

## VERIFICACION AL PANDEO DE UNA PARANTE DE SECCION DELGADA Y ABIERTA DE UN SILO

### BUCKLING VERIFICATION OF A THIN WALLED OPEN SECTION COLUMN OF A SILO

**Santiago Maiz, Alejandro R. Ratazzi y Juan María Maiz**

*Departamento de Ingeniería (UNS), Instituto de Ingeniería (II-UNS), Universidad Nacional del Sur  
(UNS), Bahía Blanca, Argentina. [alejandro.ratazzi@uns.edu.ar](mailto:alejandro.ratazzi@uns.edu.ar), [smaiz@uns.edu.ar](mailto:smaiz@uns.edu.ar),  
[jmmaiz@gmail.com](mailto:jmmaiz@gmail.com)*

**Palabras clave:** Pandeo, Perfil metálico, Sección delgada, Elementos finitos.

**Resumen.** En este trabajo se estudian los efectos de pandeo en la estructura resistente de un silo de láminas corrugadas. El estudio se focaliza en los parantes metálicos de sección delgada abierta laminados en frío denominados omega. Se estudian diferentes opciones de espesor de las columnas relacionadas con el largo de las mismas y también se estudia la superposición de diferentes perfiles variando el espesor de la chapa. Se realiza un análisis completo de pandeo con el método de elementos finitos utilizando elementos de láminas a través del software Autodesk Simulation Mechanical en el campo lineal elástico. En el estudio de las columnas se desprecia la influencia de la chapa metálica, ya que su disposición no agrega una rigidez considerable en el sentido axial de la columna. Sobre los resultados obtenidos se elaboraron una serie de recomendaciones sobre el dimensionado y el uso optimizado en la construcción de silos para almacenaje granos.

**Keywords:** Buckling, Thin-walled, Steel column, FEM.

**Abstract.** In this work the effects of buckling in the resistant structure of a corrugated sheet silo are studied. The study focuses on cold-rolled open-section metal foils called omega. Different options of thickness of the columns related to the length of the same are studied and also the overlapping of different profiles is studied by varying the thickness of the sheet. A complete buckling analysis is performed with the finite element method using Shell elements through the Autodesk Simulation Mechanical software in the linear elastic field. In the study of the columns, the influence of the metal sheet is neglected, since its arrangement does not add considerable rigidity in the axial direction of the column. A series of recommendations on the sizing and optimized use in the construction of grain storage silos were prepared on the results obtained.

## INTRODUCCIÓN

Los silos son estructuras de ingeniería utilizadas para el almacenamiento de diversos productos en la industria. Estos, en su mayoría, están contruidos de hormigón y metal.

Los silos metálicos pueden construirse con chapas corrugadas laminadas en frío, reforzadas con columnas de pared delgada de sección abierta, también laminadas en frío, distribuidas uniformemente alrededor la circunferencia del silo y conectado con tornillos.

En estos silos, las láminas de pared corrugadas horizontalmente transmiten fuerzas de tensión circunferenciales causadas por la presión de la pared horizontal y las columnas tienen fuerzas de compresión verticales debido a la fricción sobre la pared vertical ejercida por los sólidos a granel. Una forma de falla mecánica común en todos los silos metálicos es una pérdida de estabilidad causada por la fuerza de fricción de la pared de compresión debido a la interacción entre el relleno del silo y la pared del silo, particularmente durante el llenado y la descarga excéntricos y el flujo dinámico de masa.

En los trabajos de investigación sobre el estudio del pandeo de rigidizadores verticales de silos, pueden mencionarse las contribuciones de (Wójcik, Iwicki y Tejchman, 2017), (Veljkovic and Johansson, 2006), (Tang *et al.*, 2015) los autores muestran un análisis de pandeo cuasiestático de un contenedor de metal cilíndrico de flujo en embudo compuesto por láminas corrugadas horizontales reforzadas por columnas verticales. Iwicki *et al.* (2016) presenta la falla de grandes silos cilíndricos de acero compuestos por láminas corrugadas horizontales con rigidizadores verticales. Iwicki *et al.* (2015) realiza un análisis completo de elementos finitos de estabilidad 3D estáticos y dinámicos de un silo de acero cilíndrico compuesto por láminas corrugadas y perfiles de refuerzo verticales de paredes delgadas teniendo en cuenta la no linealidad geométrica y material. Hajko *et al.* (2018) desarrollan su trabajo sobre el pandeo de silos metálicos cilíndricos con láminas y columnas corrugadas. Se prestó atención al pandeo local de columnas de pared delgada de sección abierta formadas en frío en silos metálicos cilíndricos con láminas corrugadas.

En la literatura también podemos encontrar trabajos referidos al estudio de pandeo de los parantes y cascaras de silos. Hotała y Skotny (2014) realizan el análisis estructural de dos tipos de silo de acero con soporte de pared cilíndrica y rodamiento de perfil de acero, se implementa mediante el análisis de elementos finitos. Gallego *et al.* (2015) presentan una comparación de los resultados obtenidos en varios ensayos realizados utilizando un silo cilíndrico experimental con los calculados usando un modelo de elementos finitos. Chen *et al.* (2018) aplica el método de simulación de elementos finitos a la parte inferior de la carcasa cilíndrica.

En este trabajo analizamos la carga crítica de pandeo de un parante vertical de un silo metálico. El parante está compuesto por una combinación de perfiles omega de diferentes medidas de base, altura y espesor. La estructura es calculada por un programa de elementos finitos.

## 1 DESCRIPCION DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.

El parante vertical metálico en el que se focaliza el estudio está compuesto por un perfil de pared delgada y sección abierta. Se utilizará un perfil omega con los parámetros que se describen en la Figura 1. El parante tiene una longitud de 1722 mm y posee orificios de 11mm de diámetro para sujetarlo tanto de la base como de la columna siguiente en los laterales de la columna. Sobre la espalda tiene orificios para fijarlo a la cobertura metálica del silo. Los

detalles de los orificios de muestran en la **Figura 2**. En la **Figura 3** podemos ver detalles de la disposición y ensamble del modelo de columna analizado para un silo.

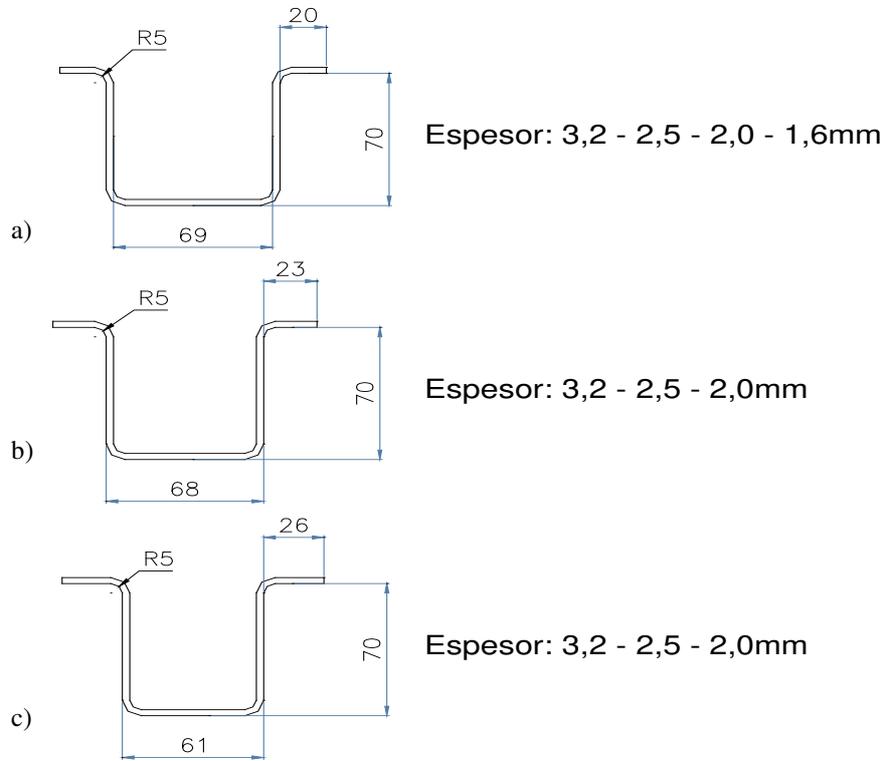


Figura 1: Sección transversal de las columnas: a) *Sección 1*, b) *Sección 2*, c) *Sección 3*

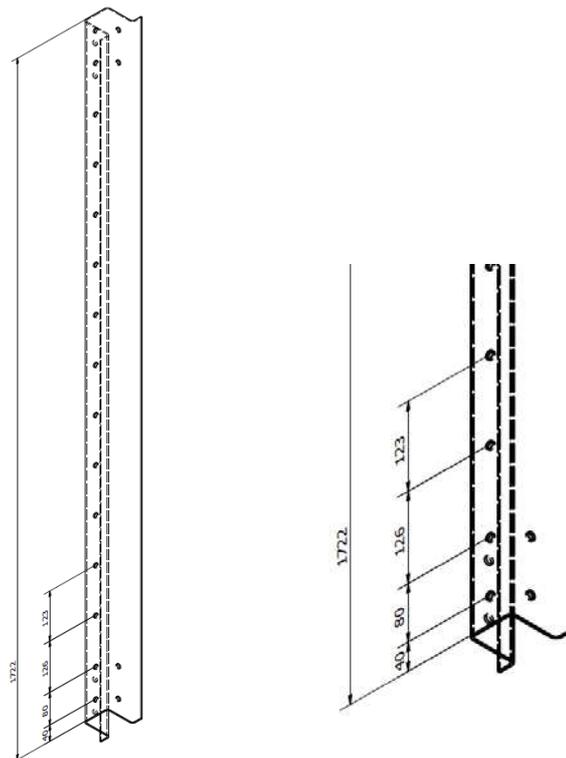


Figura 2: Dimensiones de las columnas



Figura 3: Parante omega en silo.

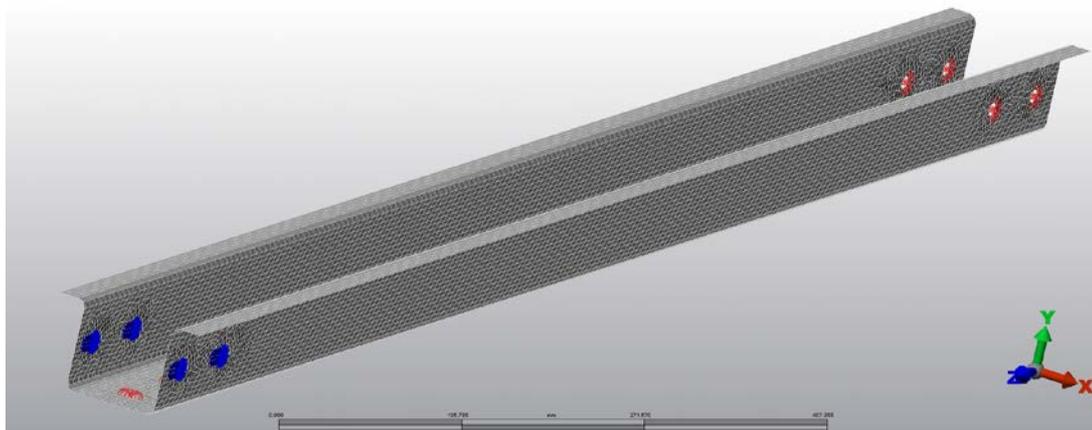
## 2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

La columna o parante indicadas en la [Figura 1](#) se modelan con elementos placa, cuadrilateros conformes del tipo Veubeke ([Veubeke, 1968](#)) de 16 Gdl. Los parantes presentan orificios en la espalda que sirven de fijación para las chapas y orificios en los laterales para fijar las columnas superiores en inferiores.

Las tres secciones están diseñadas de modo de superponer parantes y utilizarlos cuando los esfuerzos así lo requieran.

El material utilizado para las columnas tiene un valor del módulo de elasticidad  $E=205GPa$  y el coeficiente de Poisson  $\nu=0.29$ .

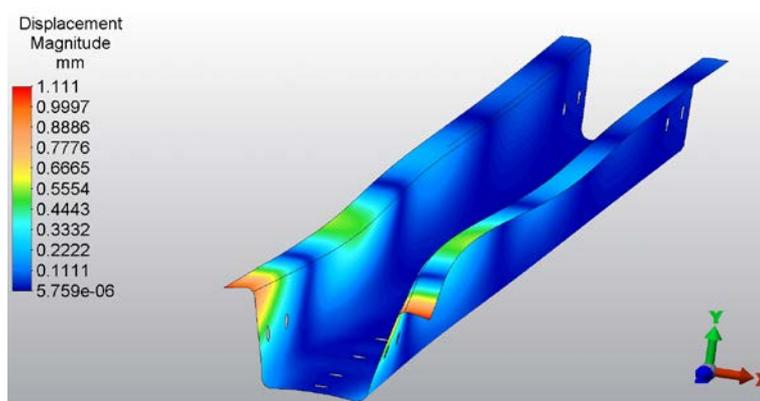
Para modelar el problema y de modo de tener una buena aproximación se aplican condiciones de borde en los orificios de los parantes. En los orificios de la espalda se restringieron las traslaciones en  $x$  e  $y$ , ya que tomamos la chapa ondulada del silo como rígida en el sentido circunferencial, siendo  $z$  el eje de la columna como puede verse en la [Figura 4](#). En los orificios laterales inferiores se restringió el desplazamiento axial y en los superiores se aplica la carga.

Figura 4: Mallado columna *sección 1*

## 2.1 Estudio de convergencia del modelo

En principio se realiza un estudio de convergencia para llegar a un modelo estable que arroje resultados confiables. El parante se somete a una carga crítica de referencia de 9800 N. Se modela la sección 1, de la Figura 1, a) con un espesor de 3.2 mm. En la Tabla 1 se muestran los valores de carga crítica arrojados con respecto al número de elementos utilizados. En la Figura 5 vemos el modelo de pandeo para la sección 1 con un espesor de 3.2 mm.

Nro de nodos	Carga crítica de pandeo
2660	597,9 KN
8228	613,1 KN
18460	622,3 KN
29349	612,8 KN
42912	609,7 KN

Tabla 1: Estudio de convergencia. Columna *sección 1* chapa de espesor 3.2 mmFigura 5: Forma modal. *Sección 1* espesor de chapa 3.2 mm

Luego del análisis de convergencia se elige el modelo de 29349 número de nodos que nos asegura la confiabilidad de los resultados.

### 3 RESULTADOS NUMÉRICOS

En la [Tabla 2](#) se muestran las cargas críticas de pandeo para las tres secciones de las columnas propuestas.

Espesor de chapa (mm)	<i>Sección 1</i>	<i>Sección 2</i>	<i>Sección 3</i>
1.6	121,25 KN	--	--
2	202,72 KN	216,01 KN	263,04 KN
2.5	341,78 KN	360,16 KN	428,97 KN
3.2	612,30 KN	637,52 KN	732,10 KN

Tabla 2: Valores de la Carga Crítica para las tres secciones propuestas.

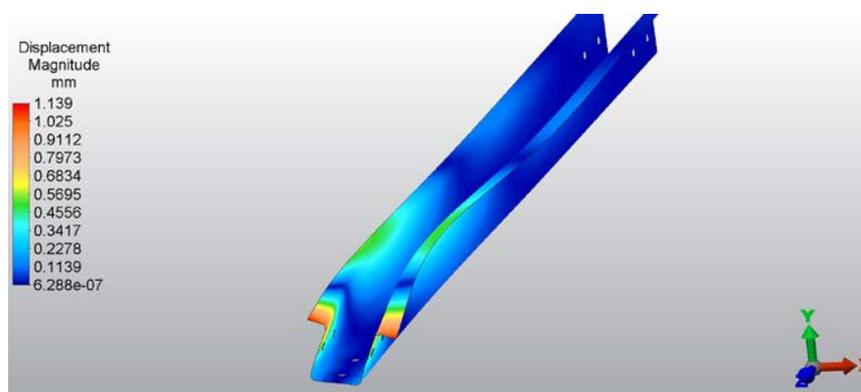


Figura 6: Forma modal para columna de *sección 2* y espesor de pared 3.2mm

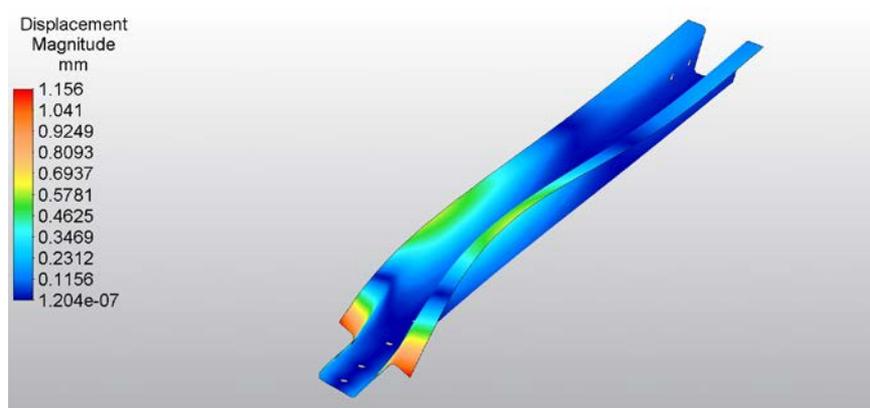


Figura 7: Forma modal para columna de *sección 3* y espesor de pared 3.2mm

En las [Figuras 6 y 7](#) se ven los modos de pandeo de las columnas de *sección 2* y *3* para espesor de pared de 3.2 mm son diferentes al de la [Figura 5](#).

### 3.1 Resultados numéricos: Columnas acopladas.

Cuando las cargas lo exigen se acoplan columnas, ya que las secciones propuestas así lo permiten. Las diferentes secciones en las columnas son acopladas por medio de bulones, como podemos ver en las Figuras 2 y 3.

Cuando se acoplan dos secciones diferentes en una columna, la externa es de *sección 1* con un espesor 3.2 mm, la interna es de *sección 2* y los espesores pueden variar en 2, 2.5 y 3.2 mm que denominaremos *caso A* y se muestra en la Figura 8a.

Cuando se acoplan 3 secciones diferentes de columna, el parante externo tiene *sección 1* y espesor de pared 3.2mm, el intermedio tiene *sección 2* y espesor de pared 3.2mm y el interno es de *sección 3* y los espesores varían en 2, 2.5 y 3.2 mm denominado *caso B* mostrado en la Figura 8b.

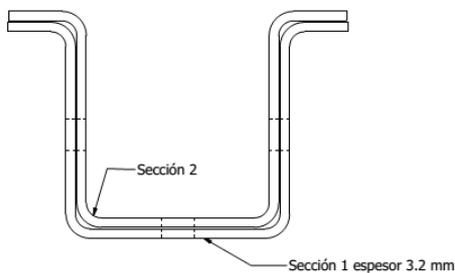


Figura 8a: Acople de dos secciones

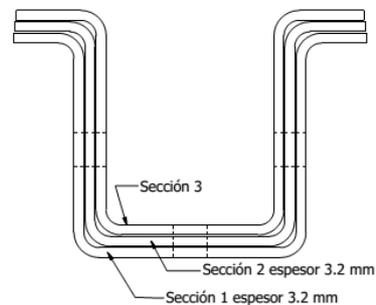


Figura 8b: Acople de tres secciones

Para modelar los parantes superpuestos, estos se acoplan en los orificios laterales mediante elementos rígidos de manera que actúen en conjunto como se ve en la Figura 9. Si bien no se consideró el contacto entre parantes para simplificar el cálculo, esto supone una menor rigidez por lo que el cálculo es conservador.

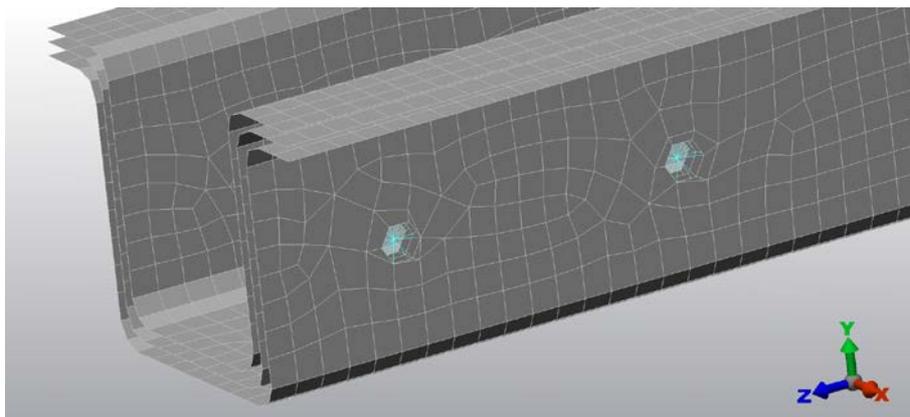


Figura 9: detalle del acople de columnas en los orificios laterales con elementos rígidos

En la Tabla 3 se muestran las cargas críticas de pandeo para columnas acopladas para los casos A y B descriptos anteriormente. En la Figuras 10 y 11, se ven los modos de pandeo de las columnas para el *caso A* con espesor de pared de la *sección 2* de 2.5mm, y para el *caso B*

espesor de pared de la *sección 3* de 2mm.

caso	Espesor de pared		
	2 mm	2.5 mm	3.2 mm
A	781,75 KN	1019,25 KN	1373,40 KN
B	1340,04 KN	1778,53 KN	2202,34 KN

Tabla 3: Carga crítica de Pandeo para columnas Acopladas

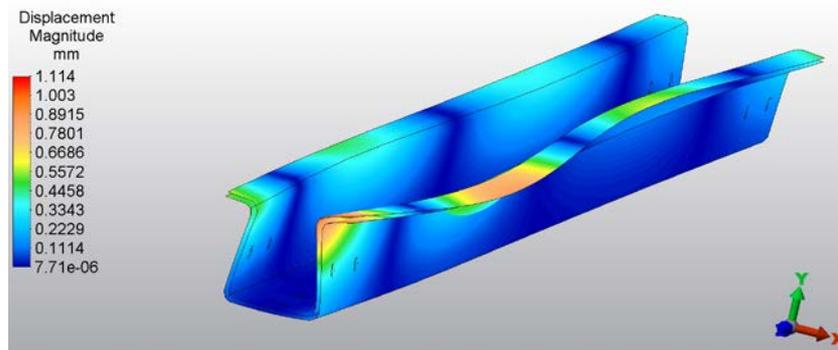


Figura 10: Caso A espesor de pared de la *sección 2* de 2.5mm

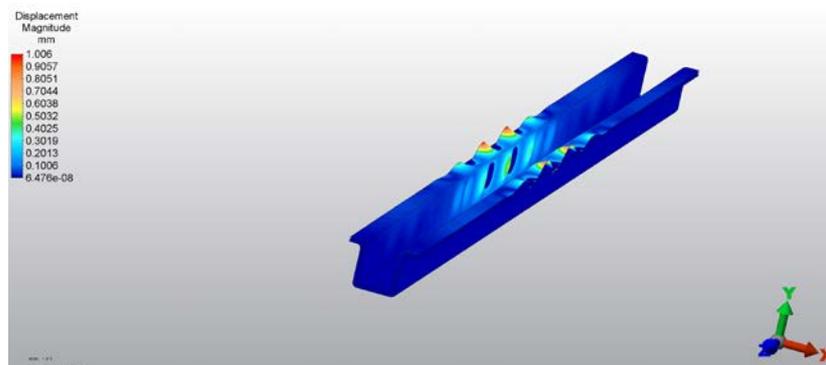


Figura 11: Caso B espesor de pared de la *sección 3* de 2mm

#### 4 CONCLUSIONES.

En este trabajo se hace una primera aproximación al problema de pandeo de parantes en silos. Una verificación más completa debe incluir un análisis no lineal con imperfecciones. (Iwicki, Rejowski and Tejchman, 2015). Este estudio preliminar se basó en el primer modo, pero se deberían incluir una mayor cantidad de modos para analizar la interacción entre modos locales y globales y quizás incluir el silo (Hajko, Tejchman and Wójcik, 2018).

De la *Tabla 2* se deduce que, cuando la sección disminuye aumenta la carga crítica de pandeo debido a que cambia el modo de pandeo como puede apreciarse en las *Figuras 5, 6 y 7*.

De la *Tabla 3* se deduce que, para columnas acopladas los valores de la carga crítica de

pandeo son diferentes a sumar individualmente cada columna por separado como vemos en la [Tabla 2](#). La [Figura 11](#), es un claro ejemplo de cómo se produce el pandeo local en la sección más débil. En el caso A (3.2 mm), la columna está compuesta por un parante de *sección 1* con espesor de pared de 3.2 mm y un parante interno de *sección 2* con espesor de pared de 3.2 mm, y el caso B (2.0 mm) se le agrega una sección 3 de espesor de pared de 2.0 mm. Uno puede suponer que esta última columna soporta una mayor carga crítica, sin embargo, se produce el pandeo local de la sección 3, la más débil, dándonos una menor carga crítica.

## 5 AGRADECIMIENTO

El presente trabajo fue auspiciado/patrocinado por la Universidad Nacional del Sur (UNS) y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Se desarrolló en el Departamento de Ingeniería y en el Instituto de Ingeniería de la UNS.

## REFERENCIAS

- Chen, Z, Fanb, H., Chenga, J., Jiaoa, P., Xua, F., Zheng, Ch. . ‘Buckling of cylindrical shells with measured settlement under axial compression’, *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, pp. 351–359. doi: 10.1016/j.tws.2017.11.006, 2018.
- Gallego, E., Ruiz, A. and Aguado, P. J. ‘Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data’, *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier B.V., 118, pp. 281–289. doi: 10.1016/j.compag.2015.09.014. 2015
- Hajko, P., Tejchman, J. and Wójcik, M. ‘Investigations of local/global buckling of cylindrical metal silos with corrugated sheets and open-sectional column profiles’, *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, 123(July 2017), pp. 341–350. doi: 10.1016/j.tws.2017.11.037. 2018
- Iwicki, P., Rejowski, K. and Tejchman, J. ‘Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on FE analyses versus Eurocode 3 approach’, *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Inc., 57, pp. 444–469. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.017. 2015
- Iwicki, P., Sondej, M. and Tejchman, J. ‘Application of linear buckling sensitivity analysis to economic design of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns’, *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd, 70(8), pp. 105–121. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.07.013. 2016
- Tang, Zhengjun, Zhou, Daibiao, Peng, Chenwei, Wu, Wenping. ‘the Structural Analysis of Steel Silos With Cylindrical-Wall Bearing and Profile-Steel Bearing’, *the Civil Engineering Journal 2-2015*, (Stavebni Obzor), p. 10. doi: 10.14311/CEJ.2015.02.0012. 2015
- Veljkovic, M. and Johansson, B. ‘Design of thin-walled steel column with partially closed cross-section’, *Proceedings of the International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, SDSS 2006*.
- Veubeke, B.Fraeijs . “A conforming finite element for plate bending”. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 4, Issue 1, pp 95-108. doi: 10.1016/0020-7683(68)90035-8, 1968.
- Wójcik, M., Sondej, M., Rejowski, K., Tejchman, J. ‘Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and 0 columns’, *Powder Technology*, 311, pp. 537–555. doi: 10.1016/j.powtec.2017.01.066. 2017.