

VERIFICACIÓN DE LA INTEGRIDAD MECÁNICA DE UN SILO-TANQUE DE ALMACENAJE DE ARENA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA MEDIANTE SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

VERIFICATION OF THE MECHANICAL INTEGRITY OF A SAND STORAGE SILO-TANK FOR THE OIL INDUSTRY, THROUGH SIMULATION BY FINITE ELEMENTS

Simon Nogueira^a, César A. Lanz^a y Daniel H. Felix^a

^a*Departamento 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>*

Palabras clave: silo-tanque, integridad, elementos finitos, arena, petróleo.

Resumen. En este trabajo se realiza un análisis de la integridad mecánica de un silo/tanque horizontal, destinado al almacenamiento de arena para la industria petrolera, el cual opera a una presión de 2.1 Bar únicamente durante el proceso de descarga. Para el estudio se utiliza simulación por elementos finitos mediante el software de licencia GPL Salome Meca que incluye a Code Aster en uno de sus módulos. En particular, se estudia la capacidad del mismo de soportar en forma admisible el almacenaje de arena y el proceso de descarga. Para llevar a cabo este análisis, se modela geoméricamente el silo y se simula su comportamiento en diferentes escenarios de carga, obteniéndose en consecuencia para cada caso analizado, un mapeo de los estados de tensión y deformación en la estructura del silo.

Keywords: silo-tank, integrity, finite elements, sand, oil.

Abstract. In this paper, an analysis of the mechanical integrity of a silo/horizontal tank for the storage of sand for the oil industry is carried out, which operates at a pressure of 2.1 Bar only during the unloading process. For the study, finite element simulation is used through the GPL Salome Meca software that includes Code Aster in one of its modules. In particular, the capacity of the same to support in an admissible way the storage of sand and the discharge process is studied. To carry out this analysis, the silo is geometrically modeled and its behavior is simulated in different load scenarios, thus obtaining a mapping of the stress and deformation states in the silo structure for each case analyzed.

1. INTRODUCCIÓN

Los silos-tolva son equipos empleados en la industria petrolera como sistemas portátiles de almacenaje de arena. Estas arenas se utilizan fundamentalmente en las tareas inherentes a la perforación y encamisado de pozos petroleros, tanto de los pozos concebidos por sistemas convencionales como por los concebidos por sistemas no convencionales, tal como se muestra en el trabajo de [Asadi et al. \(2002\)](#). Este tipo de equipo, que tiene un peso total de 199,72 Tn, es capaz de almacenar aproximadamente unos 116 m³ de arena seca, la cual posee un peso específico de 1.600 Kg/m³ y opera en etapas de carga y descarga, a una presión del orden de los 2,1 a 2,2 Bar, (0,21 a 0,22 MPa).

Básicamente un equipo de este tipo, está formado por un cilindro de disposición horizontal con cabezales tronco-cónicos, soportado en un semibastidor.

La portabilidad del mismo está dada por la existencia de un eje en la parte trasera con 4 neumáticos y la tracción es brindada por un tractor tipo 'camión'. El acoplamiento del tractor al equipo está dado por una estructura similar a un 'enganche de trailer'. En la parte inferior posee tolvas de descarga que operan por fluidificación del material a descargar, utilizando para ello aire comprimido y una malla.

El equipo objeto de nuestro trabajo posee un diámetro exterior de 3.330 mm y una longitud de 12.500 mm. El cilindro principal y las tolvas de descarga están construidos de chapa de acero al carbono de 4,9 mm de espesor, de calidad SAE 1020. para su posicionamiento posee 10 gatos de soporte, los cuales están construidos fundamentalmente con acero al carbono de calidad SAE 1045, [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#).

En la Figura 1 se muestra un detalle de la configuración del equipo, en el que se puede apreciar el cilindro principal, los cabezales troncocónicos, los gatos de soporte y el enganche al tractor. No se incluye en la Figura 1 el eje trasero de 4 neumáticos.

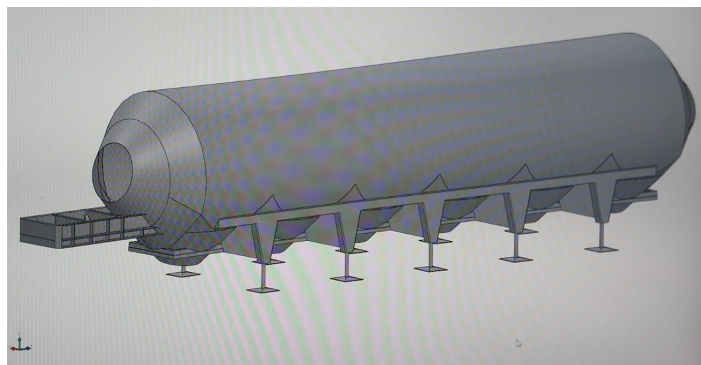


Figura 1: Vista exterior del silo-tolva en la que se pueden apreciar: el cilindro principal, los cabezales troncocónicos, los gatos de soporte y el enganche al tractor.

Otro detalle a considerar, que no se puede observar en la Figura 1 es que el cilindro tiene en la parte superior del mismo una escotilla para ingreso de un operario.

Tampoco se muestran las tuberías de ingreso y egreso de la arena, ni las tuberías de aire comprimido utilizadas para aportar la energía necesaria para la fluidificación de dicha arena, durante las etapas de carga y descarga.

Como hipótesis de estudio, la temperatura de trabajo del equipo se establece en 20°C y se considera constante, por lo que no se analizan las situaciones en donde hay variaciones de temperatura exterior, las cuales pueden fluctuar de acuerdo a la estación del año y de la ubicación geográfica del equipo.

En la Tabla 1 se detalla la composición química de los materiales utilizados para construir la chapa del cilindro y los gatos de apoyo:

Elemento	SAE 1020	SAE 1045
Carbono	0,18 - 0,23	0,43 - 0,50
Manganeso	0,30 - 0,60	0,60 - 0,90
Fósforo	< 0,04	< 0,04
Azufre	< 0,05	< 0,05
Silicio	0,15 - 0,35	0,20 - 0,40

Tabla 1: Composición del acero del cilindro, (SAE 1020) y de los gatos de apoyo, (SAE 1045).

En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas de los aceros utilizados:

Propiedad	SAE 1020	SAE 1045
Límite Elástico	239 MPa	413 MPa
Límite de Rotura	379 MPa	655 MPa
Módulo de Elasticidad	190 GPa	200 GPa
Dureza Normalizada HRB	60	84
Módulo de Poisson	0,29	0,3

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero del cilindro, (SAE 1020) y de los gatos de apoyo, (SAE 1045).

2. DEFINICIÓN DE LAS HIPÓTESIS DE TRABAJO

A los efectos del cálculo, se supone que el equipo está cargado totalmente con arena seca con una densidad de 2.400 Kg/m^3 y simultáneamente está sometido a una presión interna de 2,1 Bar durante las operaciones de carga y descarga del material. Se asume que el peso total del equipo cargado es de 257,72 Tn, y comprende el peso de la estructura del silo más el peso de la arena almacenada en su interior. Dicho peso se transmite al suelo a través de 10 apoyos, materializados mediante gatos ajustables que le permiten adaptarse a las eventuales irregularidades del terreno.

Finalmente, una vez obtenidas las reacciones externas en los gatos de apoyo, se procedió a la determinación de las tensiones y deformaciones en los mismos, para lo cual se han considerado como estados de carga impuestos el peso del material almacenado y el peso propio de la estructura. La Figura 2a muestra una vista en corte del interior del silo mientras que una vista en detalle de la geometría de uno de los gatos de apoyo puede apreciarse en la Figura 2b:

3. VERIFICACIÓN DEL ESPESOR DE LA CHAPA DEL CILINDRO PRINCIPAL SEGUN EL CÓDIGO DE DISEÑO DE APLICACIÓN

La parte del equipo que es cilíndrica fue verificada tomando como referencia las indicaciones del código [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#). El equipo estudiado, está sometido durante las operaciones de carga y descarga de arena, a una presión de servicio P_s , de 0,24 MPa y a una temperatura de servicio, de 20°C.

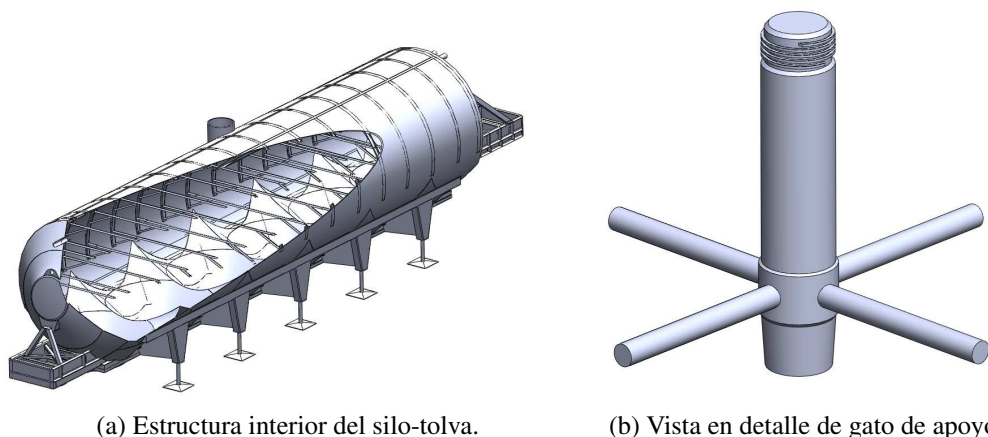


Figura 2: Vista del interior del silo-tolva y detalle de gato de apoyo de altura regulable.

El cilindro principal posee un diámetro exterior D de 3.330 mm y está fabricado empleando el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, según las normas [AWS-D1.1. \(2015\)](#). Su forma cilíndrica se obtiene conformando la chapa de acero al carbono de calidad SAE 1020, la cuál, según el [ASME-II-BPVC \(2013\)](#), posee una tensión de rotura a la tracción de 379 MPa y un límite elástico de 239 MPa.

Para el cálculo de verificación, se considera que la chapa del cilindro posee un espesor mínimo t de 4,9 mm. Para asegurar que este cilindro perteneciente al silo-tolva tenga el espesor mínimo necesario t_f como para satisfacer las condiciones de servicio, se usará el modelo indicado en la parte UG-27(c)(1) del código [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#), el cual indica que el espesor mínimo para el cilindro se determina mediante la Ec.(1):

$$t_f = \frac{0,5 P D}{SE - 0,6 P} \quad (1)$$

En la Ec.(1), se observa que la misma contiene la presión de diseño P , la cuál se determina considerando que la misma es un 10 % superior a la de servicio, (0,22 MPa), debido a la columna de arena, que genera empuje. Se tiene entonces que la presión de diseño es de 0,24 MPa. La determinación de la presión de diseño se ha hecho según indica el código [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#). La tensión admisible del material S , se determina según los valores indicados en la Tabla 1A del código [ASME-II-BPVC \(2013\)](#) y las recomendaciones del autor [Megyesy \(2001\)](#). De manera que para el acero al carbono SAE 1020 y a la temperatura de diseño le corresponde una tensión de cálculo admisible S de 160 MPa. Por otra parte, el valor de la eficiencia del cordón de soldadura E es de 0,85, porque el equipo ha sido radiografiado parcialmente, mediante la modalidad *spot*, durante su construcción.

Ingresando los valores antes enumerados en la Ec.(1), obtenemos el espesor mínimo requerido t_f para el cilindro del equipo, que es de 3,35 mm, y como el espesor mínimo real es de 4,9 mm, observamos que se satisface el requerimiento indicado por la norma.

4. MODELIZACIÓN EN ELEMENTOS FINITOS

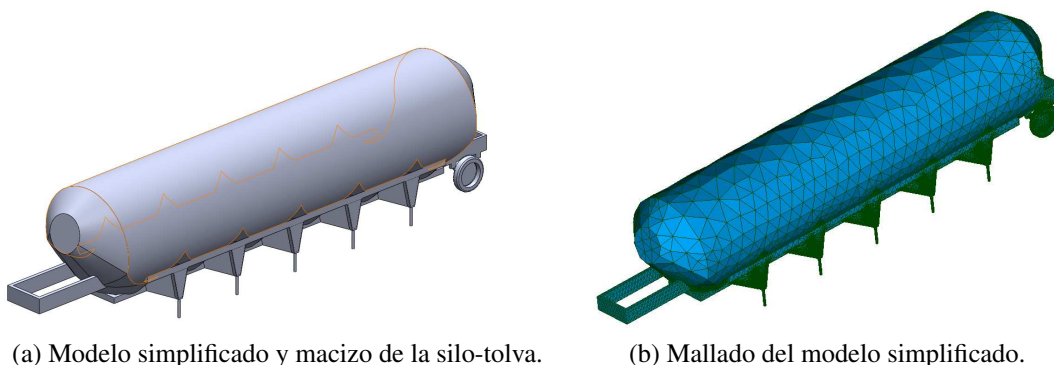
Con el fin de obtener resultados adicionales a los calculados por las normas vigentes, referentes a la integridad mecánica del equipo, se realizó una modelización lineal, en régimen elástico del silo-tolva siguiendo los siguientes pasos de cálculo:

1. Se construyó un modelo simplificado, basado en datos de relevamiento obtenidos de un silo-tolva real, de manera tal que produjera las mismas reacciones exteriores, el cual permitió obtener de forma más precisa las cargas que soportan los gatos de apoyo..
2. Se realizó un modelo más refinado del cilindro que conforma el silo pero sin considerar el bastidor interior, al que se le aplicaron las cargas de peso propio de la estructura, las de peso de la arena en condiciones de carga completa y la carga de presión producida por el proceso de fluidificación de la arena durante la descarga.
3. Con los estados de carga mencionado se procedió a determinar las tensiones y deformaciones máximas del cilindro, con el fin de verificar su integridad en las condiciones más desfavorables.
4. Se realizó un modelo detallado del gato de apoyo al que se le aplicaron las cargas correspondientes al más solicitado y con dicha carga, se determinaron las deformaciones máximas y las tensiones máximas de tracción y compresión en la zona roscada del gato.

A continuación se describen cada uno de los pasos de estudio mencionados.

4.1. Modelo equivalente del cilindro

En primer lugar se realizó un modelo macizo equivalente del silo-tolva generado mediante el uso del módulo *geometry* del software [Salome-Meca \(2021\)](#), al que se le asignó un peso equivalente al del silo completamente cargado. En la Figura 3a puede apreciarse la geometría del modelo equivalente y en la Figura 3b su correspondiente mallado:



(a) Modelo simplificado y macizo de la silo-tolva.

(b) Mallado del modelo simplificado.

Figura 3: Geometría y mallado del modelo simplificado del silo-tolva

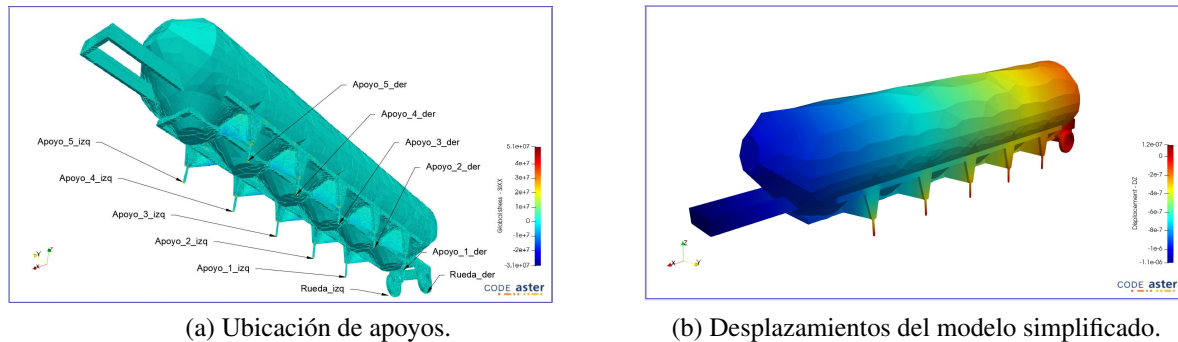
En la Tabla 3 se muestran los valores correspondientes al análisis de cargas.

Magnitud	Valor	Magnitud	Valor
Densidad del contenido	1.600 kg/m ³	Peso bruto del equipo	14,12 Tn
Capacidad de carga de diseño	116 m ³	Peso conjunto	199,72 Tn
Volumen del sólido equivalente	123,26 m ³	Densidad promedio	1.620,3 kg/m ³

Tabla 3: Datos obtenidos en el análisis de cargas del silo-tolva.

El modelo equivalente se utilizó para obtener las reacciones en cada uno de los gatos de apoyo, mediante el uso del módulo *Aster Study* para el cálculo por elementos finitos, que se encuentra integrado al software de licencia GPL, *Salome-Meca* (2021).

En la Figura 4a se aprecia la ubicación y denominación de cada apoyo mientras que en la Figura 4b se muestran los desplazamientos que sufre el modelo equivalente.



(a) Ubicación de apoyos.

(b) Desplazamientos del modelo simplificado.

Figura 4: Ubicación de apoyos y determinación de desplazamientos en el modelo simplificado.

En la Tabla 4 se muestran los valores de las reacciones nodales obtenidas para cada apoyo.

Apoyo	REACCIONES [kN]	
	Lado izquierdo	Lado derecho
Apoyo 1	194,04	194,27
Apoyo 2	191,13	213,98
Apoyo 3	191,19	215,95
Apoyo 4	191,74	192,58
Apoyo 5	195,84	222,91

Tabla 4: Reacciones en los gatos de apoyo.

Como se observa en la Tabla 4, la reacción más elevada corresponde al gato denominado Apoyo 5 del lado derecho. Su ubicación puede observarse en la Figura 4a. Una vez obtenidas las reacciones en los apoyos, las mismas se utilizaron para aplicarlas en el modelo del cilindro y para analizar con mayor detalle los esfuerzos y desplazamientos en el gato de apoyo más solicitado.

4.2. Análisis de tensiones y desplazamiento en un sector inferior del cilindro

Hemos visto en párrafos anteriores que la integridad mecánica de la chapa del cilindro que conforma el silo, se verifica al aplicar el código ASME VIII div.1. Sin embargo al realizar y analizar el modelo numérico propuesto se observa que los valores máximos del campo de tensiones obtenido en el sector del cilindro mostrado en las Figuras 5b, 6a y 6b, superan ampliamente las tensiones admisibles del acero con el que está construida la chapa del cilindro.

En dichas figuras, se aprecia una concentración de tensiones, en la región que une la chapa del cilindro con la tolva y la misma puede tener diferentes causas que no son reflejadas en la

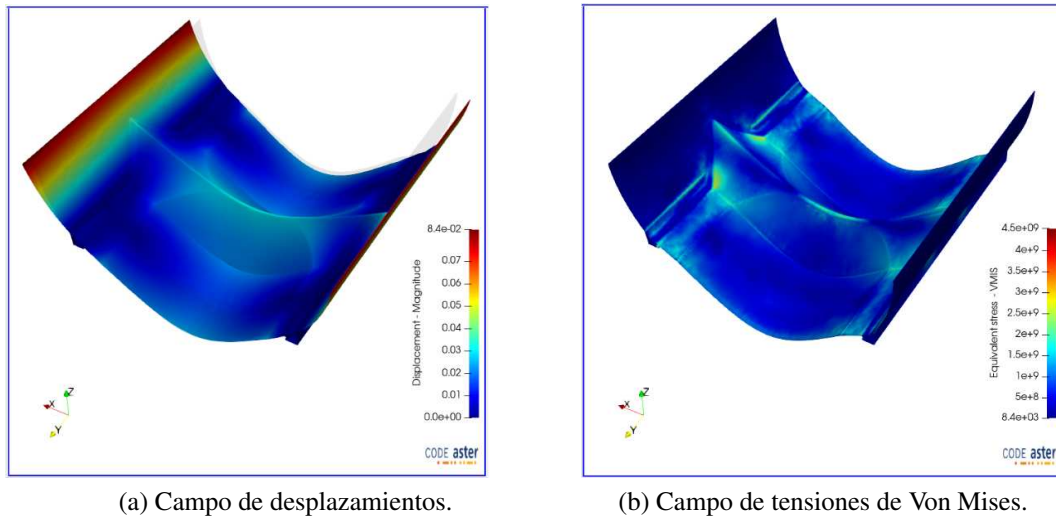


Figura 5: Campo de de desplazamientos y campo de tensiones de Von Mises en un sector inferior del cilindro que conforma el silo-tolva.

verificación de la integridad mecánica de la chapa del cilindro, utilizando el código ASME VIII div.1.

Podemos separar dichas causas en dos tipos, aquellas originadas realmente en la estructura, producto de la compleja geometría del sector que une la parte inferior del cilindro con las tolvas, y las originadas por limitaciones del propio modelo numérico utilizado. Por ejemplo, niveles limitados de refinamiento y suavización del mallado de dicha región del modelo, o bien originados por las limitaciones del uso de un modelo constitutivo elástico lineal. Sin embargo se considera de utilidad el poder apreciar, al menos cualitativamente, los efectos de concentración de tensiones obtenidos.

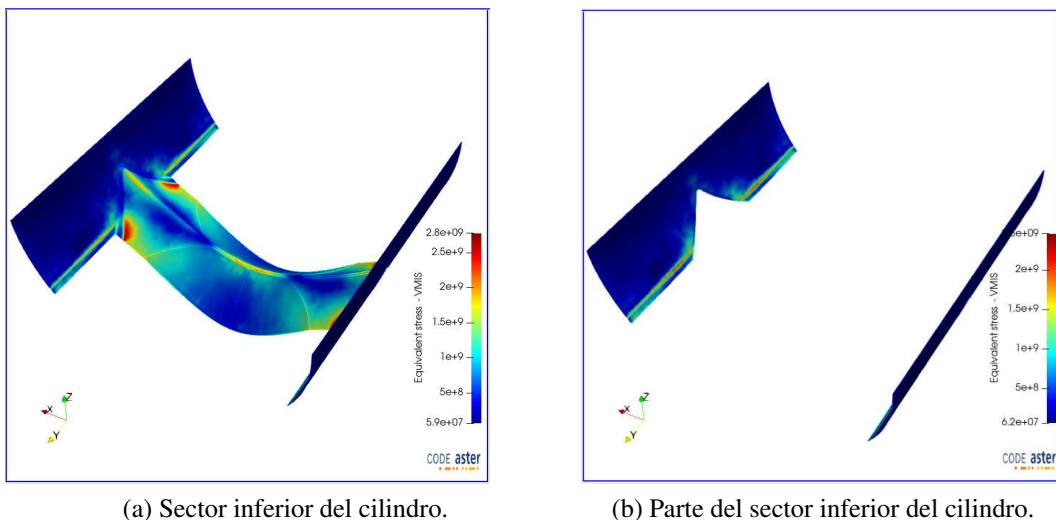


Figura 6: Campo de tensiones, de Von Mises en un sector inferior del cilindro que conforma el silo-tolva.

4.3. Modelo detallado del gato de apoyo

Para permitir que el equipo se adapte a las imperfecciones del terreno, los gatos de apoyo poseen en la zona de contacto con las cuñas del cilindro un sistema de roscas ajustables. Se debe tener presente que la parte más delicada de los apoyos del silo es la zona de contacto roscada, ya que es allí en donde se transmiten las cargas desde las cuñas del cilindro hacia los gatos de apoyo.

Con el fin de optimizar el esfuerzo computacional, se modela únicamente la porción de rosca que soporta la carga, la cual tiene un ancho en la zona de contacto con la cuña, de solo 25.4 mm, medido axialmente. Como las cargas deben ser ingresadas al módulo *Aster Study* en forma de presión se calcula para ello, con el módulo *Geometry*, el área de la superficie de apoyo (superficie helicoidal superior de la rosca) y se determina así la correspondiente presión para cada caso. La mayor de las reacciones encontradas, se adopta como condición de borde para el análisis estático. Según se observa en la Tabla 4, la máxima reacción en los apoyos es de 222,91kN. A partir del mismo se adoptó un valor de 225kN y dicho valor se utilizó para determinar la correspondiente presión de contacto, como se muestra en la Tabla 5:

Magnitud	Valor calculado	Valor adoptado
Carga seleccionada	222,91 kN	225,00 kN
Superficie cargada	2.740 mm ²	2.740 mm ²
Presión	81,06 MPa	82,00 MPa

Tabla 5: Carga y presión sobre las roscas del gato de apoyo más solicitado.

4.4. Determinación de desplazamientos y tensiones máximas en gatos de apoyo

Una vez construido el modelo en detalle del gato de apoyo, se le aplicó al mismo la máxima reacción de borde adoptada, (190,00 kN), pero en forma de presión (70,00 MPa). como se indica

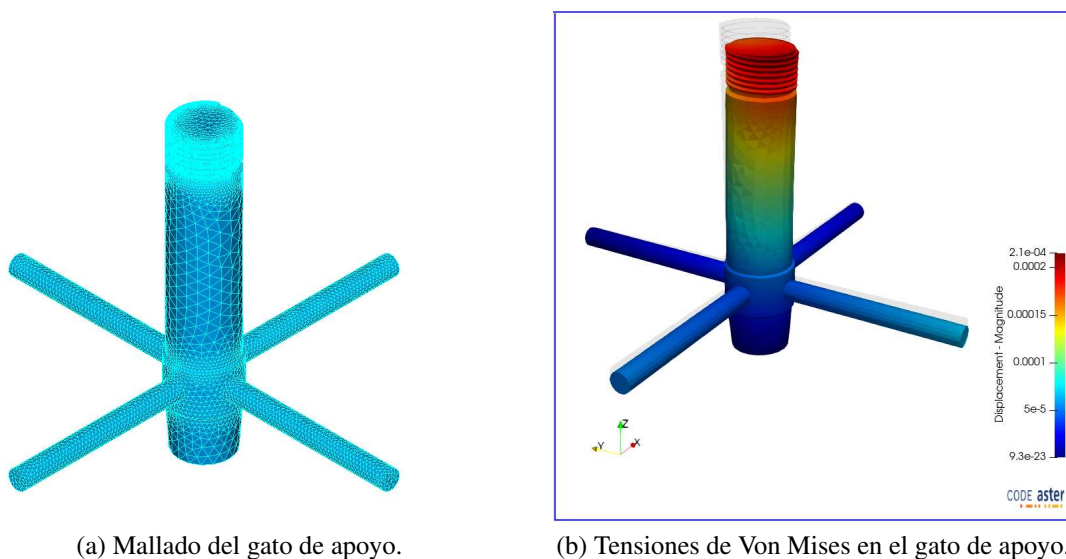
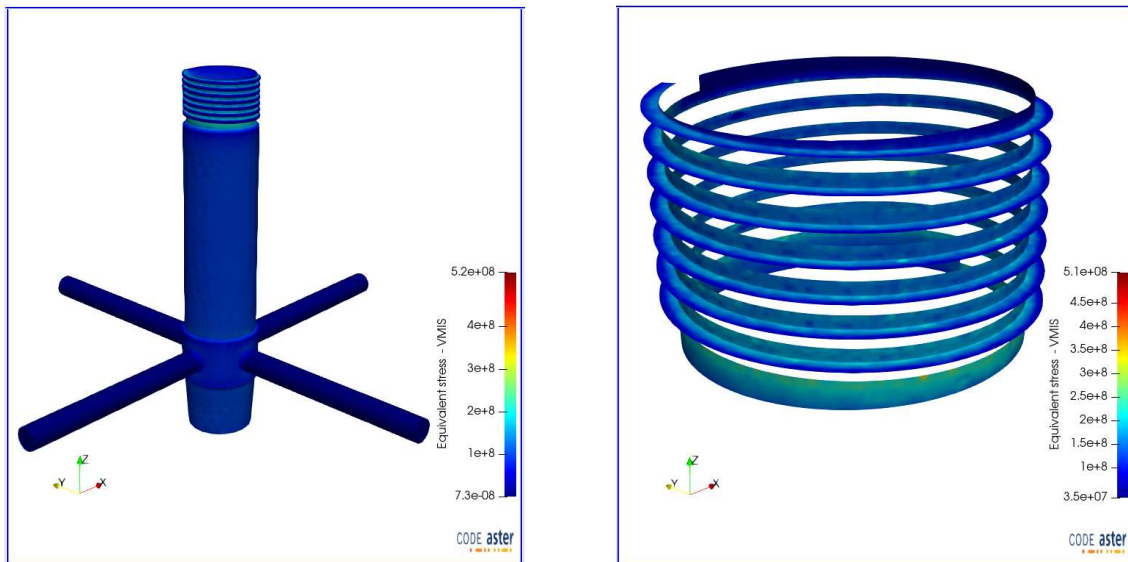


Figura 7: mallado y desplazamientos del gato de apoyo más solicitado

en la tabla 5 con el fin de determinar los estados de tensiones y deformaciones bajo la máxima sollicitación.

La Figura 7a muestra el mallado del gato de apoyo, mientras que la Figura 7b muestra el campo de desplazamientos en el gato de apoyo más sollicitado.



(a) Tensiones de V.M. en el gato de apoyo.

(b) Detalle de tensiones de V.M. en el helicoides.

Figura 8: Tensiones de Von Mises en el gato de apoyo más sollicitado.

La Figura 8a muestra el campo de tensiones de Von Mises en el gato de apoyo mas sollicitado, mientras que la Figura 8b muestra con mayor detalle el campo de tensiones de Von Mises en el helicoides que conforma la rosca. Es en dicha zona en donde se produce la transmisión de cargas desde el silo a los apoyos.

La Tabla 6 resume los resultados obtenidos de los desplazamiento máximos en el gato de apoyo más sollicitado.

Desplazamientos	Mínimo	Máximo
Desplazamientos totales	0	0,21 mm
Desp. Unitario en Nodos dirección Z	-0,25	0,91
Desp. Unitario Interpolados dirección Z	-0,19	0,51
Desp. Unitario Gaussianos Z	-0,25	0,91

Tabla 6: Desplazamientos en el gato de apoyo más sollicitado.

La Tabla 7 resume los resultados obtenidos de las tensiones máximas en el gato de apoyo más sollicitado.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió obtener las siguientes conclusiones generales:

TENSIONES	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]
σ_{zz} en nodos	-68,0	29,0
σ_{zz} interpolados	-50,0	18,0
σ_{zz} en puntos Gaussianos	-68,0	29,0
σ_{VM} en nodos	15,0	61,0

Tabla 7: Tensiones en el gato de apoyo más solicitado.

1. Se ha verificado que la chapa del cilindro principal del silo-tolva, cuenta con un espesor suficiente como para satisfacer las normas de equipos que funcionan con presión interna, como la [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#).
2. La compleja geometría del silo combinada con las características del modelo numérico utilizado han generado concentraciones de tensiones importantes, de las cuales solo podría tenerse en cuenta la ubicación de las mismas y su distribución.
3. Las características de los silo-tolva hacen necesario contar con una normativa específica para tales equipos ya que algunos comportamientos estructurales, tal como la concentración de tensiones, quedan fuera de los alcances de la norma [ASME-VIII-Div.1 \(2019\)](#).
4. El análisis complementario por elementos finitos propuesto permite aclarar varios aspectos específicos de interés en el análisis estructural pero requiere ser mejorado en lo que se refiere al mallado y al modelo constitutivo utilizados de manera tal que represente más fielmente al comportamiento estructural real del equipo modelado.

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 Prov. de Buenos Aires.

REFERENCIAS

- Asadi M., Conway M.W., y Barree R.D. Zero shear viscosity determination of fracturing fluids: An essential parameter in proppant transport characterizations. *International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, 2002.*
- ASME-II-BPVC. *Materials Part D Properties Metrics.* ASME, 2013.
- ASME-VIII-Div.1. *Pressure Vessels Code Design.* American Society of Mechanical Engineers. USA, 2019.
- AWS-D1.1. *Structural Welding Code Steel.* Welding Society. USA, 2015.
- Megyesy E.F. *Pressure Vessel Handbook*, volumen 20. LTC. USA, 2001.
- Salome-Meca. *Software de licencia GNU ver 9.7.0, que integra la interfaz gráfica Salome con el código de elementos finitos no lineal Code-Aster.* 2021.