

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN AXIAL DE COLUMNAS METÁLICAS ARMADAS

### EVALUATION OF THE AXIAL COMPRESSION BEHAVIOR OF ASSEMBLED METAL COLUMNS

**Alberto M. Guzmán, Gerardo A. González del Solar, Sergio G. Acosta, Claudio D. Dagne, Francisco A. Calderón y Gustavo L. Palazzo**

*CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza (M5502AJE), Argentina, marcelo.guzman@frm.utn.edu.ar <https://www4.frm.utn.edu.ar>*

**Palabras clave:** Columnas armadas, Pandeo, Ensayos, Simulación, CIRSOC 308-2007.

**Resumen.** Las columnas armadas son ampliamente utilizadas en construcciones metálicas por su adecuada relación resistencia/peso. Las barras que forman parte de las mismas (cordones, diagonales y montantes) trabajan predominantemente en tracción-compresión. La búsqueda de un mejor aprovechamiento del material, y con ello, de una mayor eficiencia estructural, hace que se consigan secciones transversales “armadas” que presenten radios de giro suficientemente grandes. En el presente trabajo se analizó la respuesta estructural de dos columnas armadas de sección transversal rectangular, constituidas por cuatro cordones verticales unidos entre sí por celosías formadas por diagonales y montantes, pero con características dimensionales diferentes. La carga última a compresión axial fue determinada analíticamente aplicando las expresiones de diseño previstas en el Reglamento CIRSOC 308 (2007), validando numéricamente estos resultados a partir de la modelación de las columnas con un software de elementos finitos. Por último dichas columnas fueron ensayadas en laboratorio, obteniendo experimentalmente la carga de falla. Se pudo establecer la correspondencia entre la resistencia nominal obtenida a través del reglamento, con la carga última y la de falla obtenida numérica y experimentalmente.

**Keywords:** Assembled columns, Buckling, Tests, Simulation, CIRSOC 308-2007.

**Abstract.** Assembled columns are widely used in steel construction due to their optimal strength-to-weight ratio. The bars comprising them (legs, diagonals, and struts) working predominantly in tension-compression. The pursuit of improved material utilization, and thus greater structural efficiency, results in the creation of reinforced cross-sections with sufficiently large radio of gyration. This work analyzes the structural response of two assembled columns with rectangular cross-sections, consisting of four vertical chords connected by trusses formed by diagonals and struts, but with different dimensional characteristics. The ultimate axial compression load was determined analytically by applying the design expressions provided in CIRSOC Regulation 308 (2007). These results were numerically validated by modeling the columns using finite element software. Finally, the columns were tested in the laboratory, and the failure load was obtained experimentally. The correspondence between the nominal strength obtained through the regulations and the ultimate and failure loads obtained numerically and experimentally was established.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las columnas metálicas armadas, son estructuras formadas por dos o más barras longitudinales, llamadas cordones, las cuales se unen entre sí a cierto intervalo de distancia mediante celosías planas, presillas, o la combinación de estas. Dichas columnas son ampliamente utilizadas en diversas construcciones por su adecuada relación resistencia/peso, donde las barras que forman parte de las mismas trabajan predominantemente en tracción-compresión.

Por otra parte, la búsqueda de un mejor aprovechamiento del material, y con ello, de una mayor eficiencia estructural, hace que se consigan secciones transversales “armadas” que presentan radios de giro suficientemente grandes. Esto busca controlar la esbeltez de la columna actuando como una unidad, permitiendo así una mayor capacidad frente a la falla por pandeo global.

En ese sentido, el comportamiento mecánico de columnas armadas de sección transversal triangular y rectangular ante este tipo de falla ha sido abordado analíticamente, pudiéndose desarrollar modelos continuos de representación (Guzmán et al., 2017), así como también, expresiones prácticas conducentes de forma simple a la obtención de la carga crítica de pandeo global (Guzmán et al., 2019; Guzmán y González del Solar, 2025).

Cuando el pandeo global de la columna resulta controlado, la falla predominante podría entonces estar condicionada por el pandeo local de un tramo del cordón. Esto implica la necesidad de controlar la capacidad de dicho cordón, y en consecuencia, la de la columna ante esta posibilidad de falla local.

En el caso de las denominadas estructuras “livianas” de acero, aquellas donde los cordones están constituidos por barras de sección circular maciza o perfiles ángulos laminados (CIRSOC-308, 2007), estas presentan una sección transversal triangular o rectangular. En estos casos, dichos cordones se enlazan entre sí mediante celosías planas soldadas a estos y ubicadas en todas las caras de la sección transversal de la columna.

En el presente trabajo se analizó la respuesta estructural de dos columnas armadas de sección transversal rectangular, constituidas por cuatro cordones verticales redondos y macizos, unidos entre sí por celosías formadas por diagonales y montantes. Dichas columnas presentaron características dimensionales diferentes. Se asumió para estas igual vinculación respecto a sus dos planos de simetría, por lo que el pandeo global fue analizado alrededor del eje con menor radio de giro.

La carga última a compresión axial fue determinada analíticamente aplicando las expresiones de diseño previstas en el Reglamento CIRSOC-308 (2007), validando numéricamente estos resultados a partir de la modelación de las columnas con un software de análisis por elementos finitos. Por último dichas columnas fueron construidas y ensayadas en laboratorio, obteniendo experimentalmente la carga de falla. De este modo, se pudo establecer la correspondencia entre la resistencia nominal obtenida a través del reglamento, con la carga última y la de falla obtenida respectivamente en la modelación numérica y en el ensayo experimental.

## 2. RESISTENCIA NOMINAL APLICANDO EL REGLAMENTO CIRSOC 308 (2007)

Se procedió a la determinación de la resistencia nominal a carga axial de cada una de las columnas consideradas, según lo establecido en el Reglamento Argentino de Estructuras Livianas para Edificios con Barras de Acero de Sección Circular (CIRSOC-308, 2007).

El citado Reglamento establece los requisitos mínimos para el proyecto, ejecución y protección de estructuras para edificios con elementos estructurales formados por barras de acero de sección circular maciza. Al respecto, en la presente aplicación se considera para la evaluación

lo establecido en el Capítulo 5, Artículo 5.4, Resistencia de Diseño a la Compresión Axil de Barras Armadas.

El referido artículo indica que los procedimientos de cálculo incluidos en el mismo, se deben aplicar a barras armadas de sección transversal uniforme rectangular o triangular, con cordones formados por barras de sección circular maciza o perfiles ángulo o Te, paralelos y de igual sección bruta. Donde los cordones deberán estar unidos por celosías planas en todas las caras, siendo estas uniformes a lo largo de la barra armada, y soldadas a dichos cordones. Las configuraciones de estas celosías corresponderán a las indicadas en la Figura 1. En ese sentido, cada una de las columnas evaluadas en el presente estudio cumplieron lo anteriormente señalado.

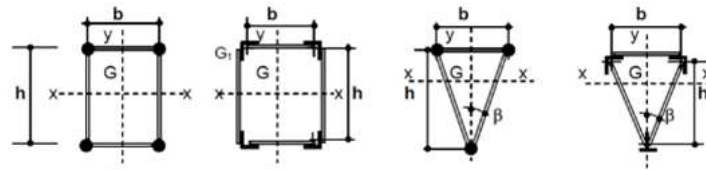


Figura 1: Configuraciones de barras armadas (CIRSOC-308, 2007).

En la Figura 2 se presenta la geometría transversal de las columnas consideradas en el presente trabajo, definidas como CR-01 y CR-02.

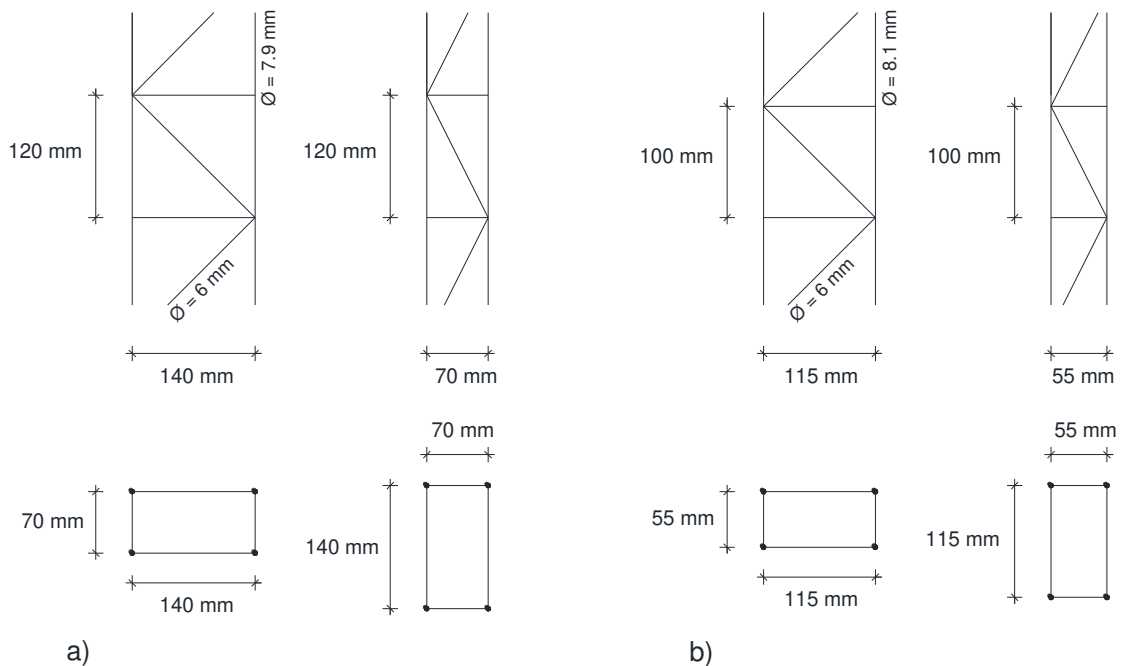


Figura 2: Sección transversal de las columnas. a) CR-01. b) CR-02.

## 2.1. Resistencia nominal de la columna CR-01

En la Tabla 1 se presentan los parámetros geométricos y mecánicos de la columna armada CR-01. Cabe destacar que la tensión de fluencia  $F_y$  considerada en la presente Tabla, se obtuvo de ensayar a tracción una muestra de acero utilizada en la construcción del espécimen posteriormente evaluado experimentalmente.

Tabla 1: Parámetros geométricos y mecánicos de la columna CR-01.

Referencia	Designación	Valor
Altura de la columna	L	2280 mm
Lado menor	b	70 mm
Distancia entre nudos	s	120 mm
Número de planos de celosías	n	2
Sección transversal del cordón	$Ag_1$	49.0 mm <sup>2</sup>
Momento de inercia del cordón	$I_1$	191.2 mm <sup>4</sup>
Radio de giro del cordón	$r_1$	1.97 mm
Sección de la diagonal	Ad	28.3 mm <sup>2</sup>
Longitud de la diagonal	d	138.9 mm
Sección transversal total de la columna	Ag	196.1 mm <sup>2</sup>
Momento de inercia menor de la columna	I	240946.6 mm <sup>4</sup>
Radio de giro menor de la columna	r	35.1 mm
Tensión de fluencia	Fy	410 MPa
Módulo de elasticidad	E	200000 MPa

### 2.1.1. Resistencia nominal al pandeo local

En este caso, la capacidad de la columna armada está condicionada por la resistencia nominal a compresión que localmente presentan los cordones.

Siendo el radio de giro del cordón  $r_1$ , su longitud de pandeo  $s$ , la tensión de fluencia  $F_y$  y el módulo  $E$ , se determina el valor de la esbeltez adimensional  $\lambda_{c1}$  (0.878). A partir de esta, se obtienen los factores  $\delta$  (1.051) y  $\chi$  (0.614), y con ello, la tensión crítica  $F_{cr}$ , la cual resulta ser de 251.6 MPa. De este modo y considerando la sección transversal del cordón  $Ag_1$ , se determina su capacidad nominal a compresión, y a partir de ello, la capacidad nominal de la columna:

$$P_{n1} = Ag_1 F_{cr} = 12328N \quad (1)$$

$$P_n = 4P_{n1} = 49312N \quad (2)$$

### 2.1.2. Resistencia nominal al pandeo global

En este caso, la capacidad de la columna armada está condicionada por la resistencia nominal a compresión que como unidad presenta dicha columna.

Se determina en primer lugar el valor auxiliar de esbeltez  $\lambda_1$ , relacionado este con la rigidez a corte de la celosía de enlace y con el tipo de configuración que presenta la columna. En lo que respecta a la esbeltez de la columna armada  $\lambda_o$ , actuando como unidad, esta depende del radio  $r$ , de la altura de la columna  $L$ , y del factor de longitud  $k$ , el cual tiene en cuenta las condiciones de borde, donde para el presente caso resulta ser 1.0 por considerar a la columna con condiciones de borde apoyada-apoyada. Por lo tanto, habiendo determinado  $\lambda_1$  (12.5) y  $\lambda_o$  (65.0), la esbeltez modificada de la columna armada,  $\lambda_m$ , resulta igual a 66.2. De este modo, la carga crítica de Euler,  $P_{cm}$ , para la columna armada, la cual resulta ser su capacidad nominal a compresión, se obtiene a partir de:

$$P_{cm} = P_n = \frac{\pi^2 E Ag}{\lambda_m^2} = 88350N \quad (3)$$

De las resistencias nominales a compresión  $P_n$  evaluadas para la columna armada CR-01, se establece que su capacidad estaría condicionada por la resistencia nominal de los cordones, donde la falla se presentaría por el pandeo local de estos.

## 2.2. Resistencia nominal de la columna CR-02

En la Tabla 2 se presentan los parámetros geométricos y mecánicos de la columna armada CR-02. Cabe destacar que la tensión de fluencia  $F_y$  considerada en la presente Tabla, se obtuvo de ensayar a tracción una muestra de acero utilizada en la construcción del espécimen posteriormente evaluado experimentalmente.

Tabla 2: Parámetros geométricos y mecánicos de la columna CR-02.

Referencia	Designación	Valor
Altura de la columna	L	3200 mm
Lado menor	b	55 mm
Distancia entre nudos	s	100 mm
Número de planos de celosías	n	2
Sección transversal del cordón	$A_{g1}$	$51.5 \text{ mm}^2$
Momento de inercia del cordón	$I_1$	$211.3 \text{ mm}^4$
Radio de giro del cordón	$r_1$	2.03 mm
Sección de la diagonal	$A_d$	$28.3 \text{ mm}^2$
Longitud de la diagonal	d	114.1 mm
Sección transversal total de la columna	$A_g$	$206.1 \text{ mm}^2$
Momento de inercia menor de la columna	I	$156738.4 \text{ mm}^4$
Radio de giro menor de la columna	r	27.6 mm
Tensión de fluencia	$F_y$	466 MPa
Módulo de elasticidad	E	200000 MPa

### 2.2.1. Resistencia nominal al pandeo local

Con idéntico análisis al realizado para la anterior columna, se obtiene  $\lambda_{c1}$  (0.757),  $\delta$  (0.923) y  $\chi$  (0.689), y con ello, la tensión crítica  $F_{cr}$  resultando para este caso de 321.1 MPa. De este modo, la capacidad nominal del cordón y de la columna valen respectivamente:

$$P_{n1} = A_{g1} F_{cr} = 16537N \quad (4)$$

$$P_n = 4P_{n1} = 66148N \quad (5)$$

### 2.2.2. Resistencia nominal al pandeo global

Con idéntico análisis al realizado para la anterior columna, se obtiene  $\lambda_1$  (13.3),  $\lambda_o$  (81.2), y  $\lambda_m$  (82.2). En este caso particular el factor de longitud  $k$  adoptado resultó de 0.7 por considerar a la columna con condiciones de borde fija-apoyada. De este modo la carga crítica de Euler,  $P_{cm}$ , para la columna armada, resultó de:

$$P_{cm} = P_n = \frac{\pi^2 E A_g}{\lambda_m^2} = 60215N \quad (6)$$

De las resistencias nominales a compresión  $P_n$  evaluadas para la columna armada CR-02, se establece que su capacidad estaría condicionada por la resistencia nominal de la columna actuando como unidad, donde la falla se presentaría por el pandeo global de la misma.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las resistencias nominales obtenidas analíticamente aplicando la Reglamentación para las columnas CR-01 y CR-02.

Tabla 3: Resistencias nominales obtenidas al aplicar el Reglamento CIRSOC-308 (2007).

Resistencia nominal [N]	CR-01	CR-02
Pandeo local	49312	66148
Pandeo global	88350	60215

### 3. MODELACIÓN NUMÉRICA

Las estructuras descritas en el apartado anterior fueron modeladas numéricamente mediante el software de análisis por elementos finitos ABAQUS (Dassault-Systèmes, 2025) con el fin de determinar la carga crítica de pandeo. Para el diseño geométrico se desarrollaron modelos tridimensionales compuestos por elementos tipo barra, cuyos parámetros geométricos y mecánicos se presentaron en las Tablas 1 y 2 para las columnas CR-01 y CR-02, respectivamente.

Con el objetivo de obtener una representación adecuada del fenómeno de pandeo, se prestó especial atención a la definición de las condiciones de borde.

En el caso de la columna CR-01, simplemente apoyada en ambos extremos, se impusieron condiciones de borde que permiten las rotaciones alrededor de los tres ejes y el desplazamiento en la dirección longitudinal, restringiendo únicamente los desplazamientos en las direcciones transversales. Asimismo, en cada extremo de barra longitudinal se aplicó una carga axial de compresión de magnitud unitaria.

Por su parte, la columna CR-02 presenta condiciones de borde equivalentes a una barra con apoyo fijo en un extremo y simple en el otro. El extremo simplemente apoyado se modeló de manera análoga al caso CR-01. En cambio, para el extremo fijo se definió un punto ficticio en el baricentro de la sección transversal de la columna, vinculado a los extremos de barra definiendo así una sección transversal rígida. De esta forma, los desplazamientos y rotaciones experimentados por el punto ficticio se transmiten proporcionalmente a cada extremo de barra. Dicho punto fue restringido de toda posibilidad de giro y de desplazamiento. En este caso, la carga axial unitaria de compresión, que posibilita el desarrollo del pandeo de Euler, se aplicó en el extremo simplemente apoyado, en correspondencia con los extremos de cada larguero.

Para la discretización de la estructura se emplearon elementos tipo barra tridimensionales de dos nodos con interpolación lineal. El modelo correspondiente a la columna CR-01 se compone de 840 nodos y 1096 elementos, mientras que el de la columna CR-02 utiliza 620 nodos y 772 elementos.

Las estructuras modeladas fueron sometidas a un análisis de pandeo por valores propios, lo que permitió estimar las cargas críticas tanto para el caso de pandeo global como de pandeo local. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4, mientras que las Figuras 3 y 4 ilustran las formas de deformada correspondientes a ambos modos de pandeo para las columnas en estudio. Del análisis de los resultados obtenidos, se destaca que el modelo CR-01 presenta como modo de falla predominante el pandeo local, mientras que el modelo CR-02 lo hace por pandeo global.

Tabla 4: Cargas críticas obtenidas en la modelación numérica.

Carga crítica [N]	CR-01	CR-02
Pandeo local	42422	65865
Pandeo global	88028	60132

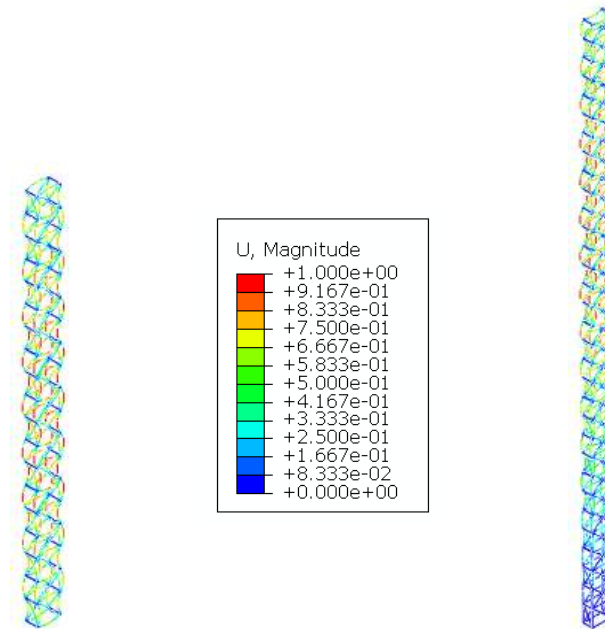


Figura 3: Pandeo local. Izq.: CR-01. Der.: CR-02. Escala de deformación: 20.

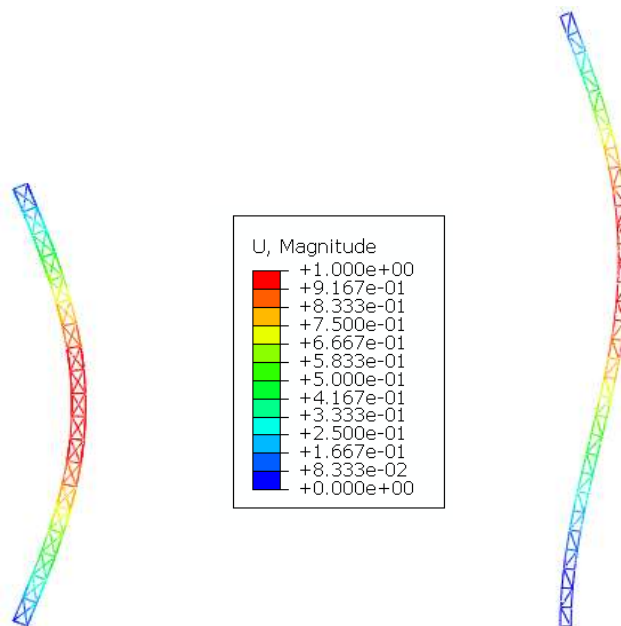


Figura 4: Pandeo global. Izq.: CR-01. Der.: CR-02. Escala de deformación: 300.



#### 4. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Estructuras que el CeReDeTeC posee en la Facultad Regional Mendoza (UTN). En el caso de la columna CR-01, la condición de borde asumida resultó la de simplemente apoyada, en tanto que para la columna CR-02, la de fija-simplemente apoyada. En la Figura 5 se presentan las columnas previo a su ensayo.



Figura 5: Columnas armadas previo a ser ensayadas a compresión.

En la Tabla 5 se presenta para las columnas ensayadas, la carga axial de compresión que en cada caso condujo a la falla, en tanto que en la Figura 6 los respectivos modos de falla observados.

Tabla 5: Cargas de falla obtenidas en el ensayo a compresión.

Columna	CR-01	CR-02
Tipo de falla	Pandeo local	Pandeo global
Carga de falla [N]	48400	64800

#### 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 6 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos para cada columna y para cada una de las metodologías de evaluación.

Tabla 6: Comparación de resultados obtenidos con cada metodología.

Designación	Tipo de falla	Reglamento [N]	Númerica [N]	Experimental [N]
CR-01	Pandeo local	49312	42422	48400
CR-02	Pandeo global	60215	60132	64800

Del análisis comparativo se desprende que, en el caso de pandeo local (CR-01), las diferencias entre la capacidad estimada según el Reglamento y la obtenida mediante métodos numéricos, ambas con referencia al valor experimental, fueron del 1.9 % y del 12.4 %, respectivamente.



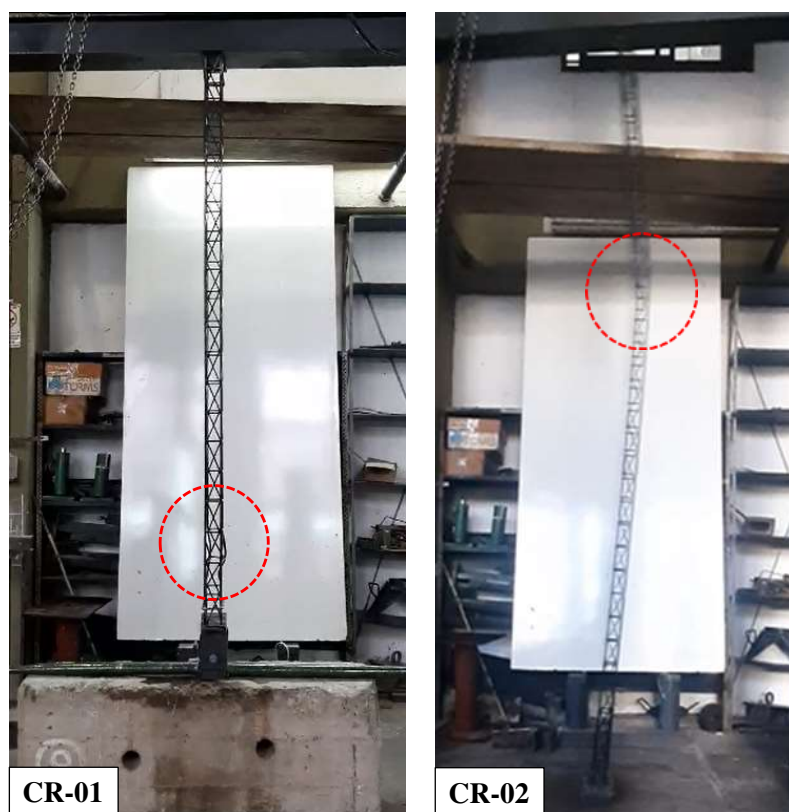


Figura 6: Columnas ensayadas. Modos de falla.

Por su parte, cuando la falla correspondió al pandeo global (CR-02), dichas diferencias resultaron del 7.1 % y del 7.2 %, respectivamente.

Las variables influyentes en la determinación de la capacidad nominal a compresión de las columnas armadas resultan ser las características geométricas, las propiedades materiales, y las condiciones de borde. En ese sentido, en el presente trabajo tanto los parámetros geométricos como mecánicos de las columnas fueron determinados en los especímenes construidos para la fase experimental, y con dicha información, se abasteció al modelo numérico y a las expresiones del Reglamento.

Las condiciones de borde inicialmente supuestas en las expresiones del Reglamento a través del factor de longitud  $k$ , así como en los modelos numéricos a partir de las restricciones adoptadas, pudieron verse levemente modificadas en la fase experimental cuando se intentaron replicar. Esto debido al propio proceso de ensayo, como por ejemplo, por efectos tales como la fricción entre la base de la columna y el material de soporte.

Frente a ello, para el caso de falla por pandeo global la incidencia de estas leves modificaciones de las condiciones iniciales de borde supuestas para la columna, habrían dado lugar a que la diferencia entre el resultado experimental con respecto a los obtenidos en la simulación y en la aplicación del reglamento, fuese ligeramente mayor que para el caso de falla por pandeo local.

El muy buen desempeño observado en la aplicación del reglamento para la valoración de la capacidad frente al pandeo local, se debería a una representación certera de las condiciones de borde del tramo local de cordón, las cuales resultan independiente de las condiciones de borde de la columna cuando esta actúa como una unidad.

Por otro lado, los indicios registrados en el estudio permiten plantear la hipótesis de que la discrepancia observada en la comparación con el modelo numérico podría estar asociada a la

cantidad de nodos empleados en la discretización de las diagonales y de los montantes. Este aspecto abre una línea de investigación orientada al análisis de la sensibilidad de malla en las celosías de las columnas.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó la respuesta estructural de dos columnas armadas de sección transversal rectangular. La capacidad nominal frente a la carga axial de compresión fue determinada analíticamente al aplicar las expresiones de diseño previstas en el Reglamento CIRSOC-308 (2007). Posteriormente estos resultados fueron contrastados con los obtenidos numérica y experimentalmente. Al respecto y de lo evaluado, se permiten obtener las siguientes conclusiones:

- . Se pudo establecer la correspondencia entre las capacidades nominales obtenidas a través de la aplicación del Reglamento, con aquellas cargas de fallas obtenidas experimentalmente.
- . La máxima diferencia entre la capacidad nominal y la carga de falla, se dio para el caso de falla por pandeo global, resultando menor al 8 %.
- . Esto se debería a que las condiciones de borde consideradas en el modelo numérico así como en las expresiones reglamentarias a través del factor de longitud  $k$ , podrían haber sido levemente diferentes a las del caso experimental debido a la influencia en este del propio proceso de ensayo.
- . La aplicación del Reglamento para la determinación de la capacidad nominal frente a la falla por pandeo local, se correspondió de forma precisa con el resultado experimental, siendo la diferencia encontrada menor al 2 %.
- . Esto último se debería a que el proceso de ensayo no incide en las condiciones de borde locales de los tramos de cordones susceptibles de pandear.
- . Por otro lado, la diferencia observada en la capacidad nominal por pandeo local entre el modelo numérico y el resultado experimental fue del orden del 12 %. Este resultado podría deberse a un fenómeno de sensibilidad de malla, lo que plantea una línea de investigación abierta para futuros trabajos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento al proyecto PID UTN 8573.

## REFERENCIAS

- CIRSOC-308. *Reglamento Argentino de Estructuras Livianas para Edificios con Barras de Acero de Sección Circular*. INTI, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2007.
- Dassault-Systèmes. *Abaqus, Student Edition, Version 2025*. Dassault Systèmes SE, 2025.
- Guzmán A. y González del Solar G. Prediction of critical global elastic buckling load in lattice columns. *International Journal of Steel Structures*, 25:647–658, 2025. <http://doi.org/10.1007/s13296-025-00962-8>.
- Guzmán A., Rosales M., y Filipich C. Natural vibrations and buckling of a spatial lattice structure using a continuous model derived from an energy approach. *International Journal of Steel Structures*, 17:565–578, 2017. <http://doi.org/10.1007/s13296-017-6016-6>.
- Guzmán A., Rosales M., y Filipich C. Continuous one-dimensional model of a spatial lattice. deformation, vibration and buckling problems. *Engineering Structures*, 182:290–300, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.074>.