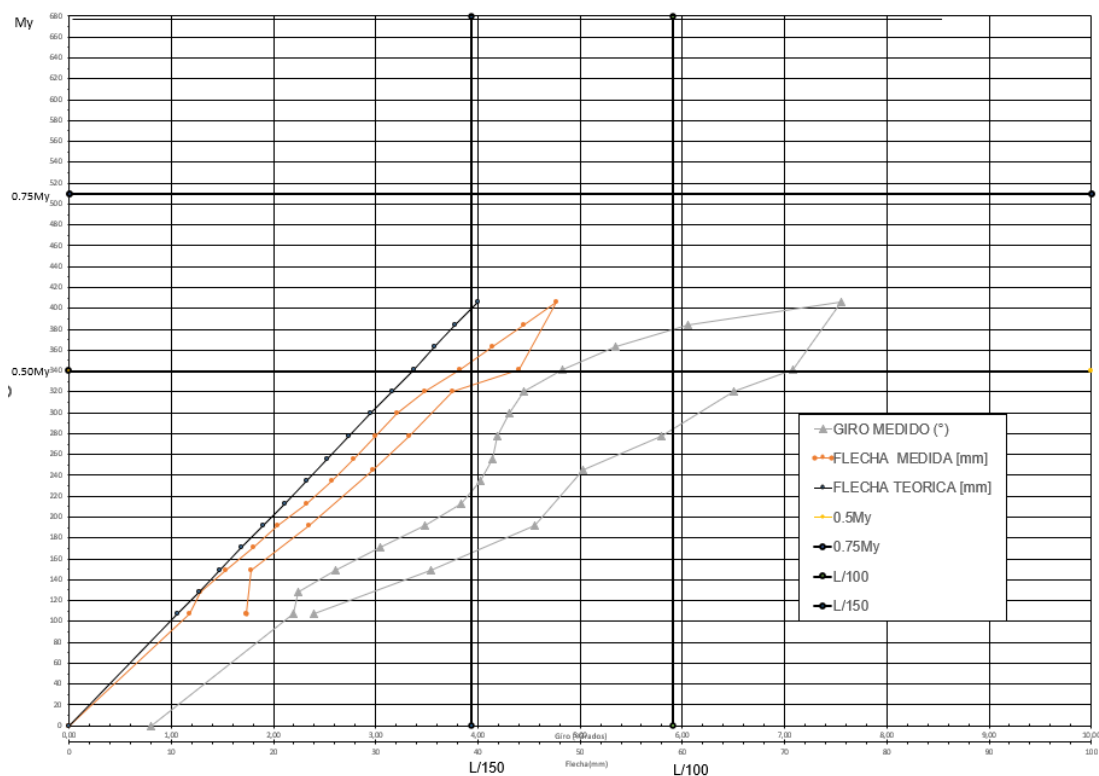


Figura 8. Curvas carga vs. flecha/giro en sección central de correa C140-2.

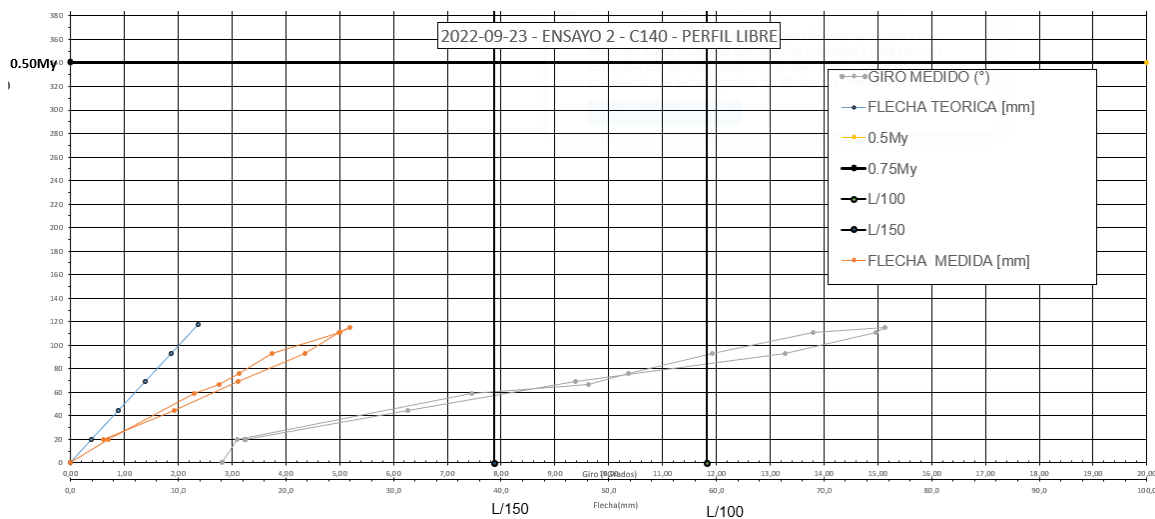


Figura 9. Curvas carga vs. flecha/giro en sección central de correa con chapa separada de perfil, pero conectada por tornillo C140-3.

Organiza:

## b. Curvas de perfiles C160

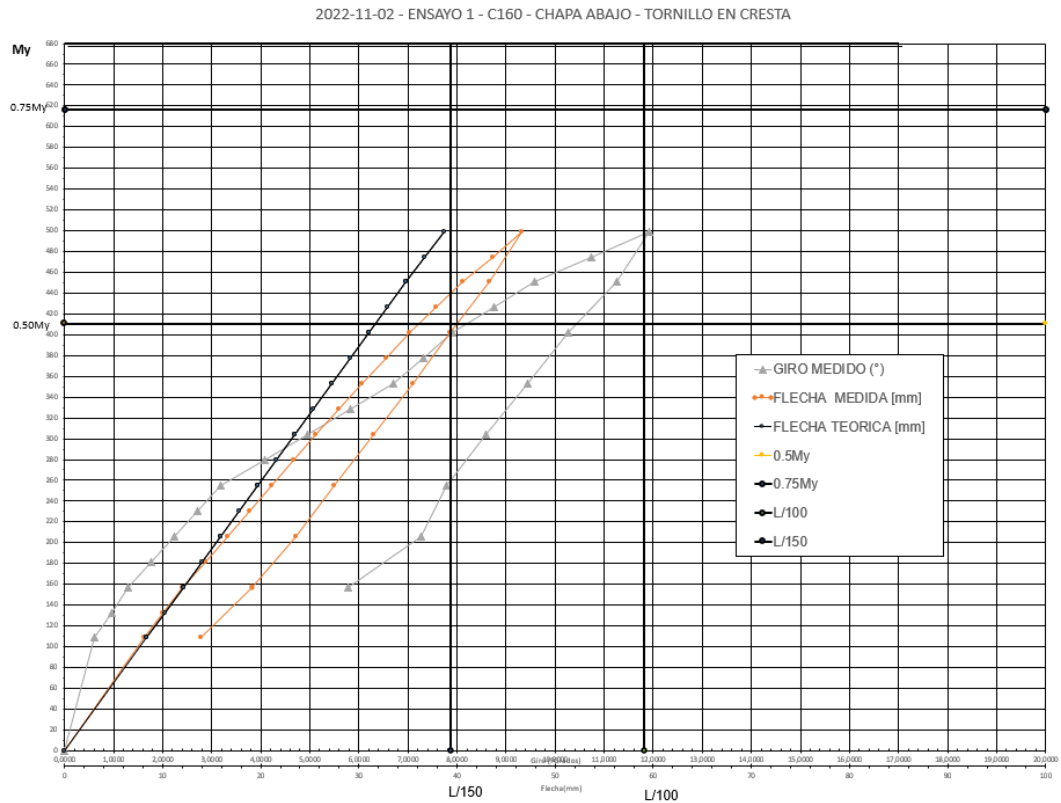


Figura 10. Curvas carga vs. flecha/giro de sección central de correa C160-1.

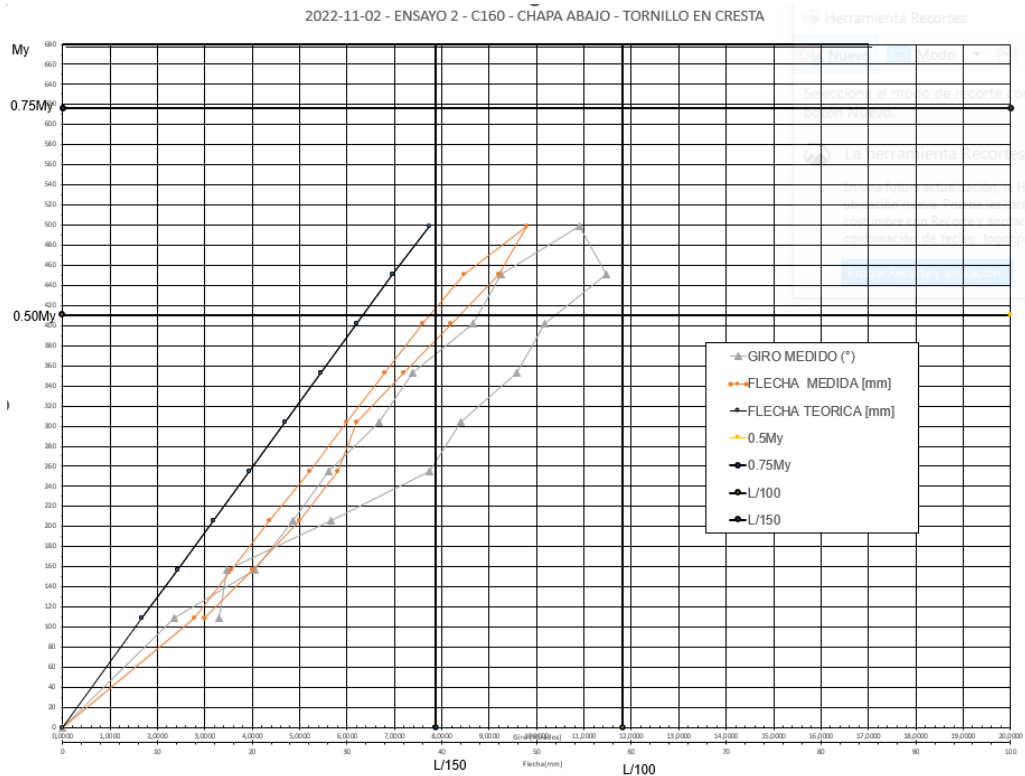


Figura 11. Curvas carga vs. flecha/giro de sección central de correa C160-2.

Organiza:

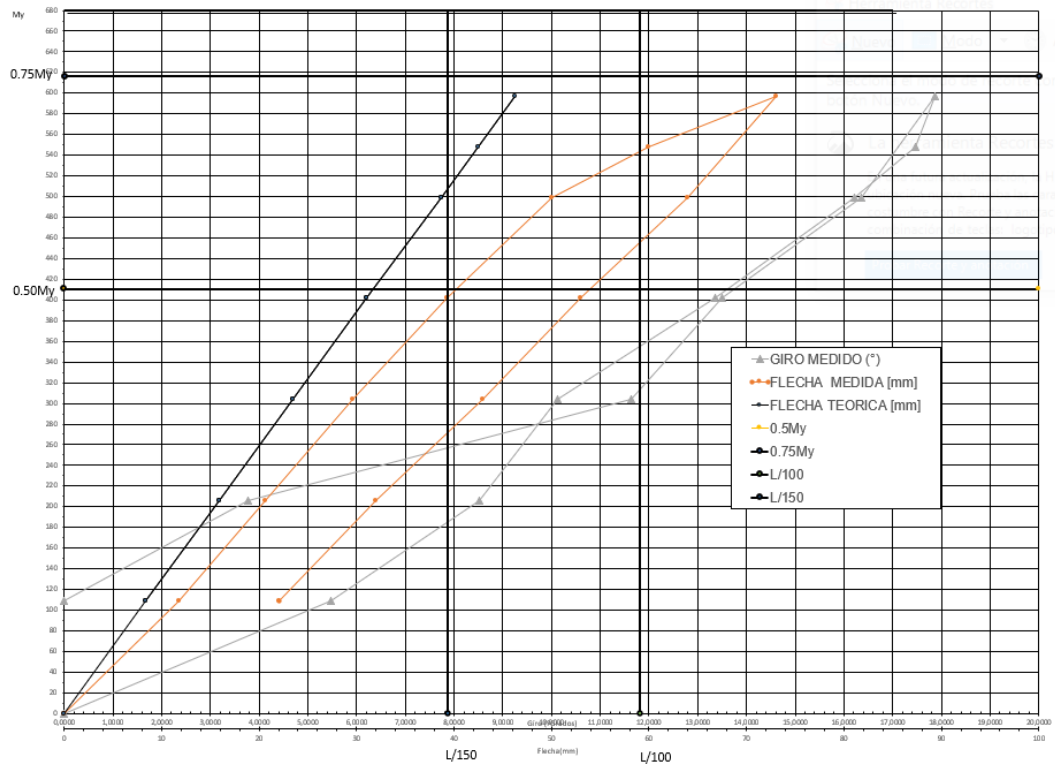


Figura 12. Curvas carga vs. flecha/giro de sección central de correa C160-3.

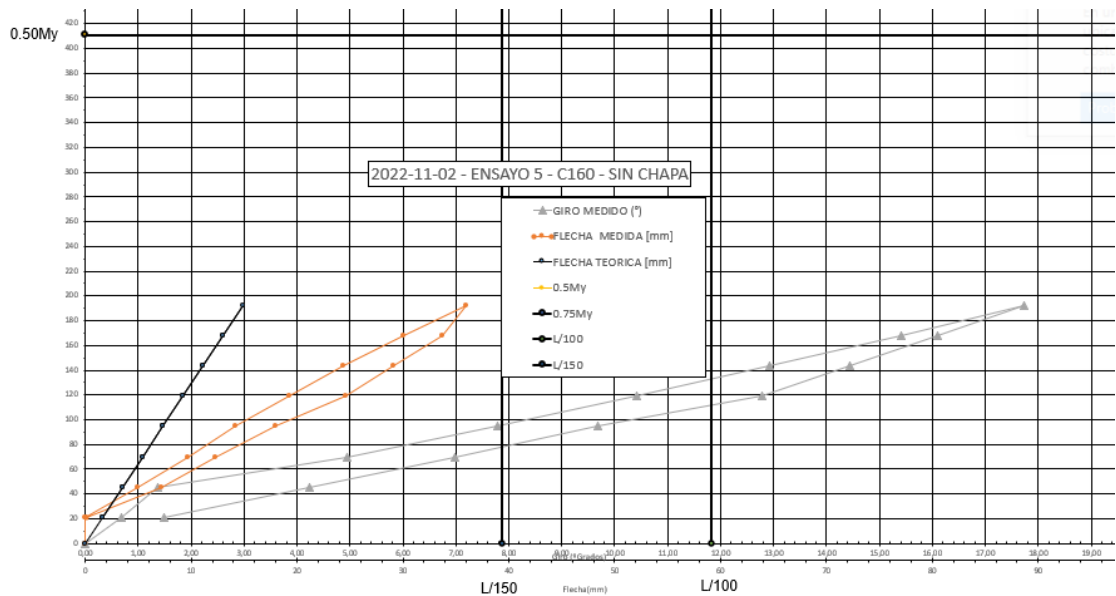


Figura 13. Curvas carga vs. flecha/giro de sección central de correa con chapa separada de perfil, pero conectada por tornillo C160- 5.

Puede observarse en los gráficos de los ensayos como, al progresar la carga, la curva de deflexión de la correa se aleja de la teórica. Este comportamiento observado igualmente en los ensayos del proyecto de investigación 2018-2019, se explica por la incidencia del giro de la sección, manifestándose un esquema típico de pandeo lateral torsional. En particular notar el Ensayo 5 de la C160 en la que no

tiene vinculación con chapa y se observa un comportamiento muy deficiente en flexión por la misma razón expresada anteriormente. Ese ensayo no se considera en el siguiente análisis.

Con la finalidad de tratar de determinar si en la reducción de la rigidez teórica a flexión de las barras ensayadas, tanto en el proyecto 2018-2019 como en 2020-2022, había alguna incidencia de la relación  $I_x/I_y$  de la sección, determinamos tal reducción para los diferentes casos y sintetizamos los resultados en el siguiente cuadro:

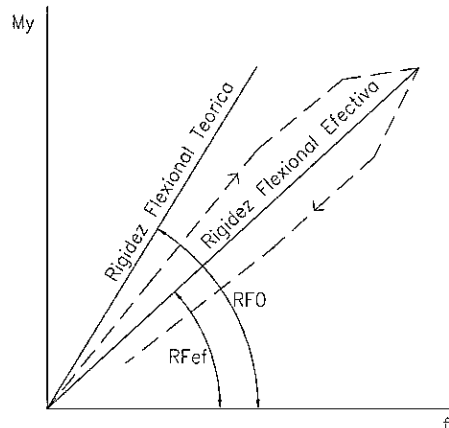
|      | $I_x/I_y$ | RF0   | RFef  | $\gamma$ |
|------|-----------|-------|-------|----------|
| C100 | 6,40      | 1,23  | 1,08  | 0,87     |
| C120 | 6,25      | 2,17  | 1,57  | 0,72     |
| C140 | 5,83      | 10,10 | 7,20  | 0,71     |
| C160 | 7,62      | 12,79 | 10,60 | 0,76     |

Donde:

$\gamma$  = Coeficiente de reducción de rigidez flexional por efecto del PLT.

$\gamma = R_{Fef}/R_{F0}$  \*

\*Solo para el caso de Perfil fijado a chapa



## E. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los siete ensayos de este Proyecto de Investigación nos permitieron confirmar que este nuevo dispositivo de ensayo es apropiado a los fines de obtener datos experimentales. Se deducen importantes conclusiones relativas a la resistencia y rigidez de este conjunto estructural de uso habitual en las construcciones metálicas de nuestro medio.

Las deformaciones iniciales de la barra, propias de su proceso de fabricación y tal como se consiguen en plaza para la construcción, afectan significativamente los giros iniciales y finales de las barras ensayadas. Estas mismas deformaciones iniciales hacen que el proceso de PLT comienza desde el momento inicial de carga y no se manifiesta como una falla súbita a partir de un determinado Momento nominal resistente ( $M_n$ ) definido por las fórmulas. Aunque la falla no se presenta como una instancia bien definida de colapso, se puede apreciar que se manifiesta incidiendo en la rigidez real a flexión de la barra. En efecto, los resultados permiten concluir que la "rigidez flexional" real ( $R_{Fef}$ ) de los perfiles es menor que la teórica, aunque con una divergencia diferente en cada perfil.

La mayor deformabilidad a flexión se explica por la interacción de la deformada por flexión recta de la barra alrededor de su eje de mayor inercia con el giro de la sección por PLT el cual se manifiesta desde los primeros escalones de carga y está claramente influido por el tipo de conexión de la chapa a la correa tal como puede verse en los gráficos. Es necesario destacar que los ensayos consideran el efecto instantáneo de la vinculación de los tornillos que unen chapa-correa. No considera

Organiza:

posible juego o aflojamiento que pudiera generarse con el tiempo por dilatación u otra causa.

Los resultados hallados muestran nuevamente la fundamental incidencia del tipo de vinculación chapas-correas en el giro de la sección en el centro de la viga a medida que se incrementa la carga y por lo tanto su incidencia en el estado límite de PLT en la situación de ala traccionada por flexión unida en forma intermitente con tornillos autorroscantes al cerramiento y estando el ala comprimida libre. En esta vinculación tornillo-chapa se producen esfuerzos locales muy importantes tal que la chapa de cubierta se abolla localmente para impedir el giro de la sección. Esto es una ventaja en el proceso de carga, pero en el proceso de descarga se convierte en un obstáculo para que el perfil vuelva a su posición original debido a la presencia de la abolladura localizada en la zona de los tornillos.

En lo relativo a resistencia, con estos ensayos se verifica que también es posible validar y calibrar para correas C140 y C160, la expresión de la Tabla I6.2.1-1 del Momento Crítico Nominal Resistente como se había demostrados para las correas C100 y C120 en el Proyecto del periodo 2018-2019. Es decir:

#### **Momento Crítico Nominal resistente por PLT. CIRSOC 303-2009- C.3.1.3-1**

$$M_n = R S_e F_y (10)^{-3}$$
$$\phi_b = 0,90$$

$S_e$  y  $F_y$  definidos en Artículo C.3.1.1 del Reglamento CIRSOC 303-2009. En este caso son secciones efectivas a flexión, es decir, sin posibilidad de pandeo local.

Los resultados de los ensayos demuestran nuevamente que la fórmula C.3.1.3-1 del Reglamento CIRSOC 303-2009 se pueden aplicar en nuestro medio para correas no continuas, aunque no se cumplan algunas condiciones enumeradas en la especificación AISI -2016 tales como:

(3)  $60 \leq \text{altura} / \text{espesor} \leq 170$ .

(4)  $2,8 \leq \text{altura} / \text{ancho del ala} \leq 4,5$ .

Se puede constatar que el dimensionado de ambas correas por medio de la expresión C.3.1.3-1 habría arrojado valores de “ $M_n$ ” similares a los alcanzados en los ensayos con falla por PLT y se comprueba también que para estas correas el dimensionado quedaría definido por las deformaciones ya que si con solicitaciones últimas pretendiéramos aprovechar hasta  $0.75M_y$  según el caso analizado, y teniendo en cuenta la RIGIDEZ FLEXIONAL EFECTIVA ( $R_{Fef}$ ) las deformaciones en servicio serían del orden de  $(1/90) / 1.5^{**} = 1 / 135$  que es superior al límite admisible más permisivo para cubiertas flexibles. Las cargas equivalentes uniformemente distribuida para alcanzar  $0.75M_y$  en cada perfil sería:

Organiza:

Me = Momento flector externo alcanzado en ensayo

\*Luz de cálculo C100 y C120: 531 cm

\*Luz de cálculo C140 y C160: 591 cm

\*\* Factor de conversión de deflexión en estado ultimo a deflexión en servicio.

| Perfil (*)<br>(mm) | Flecha teórica<br>(mm) | Flecha real | Me/My | Q <sub>equiv</sub><br>(kg/m) |
|--------------------|------------------------|-------------|-------|------------------------------|
| C160x60x20x2       | 44.8 (L/131)           | 72 mm(L/81) | 0.75  | 141                          |
| C140x60x20x2       | 51.2 (L/115)           | 62 mm(L/94) | 0.75  | 118                          |
| C101x45x11x2       | 57.4 (L/93)            | 72 mm(L/73) | 0.75  | 71.5                         |
| C120x52x16x2       | 42.0 (L/126)           | 57 mm(L/93) | 0.61  | 86.2                         |

Finalmente, y como otra conclusión del presente estudio, se pudo responder a uno de los principales interrogantes que presentaba a priori este trabajo: la hipotética incidencia de la relación  $I_x/I_y$  no se manifiesta como un factor determinante en el comportamiento real de la barra vinculada a la chapa para los cuatro tipos de perfiles analizados.

## F. AGRADECIMIENTOS

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

- DONADIO S.A.: que proveyó gratuitamente los perfiles C140.
- 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.
- Dr. ING. PEDRO COVASSI: Dr. Ing. Pedro Covassi proporcionó los dispositivos y tecnología denominados clinómetros que fueron usados por él mismo para medir el giro de la sección de los perfiles en el centro del vano.

Organiza: