



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA POR PANDEO LATERAL TORSIONAL DE PERFILES DE SECCIÓN ABIERTA CONFORMADAS EN FRÍO CON ALA TRACCIONADA FIJADA AL CERRAMIENTO

Fragueiro, Agustín¹, Crespi, Lucas Emanuel¹; Daniel O. Troglia¹; José P. Angulo Bocco¹
¹Ing. Civil, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Universidad Nacional de Córdoba

afrageiro@unc.edu.ar, lcrespi@unc.edu.ar, daniel.osvaldo.troglia@unc.edu.ar,
joseangulo@unc.edu.ar

RESUMEN

Los cerramientos de una gran variedad de construcciones metálicas se realizan mediante elementos de superficie de chapa conformada unidas a barras (correas) de sección abierta conformadas en frío formando un conjunto con capacidad para resistir las acciones gravitatorias y de viento perpendicular a su superficie. Uno de los Estados Límites Últimos que pueden sufrir las barras (correas) del tipo Perfiles de Sección Abierta Conformadas en Frío (PSACF) es el pandeo lateral torsional para el caso en que la flexión y la fijación al cerramiento definen la situación identificada en el Reglamento Cirsoc 303, en el Art. "C.3.1.3 Vigas con el ala traccionada unida en forma fija y continua a un tablero o revestimiento". Esta situación se da normalmente para el caso de succión de viento sobre techos y cerramientos laterales y constituye el ELU que suele controlar el dimensionado de la barra. La aplicación de la fórmula de dimensionado (C.3.1.3-1) que proporciona el Cirsoc 303 y que a su vez es tomada del Art. I6.2.1. de la Especificación AISI-S100-16 (*North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members*) es válida en la medida que se satisfagan un conjunto de 15 condiciones muchas de las cuales no se dan en nuestro medio. Para verificar la aplicabilidad de la fórmula de diseño a nuestro medio y en nuestras condiciones se realizaron 13 ensayos en escala natural y se obtuvieron importantes conclusiones.

ABSTRACT

Building envelopes of a wide variety of steel constructions are made of the typical solution of sheathing steel surface attached to cold formed purlins. These both elements conform a plane with the capacity to resist gravitational and wind loads perpendicular to these surfaces. This is the typical application to roof and side cladding for industrial buildings, warehouses, workshops, offices, etc. One of the Ultimate Limit State (ULS) to design Cold Formed Open Section members is the lateral torsional buckling in the particular case that flexion and the connection purlin-sheathing define the situation identified in the Cirsoc 303 Code, Art. C.3.1.3 like: "Flexural members having one flange trough-fastened to deck or sheathing". This situation normally takes place in the case of wind suction on roofs and lateral closings and it is the ULS that usually defines the design of the purlin. The application of the design formula (C.3.1.3-1) provided by Cirsoc 303, which is in turn taken from AISI-S100-16-Art. I6.2.1., is valid for roof and wall systems meeting 15 conditions given in the United States. To verify the applicability of that formula to our country and under our conditions, 13 tests at real size were done and important conclusions have been drawn.



A. INTRODUCCION

Entre los diferentes estados límites últimos que puede experimentar 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 comprimiendo 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 descritas en el primer párrafo, la especificación original ofrece una fórmula muy simple de aplicar para Resistencia Nominal a flexión:

$$\begin{aligned} M_n &= R S_e F_y (10)^{-3} \\ \phi_b &= 0,90 \end{aligned} \quad \boxed{\text{(C.3.1.3-1) – Cirsoc 303}}$$

pero limita su validez a una serie de condiciones, algunas de las cuales no se cumplen en nuestro medio, por lo cual la validez de la ecuación podría no ser general en las condiciones que se construye en Argentina.

El objetivo de este trabajo es verificar mediante ensayos 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 y desarrollar herramientas de evaluación rápida sobre la incidencia de los tipos de apoyos de las correas y de las fijaciones chapa-correa sobre la falla por PLT de secciones abiertas conformadas en frío en la situación de ala comprimida libre y ala traccionada tomada al panel de cerramiento. Siendo una expresión de fácil aplicación puede ahorrar horas de cálculos complejos y será accesible a profesionales no tan especializados en el diseño de estructuras metálicas.

B. MATERIALES

- a. Perfiles conformados en frío con cincado en caliente. Las medidas seccionales fueron relevadas para no tomar las nominales:

- C101,5 x 45 x 10,6 x 2
 - C 120 x 51,7 x 15,5 x 2,1
- Ambos califican como "totalmente efectivos a flexión".

Las características mecánicas del acero 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 $F_y = 270 \text{ MPa}$ y $F_u = 360 \text{ MPa}$.

- 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: $F_y = 380 \text{ MPa}$ y $F_u = 430 \text{ MPa}$
- c. Tornillos autorroscantes autoperforantes N°12 cabeza hexagonal con arandela forjada en la cabeza y arandela de neoprene:



Figura 1. Detalle típico fijación chapa-correa

- d. Bulones para apoyo de las correas de calidad A325N. El agujero superior es holgado para que permita giro en apoyo de la correa.



Figura 2. Esquema del apoyo de correas. Descarga sobre bulones. No tiene contacto con perfil del caballete.



C. DISPOSITIVO DE ENSAYO

Las Figuras 3 y 4 muestran los planos y fotos del dispositivo de ensayo armado:

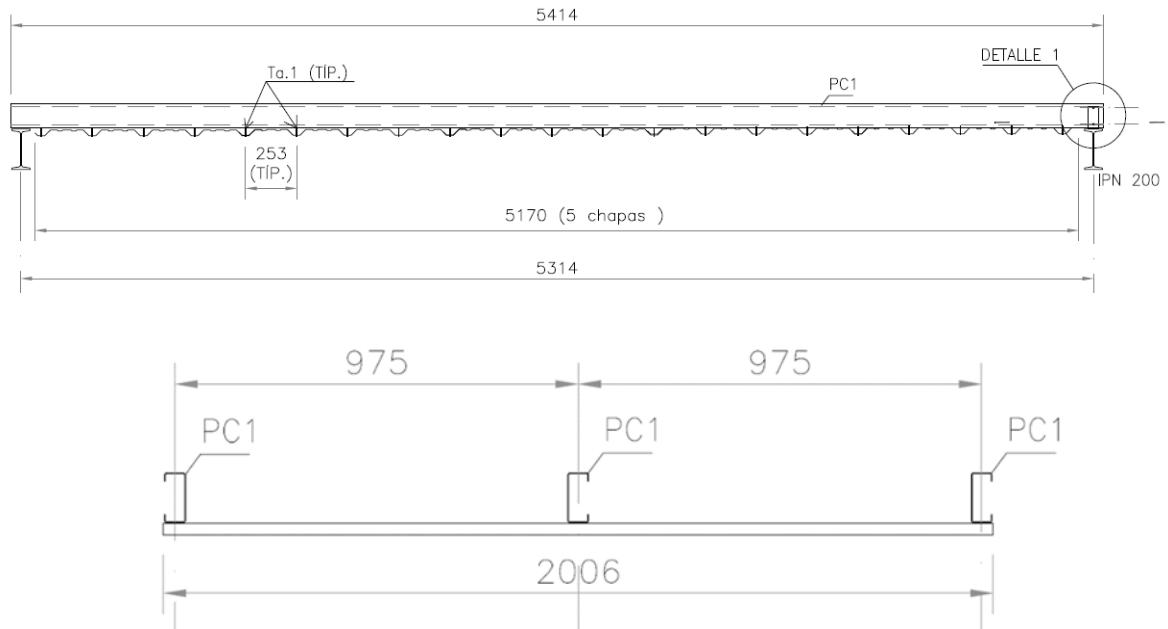


Figura 3. Esquema del dispositivo de ensayo.



Figura 4. Imagen del dispositivo de ensayo

En las Figuras 3 y 4 se muestra el prototipo 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. Se destaca que las mediciones se realizaron en la viga central del panel ya que respeta la restricción provista por la chapa a ambos lados de su ala traccionada. Las cargas de ensayo se materializaron mediante adoquines de hormigón que se aplicaron como una carga uniforme lineal colocados al lado de las correas a fin de evitar la redistribución de cargas que produce la chapa.

Los saltos de carga se logran adicionando el número de adoquines por cada fila colocada. La Figura 5 muestra el prototipo con carga. Además, se generó un punto de apoyo con desplazamiento restringido lateral en el ala comprimida en el centro del tramo a las correas laterales para que no se manifieste su PLT antes que en la correa central que es objeto de este estudio.



Figura 5. Imagen del proceso de carga.

Dado que la evolución de los ensayos mostraba que la rigidez flexional de la viga central disminuía en la medida que aumentaba su giro por PLT, y por lo tanto se producía cierta redistribución de cargas desde el centro a los laterales y viceversa, se compensó cada salto de carga con la regulación de los tornillos que fijan la chapa con las correas laterales. Para ello, en las vigas laterales, se reemplazaron tornillos autorroscantes por tornillos con tuerca y arandela para permitir regular su largo y despegue de la chapa con la correa de modo que la chapa se mantuviera plana y así garantizar que no se producía ninguna redistribución de cargas entre perfiles.

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, como se muestra en la Figura 4, 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).



Figura 4: Imagen del giro de la sección

El procedimiento del estudio indicado se realizó en un total de trece ensayos, seis para el módulo con correas C100 y siete para el módulo con correas C120.

Los diversos tipos de ensayos realizados se definieron en función del lugar adoptado para la colocación de los tornillos a fin de poder evaluar su incidencia en el comportamiento del conjunto de acuerdo con las siguientes alternativas:

- Tornillo en valle de chapa (con uno y dos tornillos por valle) (E1, E1c, E5)
- Tornillo en cresta (E2)
- Chapa separada de correa (E3)
- Chapa en ala comprimida (E4)

NOTA: en el Ensayo 5 (E5) se reemplazan los dos tornillos del apoyo que materializaban un “apoyo horquilla” por un solo bulón central a fin de evaluar la incidencia de una menor restricción y rigidez a giro en el apoyo.

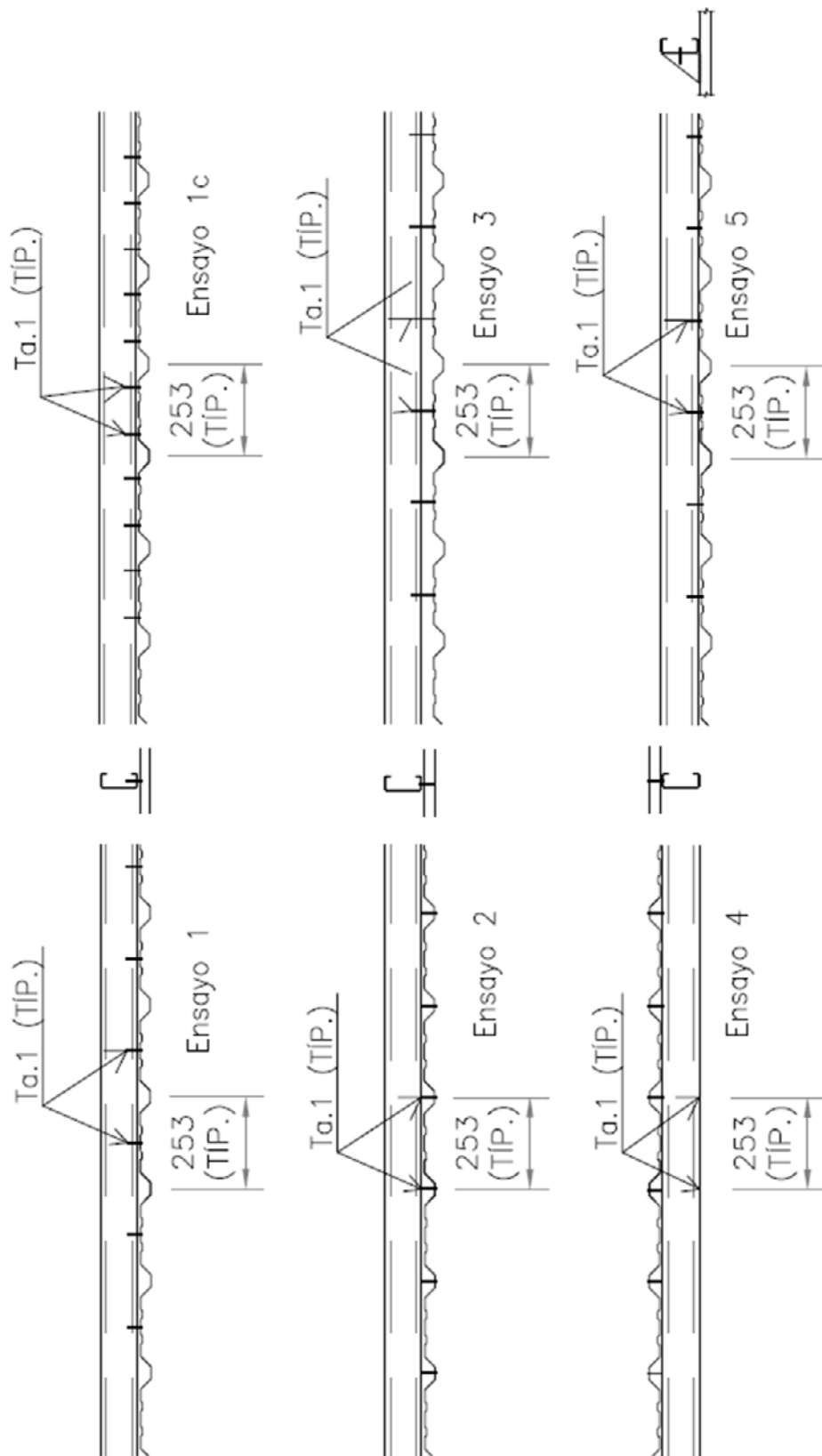


Figura 7. Imagen de la disposición de tornillos y chapa para cada ensayo.



D. RESULTADOS Y GRAFICOS

En las Figuras 8 a 11 se presentan los resultados obtenidos tanto para flechas (deflexión vertical) como para giros medidos en el centro del vano agrupados según el tipo de correa (C100 o C120) y el tipo de ensayo (tornillo en valle de chapa, tornillo en cresta, chapa separada de correa y chapa en ala comprimida). Para poder contrastar las diferencias entre los casos analizados, los resultados fueron condensados en diferentes curvas de acuerdo con el tipo de ensayo, obteniendo los siguientes resultados generales:

Módulos con correa C100:

- 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 $f/L > 1/100$ para una carga de 70 kg/m^2 (0.70kN/m^2).
- El giro de la sección central alcanzó valores de hasta 10° .
- El proceso de descarga demostró que no se registraron deformaciones permanentes.

Módulos con correa C120:

- La carga fue tal que generó momentos externos superiores a $0.60M_y$.
- 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 deflexiones” en el centro de la viga, habiendo llegado hasta relaciones $f/L > 1/100$ para una carga de 90 kg/m^2 (0.90kN/m^2).
- El giro de la sección central alcanzó valores de hasta 16° .
- El proceso de descarga demostró que no se registraron deformaciones permanentes.

a. Gráficos de resultados de perfiles C100

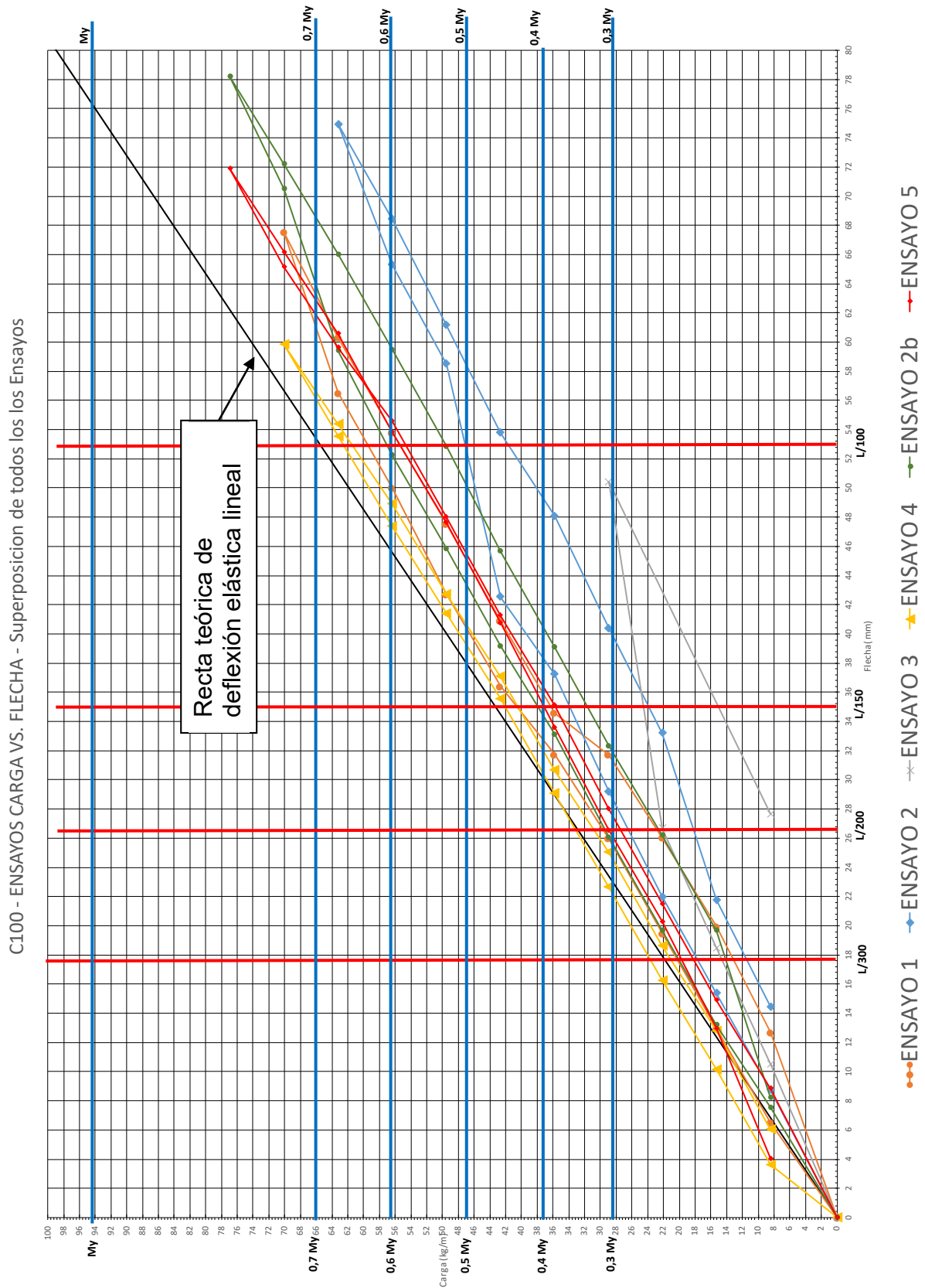


Figura 8. Curvas carga-flecha en sección central de correa C100.
(100 kg/m² = 1 kN/m²)

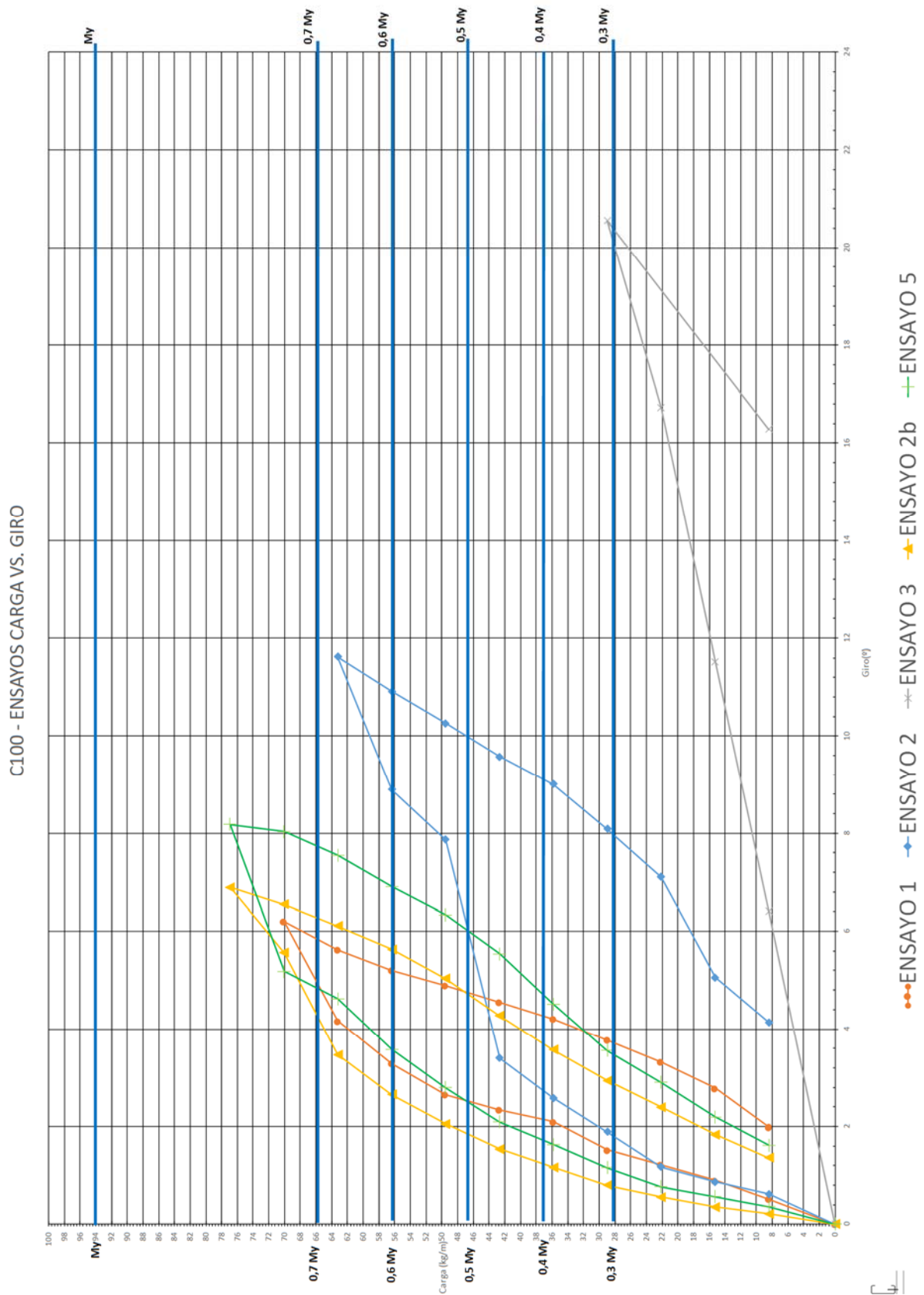


Figura 9. Curvas carga-giro en sección central de correa C100.

b. Gráficos de resultados de perfiles C120

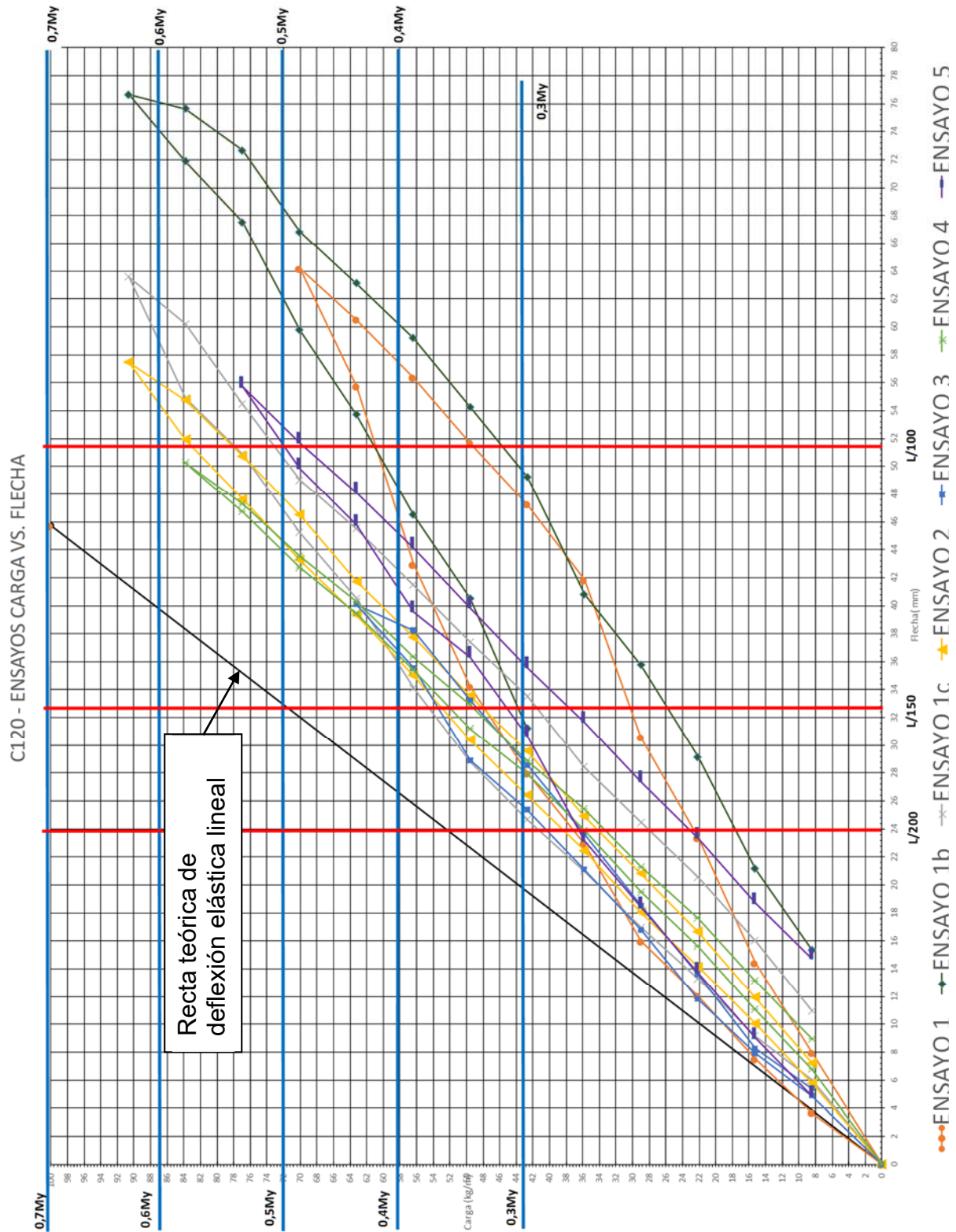


Figura 10. Curvas carga-flecha en sección central de correa C120.
(100 kg/m² = 1 kN/m²)

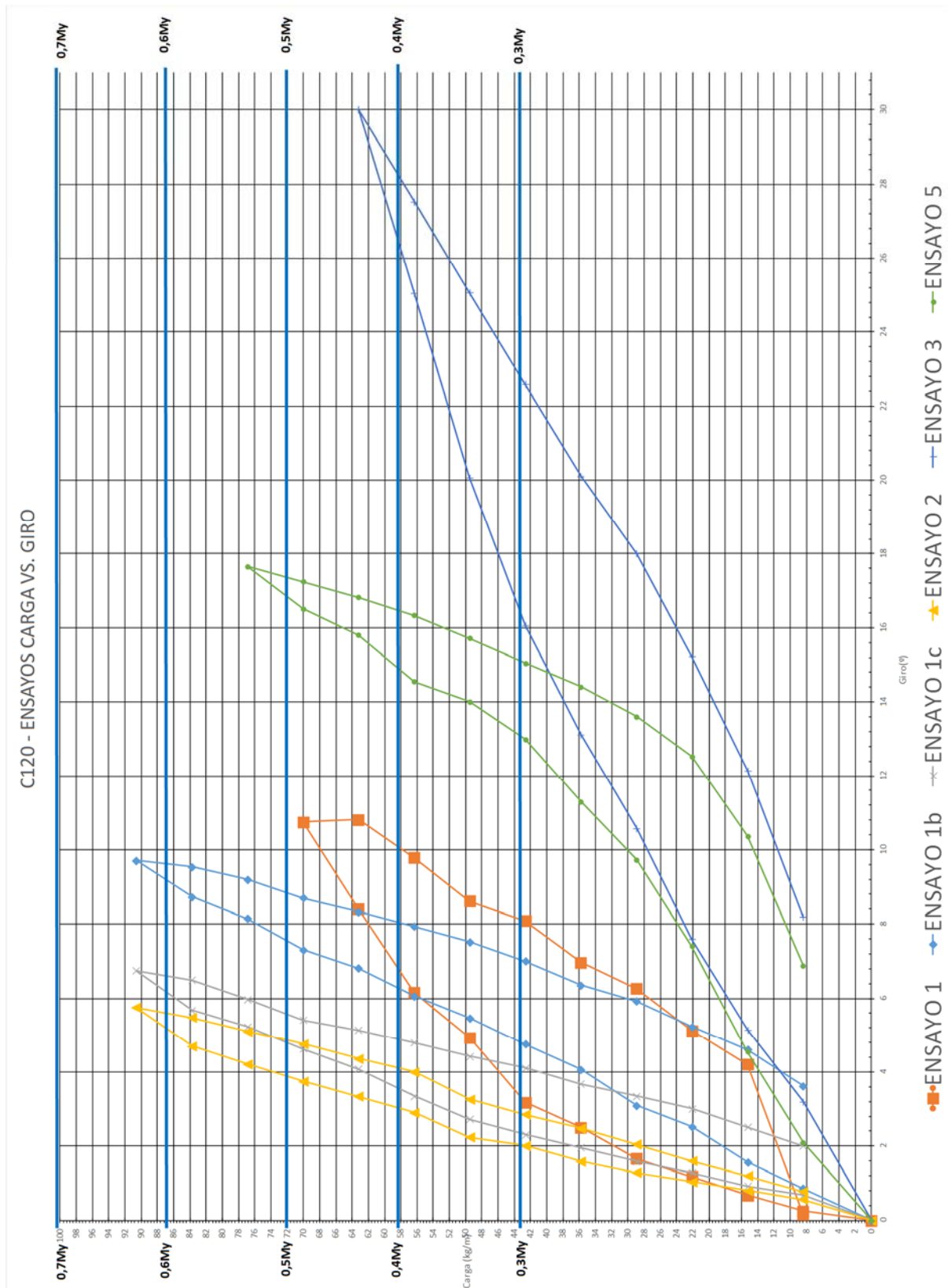


Figura 11. Curvas carga-giro de sección central de correa C120.



E. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los trece ensayos de este trabajo permitieron confirmar que el diseño del dispositivo armado a los fines de obtener datos experimentales fue apropiado, permitiendo verificar las hipótesis planteadas junto a los objetivos generales y particulares propuestos.

El análisis de los resultados obtenidos permitió deducir importantes conclusiones relativas a la resistencia y rigidez de este conjunto estructural de uso habitual en las construcciones metálicas de nuestro medio.

En lo relativo a resistencia y determinación del Momento Crítico Nominal Resistente por PLT (para la configuración definida en los ensayos realizados), se verificó que es posible validar y calibrar (para correas C100 y C120) la fórmula de dimensionado (C.3.1.3-1) que proporciona el Cirsoc 303 y su equivalente de la Tabla I6.2.1-1 de la especificación norteamericana AISI-S100-16 (*North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members*) que es el texto usado como base para el desarrollo de nuestro Reglamento Argentino CIRSOC 303-2009 “Reglamento Argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío”, el cual se cita a continuación:

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

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	

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

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 que la fórmula C.3.1.3-1 del Reglamento CIRSOC 303-2009 se puede aplicar en nuestro medio para correas no continuas, aunque no se cumplan algunas de las 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 ” por PLT menores a los valores de agotamiento por deformación alcanzados en ensayos y se comprueba también que para estas correas el dimensionado quedaría definido por el control de las deformaciones ya que si con solicitaciones últimas pretendiéramos aprovechar



hasta 0.70My y 0.60My (valores alcanzados en los ensayos) según el caso analizado, las deformaciones en servicio serían del orden de $(1/100) / 1.5 = 1 / 150$ que es el límite admisible más permisivo para cubiertas flexibles. Para esta situación las cargas correspondientes en servicio serían 46 kg/m^2 (0.46 kN/m^2) y 60 kg/m^2 (0.60 kN/m^2) para C100 y C120 respectivamente, siendo la luz analizada en estos ensayos de 5314 mm y la separación entre ellas 975 mm.

Además, se puede observar la incidencia del tipo de vinculación chapas-correas en el giro de la sección medido en el centro de la viga y por lo tanto su incidencia en el estado límite de PLT en la situación de ala traccionada por flexión unida en forma continua al cerramiento y ala comprimida libre. Aunque la falla por PLT no se presentó como una instancia marcada y súbita de colapso, se puede apreciar que se manifiesta incidiendo en la rigidez real a flexión de la barra alrededor de su eje fuerte.

En efecto, los resultados permitieron concluir que la “rigidez flexional” real de los perfiles es menor que la teórica, aunque con una divergencia diferente en cada perfil. En este punto debemos aclarar que no pudo realizarse el ensayo para la determinación del módulo de elasticidad “E” del acero de las correas ni de las chapas, que es un parámetro determinante en la rigidez de estos elementos.

Entendemos que la mayor deformabilidad a flexión alrededor de su eje fuerte se explica por la interacción de la deformada por flexión recta con el giro de la sección por PLT el cual se manifiesta desde los primeros escalones de carga por las inexorables deformaciones iniciales y está claramente influido por el tipo de conexión de la chapa a la correa tal como puede verse en los gráficos. La unión con tornillos en el valle, que se recomienda como la más adecuada como vinculación rígida para esfuerzos en el plano de la chapa de cerramiento, no parece ser siempre la más rígida a los fines de la rotación de la sección en el centro del vano (Ensayos 1 y Ensayo 2). En el Ensayo 3 en el cual se despega la chapa de la correa se observa claramente la reducción de rigidez a rotación del conjunto. En general esta reducción de la rigidez a giro debido al tipo de vinculación se corresponde con una reducción de rigidez a flexión de la correa. Es necesario destacar que los ensayos E1, E1c, E2, E4 y E5 consideran el efecto instantáneo de la vinculación de los tornillos que unen chapa-correa. No considera un posible juego o aflojamiento que pudiera generarse con el tiempo por dilatación u otra causa. O sea que este análisis comprende el caso de “ala traccionada unida a tablero en forma continua” sin considerar “el paso del tiempo”, lo que explica que el CIRSOC 303 especifique la colocación de los tornillos en los valles como vinculación válida para asegurar el arriostramiento especificado para alas comprimidas al minimizar los efectos de aflojamiento con el tiempo.

El otro análisis que podemos hacer es que este tipo de unión especificada reglamentariamente es general y se aplica para cualquier diámetro de tornillo y separación. En nuestro caso hemos utilizado tornillos N°12 (tamaño importante) y una separación indicada en el prototipo del ensayo de acuerdo con el tipo de chapa de 253 mm. Si existiese alguna analogía constructiva de esta situación, se podría considerar válido el análisis para este caso particular, pero sin poder generalizar para otros casos con distintas condiciones.



El comportamiento descrito no se repite en forma similar en ambas correas a pesar de que se han mantenido todas las condiciones de ensayo iguales. La diferencia en ese sentido nos lleva a pensar que el comportamiento de los perfiles puede estar condicionado por la relación de aspecto de las secciones expresada como la relación de rigidez alrededor de cada uno de los ejes geométricos convencionales: I_x/I_y

C100 $I_x/I_y = 6.40$

C120 $I_x/I_y = 6.25$

En la determinación de las presiones efectivas de viento en componentes y revestimientos, en este caso las correas, los valores que se obtienen llegan en algunos casos hasta 200 kg/m^2 (2 kN/m^2), con lo que las correas con luces similares a la de estos ensayos deberían ser de mayor capacidad y seguramente tendrán relaciones I_x/I_y mayores. En tal caso es probable que la falla súbita por PLT pueda presentarse para valores de carga últimas y con deflexión correspondiente menores que $1/100$.

La hipotética incidencia de la relación I_x/I_y no está explicitada en la especificación AISI ni en el Reglamento CIRSOC 303-2009 por lo que consideramos que es un aspecto que necesita ser investigado en posteriores proyectos de investigación a fin de definir la validez general de la fórmula C.3.1.3-1.

F. CONCLUSIONES

El uso de la expresión (C.3.1.3-1) para la determinación del Momento Crítico Nominal Resistente por PLT que proporciona el Cirsoc 303 y su equivalente de la Tabla I6.2.1-1 de la especificación norteamericana AISI-S100-16 (*North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members*) es muy conveniente por su simplicidad. Su uso está actualmente restringido a si se cumplen con una serie de condiciones establecidas allí, las cuales no se cumplirían en todos los casos en nuestro medio con lo cual la aplicación de esta no sería general. Para salvar esas limitaciones se propuso este estudio en base a ensayos sobre módulos realizado tal y como se hacen en las obras reales. Por razones de presupuesto y tiempo sólo se pudo trabajar con correas C100 y C120.

Los resultados demuestran que para las condiciones de los ensayos realizados en este trabajo la expresión (C.3.1.3-1) es aplicable usando la tecnología del medio.

Surge como objetivo de otra investigación el ensayo sobre perfiles con una relación I_x/I_y más grande que la de los perfiles que fueron ensayados en este trabajo ya que pareciera que a una mayor relación I_x/I_y la falla súbita por inestabilidad podría aparecer más claramente en el proceso de carga y agotamiento.



G. AGRADECIMIENTOS

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

- Se destaca la importante colaboración, del Ing. Juan E. Fernández (FCEFYN-UNC) y del Ing. Narciso Novillo (FCEFYN- UNC) en la realización de este trabajo.
- DONADIO: la firma Donadio S.A. proveyó gratuitamente los perfiles C100 y C120 más los 20 metros cuadrados de chapa T101 que fueron necesarios para realizar los dispositivos de ensayo.
- OBRAS Y PROYECTOS SRL: la firma Obras y Proyectos SRL proveyó la mano de obra para el armado de los dispositivos de ensayo usando la misma mano de obra que usa en las obras que realiza normalmente.
- CORBLOCK: la firma Corblock S.A. proveyó los adoquines de hormigón que fueron usados para materializar la carga de los dispositivos de ensayo.
- 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.