

ESTUDIO DE LA INESTABILIDAD DEL EQUILIBRIO DE PERFILES METÁLICOS ABIERTOS UTILIZADOS EN SILOS DE ALMACENAMIENTO CON MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

STUDY OF THE INSTABILITY OF THE EQUILIBRIUM OF OPEN METAL PROFILES USED IN STORAGE SILOS WITH FINITE ELEMENT MODELS

Alejandro R. Ratazzi, Daniel H. Felix, Juan M. Maíz y Martín J. Serralunga

Departamento de Ingeniería, Instituto de Ingeniería de la UNS (IIUNS), Universidad Nacional del Sur, Avda. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina, dhfelix@uns.edu.ar, alejandro.ratazzi@uns.edu.ar, <http://www.uns.edu.ar>

Palabras clave: Silos, sección delgada, carga crítica, elementos finitos.

Resumen. Entre los componentes estructurales de los silos destinados al almacenamiento de granos se encuentran principalmente las chapas corrugadas de cerramiento y los perfiles verticales de refuerzo que permiten en conjunto resistir de manera segura las cargas de peso propio, las cargas de viento y realizar los procesos de carga y descarga manteniendo adecuadamente la integridad estructural del mismo. En el caso de los refuerzos verticales, resulta cada vez más frecuente el uso de perfiles metálicos de sección delgada y abierta debido a su menor costo constructivo. Como contrapartida se requiere el uso de diseños más eficientes para resistir de manera correcta las sollicitaciones que pueden inestabilizar los mismos durante los procesos de carga o descarga de granos. En el presente estudio se modelizan en elementos finitos los parantes metálicos de refuerzo del silo considerando su vinculación a las chapas corrugadas de cerramiento. Proponiendo una continuación de trabajos anteriores se amplían los modelos en estudio y se realiza una verificación de la integridad estructural de los parantes haciendo uso de la norma IRAM 8150, a los fines de poder comparar lo dispuesto por la normativa vigente con los resultados arrojados por la modelización. <http://www.amcaonline.org.ar>.

Keywords: Silos, thin section, critical load, finite elements.

Abstract. Among the structural components of silos intended for grain storage are mainly corrugated enclosing sheets and vertical reinforcing profiles that together make it possible to safely resist self-weight loads, wind loads and carry out loading processes. and discharge while adequately maintaining its structural integrity. In the case of vertical reinforcements, the use of thin and open section metal profiles is increasingly frequent due to their lower construction cost. As a counterpart, the use of more efficient designs is required to correctly resist the stresses that can destabilize them during grain loading or unloading processes. In the present study, the metallic uprights for reinforcing the silo are modeled in finite elements, considering their connection to the corrugated sheets of the enclosure. Proposing a continuation of previous works, the models under study are extended and a verification of the structural integrity of the studs is carried out using the IRAM 8150 standard, in order to be able to compare the provisions of current regulations with the results obtained by the modeling.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata sobre la verificación de la integridad estructural de los parantes utilizados en la construcción de silos de acero, destinados al almacenamiento de granos en el caso en que dichos parantes se construyen con perfiles de pared delgada y abierta, [Maiz et al. \(2018\)](#); [Ratazzi et al. \(2021\)](#). Para ello se recurre a la normativa vigente, [IRAM-8150-1 \(2019\)](#) y a la modelización numérica mediante el método de elementos finitos, [FEMAP \(2020\)](#).

Las estructuras de silos metálicos destinados al almacenamiento de granos están formadas fundamentalmente por chapas corrugadas, reforzadas mediante parantes verticales. Entre las opciones de diseño de dichos parantes más utilizadas en la actualidad, se encuentran los perfiles metálicos de sección delgada y abierta, tipo omega, laminados en frío. A lo largo del tiempo se realizaron estudios experimentales y teóricos sobre los problemas de fallas estructurales de los silos, estas estructuras fallan con una frecuencia mucho mayor que la tasa de falla estructural de otras estructuras industriales [Dogangun et al. \(2009\)](#). Las fallas están relacionadas con grandes pérdidas económicas y accidentes de personas debido a errores de diseño. Entre las fallas que deben considerarse durante el proceso de diseño de los silos están: las presiones no simétricas en las paredes, las cargas sísmicas y de viento, las tensiones creadas por la diferencia de temperatura entre la pared del silo y los sólidos a granel almacenados, la posible explosión interna del material almacenado y el asentamiento diferencial de la base o las columnas de soporte. En el presente trabajo analizaremos las fallas debido a las presiones ejercidas por las cargas de sólidos almacenados en las paredes del silo. Estas cargas están compuestas por dos componentes ortogonales: la componente horizontal que presuriza internamente el silo y la componente de fricción en la pared vertical que causa compresión axial. Tanto los efectos estabilizadores como los desestabilizadores de la presión interna son considerados por diversas normas internacionales, tales como el Eurocódigo 1, [UNE-EN-1991-4: \(2011\)](#). En este trabajo analizaremos un caso real de un silo esbelto existente, con las normas establecidas en nuestro país para este tipo de estructura [IRAM-8150-1 \(2019\)](#). Varios autores han analizado estructuralmente las características de silos destinados al almacenamiento de granos. [Wójcik et al. \(2017\)](#), [Veljkovic y Johansson \(2008\)](#), realizaron estudios de inestabilidad aplicando estados de carga cuasi-estáticas. Los estudios de [Wójcik et al. \(2017\)](#), [Iwicki et al. \(2016\)](#), tratan sobre el análisis no lineal tanto estático como dinámico, teniendo en cuenta la no linealidad geométrica y constitutiva, [Hajko et al. \(2018\)](#), [Zhengjun et al. \(2015\)](#), analizaron en sus estudios el pandeo local de los perfiles de sección de pared delgada y abierta.

En la literatura disponible, se pueden hallar numerosos estudios que han utilizado modelos basados en elementos finitos para llevar a cabo investigaciones diversas. A modo de ejemplo, se cita el trabajo de [Chen et al. \(2018\)](#), quienes aplicaron dicho método para modelar la parte inferior del silo. [Mehrehtehran y Maleki \(2022\)](#), utilizando análisis no lineal de elementos finitos, han investigado exhaustivamente los efectos de la presión interna en el pandeo axial de los silos de acero y han examinado minuciosamente la disposición del Eurocódigo sobre este tema. [Rejowski et al. \(2023\)](#), presentan un estudio con resultados de pruebas experimentales y numéricas de la resistencia al pandeo de una columna de un silo de chapa corrugada.

2. DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS SOBRE LOS PARANTES

Con el fin de obtener la carga actuante sobre los parantes adoptados, se recurre a lo dispuesto por la Norma [IRAM-8150-1 \(2019\)](#). En primer lugar se determina la profundidad de transición de esbeltez para el silo adoptado, la cual resulta, según la norma:

$$z_t = 0,8 D \quad (1)$$

siendo D el diámetro de la sección transversal del silo. Este valor permite distinguir dos zonas: la zona de baja esbeltez que corresponde a profundidades $z \leq z_t$ y la zona de esbeltez elevada, que corresponde a profundidades $z \geq z_t$. La norma establece expresiones diferentes para cada una de estas zonas, por lo cual es necesario determinarlas para establecer el intervalo de validez de cada una de las expresiones utilizadas.

2.1. Zona de baja esbeltez

Para la zona de baja esbeltez tendremos en primer lugar que determinar la presión horizontal de cálculo, p_{hb0} en cada una de las filas o virolas del silo que se encuentran en dicha zona, con la siguiente expresión:

$$p_{hb0} = K_b \gamma z \quad (2)$$

en la que $K_b = p_h/p_v = 0,355$ es la relación entre la presión horizontal y la presión vertical, en silos de baja esbeltez; γ la densidad de los granos almacenados y z la profundidad de los granos almacenados, medida a partir del aro superior del cilindro. En este punto cabe aclarar que si bien la norma establece una densidad de $8,5 \text{ kN/m}^3$, en el presente trabajo se ha adoptado un valor ligeramente menor e igual a $8,0 \text{ kN/m}^3$, con el propósito de poder comparar valores con un silo ya calculado y construído. Luego se determina la presión horizontal aplicada mediante la expresión:

$$p_{hb} = p_{hb0} C_h + J z^2 \quad (3)$$

siendo: C_h , el coeficiente de sobrecarga horizontal, igual a 1,15 y J , el factor de presión debido a la aireación, igual a $0,0009 \text{ kN/m}^4$.

A continuación se determina la carga vertical de cálculo que se transfiere a las chapas de cerramiento debido al rozamiento entre los granos y las chapas, mediante la siguiente expresión:

$$q_{wb0} = p_{hb0} z \frac{\mu}{2} \quad (4)$$

en la que μ igual a 0,49, es el coeficiente de rozamiento entre los granos almacenados y las chapas de cerramiento lateral. Con la carga vertical de cálculo podemos ahora obtener la carga vertical aplicada en la forma:

$$q_{wb} = C_w q_{wb0} \quad (5)$$

siendo:

$$C_w = 1,1 + 0,38 \frac{h}{2,5 D} \quad (6)$$

en la que $h = 12 \text{ m}$ para nuestro caso, es la profundidad de los granos para el cálculo de cargas.

Finalmente con la carga vertical aplicada podemos determinar la carga sobre los montantes mediante la expresión:

$$P_{wb} = q_{wb} d_c \quad (7)$$

en la cual d_c es la distancia entre montantes.

2.2. Zona de alta esbeltez

La presión horizontal de cálculo, p_{ha0} para profundidades pertenecientes a esta zona se determina mediante la expresión:

$$p_{ha0} = \gamma \frac{D}{4\mu} \left(1 - e^{\left(\frac{-(z+z_0)}{Z_0}\right)} \right) \quad (8)$$

siendo $D = 12$ m, en nuestro caso, el diámetro del silo; $z_0 = 0,279 D$, la altura inicial para silos esbeltos y $Z_0 = 1,3127 D$, la profundidad característica para silos esbeltos. Luego se determina la presión horizontal que se debe aplicar, p_{ha} por medio de:

$$p_{ha} = p_{ha0} C_h + J z^2 \quad (9)$$

y la carga vertical de cálculo que se transfiere a las chapas de cerramiento debido al rozamiento entre los granos y las chapas resulta de acuerdo a la norma:

$$q_{wa0} = \gamma \frac{A}{U} \left((z + z_0) - Z_0 e^{\left(\frac{-(z+z_0)}{Z_0}\right)} \right) - q_{wa0zt} + q_{wb0zt} \quad (10)$$

siendo: A , el área de la sección transversal del silo; U , el perímetro de dicha sección; q_{wa0zt} el valor correspondiente a la profundidad de transición en silos altos y q_{wb0zt} el valor correspondiente a la profundidad de transición en silos bajos. Una vez obtenidas las cargas de cálculo, determinamos las cargas verticales aplicadas con la siguiente expresión:

$$q_{wa} = C_w q_{wa0} \quad (11)$$

y finalmente obtenemos las cargas sobre los montantes, correspondiente al estado de cargas de silo lleno:

$$P_{wa} = q_{wa} d_c \quad (12)$$

Los resultados que se obtuvieron al aplicar las expresiones vistas en ambas zonas se muestran en la Tabla 1, para el caso de una profundidad $H = 12$ m correspondiente a un silo conformado por 12 filas.

Se adopta para el perfil inferior el acero ZAR 250, que posee una tensión de fluencia de 250 MPa resultando una tensión admisible a compresión de 138 MPa.

Luego, en función de la carga de servicio en cada fila, se determinaron los espesores de los perfiles que conforman los montantes. Cabe aclarar que este cálculo es solo a los fines de determinar espesores mínimos requeridos y no corresponde necesariamente al dimensionado del silo ya que se obtuvieron únicamente con el esfuerzo de compresión simple dado por el silo lleno. Luego con dichos perfiles se procedió, mediante la modelización numérica, a verificar la seguridad al pandeo localizado por abollamiento.

La Tabla 1 se muestra para la profundidad z de cada fila o virola, el valor de la presión horizontal p_h sobre las chapas de cerramiento lateral; la carga vertical q_w , aplicada sobre las chapas y la carga total P_w que va recibiendo cada montante. Los valores determinados hasta la fila 9, corresponden a la zona de baja esbeltez, mientras que los valores determinados a partir de la fila 10 corresponden a la zona de esbeltez elevada.

En la Figura 1a, se muestran las cargas horizontales que reciben las chapas de cerramiento lateral en función de la profundidad z a la que se realiza el cálculo. Las curvas llenas corresponden a los valores válidos. En la Figura 1b, se muestra la carga vertical resultante sobre los montantes a diferentes profundidades z , nuevamente las curvas llenas corresponden a los valores válidos.

Prof. z[m]	ph [kN/m ²]	qw [kN/m]	Pw [kN]
1	3,267	0,871	0,821
2	6,536	3,485	3,284
3	9,806	7,840	7,389
4	13,08	13,94	13,14
5	16,35	21,78	20,53
6	19,63	31,36	29,56
7	22,91	42,69	40,23
8	26,19	55,75	52,55
9	29,47	70,56	66,50
10	32,28	113,7	107,1
11	33,78	165,9	156,3
12	35,20	217,3	204,8

Tabla 1: Determinación de las cargas de compresión sobre los montantes en cada fila.

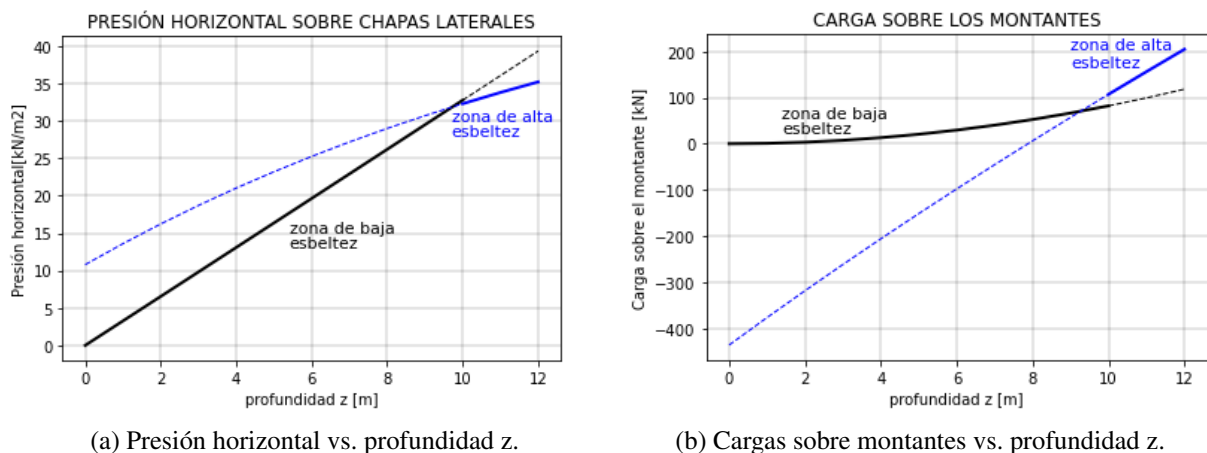


Figura 1: Presión horizontal sobre las chapas de cerramiento lateral y cargas sobre los montantes debidas al rozamiento entre granos almacenados y las chapas.

3. MODELIZACIÓN EN ELEMENTOS FINITOS

3.1. Características del silo: Estructura de los parantes

En este trabajo, llevaremos a cabo un análisis detallado de un silo esbelto conforme a la norma IRAM 8150, considerando que la profundidad z del grano representa más del 80 % del diámetro del silo. Las dimensiones de este silo son las siguientes: un diámetro de 12 metros, una altura de cilindro de chapa de 12 metros y está compuesto por 12 filas de chapas, cada una con un ancho de 0,961 metros. Además, el tamaño del parante base del silo, que será modelado utilizando elementos finitos, es de 1,995 metros de longitud.

La construcción de los modelos en elementos finitos se realizó con el software simcenter FEMAP (2021-2), en régimen elástico lineal. Las propiedades mecánicas del acero utilizado son: módulo elástico $E = 206$ GPa y coeficiente de Poisson $\mu = 0,29$.

3.2. Cálculo de la carga crítica del parante con FEM

Las cargas verticales, generadas por el peso propio del silo y el material almacenado, se transmiten a la base de hormigón a través de los parantes verticales. Estos parantes, debido a las múltiples fuerzas a las que están sujetos, experimentan no solo esfuerzos de compresión, sino también esfuerzos flexo-torsionales.

En este caso particular, los parantes de refuerzo se construyen utilizando perfiles de pared delgada y abierta conocidos como perfiles 'Omega', debido a la forma de su sección transversal. Estos parantes se sitúan en la parte exterior del silo y la Figura 2a proporciona una representación de la sección transversal de los perfiles, mientras que la Figura 2b muestra un gráfico de la vista longitudinal del mismo.

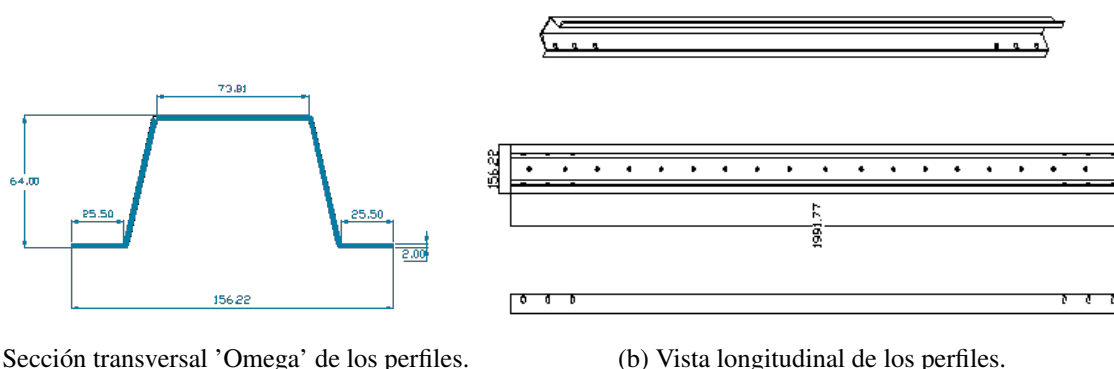


Figura 2: Representación de las dimensiones de los perfiles de sección transversal 'Omega' analizados.

3.3. Restricciones cinemáticas aplicadas a los parantes de refuerzo

Para determinar las restricciones en los desplazamientos de los parantes de refuerzo, se parte del supuesto de que están completamente anclados tanto en términos de movimiento lateral o tangencial como en movimiento radial, debido a su conexión con las chapas acanaladas de cerramiento. En consecuencia, se concluye que estos parantes solo tienen libertad de movimiento en la dirección vertical y no experimentan desplazamientos en ninguna otra dirección. Sin embargo, debido al tipo de perfil utilizado y su disposición con las alas hacia afuera, no puede impedirse la deformación local o alabeo de las alas del perfil, por la sola vinculación del parante a las chapas de cerramiento, si las cargas aplicadas son lo suficientemente elevadas.

3.4. Detalles de la modelización numérica

Para modelar los perfiles se utilizaron elementos de lámina planos, combinados. La razón de esta elección se debe a que este elemento resiste los esfuerzos del estado membranar, propios del elemento membrana más los de corte y de flexión, propios del elemento placa. Por tal razón son los indicados para modelar perfiles de pared delgada. En el caso mostrado en la Figura 4, la malla del perfil está formada por 123.887 elementos cuadriláteros de 4 nodos.

En los orificios donde se sujeta la chapa a los parantes se realizó un refinamiento de malla para mejorar el modelo. Para transmitir las cargas entre el perfil y los bulones se adoptó un esquema de nodos rígidos en el centro de cada orificio, el cual se vinculó rígidamente a los nodos que forman el borde de cada uno de ellos.

En la Figura 3 se observa el mallado del perfil mientras que en la Figura 4 se muestra en detalle el mallado en cercanía de los orificios del perfil destinados a los bulones de fijación.

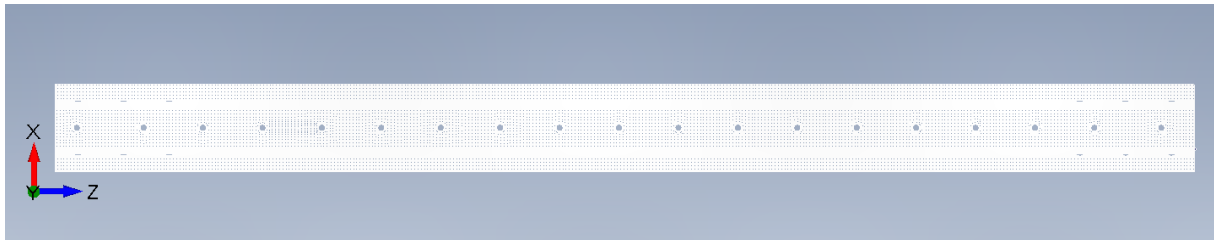


Figura 3: Mallado de uno de los perfiles con el que se obtuvieron las cargas críticas de pandeo local.

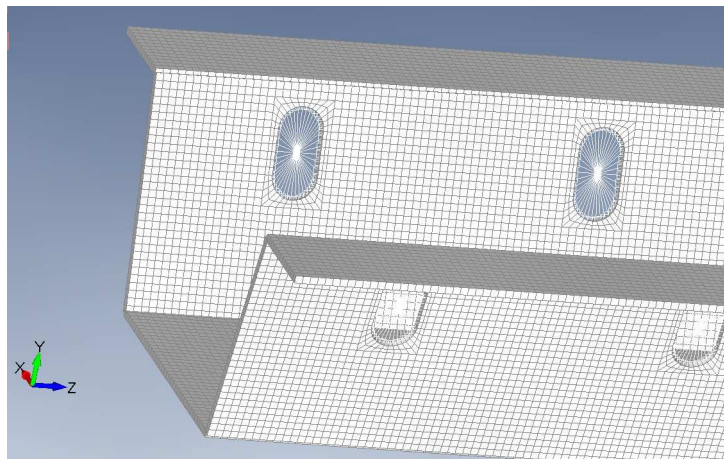


Figura 4: Detalle del mallado de uno de los perfiles en el que se observa la malla en cercanía de los agujeros para abulonamiento.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Se seleccionaron 3 perfiles con distintos espesores para calcular los autovalores que permiten determinar la carga crítica de pandeo local de las alas del perfil o abollamiento P_{cr} . Los espesores de la chapa de los perfiles resultaron de: 1,6 mm; 2,0 mm y 3,2 mm, elegidos en función de que al menos verifiquen la tensión admisible en compresión simple con el silo lleno y también en función de la mayor disponibilidad en el mercado local. Con el mismo propósito, se consideró un montante compuesto de 2 perfiles, uno de 4,0 mm y otro de 2,0 mm, para poder verificar las tensiones admisibles en las filas inferiores.

En el caso del perfil de 1,6 mm de espesor, se le aplicaron dos cargas de prueba de 1N cada una y se obtuvo un autovalor correspondiente al primer modo de pandeo, $\lambda = 85.455,7$ resultando para el mismo una carga crítica, $P_{cr} = 170.911$ N. La Figura 5 muestra el perfil mencionado.

La Figura 6 muestra el abollamiento de las alas del perfil de 2 mm de espesor, cuando se alcanza la carga crítica, en este caso se aplicaron también dos cargas de prueba de 1 N cada una y se obtuvo un autovalor $\lambda = 164.869,7$ resultando $P_{cr} = 329.739$ N.

De un modo similar se resolvió el perfil de 3,2 mm de espesor, obteniéndose un autovalor $\lambda = 409.961,7$ que determina una carga crítica $P_{cr} = 819.920$ N, como muestra la Figura 7.

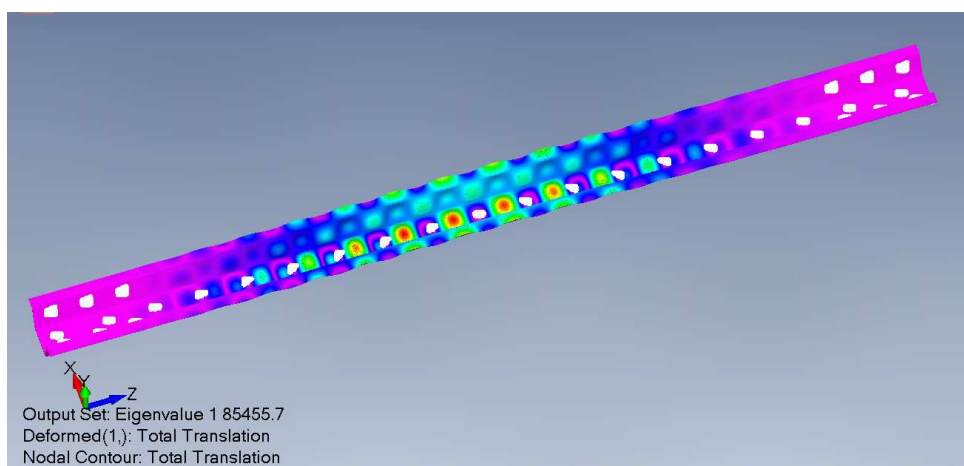


Figura 5: Primer modo de pandeo y autovalor correspondiente al perfil de 1,6 mm.

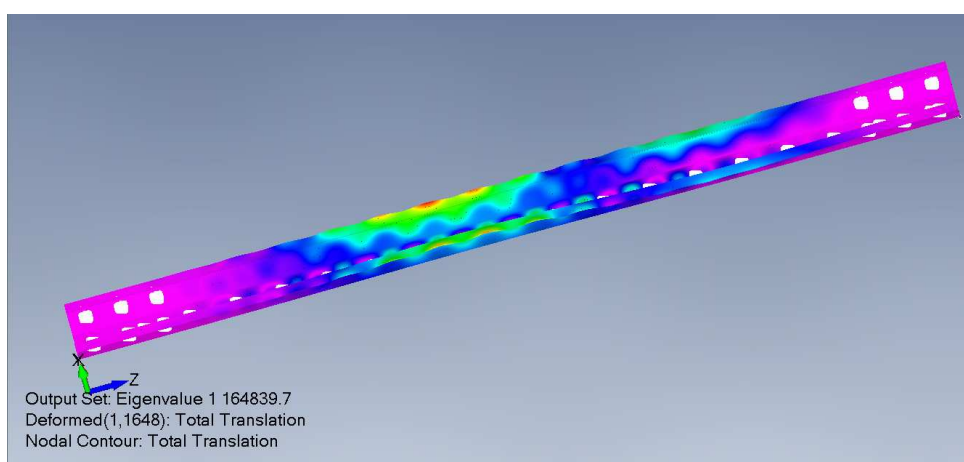


Figura 6: Primer modo de pandeo y autovalor correspondiente al perfil de 2 mm.

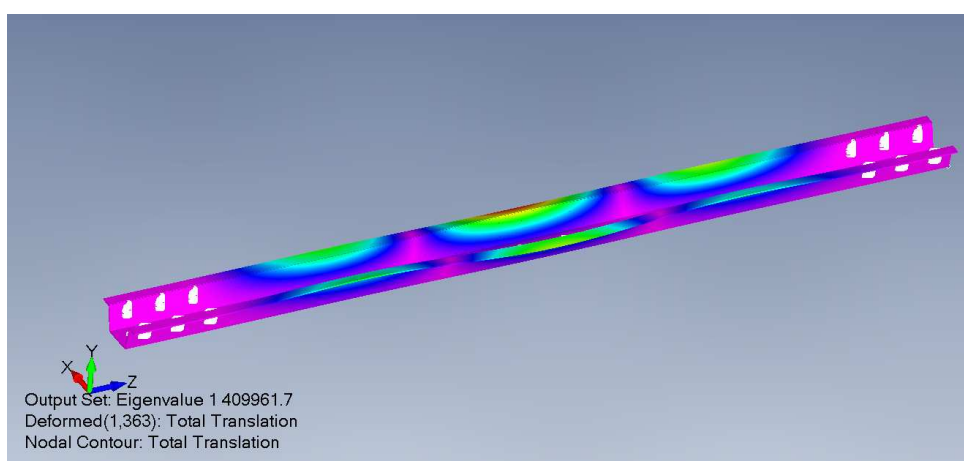


Figura 7: Primer modo de pandeo y autovalor correspondiente al perfil de 3,2 mm.

Finalmente se procedió a determinar el autovalor de carga crítica de un montante compuesto de dos perfiles, uno de 4 mm y el otro de 2 mm. resultando para el mismo $\lambda = 511.665,6$ y $P_{cr} = 1.023.331$ N, como se observa en la Figura 8.

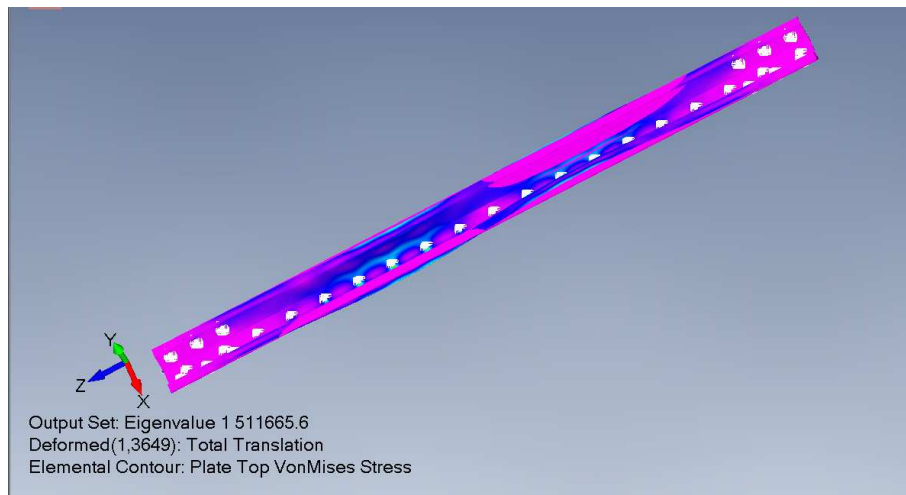


Figura 8: Montante compuesto de 1 perfil de 4 mm y de 1 perfil de 2 mm.

En la Tabla 2, se muestran Los resultados obtenidos de la carga crítica que corresponden a cada uno de los espesores adoptados:

Prof. z[m]	t [mm]	Pw [kN]	As [mm ²]	Ts [MPa]	Pcr [kN]
1	1,6	0,821	410,5	2,000	170,9
2	1,6	3,284	410,5	8,000	170,9
3	1,6	7,389	410,5	18,00	170,9
4	1,6	13,14	410,5	32,01	170,9
5	1,6	20,53	410,5	50,01	170,9
6	1,6	29,56	410,5	72,01	170,9
7	2,0	40,23	513,2	78,39	329,7
8	2,0	52,55	513,2	102,4	329,7
9	3,2	66,50	821,1	80,99	819,9
10	3,2	107,10	821,1	130,4	819,9
11	6,0*	156,3	1539	101,6	1023
12	6,0*	204,8	1539	133,1	1023

Tabla 2: Determinación de espesores de perfil y de carga crítica de pandeo local o abollamiento de los montantes en cada fila. Acero ZAR 250 ($\sigma_{adm} = 138,8$ MPa), con $l_p = 256,6$ mm.

5. CONCLUSIONES FINALES

El estudio realizado nos permite obtener las siguientes conclusiones:

- Al pasar de la zona de baja esbeltez a la de esbeltez elevada, se observó un fuerte incremento en las cargas de los montantes.
- La modelización en elementos finitos de los perfiles correspondientes a uno de los montantes permitió confirmar, que la seguridad al pandeo local está verificada cuando se está

por debajo de los límites de esbeltez de las alas del perfil, definidos por la norma IRAM 8150:1-4.

- Se comprobó, que los perfiles metálicos abiertos, tipo 'Omega' son muy aptos para la construcción de montantes en silos metálicos destinados al almacenamiento de granos.

Agradecimientos

El trabajo se desarrolló en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y bajo el auspicio de la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y de la Comisión de Investigaciones Científicas-CIC de la Provincia de Buenos Aires.

REFERENCIAS

- Chen Z., Fanb H., Chenga J., Jiaoa P. and Xua F., y Zheng C. Buckling of cylindrical shells with measured settlement under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 123:351–359, 2018.
- Dogangun A., Karaca Z., Durmus A., y Sezen H. Cause of damage and failures in silo structures. *Journal of performance of constructed facilities*, 23(2):65–71, 2009.
- FEMAP. *Simcenter*. SIEMENS Digital Industries Software, 2020.
- Hajko P., Tejchman J., y Wójcik M. Investigations of local/global buckling of cylindrical metal silos with corrugated sheets and open-sectional column profiles. *Thin-Walled Structures*, 123:341–350, 2018.
- IRAM-8150-1. *Silos aéreos de acero para almacenamiento de granos: Método de cálculo*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2019.
- Iwicki P., Sondej M., y Tejchman J. Application of linear buckling sensitivity analysis to economic design of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns. *Engineering Failure Analysis*, 70:444–469., 2016.
- Maiz S., Ratazzi A., y Maiz J. Verificación al pandeo de un parante de sección delgada y abierta de un silo. *Mecánica Computacional*, páginas 275–283, 2018.
- Mehrethran A.M. y Maleki S. Axial buckling of imperfect cylindrical steel silos with isotropic walls under stored solids loads: Fe analyses versus eurocode provisions. *Engineering Failure Analysis*, 137(6), 2022.
- Ratazzi A.R., Maíz J.M., Felix D.H., y Maíz S. Determinación de carga crítica de pandeo de un parante de refuerzo de sección de pared delgada y abierta en silos de almacenamiento de granos. *Mecánica Computacional*, XXXVIII:299–308, 2021.
- Rejowski K., Iwicki P., Tejchman J., y Wójcik M. Buckling resistance of a metal column in a corrugated sheet silo-experiments and non-linear stability calculations. *Thin-Walled Structures*, 132 Part A, 2023.
- UNE-EN-1991-4:1. *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos*. Comité Europeo de Normalización,(CEN), 2011.
- Veljkovic M. y Johansson B. Thin-walled steel columns with partially closed cross-section: Tests and computer simulations. *Journal of Constructional Steel Research*, 64:816–821, 2008.
- Wójcik M., Sondej M., Rejowski K., y Tejchman J. Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. *Powder Technology*, 311:537–555, 2017.
- Zhengjun T., Zhou D., C. P., y W. W. the structural analysis of steel silos with cylindrical-wall bearing and profile-steel bearing. *Civil Engineering Journal*, 24, 2015.