

DETERMINACIÓN DE CARGA CRÍTICA DE PANDEO DE UN PARANTE DE REFUERZO DE SECCIÓN DE PARED DELGADA Y ABIERTA EN SILOS DE ALMACENAMIENTO DE GRANOS

DETERMINATION OF CRITICAL BUCKLING LOAD OF AN OPEN THIN WALL SECTION REINFORCEMENT, FOR GRAIN STORAGE SILOS

Alejandro R. Ratazzi^{a,b}, Juan M. Maiz^a, Daniel H. Felix^{a,b} y Santiago Maiz^{a,b}

^aDepartamento de Ingeniería, Instituto de Ingeniería (IIUNS)-CIC, Universidad Nacional del Sur,
Bahía Blanca, Argentina, clanz@uns.edu.ar, dhfelix@uns.edu.ar, <http://www.uns.edu.ar>

^bDepartamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, ,
<http://www.uns.edu.ar>

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 y abierta, laminados en frío, con sección en forma de omega. Se estudian diferentes opciones de espesor de las columnas y se analizan los casos de superposición de diferentes perfiles, variando el espesor de la chapa. Adicionalmente se considera la incorporación de presillas metálicas en diferentes zonas del parante. Se realiza un análisis de pandeo mediante el método de elementos finitos. Para este propósito se utilizan elementos de lámina, en el campo lineal elástico, disponibles en el software "Simcenter FEMAP". Para obtener la carga crítica, se consideraron los tres modos predominantes en este tipo de estructuras; local, global y de distorsión. Con los resultados obtenidos se elaboraron una serie de recomendaciones sobre el dimensionado y el uso optimizado de estas piezas estructurales, en la construcción de silos para almacenaje de granos.

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

Abstract. In this approach, the effects of buckling on the resistant structure of a corrugated sheets silo are studied. The study focuses on the cold-laminated open-section metal columns, with omega-shaped section. Different options of thickness, for the thin-walled, steel columns are studied and the cases of superposition of different profiles will be analyzed by varying the thickness of the sheet metal. Additionally, the incorporation of metal clips in different areas of the column, are considered. A buckling analysis is performed with the finite element method. Sheet elements are used for this purpose, in the elastic linear field, available in the software "Simcenter FEMAP". To obtain the critical load, the three predominant modes in this type of structures were considered; local, global and distortion. On the results obtained, a series of recommendations were developed on the sizing and optimized use of these structural parts in the construction of silos for grain storage.

1. INTRODUCCIÓN

Los silos destinados al almacenamiento de granos, se construyen en la mayoría de los casos, mediante una base de hormigón y una estructura metálica, la cual consta básicamente de una estructura resistente formada por parantes verticales y aros de contención y una estructura de cerramiento, conformada por chapas corrugadas. La función de estos componentes estructurales, es soportar las sobrecargas producidas por el material a granel en el interior del silo, cuando se produce el vaciado del mismo [Maiz et al. \(2018\)](#).

La sobrecarga se produce cuando la mercadería que se encuentra ejerciendo una presión sobre la pared interior del silo, comienza a descender por el vaciado, originándose dos fenómenos, un incremento de la presión lateral horizontal y cargas verticales de compresión, producto del rozamiento del material contra las paredes.

Dichos esfuerzos verticales no puede ser soportado adecuadamente por las paredes del silo. Para evitar el daño, se instalan en todo el perímetro una serie de parantes o montantes estructurales con el fin de transferir dicha carga a la base del silo. Debido a que los parantes de refuerzo son elementos esbeltos, no puede omitirse en el cálculo estructural, la determinación de la carga crítica, que produce el pandeo del parante, especialmente en la alternativa de diseño propuesta, en que los parantes están constituidos por perfiles de pared delgada y abierta, tipo omega, [CIRSOC-303 \(2007\)](#).

Varios autores han analizado esta alternativa de diseño. [Veljkovic y Johansson \(2008\)](#), [Wójcik et al. \(2017\)](#), realizaron estudios de inestabilidad aplicando estados de carga cuasi-estáticas. Los estudios de [Iwicki et al. \(2015\)](#), [Iwicki et al. \(2016\)](#), realizaron un 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.

Los primeros modelos de silos presentaban los parantes en la pared interior del silo, los cuales eran fijados por las alas del perfil omega, transformándose, por el aporte de la pared del silo, en parantes de sección cerrada, de pared delgada o sección rectangular.

Con los requerimientos del mercado, los nuevos diseños, modificaron la posición de los parantes, ubicándolos del lado exterior de la pared del silo y fijándolos por el dorso de la sección omega. De este modo se mejora la funcionalidad, sacrificando su capacidad de carga en pos de una mejor prestación del silo, en cuanto a su “auto limpieza” para cambios de mercadería o evitando el costo de la limpieza manual.

Con el nuevo diseño de los parantes, motivado por el mejoramiento de la funcionalidad y por la reducción de costos, se presentan dos cuestiones a resolver, por un lado, determinar la distribución de la carga producida durante el fenómeno del vaciado, y por otra parte, obtener la carga crítica para diferentes variantes de diseño de estos parantes de pared delgada y abierta.

El motivo del presente estudio, se basa en el análisis de las opciones de diseño de los parantes que se proponen, sin tener en cuenta la estructura de cerramiento.

Para ello se debe tener en cuenta que, en los casos planteados, los parantes tendrán sección transversal variable debido a que la carga vertical que actúa sobre los mismos es variable a lo largo del mismo, siendo más elevada en la parte inferior del silo.

La Figura 1, es una vista parcial de la distribución de los parantes de refuerzo. En la misma puede apreciarse también su vinculación a la base y a las chapas de cerramiento.



Figura 1: Vista parcial de parantes de refuerzo abulonados en el alma del perfil a las chapas de cerramiento.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA RESISTENTE

La estructura resistente o de refuerzo del silo, está formada por un conjunto de parantes metálicos que soporta las cargas verticales y por las chapas acanaladas de cerramiento, que soportan la presión del material de acopio, como puede apreciarse parcialmente en la Figura 1.

Las cargas verticales provocadas por el material de acopio y el peso propio del silo, son transmitidas a la base de hormigón, mediante los parantes verticales, los cuales, debido a las diferentes acciones soportan, además de esfuerzos de compresión, esfuerzos flexo-torsionales.

En el presente caso, los parantes de refuerzo están construidos mediante perfiles de pared delgada y abierta, denominados omega, por la forma de su sección transversal y se encuentran ubicados en la cara externa del silo. La Figura 2 muestra la sección transversal de los perfiles analizados.

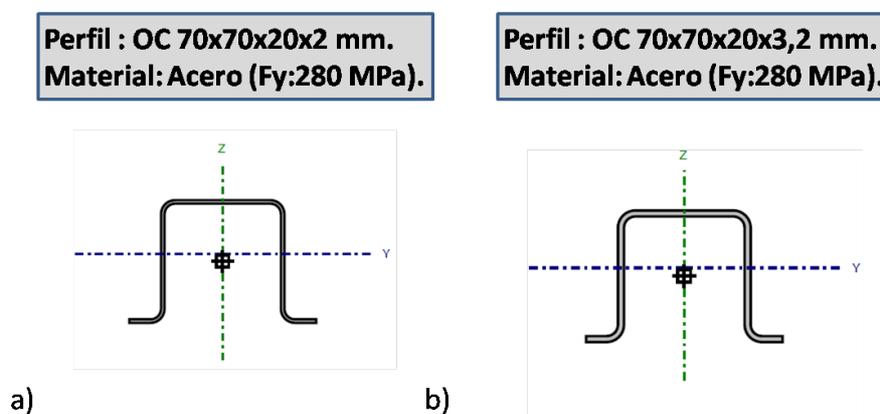


Figura 2: Secciones transversales de los perfiles. a) Perfil de 2 mm de espesor. b) Perfil de 3,2 mm de espesor.

Debido al uso de chapa galvanizada, que impide la corrosión, las uniones entre las diferentes partes de la estructura son abulonadas. La estructura metálica se completa mediante aros de refuerzo, que rodean las chapas de cerramiento en la parte superior del silo.

2.1. Restricciones cinemáticas aplicadas a los parantes de refuerzo

Para determinar las restricciones al desplazamiento que tienen los parantes de refuerzo se asume que se encuentran restringidos, tanto al movimiento lateral o tangencial como al movimiento radial, por su vinculación a las chapas acanaladas de cerramiento. De este modo, solo quedan en libertad de sufrir desplazamientos en el sentido vertical. 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. La deformación que sufren las alas del perfil, por la acción de las cargas anteriormente descriptas, puede observarse en la Figura 3.

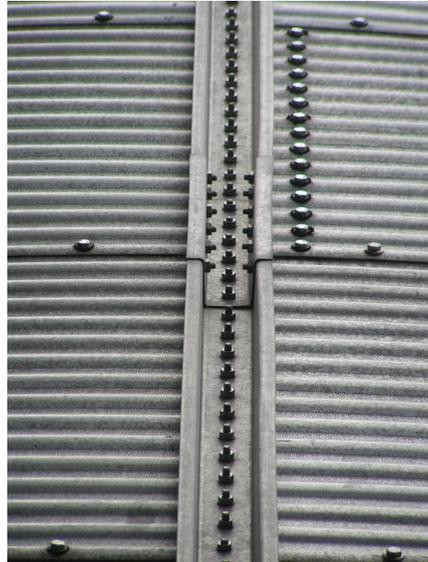


Figura 3: Vista parcial del empalme de perfiles en un parante de refuerzo.

2.2. Alabeo de las alas de los perfiles por acción de las cargas aplicadas

Los perfiles de pared delgada y abierta, construidos por conformado en frío, se imponen cada vez con mayor frecuencia debido a su menor costo de producción. Sin embargo, tienen la desventaja de presentar una baja rigidez torsional, haciendo que frecuentemente se produzca el pandeo local por torsión o flexo-torsión del parante, provocando la deformación o alabeo de las alas del perfil que se encuentra sometido a cargas verticales de compresión, [Veljkovic y Johansson \(2008\)](#).

En la Figura 4, puede apreciarse a simple vista la deformación de las alas del perfil, con pandeo local flexo-torsional, provocado por las elevadas cargas de compresión en el parante de refuerzo, durante la fase en que se intensifica el flujo másico con elevada fricción, del material acopiado.

3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA CON ELEMENTOS FINITOS

Puede encontrarse en la literatura disponible, una gran variedad de estudios realizados, utilizando modelos en elementos finitos. A modo de ejemplo, [Gallego et al. \(2015\)](#) realizaron comparaciones entre ensayos experimentales y modelos numéricos, [Chen et al. \(2018\)](#) lo aplicaron para modelar la parte inferior del silo. [Hotała y Skotny \(2014\)](#), lo aplicaron para el estudio de silos de acero con soporte de pared cilíndrica y rodamiento de perfil de acero. En el presente estudio, la construcción de los modelos en elementos finitos se realizó con el software [FEMAP \(2020\)](#), en régimen elástico lineal. Las propiedades mecánicas del material fueron definidas con el módulo elástico $E = 205 \text{ GPa}$ y el coeficiente de Poisson $\nu = 0,29$.

La Figura 6 muestra el detalle de las perforaciones que permiten unir los perfiles entre sí por las alas del mismo, mientras que en la Figura 7, se pueden apreciar los agujeros en el lomo del



Figura 4: Vista general de la deformación de las alas de los perfiles, provocada por pandeo local flexo-torsional.

perfil, que permiten vincularlo a las chapas acanaladas de cerramiento.

3.1. Características de los modelos

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

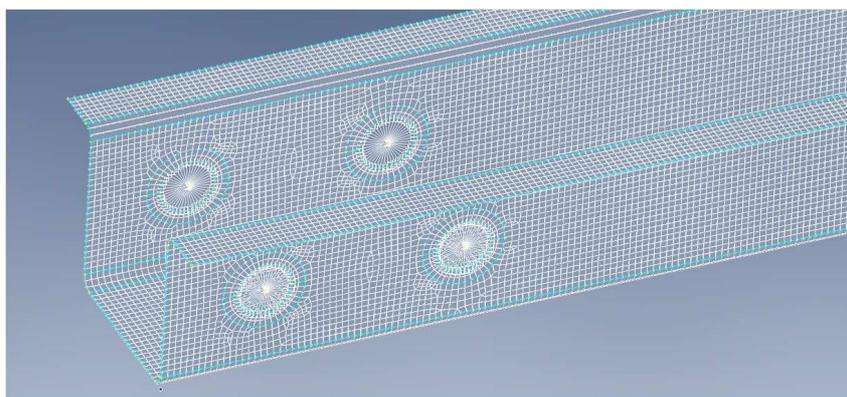


Figura 5: Vista parcial del mallado del perfil denominado omega, en la zona cercana a los orificios.

5, la malla del perfil esta formada por 66682 elementos cuadriláteros de 4 nodos. La Figura 5, permite apreciar el mallado del perfil en la zona cercana a los orificios. 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. Si bien en la imagen de la Figura 4 se observa un empalme que contiene 4 bulones por perfil y en la imagen de la Figura 3, se observa un empalme que contiene 3 bulones por perfil, dado que se comprobó que la cantidad de agujeros para los bulones no afecta sensiblemente al valor de carga crítica y dado que pueden encontrarse diferentes longitudes de perfiles y diferentes tipos de empalme, se adoptó para el modelo numérico, un empalme de dos orificios por perfil,

dado que resulta en dicho caso la luz de pandeo más desfavorable. En los nodos perimetrales superiores fué aplicada una carga de referencia de $10N$ y restricciones de borde denominadas "Fix" en los nodos inferiores. Puede apreciarse también el elevado radio de curvatura en los pliegues del perfil omega, tal cual lo recomienda la normativa vigente.

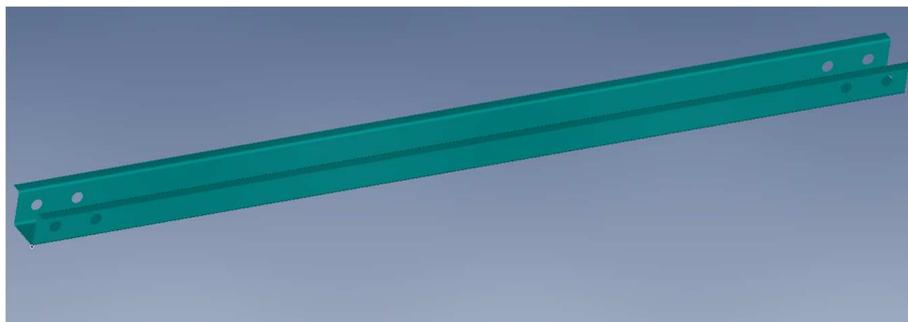


Figura 6: Vista del perfil analizado, en la que se aprecian los orificios destinados al empalme en las alas del mismo.

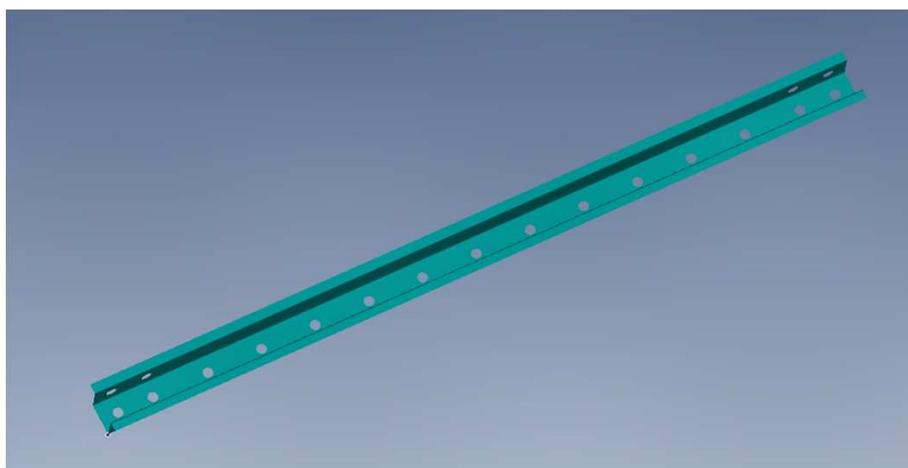


Figura 7: Vista de los orificios en el alma del perfil, para abulonamiento de los mismos a las chapas de cerramiento.

3.2. Carga crítica en columnas sin empresillado

Se adoptaron tres perfiles para la determinación de la carga crítica de pandeo, cada uno de ellos de diferente espesor, considerándose de 2 mm, 2,5 mm y 3,2 mm, teniendo en cuenta la mayor disponibilidad en el mercado local. La Tabla 1, muestra los resultados obtenidos del valor de carga crítica, para cada espesor considerado.

| Espesor | 2,0 mm | 2,5 mm | 3,2 mm |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Carga crítica | 14.122,64 N | 24.462,69 N | 44.807,86 N |

Tabla 1: Valores de carga crítica en los perfiles sin empresillado.

3.3. Carga crítica en columnas con perfiles compuestos y sin empresillado

Se analizó un perfil compuesto, conformado por dos perfiles de 2 mm de espesor cada uno. La Figura 10 muestra una vista parcial del mayado del perfil compuesto. La Figura 11 muestra en

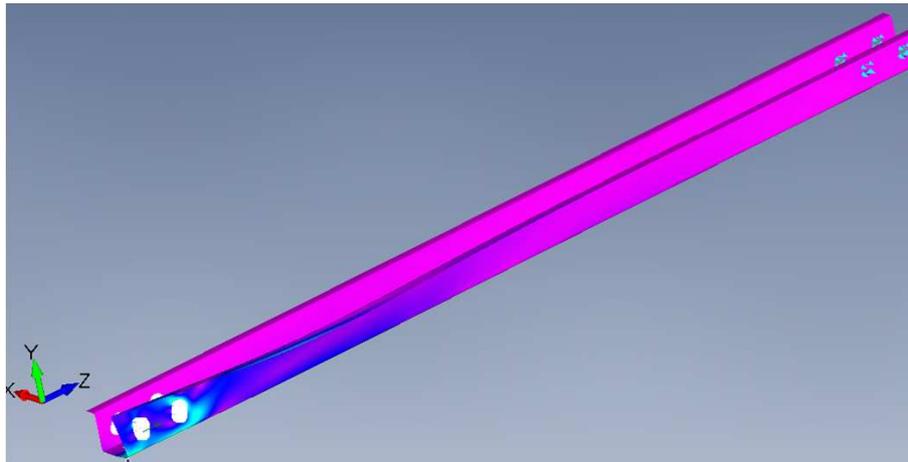


Figura 8: Campo de tensiones en el perfil de 2,5 mm. El color azul indica tensiones de compresión más elevadas.

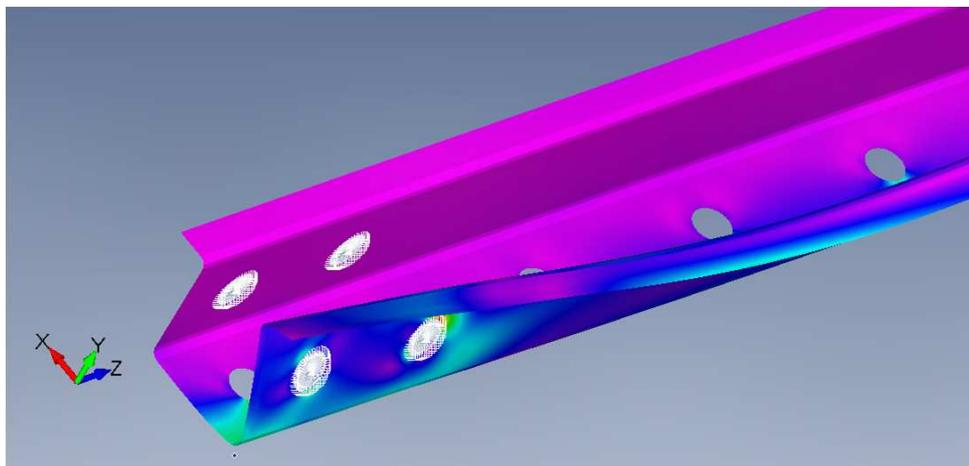


Figura 9: Vista del campo de tensiones del perfil de 3,2 mm, en la que se aprecia el fuerte alabeo del ala.

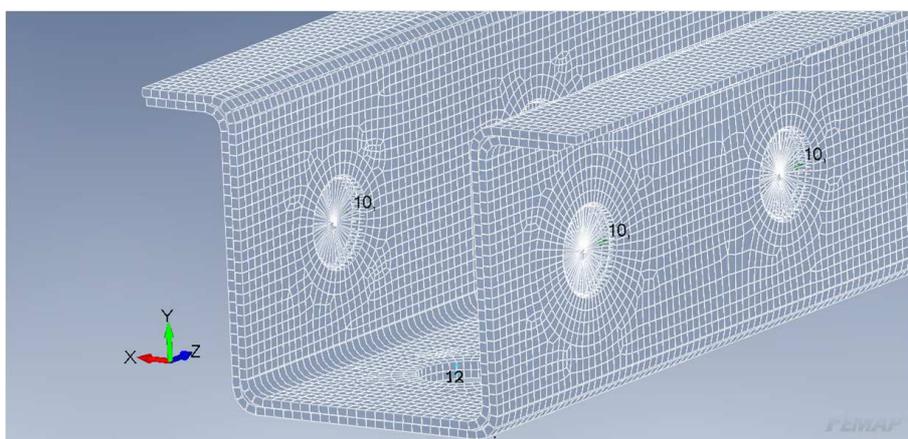


Figura 10: Vista parcial del mallado del parante compuesto de 2 perfiles de 2 mm de espesor cada uno.

detalle la deformación de las alas provocada por los esfuerzos de compresión y de flexotorsión.

La Tabla 2, muestra los valores obtenidos para la carga crítica del parante compuesto de dos perfiles de 2 mm de espesor cada uno. El valor obtenido de carga crítica confirma que esta no

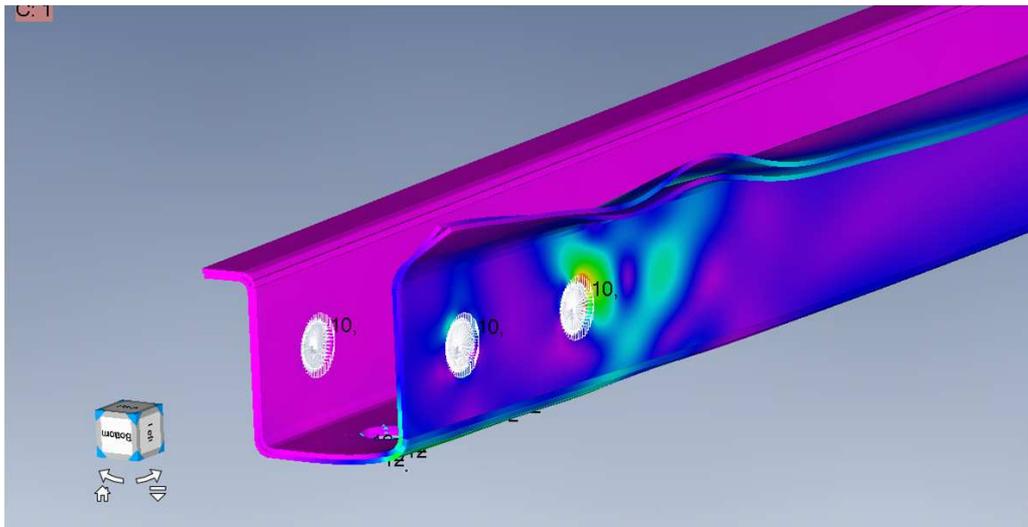


Figura 11: Campo de tensiones y deformación del parante compuesto de 2 perfiles de 2 mm de espesor cada uno.

es una buena solución para disminuir los efectos de alabeo de las alas de los perfiles.

| | |
|---------------|-----------------|
| Espesor | 2×2 mm |
| Carga crítica | 19.666,53 N |

Tabla 2: Valores de carga crítica en los perfiles sin empresillado.

3.4. Carga crítica en columnas con empresillado

Con el propósito de reducir aún más el alabeo de las alas de los parantes, se propuso una alternativa de diseño mediante el empresillado de las alas. Se adoptó la colocación de una presilla por perfil, unida a las alas mediante abulonamiento. En los resultados de la modelización numérica, puede apreciarse un incremento significativo de la carga crítica del parante.

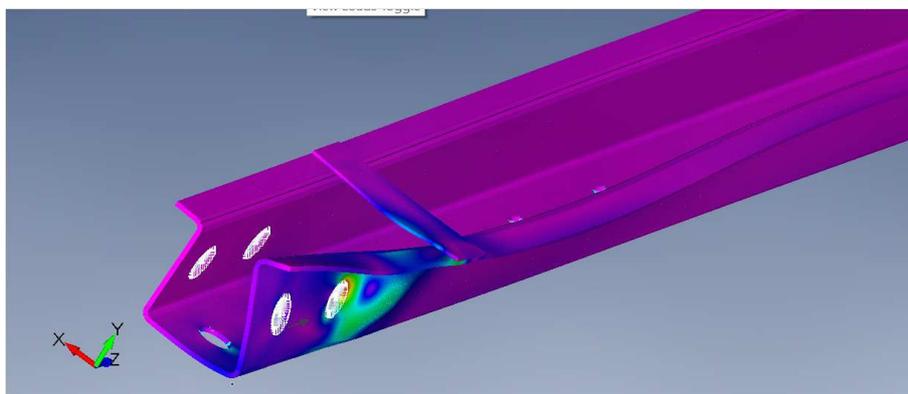


Figura 12: Vista del perfil de 2,5 mm reforzado con una presilla, en la que se aprecia la deformación del ala.

La Tabla 3, muestra los valores obtenidos para la carga crítica del perfil reforzado con una presilla, en función de la ubicación de la misma.

En las Figuras 12 y 13, pueden apreciarse las deformaciones que sufren las alas del perfil, las cuales son magnificadas para una mejor visualización.

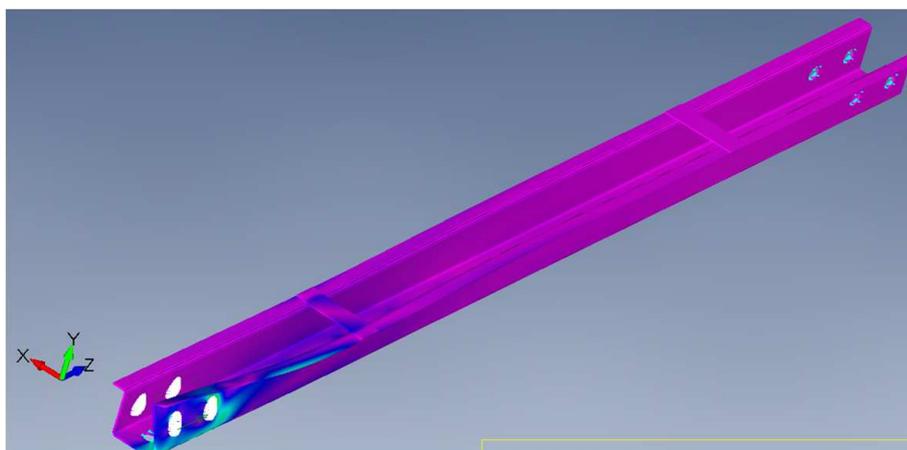


Figura 13: Vista del perfil de 3,2 mm, reforzado con dos presillas, en la que se aprecia la deformación del ala.

| Ubicación de presillas | zona de bulones | 1/4 de la luz |
|------------------------|-----------------|---------------|
| Carga crítica | 63.820,75 N | 51.491,76 N |

Tabla 3: Valores de carga crítica en los perfiles con empresillado.

4. CONCLUSIONES

El diseño de silos con parantes de refuerzo ubicados en el lado exterior, contruídos con perfiles de pared delgada y abierta, es una opción que satisface apropiadamente los aspectos funcional y económico. Sin embargo, muestran una debilidad estructural, el albeo de las alas de los perfiles originado por los esfuerzos de compresión verticales combinados con los flexo-torsionales, producidos principalmente durante los ciclos de descarga de los granos acopiados.

Para encontrar el diseño que mejor atenúe los efectos de este problema, se realizó un análisis numérico, construyendo modelos 3D en elementos finitos, comparándose entre sí, diferentes alternativas de diseño de los parantes. En el análisis realizado, se consideró como objetivo de diseño, la maximización de la carga crítica del parante. Del análisis numérico realizado, la alternativa más conveniente, resultó ser la del parante de 3,2 mm de espesor de chapa, reforzado mediante una presilla ubicada en la zona contigua al empalme de perfiles.

Agradecimientos

El presente trabajo fue auspiciado/patrocinado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología(SGCyT) de la Universidad Nacional del Sur (UNS), y por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).

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.
- CIRSOC-303. *Proyecto de reglamento argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2007.
- FEMAP. *Simcenter*. SIEMENS Digital Industries Software, 2020.
- Gallego E., Ruiz A., y Aguado P.J. Simulation of silo filling and discharge using ansys and comparison with experimental data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118:281–289., 2015.

- 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.
- Hotała E. y Skotny L. Experimental investigations on the stability of stiffened cylindrical shells of steel silos. *Journal of Constructional Steel Research*, 96:81–94, 2014.
- Iwicki P., Rejowski K., y Tejchman J. Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on fe analyses versus eurocode 3 approach. *Engineering Failure Analysis*, 57:444–469., 2015.
- 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.
- 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.