



DISEÑO DE UNIONES ATORNILLADAS REFORZADAS EN SILOS DE ALTA CAPACIDAD

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTA

ING. BENJI CHRISTOPHER SÁNCHEZ LÓPEZ

DIRECTOR:

DR. MARIO EMIGDIO RODRÍGUEZ CASTILLO

CO- DIRECTOR:

DR. LUÍS MANUEL PALACIOS PINEDA

SINODAL:

DR. IGNACIO RAMIREZ VARGAS

Pachuca de Soto, Hgo. Septiembre de 2023
89 páginas



**Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica
ACTA**

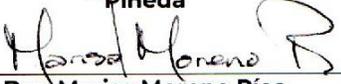
Siendo las 13:00 horas del 17 de febrero de 2023, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad*, con el siguiente contenido:

- 1 Estado del Arte y Marco Teórico
- 2 Metodología
- 3 Resultados: Obtención de esfuerzos y deformaciones
- 4 Conclusiones

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Benji Christopher Sánchez López obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®*

 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Juan Serrano Arellano	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 Dra. Erika Osiris Avila Dávila	 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos
 Dr. Armando Irvin Martínez Pérez	 Dr. Francisco Noe Demesa López	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



Pachuca, Hidalgo, **13/Septiembre/2023**
OFICIO No. DEPI-00201-23

C. ING. Benji Christopher Sánchez López
PRESENTE

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de
alta capacidad

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

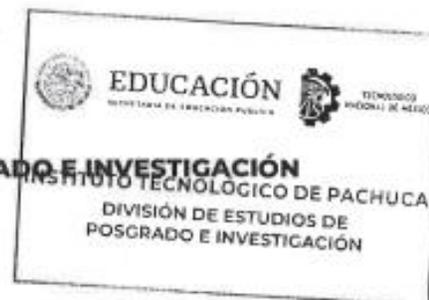
Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®

M. A. C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.p. Archivo
ECGO/LMPP



Dedicatorias

El siguiente trabajo de grado va dedicado a cada una de las siguientes personas:

A mis amigos Alejandra Servín y Jorge A. Hernández por haberme enseñado el cariño por la Ingeniería mecánica y el poder inspirarme para comenzar la maestría.

Al Dr. Luis Manuel Palacios por haberme impulsado en todo momento a no rendirme durante la maestría y por transmitirme el gusto por el diseño de componentes 3D y su evaluación por elementos finitos.

Al Dr. Mario E. Rodríguez quien agradezco por haberme apoyado en poder comprender los temas técnicos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

A mi pareja Nadia P. Rivera quien me ha apoyado en todo momento a no rendirme y en poder ser una mejor versión de mí mismo.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por brindarme el apoyo financiero. A los doctores Luis M. Palacios, Mario E. Rodríguez e Ignacio Ramírez, por su apoyo a este trabajo, por respetar mis ideas, y por su dirección y guía. Gracias por su confianza desde mi llegada a las instalaciones. Agradezco también a mis compañeros y amigos que me acompañaron a lo largo de este proceso en mi vida.

Índice general

Dedicatorias	i
Agradecimientos	ii
Índice general.....	iii
Lista de tablas	v
Lista de figuras	vi
Nomenclatura	viii
Resumen	ix
Abstract	x
Introducción.....	xi
Planteamiento del problema.....	xii
Justificación	xii
Hipótesis	xiii
Objetivos	xiii
1 Capítulo I Estado del Arte y Marco Teórico.....	1
1.1 Estado del arte	2
1.2 Marco teórico.....	9
1.2.1 Eurocódigo UNE-EN 1991-4 [43]	9
1.3 Cargas en silos debidas a materiales granulares.....	12
1.3.1 Consideraciones importantes para el cálculo de presiones.....	12
1.3.2 Presiones de llenado	12
1.3.3 Sección de paredes verticales durante el llenado	13
1.3.4 Tapa del silo	15
1.3.5 Cono de descarga.....	15
1.3.6 Sección de paredes verticales durante el vaciado	16
2 Capítulo 2 Metodología.....	17
2.1 Cálculo de carga de prueba y pre carga	18
2.2 Modelado 3D de superficies en SolidWorks.....	18
2.3 Simulación MEF	19
2.3.1 Ventajas del MEF	20
2.3.2 Ecuaciones diferenciales parciales 3D	20
2.3.3 Concepto general del método MEF	20
2.3.4 Términos más utilizados en el MEF.....	21
2.3.5 Aplicaciones no lineales del MEF	22
2.3.6 Discretización.....	22
2.3.7 Sub-modelo en ANSYS	23
2.3.8 Teoría del cemento	25
2.3.9 Densidad.....	28
2.3.10 Porosidad.....	28

2.4	Modelación 3D de silos	29
2.5	Parámetros de diseño	30
2.5.1	Geometría de silo	30
3	Capítulo 3: Resultados: Obtención de esfuerzos y deformaciones	
3.1	Obtención de esfuerzos y deformaciones	32
3.1.1	Discretización.....	32
3.1.2	Condiciones de frontera	33
3.1.3	Resultados del análisis de esfuerzos y deformaciones de Silos completos	35
3.1.4	Desarrollo de sub modelos	38
3.2	Ubicación de Sub modelo en Silo 1 y Silo 2.....	39
3.2.1	Desarrollo de sub modelos en ANSYS	39
3.2.2	Discretización en sub modelos de ambos silos.....	43
3.2.3	Condiciones de frontera aplicadas al sub modelo.....	45
3.2.4	Resultados obtenidos en sub modelos	48
3.2.5	Estado de contacto entre placas de sub modelos	60
3.2.6	Costo total de los Silos 1 y 2.....	64
4	Conclusiones	67
5	Referencias	68
6	Anexos	74
	Anexo A Plano de fabricación de silo 1	75
	Anexo B Plano de fabricación de silo 2	81
	Anexo C Artículo SOMIM	82

Lista de tablas

TABLA I CLASES DE CONFIABILIDAD DE SILOS	9
TABLA II CLASES DE CONFIABILIDAD DE SILOS	10
TABLA III CLASIFICACIÓN DE SILOS DE ACUERDO AL ESPESOR DE LA PARED	10
TABLA IV PROPIEDADES DE LOS MATERIALES GRANULARES ALMACENADOS EN SILOS.....	11
TABLA V DIMENSIONES DEL SILO 1	30
TABLA VI DIMENSIONES DEL SILO 2.....	30
TABLA VII DATOS DE DISEÑO DE SILO 1 Y SILO 2.....	30
TABLA VIII CALIBRES SILO 1	38
TABLA IX CALIBRES SILO 2	38
TABLA X PARÁMETROS DE PRECARGA	46
TABLA XI RESULTADOS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN SUB MODELOS	49
TABLA XII RESULTADOS DE ESFUERZOS EN COMPONENTES DE SUB MODELOS	52
TABLA XIII PRESIONES RESULTANTES DE SILO 1	63
TABLA XIV PRESIONES RESULTANTES DE SILO 2.....	63
TABLA XV PESO Y COSTO DE COMPONENTES INDIVIDUALES DEL SILO 1	64
TABLA XVI PESO Y COSTO DE COMPONENTES INDIVIDUALES DEL SILO 2.....	65
TABLA XVII COSTO TOTAL DEL SILO 1 EN SUS TRES PROPUESTAS DE DISEÑO.....	66
TABLA XVIII COSTO TOTAL DEL SILO 2 EN SUS TRES PROPUESTAS DE DISEÑO	66

Lista de figuras

FIG. 1 GEOMETRÍA GENERAL DE SILOS CON CONO [43]	12
FIG. 2 FORMA DE LOS SILOS, DIMENSIONES Y NOTACIÓN DE LAS PAREDES [43].....	14
FIG. 3 VISTA PLANTA Y ALZADO DE LA PRESIÓN LOCAL [43].	14
FIG. 4 CARGAS EN LA TOLVA Y FUERZAS DE TRACCIÓN EN LA PARED SUPERIOR DE LA TOLVA. [43].....	15
FIG. 5 MODELO 3D DE SILOS CON SUPERFICIES.....	19
FIG. 6 PROYECCIÓN MEF EN CASOS REALES [48]	20
FIG. 7 DISCRETIZACIÓN DE SILO 1	23
FIG. 8 DISCRETIZACIÓN DE SILO 2	23
FIG. 9 ZONIFICACIÓN DE UN SUB MODELO [46].	24
FIG. 10 LÍMITES DE CORTE EN SUB-MODELO [47].....	24
FIG. 11 ESQUEMA DE MODELO COMPLETO Y SUB-MODELO [47].	25
FIG. 12 PROCESO GENERAL DE LA PRODUCCIÓN DEL CEMENTO [50].	26
FIG. 13 ESQUEMA GENERAL DE SILO 1 (MM).	29
FIG. 14 ESQUEMA GENERAL DE SILO 2 (MM).	29
FIG. 15 DISCRETIZACIÓN GENERAL DEL SILO 1	32
FIG. 16 DISCRETIZACIÓN GENERAL DEL SILO 2	33
FIG. 17 CONDICIONES DE FRONTERA EN SILO 1.....	34
FIG. 18 CONDICIONES DE FRONTERA EN SILO 2.....	34
FIG. 19 DEFORMACIONES RESULTANTES EN SILO 1.....	35
FIG. 20 DEFORMACIONES RESULTANTES EN SILO 2.....	35
FIG. 21 ESFUERZOS RESULTANTES EN SILO 1.....	36
FIG. 22 ESFUERZOS RESULTANTES EN SILO 2.....	36
FIG. 23 ESFUERZOS RESULTANTES EN COMPONENTE DEL SILO 1.....	37
FIG. 24 ESFUERZOS RESULTANTES EN CADA COMPONENTE DEL SILO 2.....	37
FIG. 25 EXPLOSIONADO DE PROPUESTAS DE SUB MODELOS PARA SILO 1 Y 2.....	38
FIG. 26 UBICACIÓN DE SUB MODELOS EN SILO 1 Y 2.	39
FIG. 27 UBICACIÓN DE SUB MODELOS EN SILO 1 Y 2	40
FIG. 28 UBICACIÓN DE SUB MODELOS EN SILO 1 Y 2.	40
FIG. 29 SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA SUPERIOR ANILLOS 6 Y 7	41
FIG. 30 SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA MEDIA ANILLOS 4 Y 5	41
FIG. 31 SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA INFERIOR ANILLO 2 Y 3	42
FIG. 32 SUB MODELOS DE SILO 2 – ZONA SUPERIOR ANILLOS 4 Y 5.....	42
FIG. 33 SUB MODELOS DE SILO 2 – ZONA INFERIOR ANILLO 2 Y 3	43
FIG. 34 DISCRETIZACIÓN DE SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA SUPERIOR. ANILLOS 6 Y 7.....	44
FIG. 35 DISCRETIZACIÓN DE SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA MEDIA ANILLOS 4 Y 5.....	44
FIG. 36 DISCRETIZACIÓN DE SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA INFERIOR ANILLOS 2 Y 3.....	44
FIG. 37 DISCRETIZACIÓN DE SUB MODELOS DE SILO 2 – ZONA SUPERIOR ANILLOS 4 Y 5.....	45
FIG. 38 DISCRETIZACIÓN DE SUB MODELOS DE SILO 2 – ZONA INFERIOR ANILLOS 3 Y 4.....	45
FIG. 39 CONDICIONES DE FRONTERA DE SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA SUPERIOR ANILLO 6 Y 7	46
FIG. 40 CONDICIONES DE FRONTERA DE SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA MEDIA ANILLO 4 Y 5	47
FIG. 41 CONDICIONES DE FRONTERA DE SUB MODELOS DE SILO 1 – ZONA INFERIOR ANILLO 2 Y 3	47
FIG. 42 CONDICIONES DE FRONTERA DE SUB MODELOS DE SILO 2 – ZONA SUPERIOR ANILLO 4 Y 5	48
FIG. 43 CONDICIONES DE FRONTERA DE SUB MODELOS DE SILO 2 – ZONA INFERIOR ANILLO 3 Y 4	48
FIG. 44 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 1 EN LA ZONA SUPERIOR ANILLOS 6 Y 7.....	49
FIG. 45 DEFORMACIONES OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 1 EN LA ZONA SUPERIOR ANILLOS 6 Y 7	49
FIG. 46 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 1 EN LA ZONA MEDIA AMILLOS 4 Y 5.....	50
FIG. 47 DEFORMACIONES OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 1 EN LA ZONA MEDIA AMILLOS 4 Y 5.....	50
FIG. 48 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 1 EN LA ZONA INFERIOR ANILLOS 2 Y 3.....	50
FIG. 49 DEFORMACIONES OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 1 EN LA ZONA INFERIOR ANILLOS 2 Y 3	50
FIG. 50 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 2 EN LA ZONA SUPERIOR ANILLO 4 Y 5	51
FIG. 51 DEFORMACIONES OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 2 EN LA ZONA SUPERIOR ANILLO 4 Y 5	51

FIG. 52 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 2 EN LA ZONA INFERIOR ANILLOS 3 Y 4.....	51
FIG. 53 DEFORMACIONES OBTENIDOS EN SUB MODELO DE SILO 2 EN LA ZONA INFERIOR ANILLOS 3 Y 4	51
FIG. 54 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 1 DE LA ZONA SUPERIOR DEL SILO 1 ANILLO 6 Y 7	53
FIG. 55 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 2 DE LA ZONA SUPERIOR DEL SILO 1 ANILLO 6 Y 7	53
FIG. 56 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 3 DE LA ZONA SUPERIOR DEL SILO 1 ANILLO 6 Y 7	54
FIG. 57 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 1 DE LA ZONA MEDIA DEL SILO 1 ANILLO 4 Y 5.....	54
FIG. 58 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 2 DE LA ZONA MEDIA DEL SILO 1 ANILLO 4 Y 5.....	55
FIG. 59 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 3 DE LA ZONA MEDIA DEL SILO 1 ANILLO 4 Y 5.....	55
FIG. 60 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 1 DE LA ZONA INFERIOR DEL SILO 1 ANILLO 2 Y 3	56
FIG. 61 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 2 DE LA ZONA INFERIOR DEL SILO 1 ANILLO 2 Y 3	56
FIG. 62 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 3 DE LA ZONA INFERIOR DEL SILO 1 ANILLO 2 Y 3	57
FIG. 63 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 1 DE LA ZONA SUPERIOR DEL SILO 2 ANILLO 4 Y 5	57
FIG. 64 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 2 DE LA ZONA SUPERIOR DEL SILO 2 ANILLO 4 Y 5	58
FIG. 65 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 3 DE LA ZONA SUPERIOR DEL SILO 2 ANILLO 4 Y 5	58
FIG. 66 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 1 DE LA ZONA INFERIOR DEL SILO 2 ANILLO 3 Y 4	59
FIG. 67 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 2 DE LA ZONA INFERIOR DEL SILO 2 ANILLO 3 Y 4	59
FIG. 68 ESFUERZOS OBTENIDOS EN SUB MODELO OPCIÓN 3 DE LA ZONA INFERIOR DEL SILO 2 ANILLO 3 Y 4	60
FIG. 69 ESTADO DE CONTACTO DE SUB MODELOS DE SILO 1	61
FIG. 70 PRESIÓN DE CONTACTO DE SUB MODELOS DE SILO 1	61
FIG. 71 ESTADO DE CONTACTO DE SUB MODELOS DE SILO 2	62
FIG. 72 PRESIÓN DE CONTACTO DE SUB MODELOS DE SILO 2	62

Nomenclatura

A_t	Área de esfuerzo de tensión
BRC	British Retail Consortium
C_b	Coefficiente de mayoración de la presión sobre el fondo
C_w	Coefficientes de mayoración de la presión
D_c	Diámetro interior del silo
E_i	Distancia entre altura máxima del talud del material respecto al eje vertical
FEM	Finite Element Method
F_i	Precarga
F_p	Carga de prueba
K_s	Relación de presiones horizontal y vertical
P_v	Presión vertical
P_{n1} ,	Presión debida al llenado de la tolva
P_{n2}	
P_{n3}	Presión debida a la presión vertical sobre el material almacenado directamente por encima de la transición
P_0	Presión vertical actuando en la transición
ρ_r	Densidad real (Kg/m ³)
P_p	Presión local
P_{wf}	Presión de rozamiento sobre la pared del silo
P_{hf}	Presión horizontal
P_v	Presión vertical
P_{we}	Presión fija
P_{he}	Presión fija
P_{wf}	Presión de rozamiento sobre la pared
P_{hf}	Presión horizontal
P_t	Presión de rozamiento sobre la pared
rpm	Revoluciones por minuto
S_p	Resistencia de prueba mínima
t	Espesor
U	Perímetro interior.
v	Volumen real del producto (m ³)
WE	Viento y silos vacíos
WF	Viento y silos llenos
X	Longitud entre 0 y I_h (véase la figura 5);
Z	Profundidad
γ	Densidad de la carga
μ	Coefficiente de rozamiento de la pared

Resumen

Los silos están diseñados para almacenar diversos productos en óptimas condiciones, debido a la alta demanda de productos granulares en la sociedad, es importante extender su ciclo de vida en diferentes etapas, así como considerar el tiempo necesario para el transporte de materiales a granel de un punto a otro. Este trabajo presenta un análisis del desempeño mecánico de uniones atornilladas utilizadas en silos para almacenamiento de materiales a granel. En particular, se estudia la efectividad de tres tipos de uniones atornilladas: una sin refuerzo, una con refuerzo angular y una con refuerzo cuadrado en un silo de alta capacidad de 800m^3 y otro de 51.4 m^3 . El análisis involucró el uso de la técnica de submodelado de análisis de elementos finitos, que permitió construir un gran modelo de elementos finitos con elementos tipo cascarón y un submodelo con elementos sólidos. Al analizar el estado de esfuerzos de cada junta, se pudo determinar el estado de contacto y la presión de contacto. Los hallazgos mostraron que las uniones atornilladas reforzadas con placas triangulares y cuadradas fueron efectivas para mantener la presión de contacto, incluso en condiciones de alta presión. Este estudio proporciona información valiosa sobre el diseño de uniones atornilladas utilizadas en silos, lo que puede ayudar a garantizar su funcionamiento confiable y seguro.

Abstract

Silos are designed to store various products in optimal conditions, due to the high demand for granular products in society, it is important to extend their life cycle in different stages, as well as to consider the time required to transport bulk materials from one point to another. This paper presents an analysis of the mechanical performance of bolted joints used in silos for bulk material storage. In particular, the effectiveness of three types of bolted joints is studied: one without reinforcement, one with angular reinforcement and one with square reinforcement in a high capacity silo of 800m³ and another of 51.4 m³. The analysis involved the use of the finite element analysis sub-modeling technique, which allowed the construction of a large finite element model with shell-type elements and a sub-model with solid elements. By analyzing the stress state of each joint, the contact state and contact pressure could be determined. The findings showed that bolted joints reinforced with triangular and square plates were effective in maintaining the contact. pressure, even under high pressure conditions. This study provides valuable information on the design.

Introducción

Los silos cuentan con gran demanda en la industria, ya que están especialmente diseñados para almacenar productos a granel como: granos, plástico, arena, fertilizantes o cualquier otro tipo de producto granular que deba estar en un ambiente libre de humedad. La idea de almacenar grano se remonta al siglo VIII a.C., tras el descubrimiento de algunos hallazgos arqueológicos. En la antigua Roma, las bóvedas subterráneas se cubrían con arcilla dura para una mejor retención de los objetos almacenados.

Los silos de acero se desarrollaron a principios del siglo XX y se utilizaron por primera vez para la industria alimentaria. A fines de la década de 1970, el silo de acero reemplazó a casi todos los tipos de graneros como instalaciones de almacenamiento de granos en la industria extranjera. A medida que la tecnología ha evolucionado, los silos de acero se pueden utilizar para almacenar materiales granulares, en polvo y líquidos.

Los silos son diseñados para almacenar y mantener en condiciones óptimas diversos productos y debido a la alta demanda de mercancía granular en la sociedad, el sector empresarial necesita alargar el ciclo de vida de estos en las diferentes etapas correspondientes a cada proceso industrial y a los tiempos necesarios para transportar de un punto a otro el material a granel [1]. Su importancia radica principalmente dentro de la industria alimenticia, ya que son utilizados para el resguardo de granos y otros materiales a granel [2]. Debido a sus características son usados por otras empresas como la minera [3], construcción (cemento), plástica [4], química [5], agrícola [6], entre otras.

Se puede encontrar una gran variedad de diseños/arquitecturas de silos, entre los que se encuentran silos de hormigón [7], silos de tela, silos de acero [8], etc. y cada tipo tiene procesos de fabricación especializada, por lo que existe un número muy alto de condiciones y parámetros que necesitan de un estudio especializado [9]. Según Romulo Marcal Gandia, et al 2021[10], se menciona que existen diversos cuestionamientos, respecto al almacenamiento y a la estimación de presiones en silos.

Actualmente, los silos de acero han tenido un auge excepcional en el almacenamiento de materiales a granel, debido a su eficiencia estructural y/o facilidad de construcción/montaje en la industria. Un silo que almacena 800 toneladas de materiales a granel se considera de alta capacidad, dicho contenedor fue desarrollado con el fin de obtener mayores utilidades obtenidas con evaluaciones y proyecciones de la producción de material a granel y su venta [11]. Sin embargo, estos tienen algunos problemas, como la poca estabilidad debido a los bajos espesores de pared, pandeo debido a la fricción individual de las partículas de material contra las paredes del silo y/o presiones simétricas durante la descarga del producto [1, 12].

Planteamiento del problema

El comportamiento mecánico de las paredes de los silos continúa siendo ampliamente estudiado para solucionar este problema. Ya que, durante su llenado, almacenamiento y descarga, el silo sufre diferentes presiones provocando fuerzas axiales en sus paredes [9]. Además, existen pocas evaluaciones experimentales a gran escala en el mundo para facilitar el estudio de las presiones de los silos, esto debido a los altos costos que representa la manufactura para este tipo de análisis, lo que ha dificultado el avance en esta área para poder calcular el comportamiento de las placas de acero de un silo de forma fiable [13].

El material granular que almacenan los silos cuenta con distintas propiedades/características como: densidad, ángulo de inclinación, coeficientes de fricción, entre otros. El tipo de material es un factor crítico en el cálculo estructural del silo, especialmente para el producto a almacenar, ya que afecta la presión que se ejerce sobre el silo [14]. Actualmente, el estudio relativo a la predicción de presiones en un silo es un caso abierto, por las dificultades que ello conlleva [16]. Así, la teoría publicada por Janssen centrada en el cálculo de presiones establece una ecuación reconocida, que considera el equilibrio de fuerzas en una parte elemental del material almacenado en su interior. Sin embargo, las hipótesis consideradas para el cálculo y diseño de los silos sólo se refieren al estado estático y materiales que son de difícil comprensión y que no disminuyen de volumen al ser sometidos a presión o compresión durante cada una de las etapas del proceso por el que pasa [17].

Justificación

En la actualidad, existen diferentes normativas utilizadas para predecir las presiones y los esfuerzos que se presentan en las paredes de los silos, sin embargo, el Eurocódigo EN 1991-4 ha ganado relevancia debido a su gran aplicación a nivel mundial y con resultados satisfactorios en los diseños realizados. [8]. Durante los últimos años, información sobre el análisis de las juntas atornilladas en silos es escasa y estas presentan con frecuencia fallas que, dependiendo de su nivel de severidad, pueden tener un impacto representativo en la estabilidad y confiabilidad de los conjuntos de cada uno de los componentes que constituyen el silo [12, 18].

Hablando de la resistencia de los pernos con los que son ensambladas los componentes modulares del silo, el valor de la resistencia de prueba media, de la resistencia a tensión media y de las desviaciones estándares correspondientes, no forman parte de los códigos de especificación, al igual que no se sabe con exactitud cómo se distribuye la carga en el perno o las deformaciones relativas de éste, por lo que la determinación de estos valores es responsabilidad del diseñador mediante ensayos de laboratorio antes de diseñar una especificación confiable. [9].

Hipótesis

La geometría de uniones atornilladas perimetrales en silos contribuye a una mayor resistencia logrando reducir los esfuerzos en zonas críticas durante su operación y logrando una reducción responsable de calibres para su manufactura.

Objetivos

Objetivo general

Analizar uniones atornilladas perimetrales en silos de acero de alta capacidad mediante sub modelos con elementos finitos.

Objetivos específicos

- Elaborar el procedimiento de diseño para dos silos de 800 m^3 y 51.4 m^3 con superficies 3D.
- Evaluar mediante elementos finitos los silos para la obtención de esfuerzos y deformaciones.
- Evaluar 3 tipos de uniones atornilladas perimetrales con elementos finitos en ambos silos mediante sub modelos.
- Evaluar el estado de contacto de las uniones atornilladas en cada una de sus 3 alternativas de cada silo.
- Determinar la mejor unión atornillada para la manufactura de silos atornillados.

1 Capítulo I Estado del Arte y Marco Teórico

En esta sección se mencionan los antecedentes teóricos, la revisión bibliográfica y las herramientas utilizadas en este estudio. Para ello, se divide, por un lado, en una descripción de las investigaciones más recientes y relevantes al cálculo estructural de silos y por otro, los métodos experimentales y numéricos utilizados que cubrirán los factores importantes en la realización del estudio.

1.1 Estado del arte

A lo largo de los últimos años, diversos autores han desarrollado investigaciones acerca del comportamiento estructural de los silos, las más relevantes son presentadas a continuación:

Qing Shuai Cao et al, China 2018 [19]. Demostró un análisis de pandeo de silos de acero sometido a la presión del viento de acuerdo con los Eurocódigos (EN1990, 1991, 1993) y los casos de carga combinados propuestos WE (viento y silos vacíos) y WF (viento y silos llenos). Por ejemplo, se consideraron 6 silos de acero con una capacidad de 30,000 a 60,000 m³ y una esbeltez de 4,77 a 0,35, (silos intermedios muy delgados y achaparrados). Los modelos de elementos finitos se crearon utilizando ANSYS. Se realizaron cinco tipos de análisis de pandeo con o sin plasticidad del material en modelos geoméricamente completos o incompletos. Los efectos de las no linealidades geométricas y materiales, así como la soldadura incompleta sobre la estabilidad de los silos de acero son muy complejos y están estrechamente relacionados con la flexibilidad del diseño del silo.

P. Hajko et al, Polonia 2018 [20]. Trata el pandeo de silos metálicos cilíndricos con láminas y columnas corrugadas, se prestó atención al pandeo local de columnas de paredes delgadas de sección abierta formadas en frío en silos cilíndricos de metal con hojas corrugadas, así como efecto de las dimensiones del perfil de la columna, la altura del silo, el diámetro del silo, el espesor de la pared corrugada y la columna.

Se investigó exhaustivamente la distancia de número/columna, la altura de la ondulación y el tipo de sólido a granel, se realizaron análisis tridimensionales de bifurcación lineal para silos utilizando el método de elementos finitos y se compararon con fórmulas analíticas del Eurocódigo 3. Y basándose en los resultados de los cálculos, se elaboraron algunas recomendaciones para el dimensionamiento de silos.

Shervin Maleki et al, Irán 2018 [21]. En este estudio se realizó un análisis numérico del comportamiento frente al viento de un silo corrugado de acero real de 8,02 m de diámetro y 17,62 m de altura, reforzado con un rigidizador vertical abierto. Por lo tanto, se realizó un análisis de pandeo lineal y no lineal detallado utilizando un modelo complejo de elementos finitos en 3D, lo cual examina específicamente la influencia de las dimensiones de un perfil ondulado sinusoidal, la distribución de la carga del viento a lo largo de la vertical y a lo largo de la circunferencia corresponde al Eurocódigo. Para silos aislados y silos grupales, se utilizaron dos distribuciones de presión circunferencial propuestas y para investigar la eficiencia del material de los silos de acero corrugado, se comparó un silo de acero corrugado a escala real con uno de placa plana equivalente. También se realizó un análisis de sensibilidad de defectos para ambas estructuras.

Alireza Moazezi Mehretehran et al, Irán 2018 [22]. Este artículo se investigó el comportamiento de pandeo dinámico de un silo de acero sujeto a excitación de base horizontal. La resistencia al pandeo elástico-plástico de tres silos con diferentes relaciones de aspecto se estima mediante análisis dinámico incremental (IDA), con lo que se obtuvo la aceleración máxima del terreno (PGA) en el

cortante base crítico, el momento base y el momento de pandeo. Además, se evaluó la presión normal adicional inducida por los sólidos a granel en la pared del silo y se comparó con la presión del Eurocódigo. Los resultados obtenidos ilustraron que los silos delgados son más susceptibles a la rotura por pandeo.

Phung Tu et al, Australia 2018 [23]. Afirma que existen tres variantes del fenómeno de oscilación del silo: bocina, impacto del silo y pulsación del silo. Las aceleraciones recopiladas de contenedores experimentales se analizaron utilizando señales no lineales y no estacionarias, los resultados mostraron la existencia de un espectro sísmico de silo, que proporciona una base sólida para futuras investigaciones sobre el fenómeno de la vibración del silo, en particular, los métodos de diseño estructural para mitigar los efectos de la vibración del silo en las estructuras del silo.

Yaxiong Zhang et al, China 2018 [24]. En esta investigación, se encontró que las características de flujo del material granular (arroz) estudiado en este trabajo cambiaron significativamente en el proceso de cambio de régimen de flujo, en el que la velocidad, porosidad y dirección del flujo cambiaron de uniforme a no uniforme respectivamente; de pequeño a grande, de horizontal a vertical. Con base en estos cambios, la ubicación específica de la transición del régimen de flujo se define como la altura crítica y puede determinarse por la tasa específica de cambio de velocidad. Además, la altura crítica aumenta con un aumento en la mitad del diámetro del silo, pero inicialmente permanece casi constante y disminuye con un aumento en el tamaño de la salida. Finalmente, se creó un modelo matemático entre los parámetros de la geometría del silo y la altura crítica. En general, estos resultados son útiles para comprender los cambios en la fluidez de los granos de arroz durante la descarga, así como para brindar orientación sobre el diseño correcto de los silos cónicos.

Jakub Marcinowski et al, Polonia 2019 [25]. En este trabajo, se habló acerca de la derivación del apartado 5.6 del Eurocódigo EN 1991-4 donde se presentaron dos enfoques diferentes, las consideraciones teóricas se ilustraron con ejemplos seleccionados que muestran el aumento en la tensión de la pared del silo como resultado del enfriamiento repentino de la pared de este.

Se mencionan silos con diferentes esbeltes y diferentes coeficientes de fricción de pared, los cuales fueron considerados. El análisis realizado reveló que en todos los casos la fórmula basada en la deformación plana dio valores mayores que el aumento de la presión horizontal, por otro lado, los cálculos revelaron que la repentina caída de temperatura de la pared del silo de 20° C puede incluso conducir a un aumento del 35% en la presión horizontal.

Los resultados de las soluciones analíticas se complementaron con simulaciones numéricas que confirmaron la corrección de las fórmulas derivadas en este trabajo. La fórmula alternativa basada en la suposición de deformación plana debería reemplazar la recomendada en la fórmula del Eurocódigo en el caso de tensiones planas.

Özer Zeybek et al, Turquía 2019 [26]. En este nuevo estudio, se evaluaron vigas anulares de dimensiones y rigidez prácticas, valorando el efecto de suavizar la tensión axial de la membrana del caparazón a un estado uniforme y encontrando el efecto sobre la resistencia al pandeo del cuerpo del silo. En este estudio, se utilizó un estudio paramétrico de elementos finitos de un almacén de silo

conectado a una viga anular flexible para investigar las tensiones inducidas en una viga anular de sección cerrada de dimensiones prácticas con una rigidez inferior a la ideal.

Los resultados mostraron que la tensión resultante en la viga anular es relativa a la tensión en la viga anular aislada bajo la misma carga y esta puede estar directamente relacionada con la relación de rigidez establecida entre el pórtico y la viga anular.

Qing Shuai Cao et al, China 2019 [27]. En este análisis, se evaluó el comportamiento de pandeo de silos circulares de acero con grietas de producción circunferenciales y meridionales de acuerdo con los Eurocódigos EN1990, 1991 y 1993. Se usó un silo de acero con un diámetro de 10 m y una altura de 24 m como silo de ejemplo. Los modelos de elementos finitos de silos de acero cubren una amplia gama de geometrías de fisuras. Ángulos de fisura circunferencial que van de 10° a 60° , longitudes de fisura meridional que van de 0,5 m a 3,0 m, y varias alturas de fisura. Las trayectorias de pandeo en equilibrio y las deformaciones por pandeo se investigan mediante una serie de cálculos numéricos. El modo de pandeo de una estructura de silo con grietas de fabricación es bastante diferente al de un silo geoméricamente perfecto, la altura de grieta más desfavorable para el pandeo estructural se encuentra en la parte inferior de la pared del silo, y el factor de carga de pandeo aumenta a medida que disminuye la longitud de la grieta. Además, el agrietamiento es menos favorable al comportamiento de pandeo de las estructuras de silo con mayor esbeltez que las estructuras de silo con menor esbeltez.

Shervin Maleki et al, Irán 2019 [28]. En este artículo, investigó numéricamente el comportamiento del pandeo por viento de tres silos de acero de muestra con paredes compuestas de laminados isotrópicos. La distribución de la carga de viento vertical y circunferencial se tomó del Eurocódigo. Se consideraron dos distribuciones de presión circunferencial propuestas para silos aislados y silos grupales con techos cerrados. Además, evaluaron el efecto de la presión interna adicional propuesta por el Eurocódigo sobre la capacidad de pandeo de silos de ventilación con aberturas pequeñas. Los resultados obtenidos sugieren una reducción considerable de la resistencia al pandeo de los silos imperfectos.

C. Bywalski et al, Polonia 2019 [29]. El artículo analiza la destrucción del techo de hormigón armado sobre la cámara del silo cilíndrico para almacenar la harina extraída. La falla se debió al colapso de un arco formado dentro de la cámara y una columna de material deslizándose hacia abajo. Se han identificado varios factores que contribuyen al endurecimiento y la flexión de materiales pegajosos almacenados en contenedores, se realizó un análisis de cargas anómalas en descargas de arco espontáneas o inducidas, tales cargas no se tienen en cuenta en los criterios de diseño.

Se identificó la necesidad de tener en cuenta estas cargas en el diseño, se presentó una propuesta inicial. Del mismo modo, se describe cómo prevenir sus efectos y sus limitaciones, se revelaron las razones directas e indirectas de la negativa y se identificaron los errores de diseño y operación que provocaron los arcos, el colapso del techo del silo y las consecuencias del colapso.

P. Iwicki et al, Polonia 2019 [30]. En esta investigación se trabajó con el pandeo de silos metálicos cilíndricos compuestos de lámina corrugado y columnas de sección abierta de paredes delgadas. En lugar de realizar un cálculo 3D completo de toda la estructura del silo, se propone un modelo de segmento de pared de silo de varias columnas simplificado para calcular la resistencia general al pandeo del silo. Se calcularon 3 silos reales con diferentes geometrías (2 delgados y 1 mediano delgado). De acuerdo con el Eurocódigo 1, las paredes del silo se cargan mediante presión de pared tangencial, presión de pared horizontal y carga de parche.

El modelo simplificado del segmento de la pared del silo demuestra completamente su eficacia en el cálculo de elementos finitos de la resistencia al pandeo del silo.

J.M. Rotter et al, Reino Unido 2019 [31]. El modelo de este estudio predijo el estado de tensión del sólido almacenado y la presión aplicada a la pared flexible del silo. Se investigó la distribución desigual de la presión horizontal en cada profundidad al final del terraplén, se observó que la dependencia empírica del cambio de presión horizontal para cada pared recta obtenida sobre la base de observaciones experimentales de estudios previos, está en total acuerdo con la predicción calculada, demostrando que el coeficiente de esta relación depende de la profundidad debajo de la superficie del sólido almacenado y la rigidez relativa del sólido almacenado y la pared del contenedor. Después de muchos cálculos usando varios sólidos, se han obtenido relaciones empíricas que son adecuadas para el diseño práctico de varios sólidos almacenados, para los cuales se conocen las propiedades relevantes. La expresión resultante es muy adecuada para la determinación práctica de la presión de llenado de un silo rectangular, proporcionando una guía sobre la presión de diseño del silo basada en resultados teóricos en lugar de datos empíricos.

Lakshmi E. Jayachandran et al, India 2019 [32]. En este estudio, un silo de hormigón armado (RCS) de fondo plano para almacenar arroz fue analizado. Se desarrolló un modelo de elementos finitos (FEM) 3D a escala real del silo BRC y el llenado progresivo de granos en el software ANSYS®. Se modeló la interacción entre el grano almacenado y el cuerpo del silo, considerando las características del arroz integral y DBK con una simplificación mínima. Este método también puede determinar la presión máxima local y los modelos de distribución de tensiones en la capa de grano, que generalmente están fuera del alcance de los métodos analíticos. Las posibles causas de las fluctuaciones del patrón de estrés se discuten en detalle.

Este estudio reveló dificultades relacionadas con FEM y resultados analíticos para predecir la carga de silos de tamaño pequeño y mediano utilizados en granjas.

Muhammad Zaki et al, Pakistán 2019 [33]. Este estudio está dedicado a predecir las tasas de descarga de masas granulares por gravedad a través de orificios de varias formas (redondas, cuadradas y triangulares) con la misma área de apertura cuando se descargan de silos cilíndricos de fondo plano utilizando un software de código abierto. La idea principal de este trabajo fue utilizar tres formas de agujeros para comparar las tasas de descarga de masa (Q) en estado estacionario (promedio) para perlas de vidrio esféricas y calcular las constantes de la ecuación de Bevelou ($k&C$) y la dependencia de la forma de los agujeros. Los contornos de velocidad a lo largo de la dirección radial se trazaron

a diferentes alturas de capa, mostrando la distribución de la velocidad y la dependencia de la velocidad en la forma de la apertura del flujo del vórtice.

Qun Zhou et al, China 2019 [34]. En este artículo, se investigaron la distribución del campo eléctrico en una tolva a escala de laboratorio que contiene polvo de polietileno cargado mediante el modelado en un software de elementos finitos, para confirmar la eficacia de este método, se midió la intensidad del campo eléctrico con una sonda electrostática. Con este modelo se evaluaron los efectos del factor de llenado (0-100%), la forma de la pila de polvo (plana, cónica, inclinada y cono invertido) y el ángulo de reposo del polvo (0-60°).

La ubicación de la máxima intensidad de campo en el silo ocurrió en la superficie de la pila, en la pared del silo y en el fondo de la pila, el riesgo de descarga electrostática en los silos aumentó con el aumento de la tasa de llenado y el ángulo de reposo del polvo con un factor de relleno del 20%, los pilotes de cono inverso y los pilotes cónicos fueron los dos tipos de pilotes más peligrosos. Para pilotes neutros (del 20% al 80%), los pilotes cónicos y los pilotes inclinados estos fueron los más peligrosos, la tasa de llenado aumentó significativamente (N80%), la fuerza máxima del campo eléctrico en la superficie del este aumentó rápidamente y la descarga electrostática cuando el silo estaba casi lleno indica lo más probable.

Shubham Subrot Panigrahi et al, Australia 2021 [35]. En esta investigación se realizaron estudios de perforación secuencial utilizando métodos dinámicos de fluidos computacionales para predecir volúmenes optimizados de extracción de testigos para silos de 1000 t equipados con ventiladores de 3 kW y 5 kW. Después de cada muestreo, la configuración se validó utilizando datos de flujo de aire medidos desde la superficie superior de un silo de granos en una granja de 12,8 m de diámetro.

Los resultados mostraron que el modelo predijo un error estándar de $0.0009e0.0024$ m s⁻¹ para las cajas de extracción de testigos de 16t, 32t, 48t, 80t y 158t. cuando estaba completamente cargada, alrededor del 9 % de la masa total (80 t) tuvo que descargarse con un ventilador de 3 kw para lograr el flujo de aire deseado en el área de grano superior. Sin embargo, con el mismo efecto que el ventilador de 5kW, la cantidad de descarga disminuyó un 2% (16t), por ello, se recomienda un ventilador de 5kW, que reduce el porcentaje de puntos ciegos, hasta un 65 % en el área inferior a granel en un silo típico de 1000 t.

Quan Chen et al, China 2021 [36]. En este artículo, se presentaron resultados experimentales para los perfiles de temperatura y velocidad en estado estacionario de partículas de perlas de vidrio dentro de un silo de fondo plano. Descubrieron que la dinámica del sistema granular durante la descarga es estable a escala mesoscópica, en particular, el movimiento direccional ordenado de partículas puede ocurrir cerca de los agujeros, además, la correlación entre la distribución de temperatura de las partículas y el vector de campo de velocidad es opuesta en las direcciones radial y axial.

Según el modelo cinético, la causa principal de la inversión de la correlación espacial es que la intensidad de la dispersión de partículas disminuye al disminuir la altura del silo lo cual, destaca el papel sorprendente y no reconocido que juega el movimiento de difusión de partículas en la disipación de energía para el flujo de la tolva.

Rômulo Marçal Gandia et al, Brasil 2021 [37]. En este artículo, se presentaron los resultados de presión en un silo a gran escala de las pruebas realizadas en una estación de prueba con productos de flujo libre. Se probaron seis tipos de geometrías de silo (delgado y con ángulo de tolva) llenando el silo hasta la altura de interés y observando una fase de reposo (10 min) seguida de una descarga completa, como resultado se encontró que el caudal de descarga no se vio afectado por la finura del silo, los valores obtenidos para la relación de presiones transversales y las tensiones normales del material almacenado en la transición fueron superiores a los indicados en los Eurocódigos partes 1 y 4. Además, la presión máxima de fricción del cilindro presentó un pico superior al estándar, y la presión normal máxima y caudal másico del cilindro de máxima esbeltez (tolva $\beta = 15^\circ$).

Li-Tsung Sheng et al, Taiwán 2021 [38]. En este estudio, se investigó experimentalmente el efecto de las burbujas de aire en las características de emisión de polvo fino, incluidos los cambios en el flujo másico de salida y la presión dentro del silo. La destrucción inicial de la capa de polvo en el silo se observó al comienzo del proceso de descarga, lo que provocó un cambio rápido de presión. Además, se analizó especialmente la dependencia del tamaño de la burbuja, su tasa de crecimiento, el número y la frecuencia de formación, en función del tamaño del polvo fino, de acuerdo con la tasa de pérdida de aire para varios tamaños de partículas.

La proporción de vacíos no dispersados y no dispersados entre los polvos en el aire que ingresa al silo no se convierte en parte de la burbuja; las propiedades de las burbujas en los ejemplos experimentales con diferentes tamaños de partículas son consistentes con la clasificación de las partículas de los polvos usados según Geldart. Los resultados de este estudio explicaron con éxito la dinámica de las burbujas y el comportamiento de emisión del polvo fino.

Qun Zhou et al, China 2021 [39]. El propósito de este artículo fue estudiar el efecto de la segregación de partículas en la distribución desigual de las cargas electrostáticas en los búnkeres. Usando el método DEM, se obtuvieron patrones de flujo en varios ángulos de reposo α y la fracción de volumen de partículas finas en la mezcla inicial χ_S . Los resultados mostraron que el nivel de densidad de carga espacial era mayor en el centro del silo y menor en la pared del silo cuando las partículas tenían una carga de saturación negativa. Un aumento en α incrementó la diferencia en las densidades de carga espacial entre el centro del búnker y el costado de la pared.

El aumento de χ_S para el nivel de densidad de carga espacial en la mina y el riesgo de descarga electrostática en la mina. Además, la distribución estática en la tolva está relacionada con la eficiencia de carga de partículas. La distribución de carga estática del sistema de carga positiva se comparó con la del sistema de carga unipolar.

Qun Zhou et al, China 2021 [40]. En este estudio, utilizaron el método de elementos finitos para analizar el campo eléctrico de una tolva cónico-cilíndrica con una protuberancia de metal dentro de la tolva. El efecto del ángulo de reposo α al diámetro del espesor D_m y la distancia entre el espesor y la superficie del pilote H_m sobre el campo eléctrico del espesor metálico.

Los resultados muestran que cuanto mayor es la probabilidad, mayor es la descarga, una disminución de D_m y H_m conduce a un aumento de la carga inducida en la concentración, un aumento de la intensidad del campo eléctrico y la posibilidad de una descarga electrostática en la concentración. El efecto neutralizador de la descarga de choque en $D_m = 1$ cm explica la descarga débil en la superficie ficticia. La energía de la descarga concentrada oscila entre 0,06 y 4 mJ. Las protuberancias de metal deben ser lo más pequeñas posible para reducir el daño y deben mantenerse alejadas del polvo cargado.

Guangbiao Gao et al, China 2022 [41]. En este estudio se investigó el efecto del enfriamiento sobre las propiedades del aire en los límites de la aireación intergranular y la calidad del grano de trigo almacenado en dos silos durante invierno. En el primer silo se airearon hacia abajo 4759 toneladas de trigo a granel mediante cuatro sistemas de aspiración de 11 kW. El ventilador centrífugo con volumen de aire de $10,1 \text{ m}^3/(\text{tiempo})$, controlado por un software basado en el primero. En el modelo de aireación de deshumidificación inteligente, el grano a granel perdió un 0,8% de contenido de humedad (CM) y su promedio, la temperatura descendió $5,8^\circ\text{C}$, después de la aireación de enfriamiento, el grano de trigo tiene una alta absorción de agua y un alto valor de ácidos grasos, temperatura de gelatinización de máxima retención y mayor tiempo de desarrollo de la masa, fuerza de la red de proteínas y la velocidad de gelatinización del almidón. El sistema de control de aireación propuesto tiene un buen potencial para su aplicación en silos bajos.

Grabowski et al, Polonia 2021 [42]. Esta investigación aborda el flujo limitado cuasi estático de arena no cohesiva en un modelo de silo de deformación plana con paredes paralelas y un fondo de movimiento lento. El modelado numérico se realizó con el método de elementos discretos (DEM) utilizando esferas con momentos de contacto para capturar aproximadamente la morfología no uniforme de las partículas de arena. Se utilizó la relación entre los vacíos iniciales de arena en la pared del silo y el grado de rugosidad, para tener en cuenta la diferencia entre la topografía de la superficie de la pared, se utilizaron surcos triangulares equiláteros (protuberancias) de igual pendiente y diferentes alturas. Los resultados de la simulación se compararon con los experimentos modelo correspondientes y las soluciones teóricas. Los hallazgos numéricos mejoran nuestra comprensión de la ubicación del corte a nivel de partículas y su fuerte influencia en la magnitud, distribución y vibración de las tensiones de la pared durante el flujo confinado en silos.

1.2 Marco teórico

1.2.1 Eurocódigo UNE-EN 1991-4 [43]

Esta norma establece principios generales y actividades para el diseño estructural de silos para almacenamiento de sólidos granulares y tanques de almacenamiento de líquidos, de igual manera incluye algunas pautas sobre los efectos en silos y tanques que no solo están relacionados con el almacenamiento de sólidos o líquidos (por ejemplo, los efectos de cambios de temperatura o diversos aspectos sedimentos en silos).

1.2.1.1 Clasificación de silos de acuerdo con su confiabilidad

Tabla I

Clases de confiabilidad de silos

Clase de confiabilidad	Descripción
Clase de confiabilidad 3	<ul style="list-style-type: none">• Silos con capacidad superior a 10,000 toneladas• Silos con capacidad superior a 1,000 toneladas en los que se produzca alguna de las siguientes situaciones de diseño:<ul style="list-style-type: none">○ Descarga excéntrica con $e_0 / d_c > 0.25$○ Silos achaparrados con excentricidad en la superficie superior con $e_t / d_c > 0.25$
Clase de confiabilidad 2	Todos los silos cubiertos por esta Norma y no colocados en otra clase
Clase de confiabilidad 1	Silos con capacidad inferior a 100 toneladas

Nota.* Clases de confiabilidad de silos en función de su capacidad y excentricidades de descarga o llenado [43].

1.2.1.2 Clasificación de silos de acuerdo con la relación de aspecto h_c/d_c

Tabla II

Clasificación de esbeltez en silos

Relación de aspecto h_c/d_c	Clase de silo
$h_c/d_c \geq 2$	Esbelto
$1 < h_c/d_c < 2$	Esbeltez intermedia
$0.4 < h_c/d_c \leq 1$	Achaparrado
$h_c/d_c \leq 0.4$	Granero

Nota: Clasificación de silos de acuerdo a la relación de aspecto h_c/d_c [43].

1.2.1.3 Clasificación de silos de acuerdo a la relación d_c/t

Tabla III

Clasificación de silos de acuerdo al espesor de la pared

Relación de esbeltez del silo, h_c/d_c	Clase de silo
$h_c/t > 200$	Pared delgada
$h_c/t < 200$	Pared gruesa

Nota: Clasificación de silos de acuerdo a la relación d_c/t [43].

1.2.1.4 Propiedades de los materiales granulares almacenados en silos

Las propiedades de los materiales almacenados en silos se entienden como peso específico, ángulo de rozamiento con la pared, adherencia, etc. la siguiente tabla presenta datos promedio para varios materiales [43].

Por otro lado, dado que se utiliza el máximo, promedio o mínimo de cada parámetro para los diferentes tipos de fuerzas que actúan sobre el silo (rozamiento, presión, vertical), existen factores ascendentes y descendentes.

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

Tabla IV
Propiedades de los materiales granulares almacenados en silos

Tipo de sólido disgregado	Peso específico γ		Angulo de talud natural ϕ_r	Angulo de rozamiento interno ϕ_i		Coeficiente de presiones laterales K		Coeficiente de rozamiento con la pared μ ($\mu = \tan \phi_w$)				Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas C_{op}
	γ_i	γ_u		ϕ_{im}	a_ϕ	K_m	a_k	Tipo de pared			a_μ	
	Inferior	Superior	Medio					Coeficiente	Medio	Medio		
	kN/m ³	kN/m ³	grados	grados			Medio	Medio	Medio			
Material por defecto	6	22	40	35	1.3	0.5	1.5	0.32	0.39	0.5	1.4	1
Áridos	17	18	36	31	1.16	0.52	1.15	0.39	0.49	0.59	1.12	0.4
Aluminio	10	12	36	30	1.22	0.54	1.2	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
Mezcla de piensos	5	6	39	36	1.08	45	1.1	0.22	0.3	0.43	1.28	1
Pienso en pellets	6.5	8	37	35	1.06	0.47	1.07	0.23	0.28	0.37	1.2	0.7
Cebada	7	8	31	28	1.14	0.59	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.5
Cemento	13	16	36	30	1.22	0.54	1.2	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
Clinker de cemento	15	18	47	40	1.2	0.38	1.31	0.46	0.56	0.62	1.07	0.7
Carbón	7	10	36	31	1.16	0.52	1.15	0.44	0.49	0.59	1.12	0.6
Carbón en Polvo	6	8	34	27	1.26	0.58	1.2	0.41	0.51	0.56	1.07	0.5
Coque	6.5	8	36	31	1.16	0.52	1.15	0.49	0.54	0.59	1.12	0.6
Cenizas volantes	8	15	41	35	1.16	0.46	1.2	0.51	0.62	0.72	1.07	0.5
Harina	6.5	7	45	42	1.06	0.36	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.6
Pellets de Mineral de hierro	19	22	36	31	1.16	0.52	1.15	0.49	0.54	0.59	1.12	0.5
Cal hidratada	6	8	34	27	1.26	0.58	1.2	0.36	0.41	0.51	1.07	0.6
Caliza en Polvo	11	13	36	30	1.22	0.54	1.2	0.41	0.51	0.56	1.07	0.5
Maiz	7	8	35	31	1.14	0.53	1.14	0.22	0.36	0.53	1.24	0.9
Fosfato	16	22	34	29	1.18	0.56	1.15	0.39	0.49	0.54	1.12	0.5
Patatas	6	8	34	30	1.12	0.54	1.11	0.33	0.38	0.48	1.16	0.5
Arena	14	16	39	36	1.09	0.45	1.11	0.38	0.48	0.57	1.16	0.4
Escoria de clinker	10.5	12	39	36	1.09	0.45	1.11	0.48	0.57	0.67	1.16	0.6
Semillas de soja	7	8	29	25	1.16	0.63	1.11	0.24	0.38	0.48	1.16	0.5
Azúcar	8	9.5	38	32	1.19	0.5	1.2	0.46	0.51	0.56	1.07	0.4
Remolacha azucarada en pellets	6.5	7	36	31	1.16	0.52	1.15	0.35	0.44	0.54	1.12	0.5
Trigo	7.5	9	34	30	1.12	0.54	1.11	0.24	0.38	0.57	1.16	0.5

1.3.3 Sección de paredes verticales durante el llenado

La presión de llenado se compone de una presión fija y de una presión libre llamada carga local. La presión local (P_p) actúa sobre cualquier parte de la pared del silo, y se toma igual a:

$$P_p = 0.2 \beta P_{hf} \quad (6)$$

Donde:

$$\beta = 1 + 4 \frac{e_i}{d_c} \quad (7)$$

Donde e_i y d_c se definen en la figura 3.

En los silos circulares de pared delgada, la presión local actúa sobre una altura s , pero se extiende desde una presión máxima p_p hacia afuera en un lado, hasta la presión hacia dentro p_p en el lado opuesto (figura 3). La variación será:

$$P_{ps} = p_p \cos\theta \quad (8)$$

Donde:

θ Es definido en la figura 3.

La fuerza horizontal total F_p debida a la presión local en solos de acero no rigidizados se obtiene de:

$$F_p = \frac{\pi}{2} s d_c p_p \quad (9)$$

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

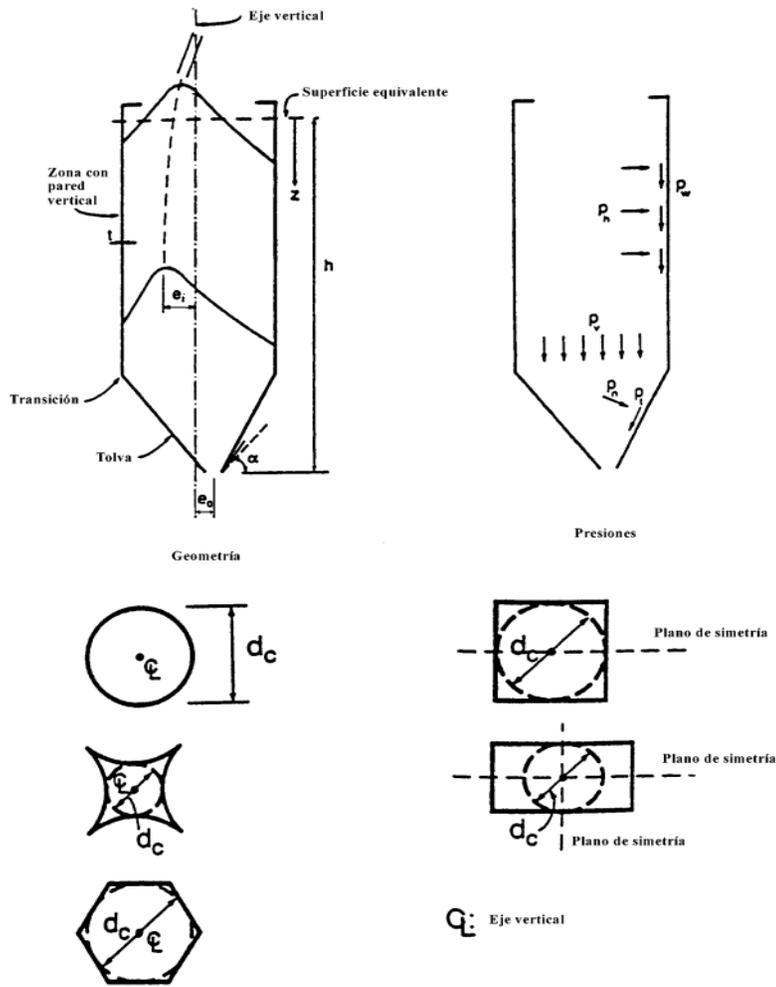


Fig. 2 Forma de los silos, dimensiones y notación de las paredes [43].

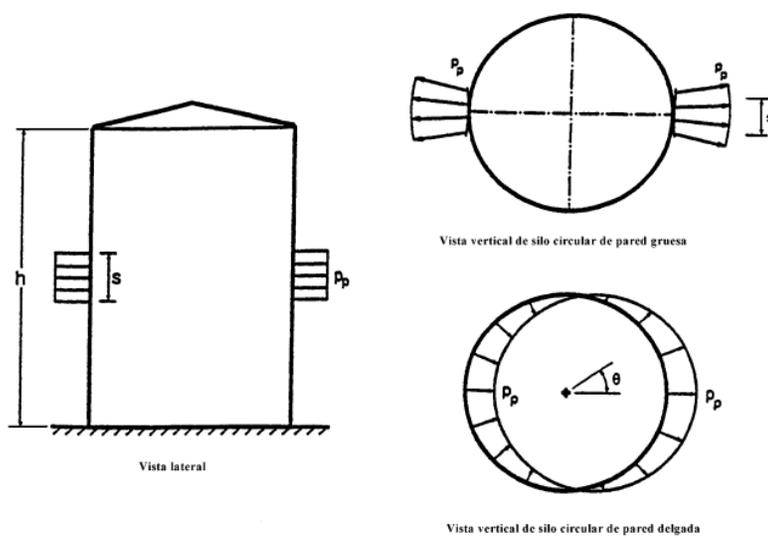


Fig. 3 Vista planta y alzado de la presión local [43].

1.3.4 Tapa del silo

Las presiones verticales actuando sobre el fondo plano o liso de un silo (inclinado $\alpha \leq 20^\circ$) se calcularán del siguiente modo:

$$P_{vf} = C_b p_v \quad (10)$$

1.3.5 Cono de descarga

Cuando $\alpha > 20^\circ$ (véase figura 4) la presión perpendicular a la pared inclinada de la tolva (P_n) se calcula como sigue:

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \frac{x}{I_h} \quad (11)$$

$$p_{n1} = p_{v0} (C_b \cos^2 \alpha + \text{sen}^s \alpha) \quad (12)$$

$$p_{n2} = C_b p_{v0} \cos^2 \alpha \quad (13)$$

El valor de la presión de rozamiento sobre la pared pt se obtiene mediante:

$$p_{n3} = 3.0 \frac{A}{U} \frac{\gamma k_s}{\sqrt{\mu}} \text{sen}^2 \alpha \quad (14)$$

$$p_t = p_n \mu \quad (15)$$

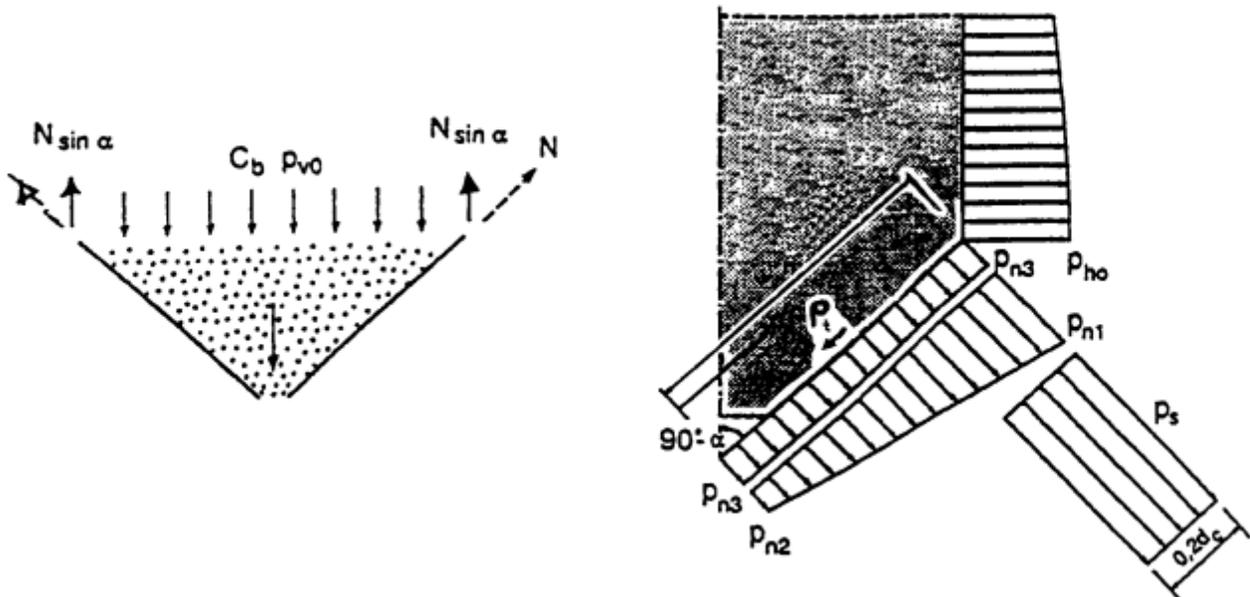


Fig. 4 Cargas en la tolva y fuerzas de tracción en la pared superior de la tolva. [43].

1.3.6 Sección de paredes verticales durante el vaciado

Las presiones de vaciado se componen de una presión fija y de una presión libre llamada presión local. Las presiones fijas (p_{we} , p_{he}) se obtienen de:

$$p_{we} = C_{wi} p_{wf} \quad (16)$$

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (17)$$

C_w y C_h son los coeficientes de mayoración de la presión, obtenidos en las expresiones (18) y (19). El coeficiente de mayoración de la presión sobre las paredes y de la presión horizontal serán:

$$C_w = 1.1 \quad \text{y} \quad C_h = C_0 \quad (\text{vease tabla 6}) \quad (18)$$

La magnitud de la presión local de vaciado p_p es:

$$p_p = 0.2 \beta p_{he} \quad (19)$$

Donde:

p_{he} calculada con la expresión (17);

β depende de la mayor de las excentricidades de llenado o de vaciado, y es:

$$\beta = 1 + 4 \frac{e}{d_c} \quad (20)$$

2 Capítulo 2 Metodología

En esta sección se describe la metodología a seguir para la elaboración del proyecto. Inicialmente se calculó la precarga requerida para el ensamble de las uniones atornilladas propuestas, posteriormente se realiza la modelación con superficies 3D de los silos a estudiar en SolidWorks y finalmente se analizaron las uniones atornilladas con sub modelos en ANSYS, mientras cada silo estaba almacenado de cemento.

2.1 Cálculo de carga de prueba y pre carga

Para poder conocer la resistencia de cada una de las juntas atornilladas propuestas en esta investigación, primerio se debe conocer el comportamiento que presentan cuando únicamente se aplica la precarga (F_i) sin ningún esfuerzo adicional; para conocer este valor, se emplearon las ecs. (21)–(22) utilizando un 75% del valor de la carga de prueba (F_p) para tornillos ASTM A325 tipo 3 con diámetro nominal de 0.0127m ($\frac{1}{2}$ ”), debido a que los tornillos utilizados para el ensamble de silos comúnmente son sustituidos en algunos casos durante el mantenimiento de esta clase de equipos.

$$F_i = \frac{0.75 F_p}{0.90 F_p} \quad (21)$$

$$F_p = A_t S_p \quad (22)$$

2.2 Modelado 3D de superficies en SolidWorks

Para algunos procesos de diseño, como la creación de objetos con formas y curvas bastante complejas, las superficies teóricas son muy útiles, esto significa que el producto se puede modelar utilizando un cuerpo delgado (lámina) que se asemeja a una superficie. Este tipo de geometría sin espesor se utiliza para:

- Crear cuerpos sólidos con superficies perimetrales.
- Utilizar la superficie como elemento cortante de un sólido o de otra superficie.
- Construcción de una nueva superficie a partir de otra previamente creada.

La ventaja de trabajar con superficies es que no hay espesor, por lo que no es de preocupar el volumen de la pieza. Esto simplifica el trabajo ya que solo es fundamental el exterior y no el interior. También es bastante útil usar esto para dividir otro cuerpo con el fin de obtener diferentes partes de este. Las superficies inicialmente no tienen espesor ni volumen, pero se pueden especificar más tarde para convertirse en sólidos. Por lo cual, se realizaron 2 silos, el silo 1 fue modelado para almacenar 800 m³ y el silo 2 para almacenar 51.4 m³ de material a granel, tal como se puede visualizar en la figura 5.

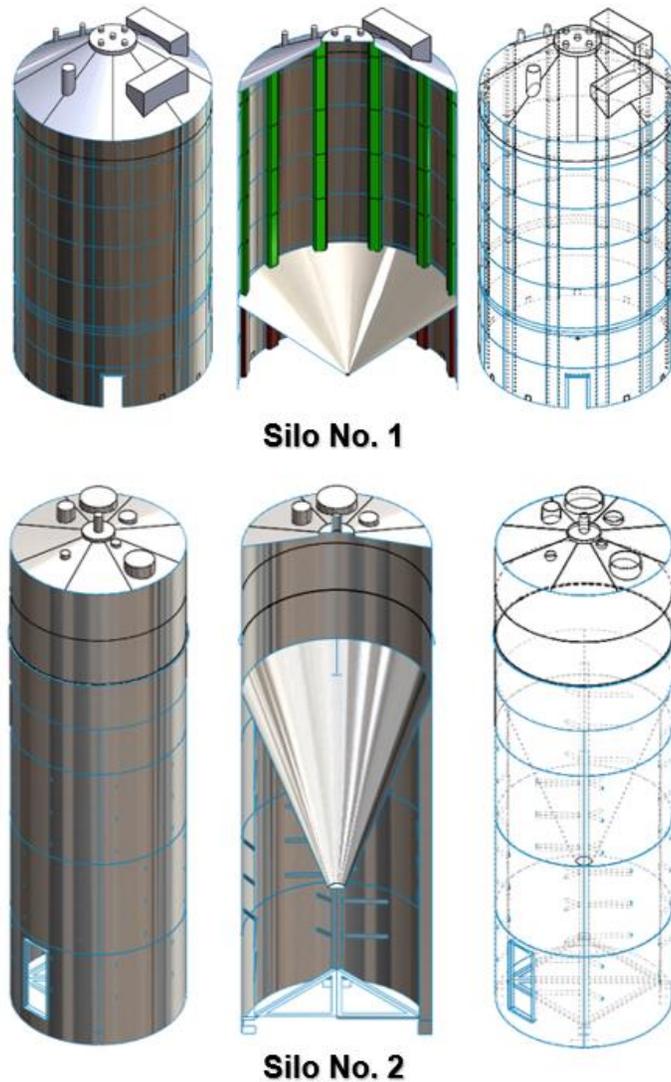


Fig. 5 Modelo 3D de silos con superficies

2.3 Simulación MEF

El método de los elementos finitos es el método numérico más potente aplicable al análisis de todo tipo de estructuras sujetas a cargas mecánicas y térmicas constantes y no estacionarias. El método de los elementos finitos es una simplificación de estas ecuaciones.

Esto se debe a que la forma diferencial se reemplaza por un conjunto de ecuaciones discretas y las condiciones de contorno correspondientes para su resolución posterior.

Dependiendo del número de estas ecuaciones, como en este caso, puede ser necesario o no implementar el problema para una solución computarizada. Se pueden aplicar diferentes tipos de cargas al modelo MFE, incluidas cargas nodales (fuerzas, momentos, desplazamientos, velocidades, aceleraciones, temperatura y flujos de calor) y cargas de elementos para modelar el efecto de las condiciones operativas reales en el MFE (carga distribuida, presión, temperatura y flujo de calor), así como la aceleración de las cargas sobre el cuerpo (gravedad). Los tipos de análisis MFE incluyen estadísticas lineales, estáticas y dinámicas no lineales, modo general, respuesta dinámica, pandeo y

transferencia de calor. Los resultados típicos calculados por el solucionador incluyen desplazamientos nodales, velocidades y aceleraciones, así como también fuerzas, deformaciones y tensiones de los elementos, en la Figura 6 se muestra un claro ejemplo de que el uso de simulaciones ayuda a la determinación de los resultados mencionados y poder obtener una visión más amplia al momento de diseñar todo tipo de equipos.



Fig. 6 Proyección MEF en casos reales [48]

2.3.1 Ventajas del MEF

MEF se puede utilizar para desarrollar un nuevo producto, mejorar un producto existente o asegurarse de que el diseño cumpla con las especificaciones antes de la producción.

Se puede utilizar MEF para:

- Predecir y mejorar el rendimiento y la confiabilidad del producto
- Conocer varios diseños y materiales
- Reducir prototipos físicos y pruebas
- Optimizar el diseño y reducción de material

2.3.2 Ecuaciones diferenciales parciales 3D

La solución a las PDQ (Ecuaciones en Diferenciales Parciales) es "exacta", pero encontrar una solución completa para el sistema PDQ es casi inútil.

Es necesario utilizar la combinación correcta de geometría, generalmente en condiciones muy simples, y condiciones de contorno (generalmente no lo que se requiere) para resolver el PDQ. Es probable reducir el enfoque a una ecuación diferencial ordinaria (ecuación diferencial, DK). Desafortunadamente, la simplificación esencialmente requiere "repensar" el problema como algo que no se quiere. El nombre más común para la simplificación se traduce como ecuaciones de cálculo, del tipo que se encuentra en los libros de texto para estudiantes de ingeniería.

2.3.3 Concepto general del método MEF

Muchos fenómenos de ingeniería se expresan usando "ecuaciones que gobiernan el comportamiento del continuo (ecuación gobernante)" y "las condiciones de frontera". Estas ecuaciones de gobierno o de estado a menudo vienen en forma de ecuaciones diferenciales parciales o ecuaciones diferenciales

ordinarias. Desde un punto de vista matemático, el MEF es un método numérico que permite resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales tales como [49]:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + f_x = m\ddot{u}_x \quad (24)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f_y = m\ddot{u}_y \quad (25)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z = m\ddot{u}_z \quad (26)$$

Desde el punto de vista de la ingeniería, MEF es un método numérico para resolver ecuaciones acopladas mediante la aproximación de variables de campo continuas, con un conjunto de variables de campo en puntos discretos (nodos). Para los problemas estructurales que se analizarán en este estudio las ecuaciones correspondientes son las ecuaciones de equilibrio y las variables de campo (las cargas y desplazamientos nodales).

El desafío para ingenieros y científicos es crear métodos de discretización para aproximar la solución de modo que sea cercana a la real. Los matemáticos y los ingenieros abordan esta discretización de manera diferente

2.3.4 Términos más utilizados en el MEF

Dominio: En matemáticas, un dominio es un conjunto de valores de una variable independiente para los cuales se define una función. En el análisis de elementos finitos, un dominio es un sistema continuo (región) regido por las leyes de la física. En construcción, un dominio puede ser una viga o el marco completo de un edificio. En ingeniería mecánica, un dominio puede ser parte de una máquina o un campo térmico.

Condiciones de Frontera: Son los valores de una función en los ejes de rango de alguna de sus variables. Es necesario conocer algunas condiciones de contorno para resolver un problema técnico o encontrar una función desconocida.

Elemento: Un elemento es parte de un dominio, y sus formas más típicas son como un triángulo o un cuadrilátero bidimensional; o un tetraedro o un sólido rectangular en 3D.

Nodo: un nodo es un punto en un dominio y, a menudo, es el vértice de muchos elementos.

Malla: los elementos y los nodos juntos forman una malla, que es la estructura de datos central en el análisis de elementos finitos.

Análisis no lineal mediante elementos finito: Aquí se considera como un material con comportamiento no lineal y/o no linealidad geométrica del sistema técnico. El análisis geométrico no lineal también se conoce como análisis de grandes deformaciones.

2.3.5 Aplicaciones no lineales del MEF

Al calcular los esfuerzos de un sistema, es necesario distinguir entre dos tipos de aplicaciones: cálculo lineal y no lineal. Actualmente, la gran mayoría de los usuarios del MEF, aproximadamente el 80%, son cálculos lineales. Los métodos de cálculo lineal están suficientemente probados para que poder usarse en forma generalizada con poca o ninguna ambigüedad en términos de los recursos necesarios para lograr el resultado [49].

El cálculo y la visualización de los resultados permiten al ingeniero comprender mejor el rendimiento de sus diseños y por tanto optimizarlos. En este sentido, el cálculo lineal ha reemplazado casi por completo las pruebas y la creación de prototipos en el que se basaron la mayoría de los diseños mecánicos hace apenas unas décadas.

El cálculo de restricciones no lineales comienza a jugar un papel importante en aplicación práctica de MEF y muchos autores basan su uso desarrollando expresiones matemáticas que se introducen en los programas profesionales.

La industria ha avanzado mucho en la investigación, el objetivo es tener en el mediano plazo las incertidumbres que hoy afectan a los cálculos no lineales, si bien se han logrado avances significativos, en la última década todavía hay áreas donde la solución de cálculos no lineales es de gran importancia.

El cálculo no lineal también se utiliza en la búsqueda de causas como accidentes (forense) y para obtener cargas últimas o límites de fuerza estructural. Este tipo de investigación difiere del aprendizaje basado en proyectos, esto significa que la descripción precisa del comportamiento real durante los cálculos de diseño, lo que se requiere es simplemente garantizar la seguridad.

2.3.6 Discretización

La discretización del problema se realiza mediante un proceso de modelado 3D para transformarlo en un número finito de elementos ensamblados en puntos llamados nodos, formulando ecuaciones de desplazamiento para dichos nodos, e imponiendo condiciones de contorno adecuadas en términos de compatibilidad de desplazamientos nodales [44]. De la resolución de este en su conjunto, se obtendrá el campo de desplazamientos para cada uno de los nudos y de él, y en su caso, el campo de tensiones [45]. El comportamiento dentro del elemento se interpola a partir de los desplazamientos nodales utilizando funciones de forma, los errores en este enfoque están principalmente relacionados con la aproximación del dominio, la aproximación del comportamiento dentro de cada elemento y la precisión aritmética utilizada para resolver el sistema de ecuaciones usando métodos numéricos [44]. En la Figura 7 se muestra la discretización del silo 1, en la Figura 8 se muestra la discretización del silo 2.

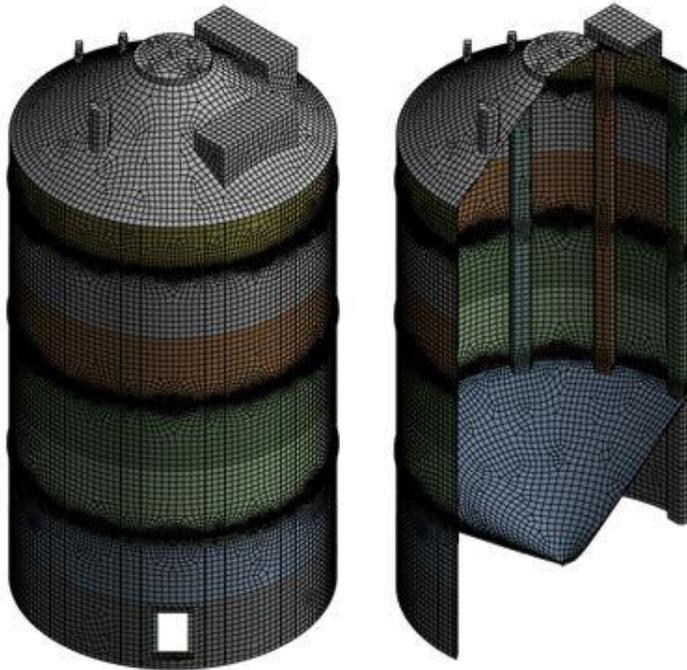


Fig. 7 Discretización de silo 1



Fig. 8 Discretización de silo 2

2.3.7 Sub-modelo en ANSYS

El submodelado, como sugiere el nombre, consiste en modelar partes de un modelo más grande (global) para reflejar el efecto de una malla refinada en uno más pequeño. Esto se hace para evitar agarrar todo el conjunto con elementos pequeños. Para ello se utiliza una malla gruesa en el modelo global porque las características locales de los submodelos no afectan la respuesta general del sistema. Los resultados de compensación y temperatura se aplican luego al submodelo para definir el submodelo subdividido, en la mayoría de los casos, este enfoque se usa para refinar áreas importantes o áreas de interés sin resolver de todo el modelo.

Otro aspecto importante es explorar pequeños cambios, como agregar redondeo. La parametrización del proyecto se proporciona con cambios locales del proyecto, lo que es mucho más fácil en submodelos más pequeños, también puede modelar no linealidades locales que pueden no reflejarse en modelos globales [46]. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de lo que es el sub modelo, en donde se inicia con los esfuerzos y/o deformaciones de un modelo global y posteriormente se parten de estos resultados para evaluar un sub modelo del modelo global.

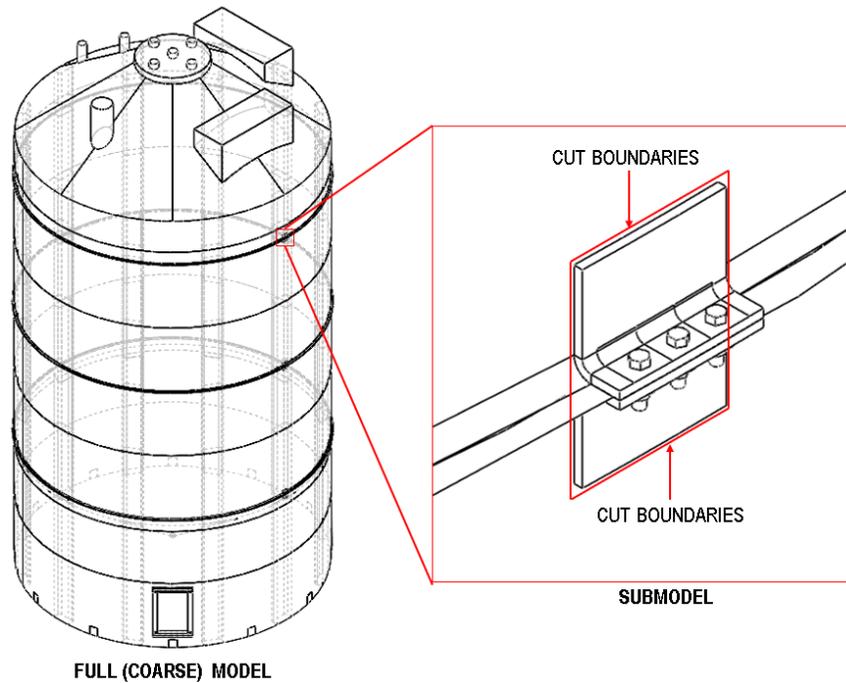


Fig. 9 Zonificación de un sub modelo [46].

2.3.7.1 Límites de corte

Como se muestra en la figura 10, uno de los conceptos clave en sub modelado es la designación de los "límites de corte" que definen el submodelo.

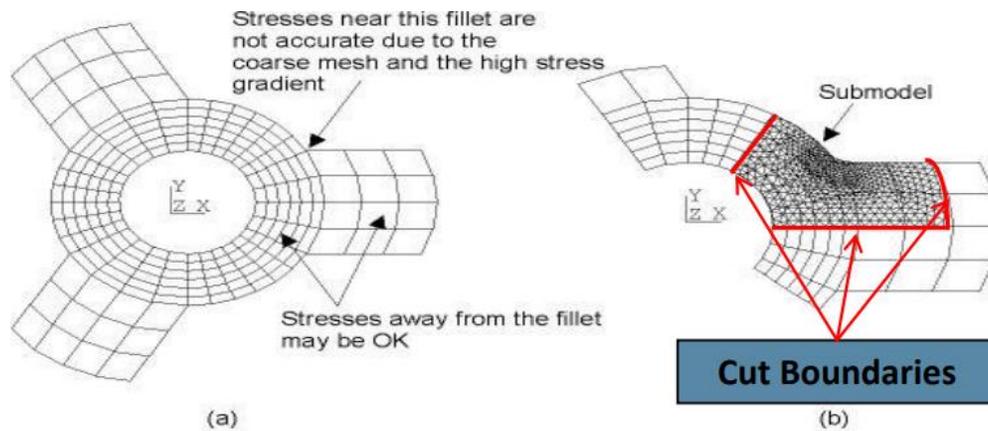


Fig. 10 Límites de corte en sub-modelo [47].

Como muestra la Figura 11, los desplazamientos del modelo aproximado se asignan al cortar ubicaciones de límite en el submodelo de las ubicaciones correspondientes en el completo modelo. Algo muy importante es que, si los límites de corte están demasiado cerca de las concentraciones de tensión, la precisión del submodelo se puede degradar, para lo cual es factible usar una comparación de resultados que permita verificar la ubicación del límite de corte.

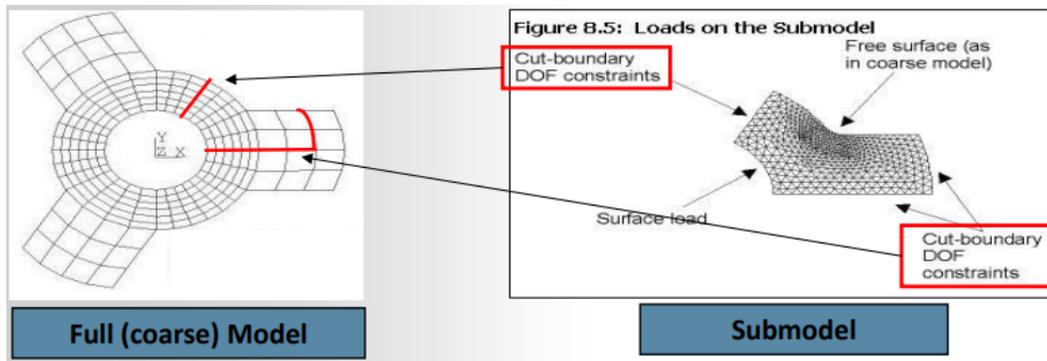


Fig. 11 Esquema de modelo completo y sub-modelo [47].

2.3.8 Teoría del cemento

El cemento se puede caracterizar como un material que tiene propiedades adhesivas y cohesivas, lo que le da la capacidad de unir fragmentos minerales en un todo compacto. Esta definición cubre varios materiales de fijación, para fines de construcción, el significado del término "cemento" se limita a los aglomerantes utilizados con piedra, arena, ladrillo, piedra de construcción, etc.

Los principales componentes de este tipo de cemento son los compuestos de cal, por lo que los cementos de piedra caliza se utilizan en la construcción y obras civiles; los cementos utilizados en la producción de hormigón tienen la capacidad de fraguar y endurecerse con el agua, provocando que entren en una reacción química, por lo que se denominan cementos hidráulicos. Los cementos hidráulicos se componen principalmente de silicatos de cal y aluminatos y en general pueden clasificarse como cementos naturales, Cementos portland y cementos aluminosos.

2.3.8.1 Preparación del cemento

2.3.8.1.1 Etapa 1 – Preparación de la materia prima

Las principales materias primas (calizas, margas, esquistos o gravas) se obtienen mediante explosión controlada en canteras, posteriormente se cargan y transportan en grandes camiones hasta las trituradoras, donde se pulverizan hasta alcanzar un tamaño de unos 50 mm. Luego se almacenan en salas separadas en los almacenes de materias primas. Además de esta materia prima básica, otros productos que contienen calcio, silicio, aluminio o hierro, como escamas, arenas, escorias, cenizas, etc., también se utilizan en pequeñas cantidades y se compran y usan en el extranjero para ajustar la composición química.

Esta materia prima es pesada de manera controlada y alimentada en conjunto a los molinos. La proporción relativa de cada componente se ajusta automáticamente en función de los resultados de los análisis realizados por analizadores de rayos X. El material que sale del molino, denominado "harina cruda", es muy fino y se almacena en silos cerrados, donde el proceso de homogeneización se lleva a cabo soplando aire comprimido por el fondo del silo. Esta materia prima es pesada de manera controlada y alimentada en conjunto a los molinos, la proporción relativa de cada componente se ajusta automáticamente según los resultados de los análisis realizados por los analizadores de rayos X.

2.3.8.1.2 Etapa 2 – Cocción

La "harina cruda" se alimenta al intercambiador de calor, donde se realiza un proceso de calentamiento gradual hasta alcanzar una temperatura de 1000°C. Este proceso de calentamiento del petróleo crudo ocurre a través del intercambio de calor entre los gases calientes que ascienden de la combustión en el horno y las materias primas que descienden y fluyen a través del intercambiador de calor.

Posteriormente, la sustancia entra en el horno (que es un tubo de diferentes tamaños) de 45-60 metros de largo y 3-5 metros de diámetro, que gira a una velocidad inferior a 3 rpm. La combustión controlada del combustible tiene lugar dentro del horno hasta que se alcanza una temperatura de llama de hasta 2000 °C. En el interior del horno se sigue calentando el crudo hasta alcanzar la temperatura máxima de 1450°C, necesaria para la correcta formación de los componentes responsables de las propiedades mecánicas del cemento. El material que sale del horno tiene forma de gránulos redondos y se denomina "clinker". Para congelar la estructura cristalina y estabilizar los componentes formados a 1450 °C, el clínker se enfría al aire a una temperatura inferior a 120 °C.

Para obtener 1000 kg de clínker se requieren 1560 kg de materia prima.

2.3.8.1.3 Etapa 3 – Molienda

Los principales componentes del cemento son:

- Clinker
- Materia esencial como: escoria de alto horno, puzolana, humo de sílice, caliza y cenizas volantes.
- Regulador de fraguado
- Componentes de fraguado

La proporción de cada componente depende del tipo específico de cemento que se esté elaborando. Los diferentes componentes se almacenan en áreas separadas, se dosifican mediante balanzas y se alimentan juntos y de forma continua al molino de cemento. En la Figura 12 se resume en un esquema general el proceso de la producción del cemento.



Fig. 12 Proceso general de la producción del cemento [50].

2.3.8.2 Clasificación del cemento por su uso

2.3.8.2.1 Cementos de uso general

Son cementos utilizados en la producción de hormigón para su inclusión en elementos estructurales simples o armados que no requieren propiedades especiales del cemento por cuestiones de durabilidad (riesgo de exposición a sulfatos, uso de áridos considerados potencialmente reactivos se clasifican como elementos con posibilidad).

Su exposición permanente o semipermanente a las condiciones de humedad y temperatura (riesgo de fisuración de elementos macizos por estrés térmico, etc.), la resistencia temprana del hormigón o la importancia del color en elementos portantes y/o decorativos, entre otros.

En Argentina, los cementos de uso general deben cumplir con la norma IRAM 50.000, que especifica los siguientes materiales:

- CPN - Cemento portland normal
- CPF - Cemento portland con "filler" calcáreo
- CPE - Cemento portland con escoria
- CPC - Cemento portland compuesto
- CPP - Cemento portland puzolánico
- CAH - Cemento de alto horno

2.3.8.2.2 Cementos con propiedades especiales

Cuando se elaboran requisitos específicos al concreto, se hacen otros además de los requerimientos para los cementos de uso general, con base en las propiedades específicas que se le exigen al producto. Estos están especificados en la norma IRAM 50.001:

- ARI - de alta resistencia inicial
- MRS - moderadamente resistente a los sulfatos
- ARS - altamente resistente a los sulfatos
- BCH - de bajo calor de hidratación (BCH)
- RRAA - resistente a la reacción álcali – agregado
- B – blanco

Estos cementos se usan cuando (1) se requiere que el concreto tenga una resistencia inicial significativa por razones de diseño o construcción, se puede usar Cemento Portland de Alta Resistencia Inicial (ARI), (2) estará expuesto a sulfatos, que al usar Alta o Cemento Portland de Media Resistencia a los sulfatos (ARS o MRS) según el grado de agresión, (3) cuando se instalen zonas con una dimensión lineal mínima de 75 cm y exista riesgo de fisuración del hormigón por estrés térmico, por lo que el cemento Portland se utiliza preferentemente bajo calor de hidratación (BCH), (4) cuando se construye un elemento de concreto que estará constantemente expuesto a la humedad y se utilizan agregados que han sido identificados como potencialmente reactivos, requiriendo el uso

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

de cemento Portland Resistente a la Reacción de Agregados Alcalinos (RRAA) o (5) es necesario hacer hormigón blanco, en este caso blanco r portland.

El cemento debe usarse junto con agregados de colores claros. En cuanto a la nomenclatura, la norma IRAM 50.001 especifica requisitos "particulares", aunque la IRAM 50.000 especifica la composición del cemento, indicando primero el tipo de cemento y luego, si es necesario, la condición "particular" que cumple. Así se producen los cementos: CPN (ARI), CPN (MRS), CPN (ARS), CFE (RRAA), CPP (ARS, VSN, RRAA), etc. El cemento con propiedades especiales, por regla general, es más caro que el cemento convencional, pero quizás en el mercado se encuentre cemento con aditivos minerales activos como la escoria.

2.3.9 Densidad

La densidad se puede interpretar como la relación entre el peso seco del grano y su volumen. Hay dos tipos de densidad:

- densidad aparente
- densidad real

La densidad real descarta los vacíos que quedan entre los granos y la densidad aparente los ignora, pero ambos son necesarios al diseñar estructuras.

La densidad puede calcularse con la siguiente expresión:

$$p_r = \frac{m}{v} \quad (27)$$

2.3.10 Porosidad

La porosidad en los granos se define como la relación de vacíos a volumen total, indica la cantidad de vacíos que dejan los granos y cuando se almacenan en un recipiente, estos espacios se pueden llenar con otra sustancia (aire o agua) [52].

2.4 Modelación 3D de silos

Los silos propuestos en este trabajo de investigación están compuestos de anillos/rolos, tapa y cono de descarga como se muestra en las Figuras [13,14], la geometría general de ambos silos fue diseñada en base al Eurocódigo EN 1991-4. El silo 1 puede almacenar 800 m³ y el silo 2 puede almacenar 51.4 m³ de material granular en su interior.

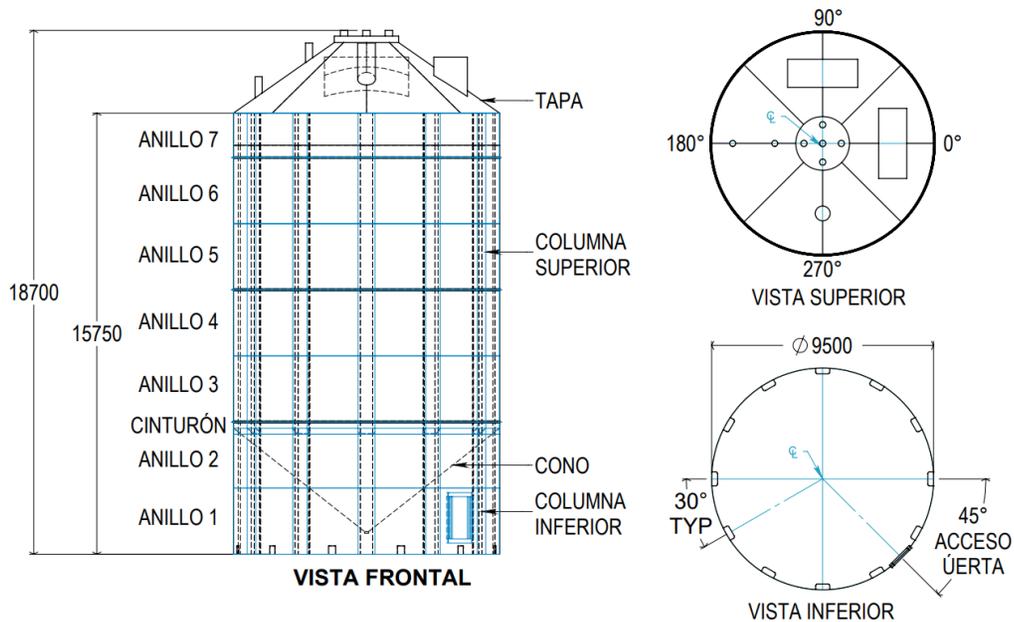


Fig. 13 Esquema general de silo 1 (mm).

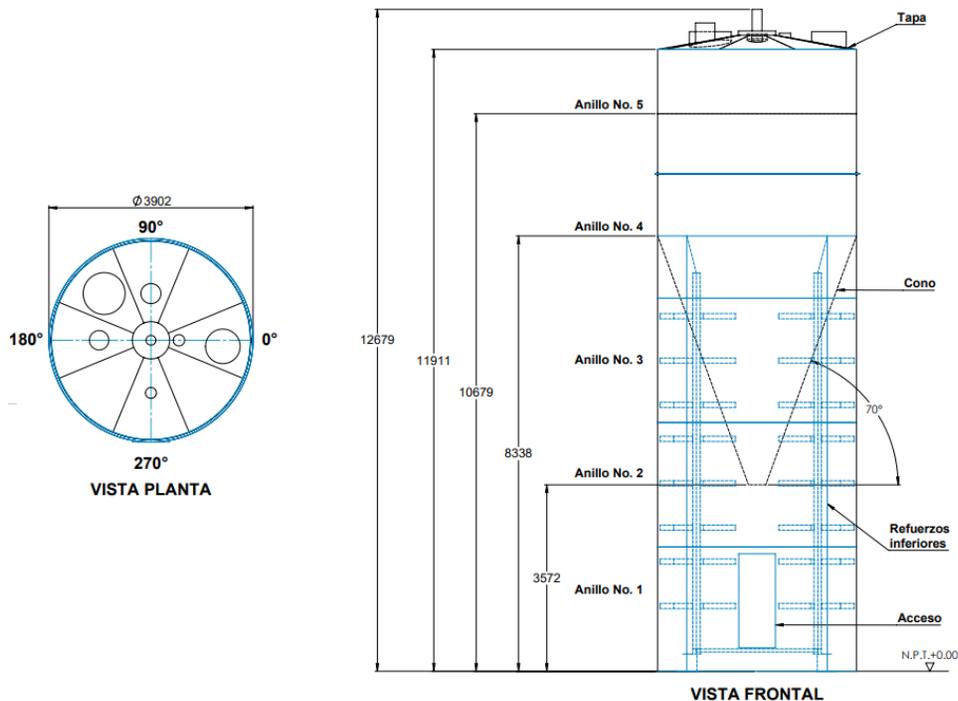


Fig. 14 Esquema general de silo 2 (mm).

2.5 Parámetros de diseño

2.5.1 Geometría de silo

Para la presente investigación, ambos silos fueron diseñados en base a los códigos de referencia EN 1991-4 2011: Acciones en Estructuras - Silos y Depósitos y ANSI AISC 360-16: Especificación para Edificios de Acero Estructural, dichos códigos dieron como resultado los siguientes resultados:

Tabla V

Dimensiones del Silo 1

Valor	Unidad	Concepto
15	m	Altura total del silo
9.5	m	Diámetro interior del silo
2.4	m	Altura de anillos
1.15	m	Profundidad bajo la superficie equivalente del cono
3.75	m	Altura de la tolva
11.25	m	Altura recta del silo
52	Grados	Ángulo de inclinación de la tolva

Tabla VI

Dimensiones del silo 2

Valor	Unidad	Concepto
12.7	m	Altura total del silo
3.9	m	Diámetro interior del silo
2.4	m	Altura de anillos
3.5	m	Profundidad bajo la superficie equivalente del cono
8.3	m	Altura de la tolva
11.9	m	Altura recta del silo
70	Grados	Ángulo de inclinación de la tolva

Tabla VII

Datos de diseño de Silo 1 y Silo 2

Propiedad	Silo 1	Silo 2
Producto para almacenar	Cemento	
Densidad del producto	1200 kg/m ³	
Volumen de trabajo	800 m ³	51.4 m ³
Presión de operación	Ambiente	Ambiente
Temperatura de operación	Ambiente	Ambiente
Toneladas almacenadas	960 toneladas	61.7 toneladas
Material de construcción	ASTM A-36	
Tipo de tornillería	ASTM A-325	

3 Capítulo 3: Resultados: Obtención de esfuerzos y deformaciones

En este capítulo se implementó la metodología mencionada anteriormente. En resumen, se describirán los aspectos abordados a lo largo del proyecto de investigación, se mencionarán consejos para la reproducción del mismo y se presentarán los resultados obtenidos con esta nueva metodología de diseño de silos, finalmente se analizaron y compararon el costo de los 2 silos en sus tres propuestas de diseño.

3.1 Obtención de esfuerzos y deformaciones

3.1.1 Discretización

Los silos estudiados en esta investigación fueron discretizados con 2 tipos de malla, el silo 1 tiene un tamaño de malla de 200 mm lo cual se puede visualizar en la Figura 15 se muestra la discretización del silo 1 con un total de 58,885 elementos, en las uniones entre anillo fue asignado un refinamiento de malla de 400. El tamaño de malla del silo 2 fue de 120 mm y en la Figura 16, se muestra la discretización del silo 2 con un total de 32,536 elementos, en las uniones entre anillos el refinamiento fue de 30 mm.

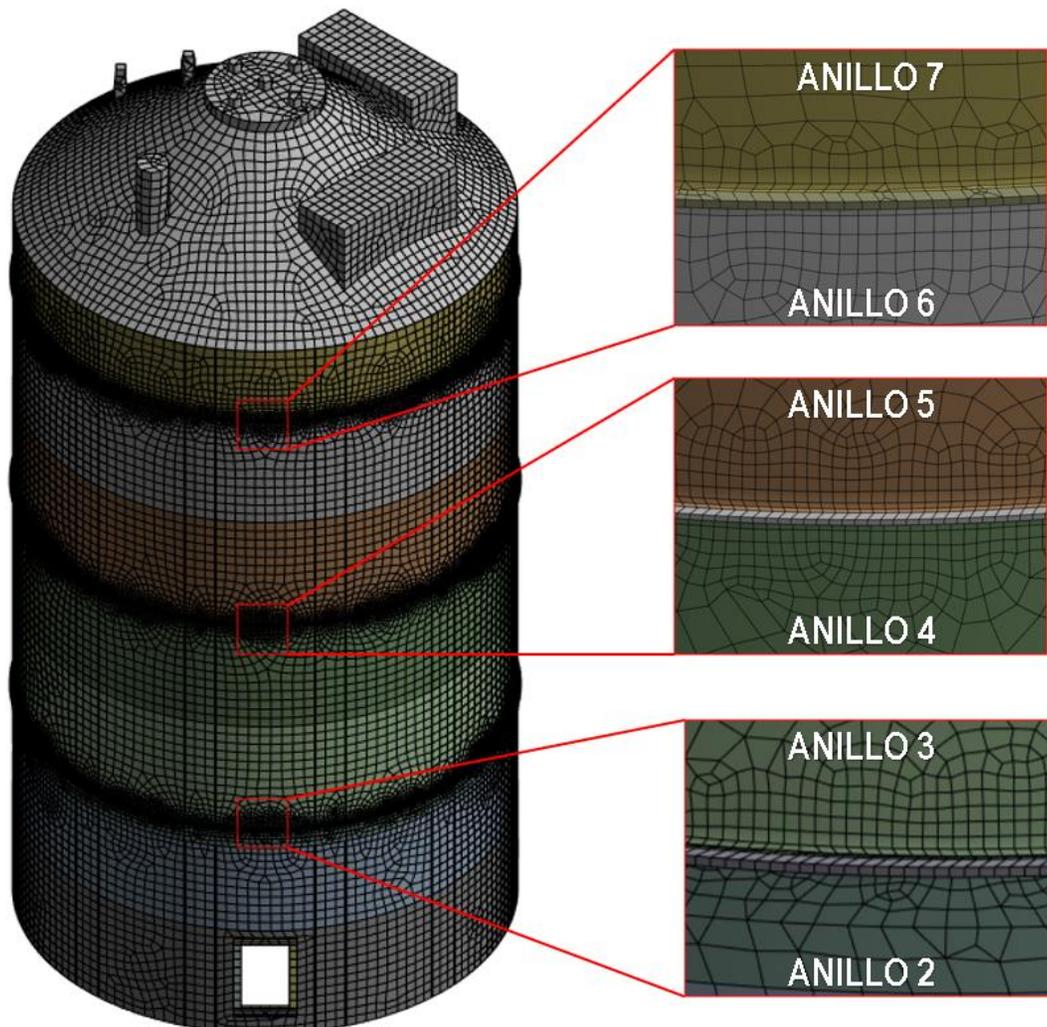


Fig. 15 Discretización general del Silo 1

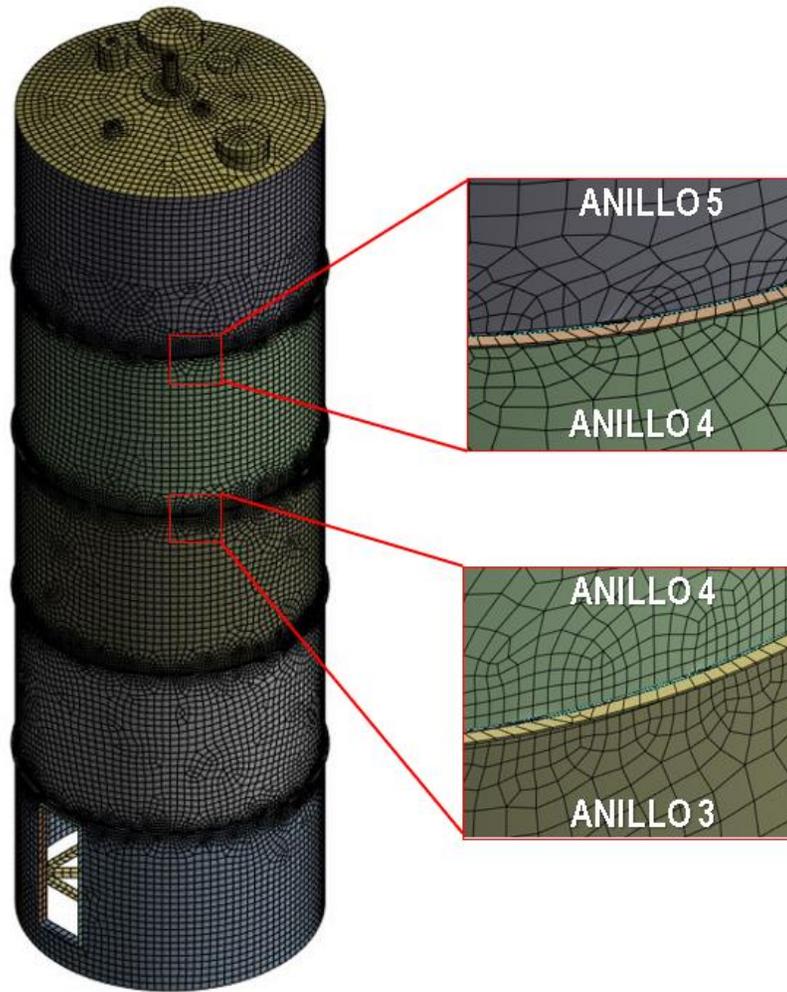


Fig. 16 Discretización general del Silo 2

3.1.2 Condiciones de frontera

Ambos Silos fueron evaluados con 4 tipos de condiciones de frontera para poder conocer los esfuerzos y deformaciones resultantes, fue agregada la fuerza de gravedad para conocer la estabilidad del silo bajo el esfuerzo que es provocado por el peso mismo de las placas con las que están fabricados, soporte fijo en donde se anclan los silos, la fuerza que provoca el peso del material en el cono y las presiones que provoca el material granular sobre cada anillo del silo. En la Figura 17 se puede visualizar las condiciones de frontera asignadas al Silo 1 y en la Figura 18 las del Silo 2.

En esta parte de la investigación se prestó especial atención en la forma en la que se colocaban las presiones sobre los anillos respectivos de cada silo, puesto que cada superficie tenía su propio sentido y al colocar la presión, esta se tornaba en un sentido opuesto entre caras o componentes de la misma sección, para evitar esta situación a cada grupo de componentes (anillos, refuerzos, sección de anillo) se les asignó su respectiva presión y se pudieron obtener los resultados esperados.

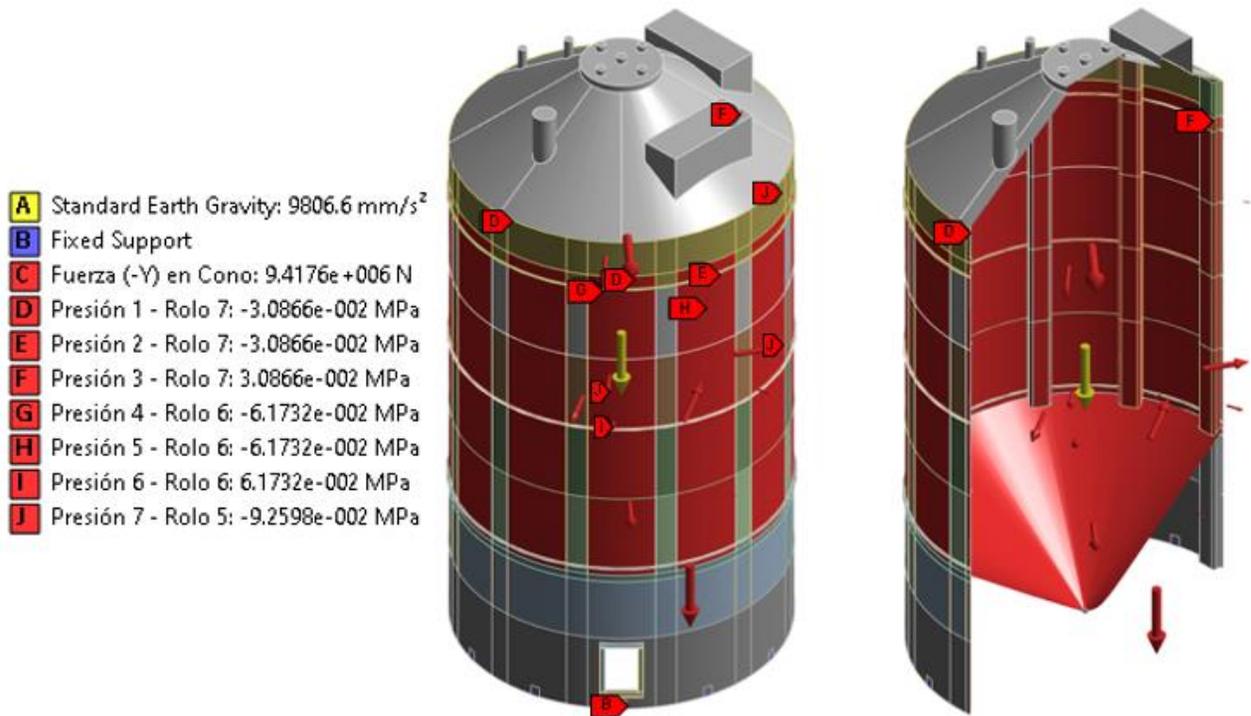


Fig. 17 Condiciones de frontera en Silo 1

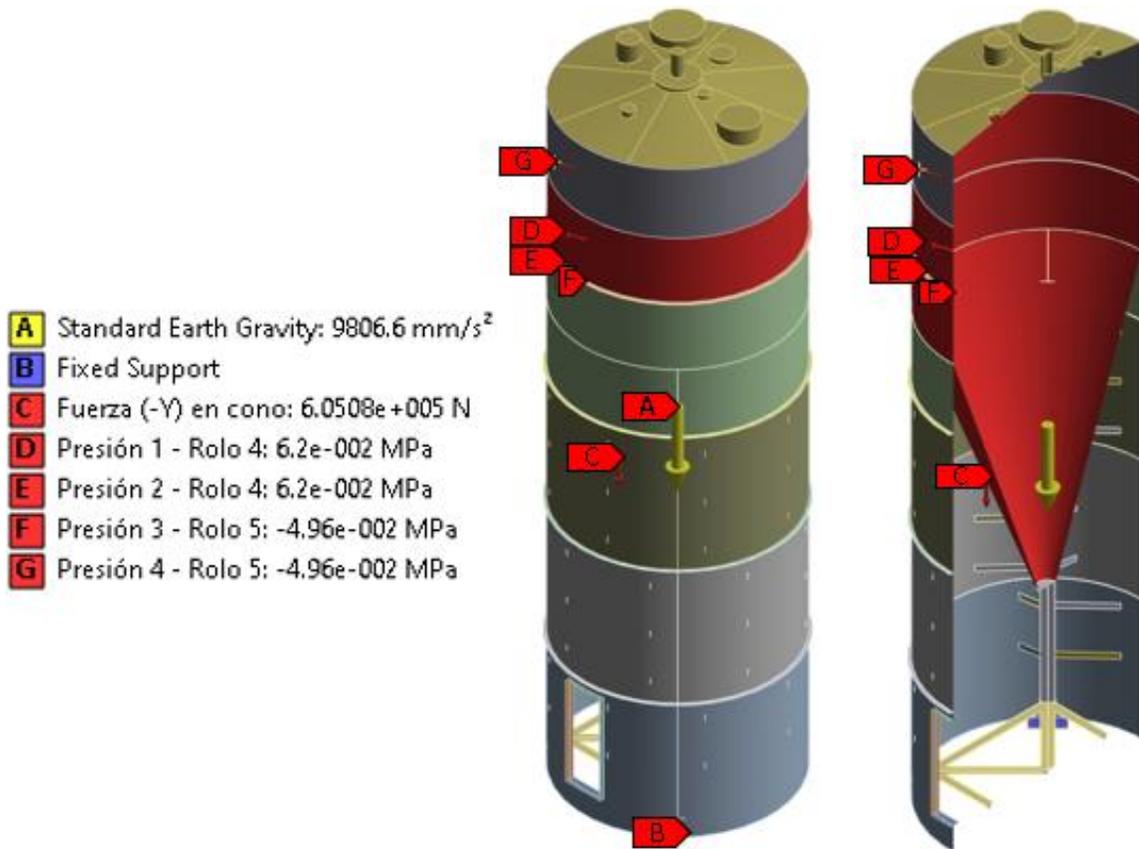


Fig. 18 Condiciones de frontera en Silo 2.

3.1.3 Resultados del análisis de esfuerzos y deformaciones de Silos completos

En esta parte de la investigación se muestran los primeros resultados obtenidos, tras haber asignado las condiciones de frontera a cada silo y se obtuvieron los siguientes resultados. El Silo 1 obtuvo una deformación máxima de 8.22 mm, en la Figura 19 b se ve la deformación al interior del Silo 1 y en la Figura 19 c las deformaciones del exterior. De igual manera, se muestra la deformación máxima obtenida en el Silo 2, en la figura 20 equivalente a 1.26 mm, en la Figura 20 b se ve la deformación al interior del Silo 2 y el en la Figura 20 c la deformación en el exterior.

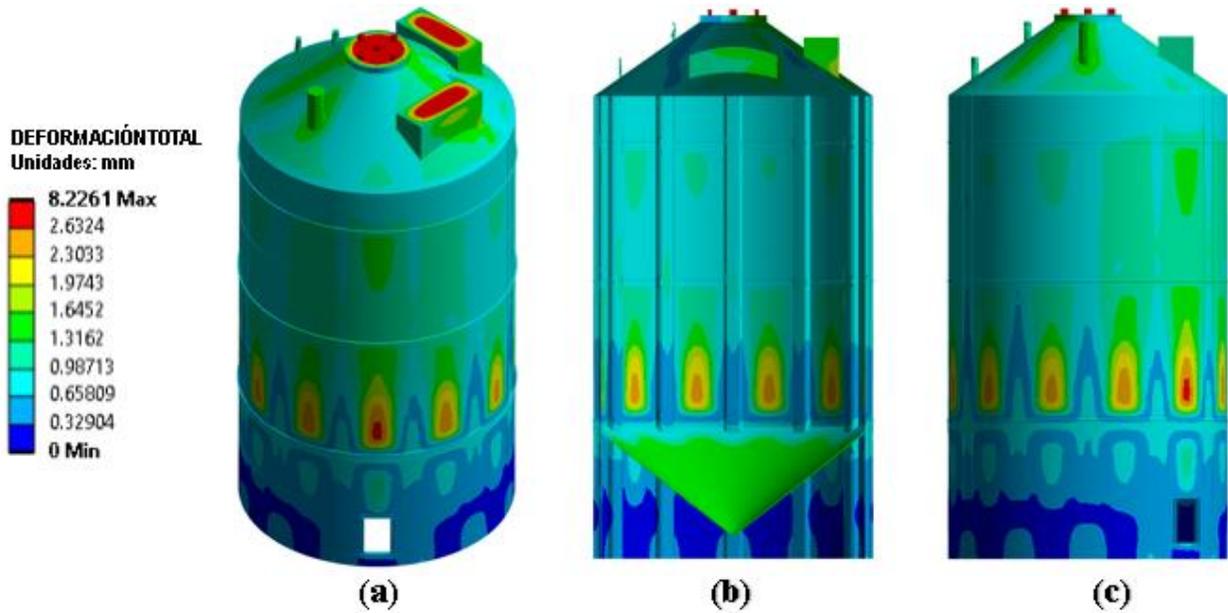


Fig. 19 Deformaciones resultantes en Silo 1

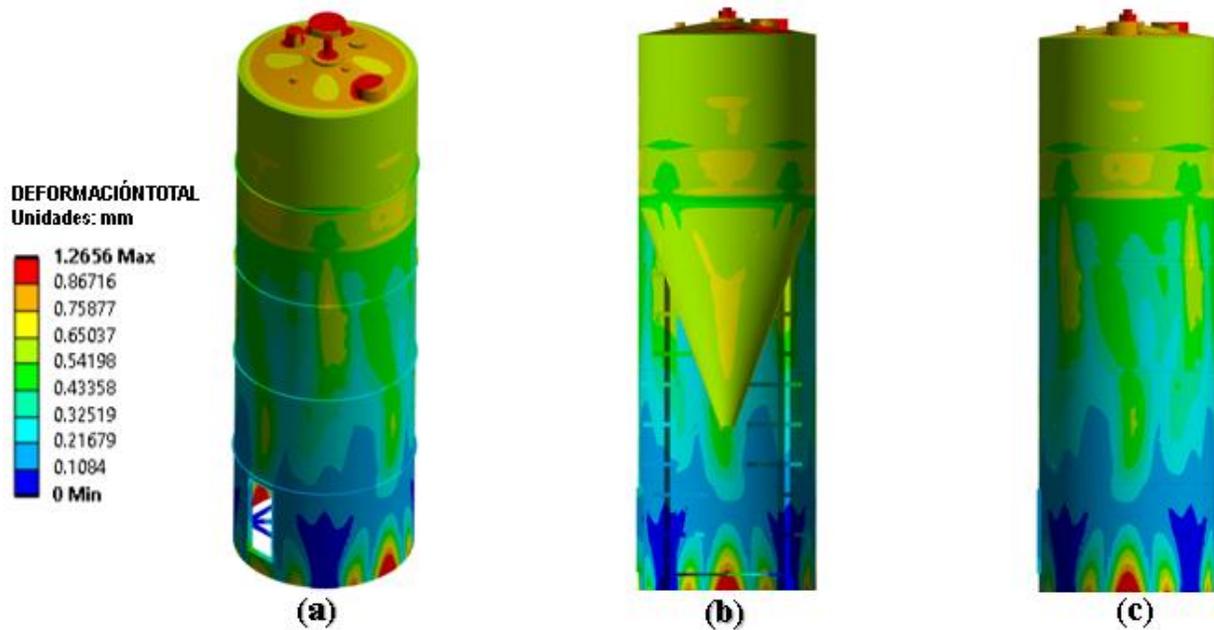


Fig. 20 Deformaciones resultantes en Silo 2

Por haber modelado los silos con superficies se pueden ver los esfuerzos en compresión y tensión de manera separada en cada estudio. El esfuerzo máximo resultante en el Silo 1 fue de 95.93 MPa, el esfuerzo en tensión se puede ver en la Figura 21 b y los esfuerzos en compresión en la Figura 21 c.

El Silo 2 tuvo un esfuerzo máximo de 98.36 MPa, y también se puede observar el esfuerzo en compresión en la figura 22 b y el de tensión en la Figura 22 c. Lo cual indica que los esfuerzos en compresión son menores a los de tensión en ambos casos, por lo que el desarrollo del sub modelo para el análisis detallado de las uniones atornilladas se torna crítico para garantizar la estabilidad estructural completa en ambos silos.

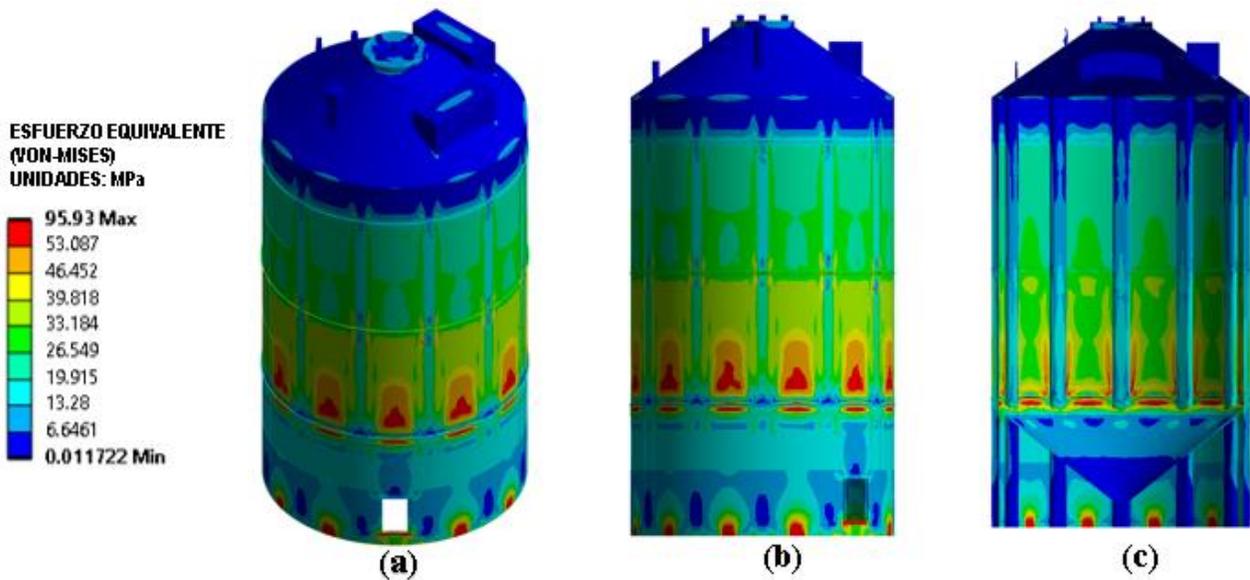


Fig. 21 Esfuerzos resultantes en Silo 1.

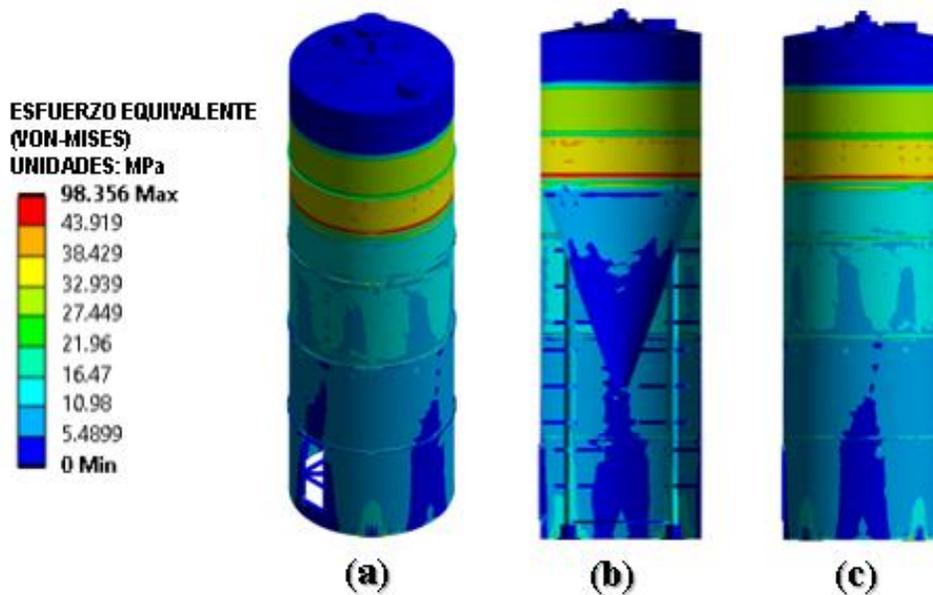


Fig. 22 Esfuerzos resultantes en Silo 2.

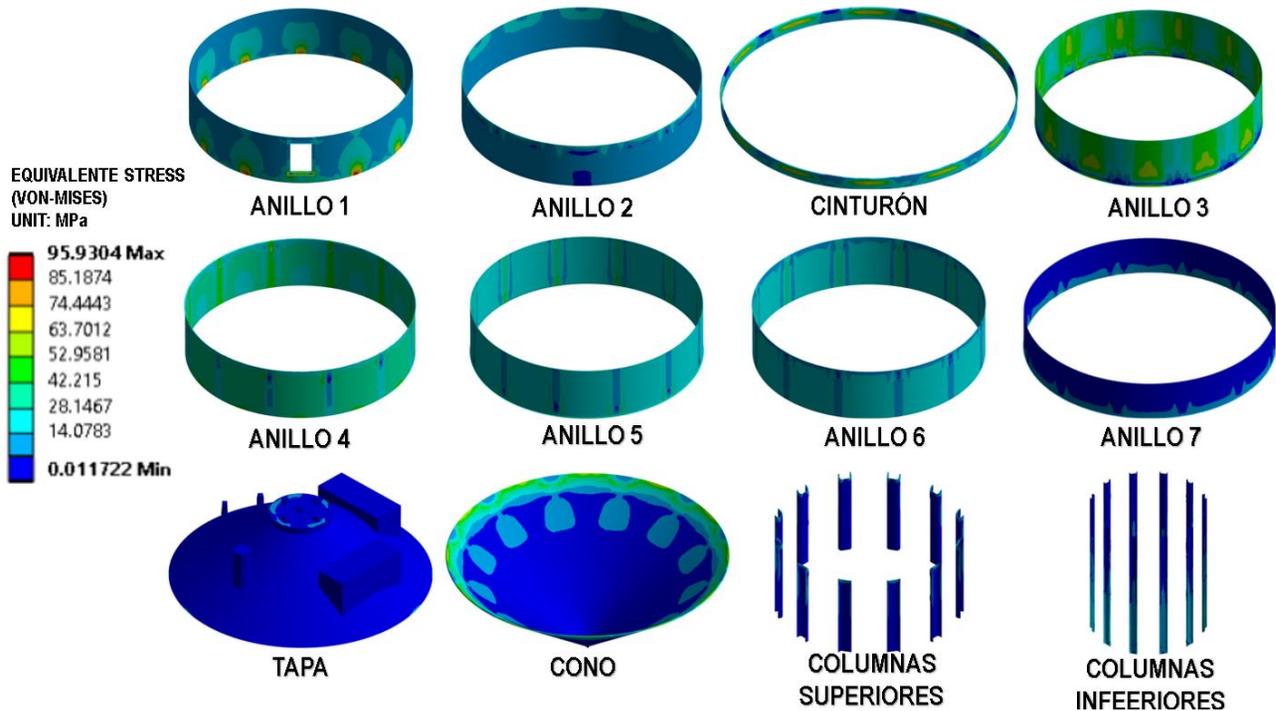


Fig. 23 Esfuerzos resultantes en componente del Silo 1.

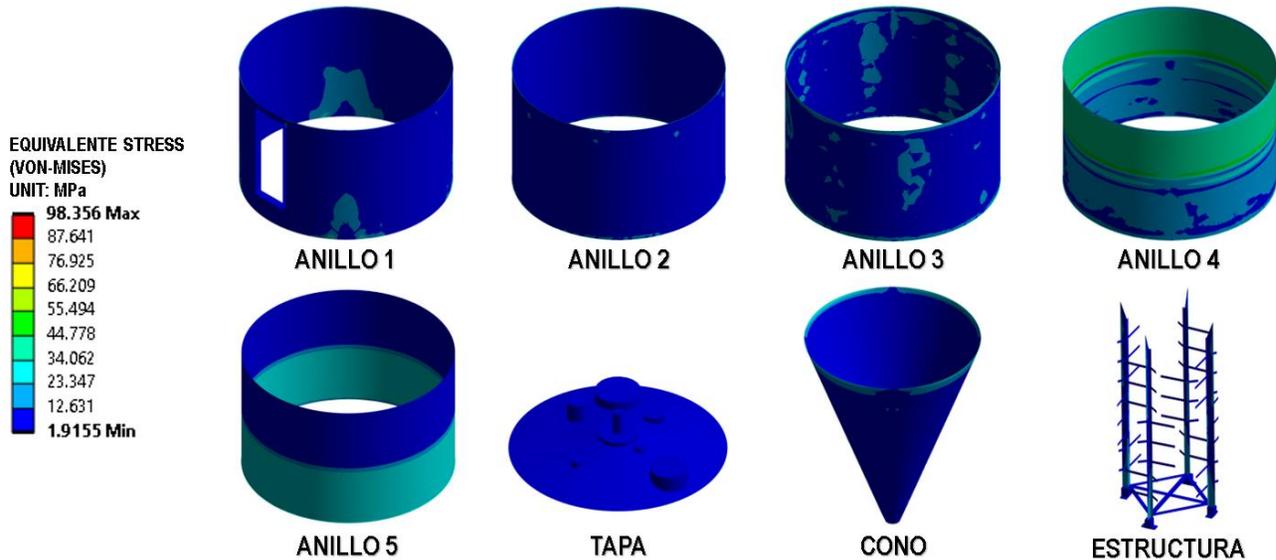


Fig. 24 Esfuerzos resultantes en cada componente del Silo 2.

En las Figura 35 se pueden visualizar los esfuerzos obtenidos en cada uno de los componentes del Silo 1 y en la Figura 24 los esfuerzos obtenidos en cada uno de los componentes del Silo 2, la ventaja de realizar el silo con superficies de cada componente es que se pueden evaluar de manera independiente cada una de las partes del silo y a su vez realizar cualquier tipo de análisis entre uniones con sub modelos.

3.1.4 Desarrollo de sub modelos

Se desarrollaron 3 clases de sub modelos en total, cada silo tuvo 3 diferentes opciones de sub modelos en las uniones que fueron evaluadas, la primera propuesta es únicamente las placas dobladas para hacer las cejas en los anillos, en la propuesta 2 se colocaron cartelas triangulares de 1/8" de espesor y en la propuesta 3 cartelas cuadradas de 1/8" de espesor. El espesor de las placas con las que están fabricadas los sub modelos se pueden visualizar en la siguiente tabla, ambas propuestas de cartelas triangulares y cuadradas tienen espesor de 1/8" y juegos de tornillería ASTM A-325 de 1/2". Como se observa en la Figura 25.

Tabla IX
Calibres Silo 1

COMPONENTE	ESPESOR (mm)
TAPA	3.175
REF SUPERIORES	25.4
ROLO 7	11.1125
ROLO 6	11.1125
ROLO 5	15.875
ROLO 4	15.875
ROLO 3	15.875
ROLO 2	15.875
ROLO 1	19.05
CONO	44.45
CINTURON	38.1
REF INFERIORES	25.4
PUERTA	6.35

Tabla VIII
Calibres Silo 2

COMPONENTE	ESPESOR (mm)
TAPA	3.175
ROLO 5	3.175
ROLO 4	3.175
ROLO 3	3.175
ROLO 2	4.7625
ROLO 1	6.35
CONO	6.35
COLUMNAS	12.7
PLACA BASE SUP	25.4
PLACA BASE INF	38.1
CELDA DE PESAJE	25.4
CRUCETA BASE	4.7625
LARGUEROS INFERIORES	4.7625
MARCO PUERTA	4.7625

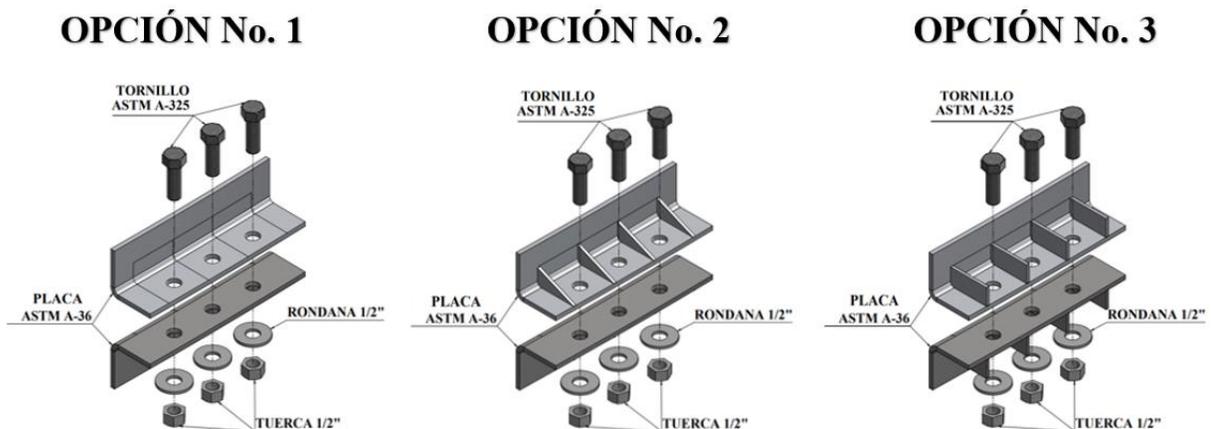


Fig. 25 Explosionado de propuestas de Sub modelos para Silo 1 y 2

3.2 Ubicación de Sub modelo en Silo 1 y Silo 2

En esta parte de la investigación se ubicaron las áreas de estudio de los sub modelos, en la Figura 26 se pueden identificar las uniones entre anillos que fueron resaltadas con un rectángulo rojo para poder empezar con el desarrollo detallado del sub modelo y sus 3 propuestas para cada silo. En el silo uno las uniones que fueron analizadas fueron entre los anillos 2-3, 4-5 y finalmente 6-7, en el Silo 2, los anillos que fueron elegidos para el estudio fueron 3-4 y 4-5.

Se eligieron estas opciones entre anillos ya que la presión en esta zona afecta directamente la estabilidad de la parte recta del silo que comprende la zona entre el cono y la tapa. Para futuras investigaciones, se analizarán uniones atornilladas en toda parte del silo.

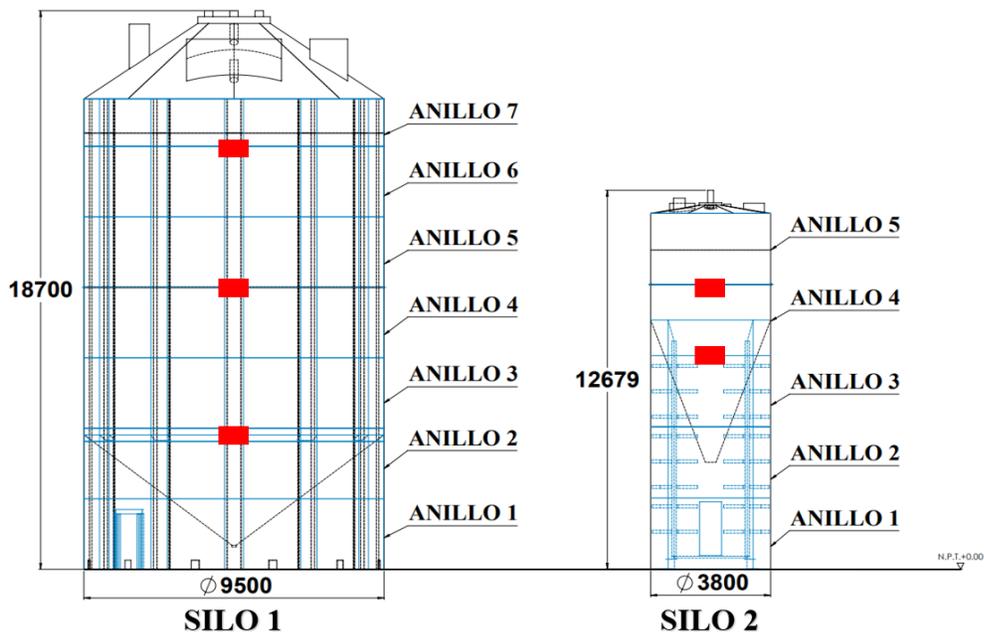


Fig. 26 Ubicación de sub modelos en Silo 1 y 2.

3.2.1 Desarrollo de sub modelos en ANSYS

Con los resultados de esfuerzos y deformaciones obtenidos en cada silo y también el desarrollado los sub modelos con sus respectivos componentes, se comenzó con el siguiente paso en esta investigación, el reto principal fue el poder transmitir los resultados obtenidos de un modelo hecho en superficies a un modelo de sólidos completamente.

Con la ayuda de ANSYS, en el desarrollo de sub modeling como se muestra en la Figura 27 se puede hacer la correcta transferencia de resultados del silo con superficies a cada sub modelo, una vez colocado el “Imported cut boundary constraint” como una condición de frontera, se debió de cambiar en “Transfer key” la opción de “Shell – Solid”.

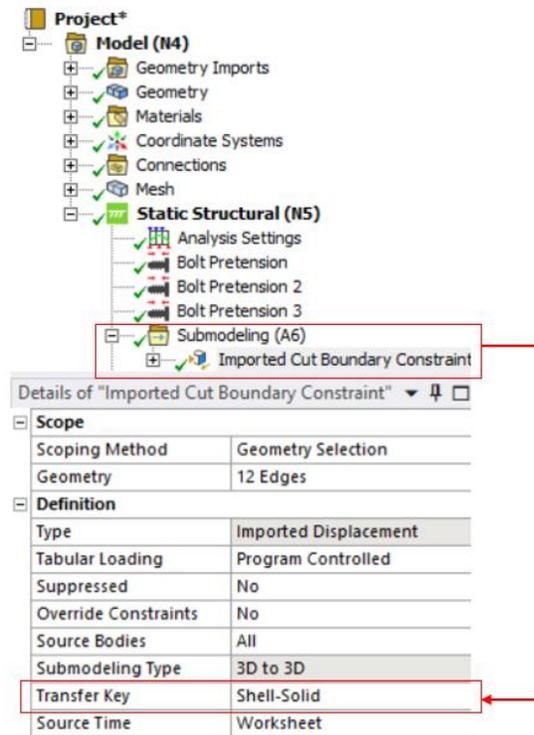


Fig. 27 Ubicación de sub modelos en Silo 1 y 2

De esta manera la herramienta de Sub modeling nos permite ubicar de manera exacta el sub modelo correspondiente en cada unión de anillos de cada silo, ya que el sub modelo parte de la geometría original de cada silo. En la Figura 28 se pueden visualizar cada zona de estudio que fue elegida para poder realizar las pruebas correspondientes de cada sub modelo.

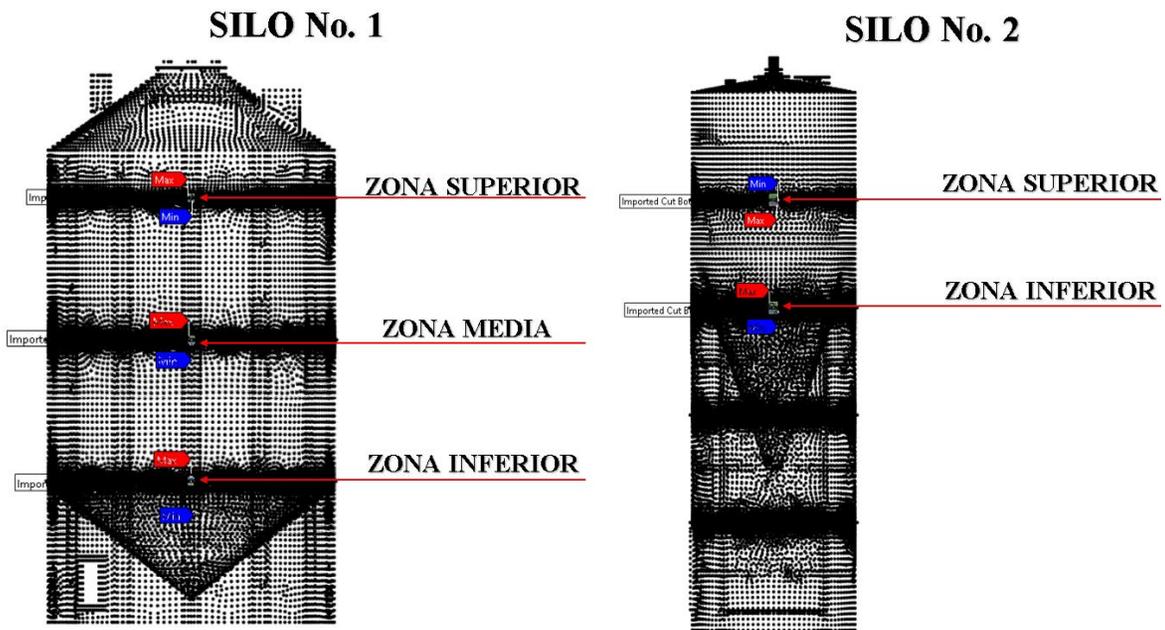


Fig. 28 Ubicación de sub modelos en Silo 1 y 2.

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

Una vez ubicando las zonas donde se analizaron las uniones atornilladas de cada silo, se desarrolló cada sub modelo detallado, las Figuras 29-31 muestran los sub modelos del Silo 1, y las Figuras 32, 33 los sub modelos del Silo 2.

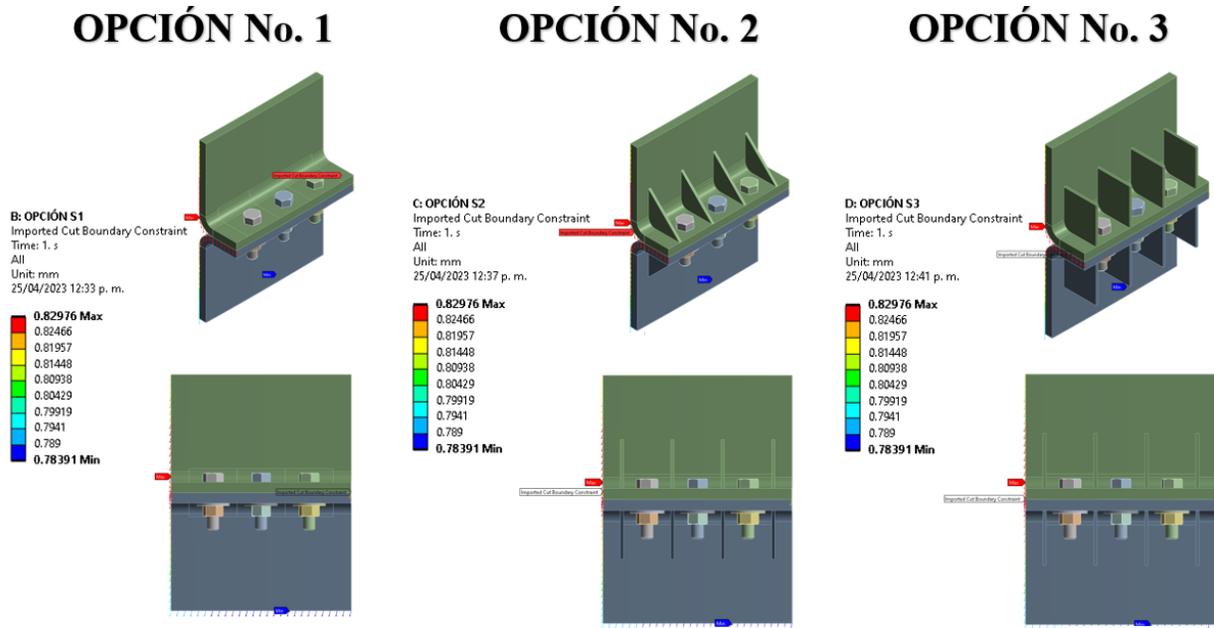


Fig. 29 Sub modelos de Silo 1 – Zona superior | Anillos 6 y 7

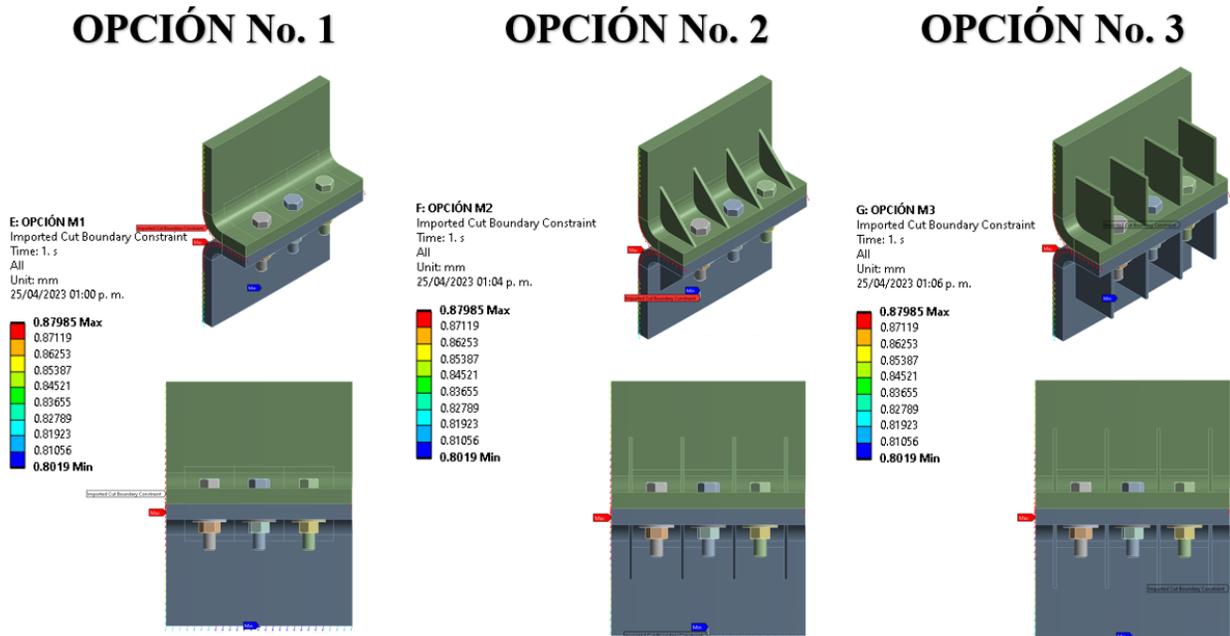


Fig. 30 Sub modelos de Silo 1 – Zona media | Anillos 4 y 5

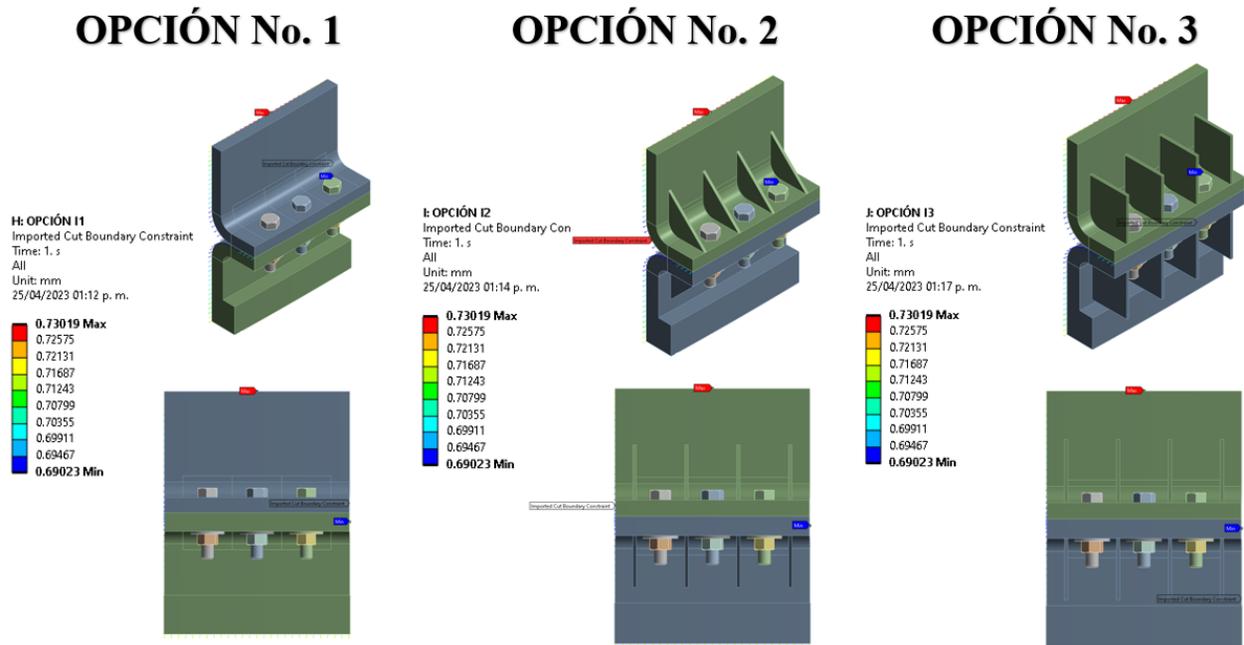


Fig. 31 Sub modelos de Silo 1 – Zona inferior | Anillo 2 y 3

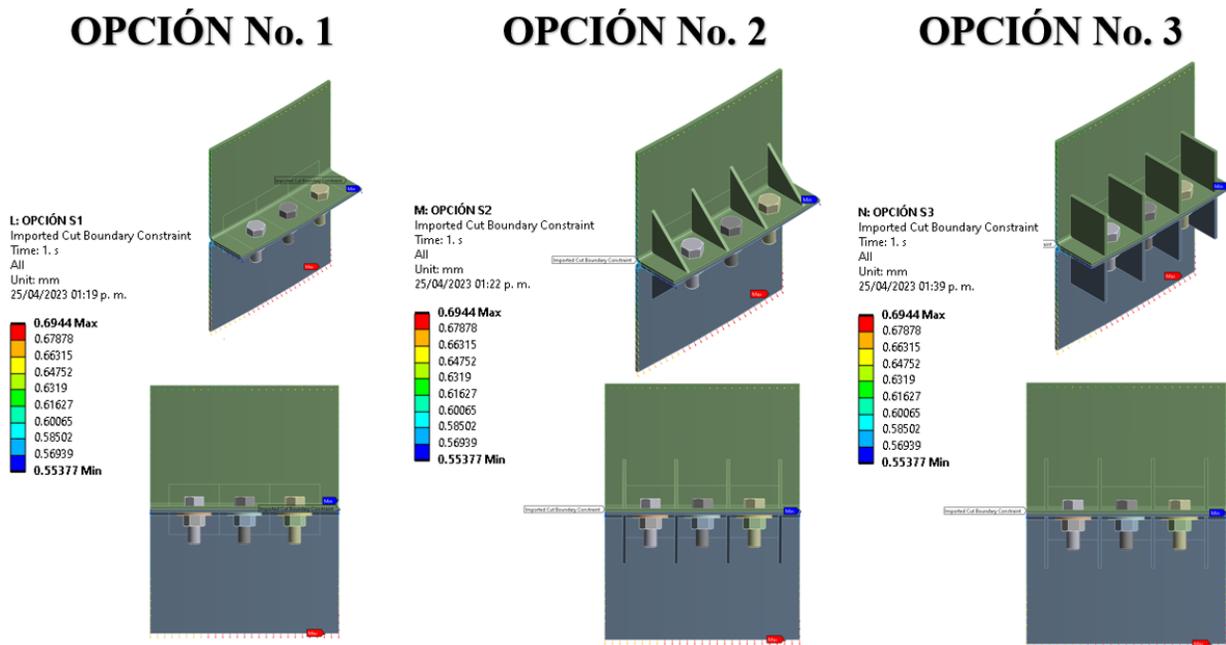


Fig. 32 Sub modelos de Silo 2 – Zona superior | Anillos 4 y 5

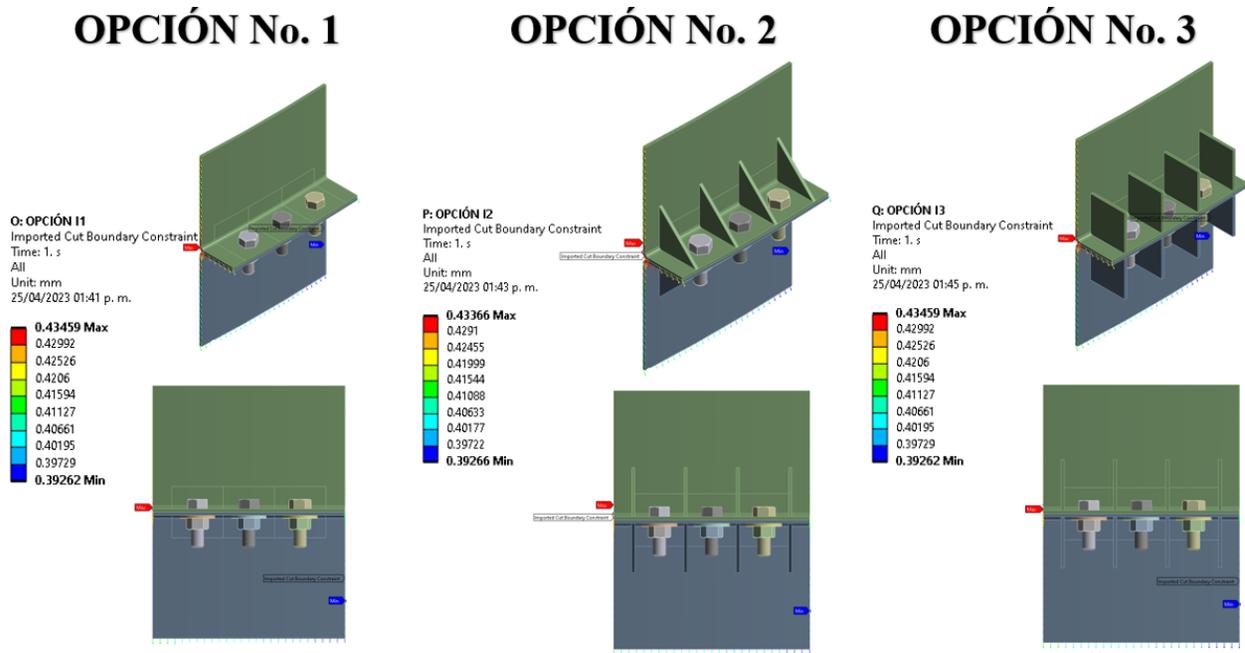


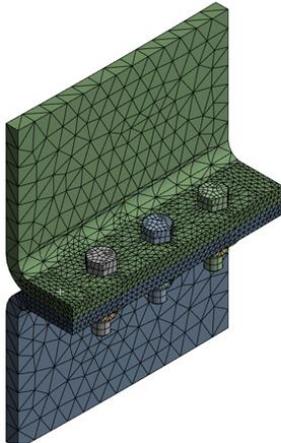
Fig. 33 Sub modelos de Silo 2 – Zona inferior | Anillo 2 y 3

3.2.2 Discretización en sub modelos de ambos silos

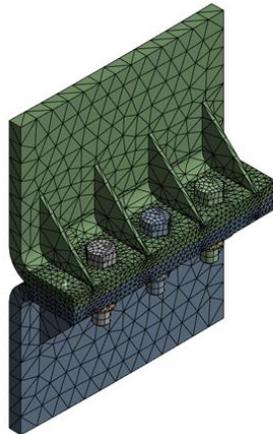
La discretización de sub modelos fue crucial para la obtención de los resultados, ya que al afinar demasiado la malla se obtenían resultados elevados en los esfuerzos y en las deformaciones, para evitar esto último, se eligió un tamaño de malla estándar para las placas y un refinamiento en las aristas de sus barrenos, mientras a los tornillos se les dio un método distinto de malla denominado “hex dominant” en ANSYS y se le proporcionó un tamaño de malla de 5 mm para poder tener un valor detallado de esfuerzos a la hora de correr el estudio correspondiente de cada sub modelo. Para las rondanas y tuercas se utilizó un tamaño de malla estándar también.

Se refinaron las caras entre placas de cada sub modelo para visualizar de manera exacta el contacto que tenían y poder garantizar la efectividad del uso de cartelas, en las Figuras 34 – 36 se pueden visualizar los sub modelos del Silo 1 discretizados y en las Figuras 37 y 38 las del Silo 2. En esta parte de la investigación es importante revisar que cada sub modelo no tenga espacios estrechos entre sólidos, puesto que esto afectara el desarrollo de la malla, esto último es una recomendación para denotar la importancia de evitar espacios estrechos y que la malla se cruce a la hora de crearse y a su vez exista un error en el programa ANSYS.

OPCIÓN No. 1



OPCIÓN No. 2



OPCIÓN No. 3

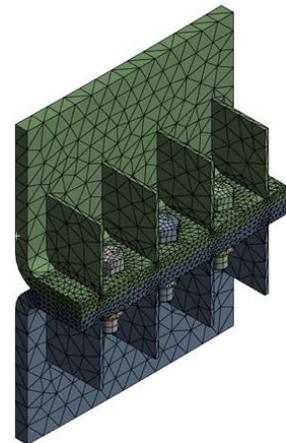
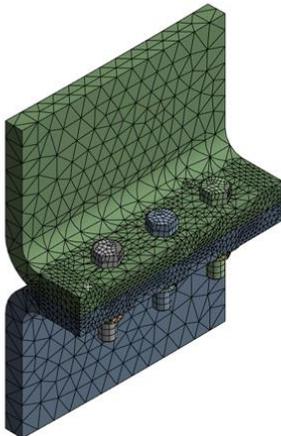
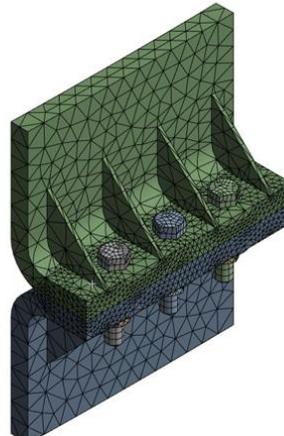


Fig. 34 Discretización de sub modelos de Silo 1 – Zona superior. | Anillos 6 y 7

OPCIÓN No. 1



OPCIÓN No. 2



OPCIÓN No. 3

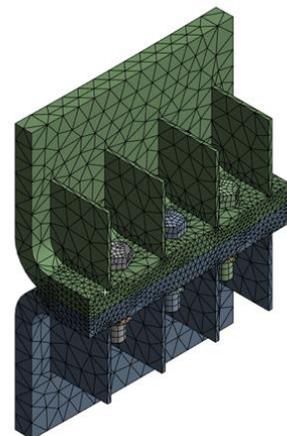
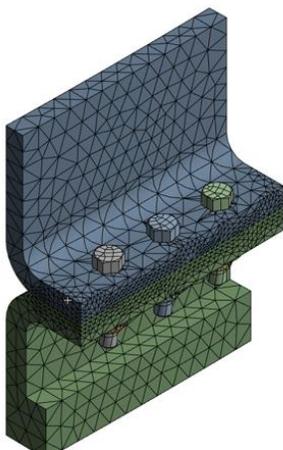
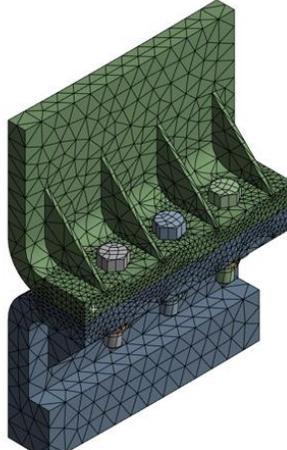


Fig. 35 Discretización de sub modelos de Silo 1 – Zona media | Anillos 4 y 5

OPCIÓN No. 1



OPCIÓN No. 2



OPCIÓN No. 3

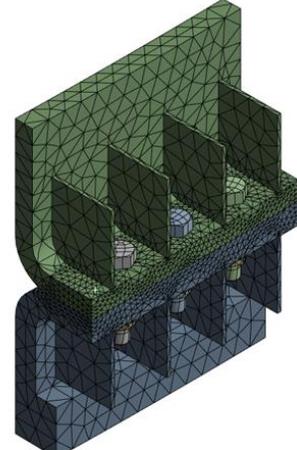
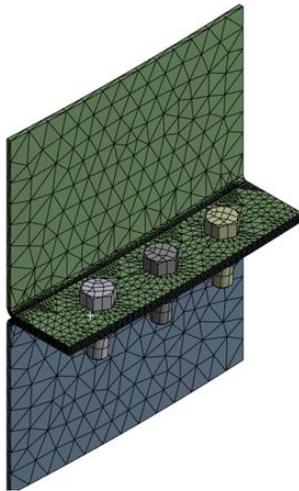
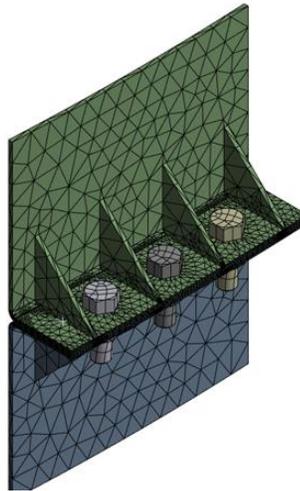


Fig. 36 Discretización de sub modelos de Silo 1 – Zona inferior | Anillos 2 y 3

OPCIÓN No. 1



OPCIÓN No. 2



OPCIÓN No. 3

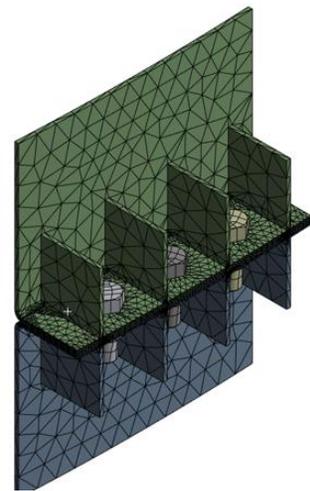
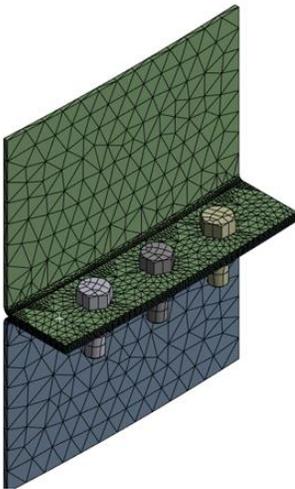
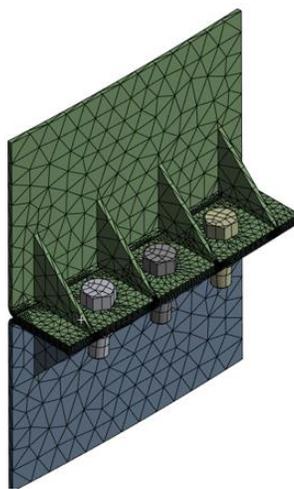


Fig. 37 Discretización de sub modelos de Silo 2 – Zona superior | Anillos 4 y 5

OPCIÓN No. 1



OPCIÓN No. 2



OPCIÓN No. 3

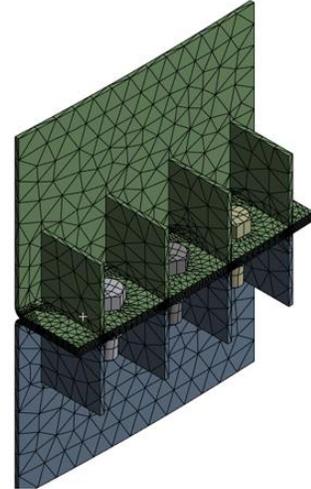


Fig. 38 Discretización de sub modelos de Silo 2 – Zona inferior | Anillos 3 y 4

3.2.3 Condiciones de frontera aplicadas al sub modelo

Para poder conocer la resistencia máxima de cada sub modelo propuesto se consideró como única condición de frontera la precarga (F_i), para conocer este valor, se emplearon las ecs. (21) –(22) utilizando un 75% del valor de la carga de prueba (F_p) para tornillos ASTM A325 tipo 3 con diámetro nominal de 0.0127m ($\frac{1}{2}$ ”), debido a los tornillos utilizados para el ensamble de silos. Los valores obtenidos de este cálculo se muestran en la Tabla X.

Partiendo desde los resultados obtenidos de los silos 1 y 2 anteriormente presentados, los esfuerzos que presentaron sirvieron como punto de partida inicial, puesto que los sub modelos ya tienen cargados los esfuerzos y deformaciones de los silos, así que con estos valores se iniciaron los estudios

individuales de cada propuesta, al igual de cada componente que la conformaba. En las Figuras 39,41 se pueden visualizar las precargas aplicadas en los sub modelos del Silo 1 y en las figuras 42,43 las del Silo 2.

Tabla X

Parámetros de precarga

PARAMETRO	RESULTADO
A_t (mm^2)	91.54
S_p (MPa)	586.1
F_p (KN)	53.65
F_i (KN)	40.24

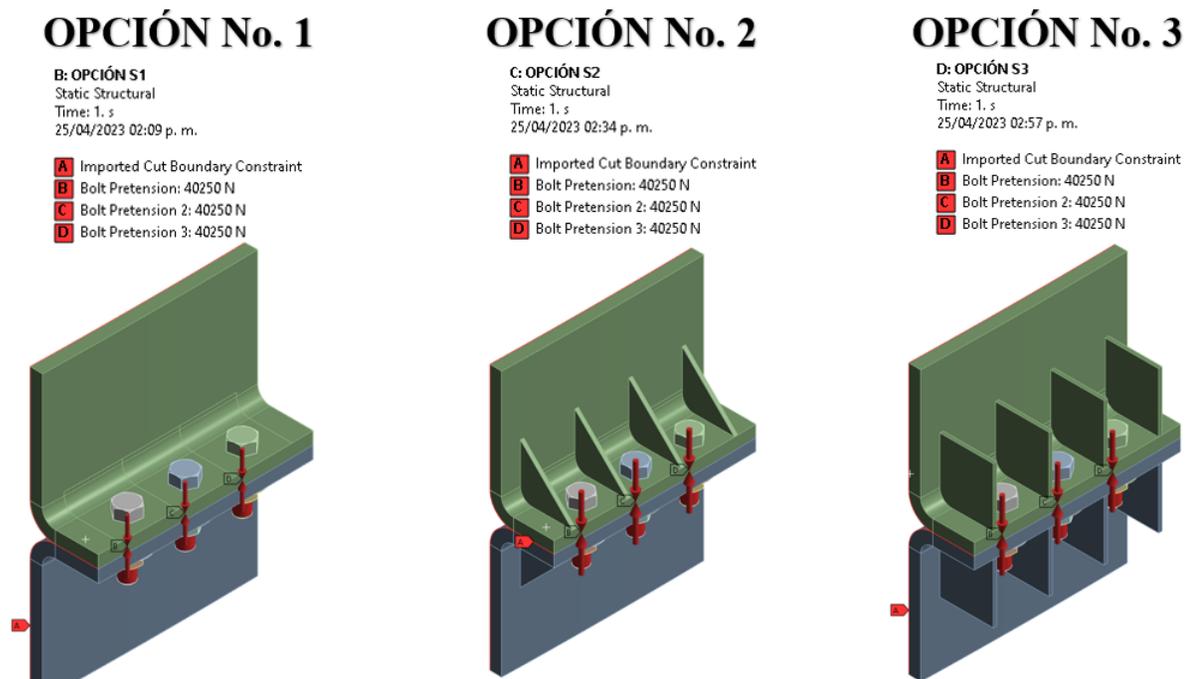
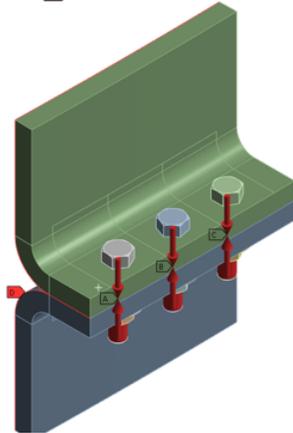


Fig. 39 Condiciones de frontera de sub modelos de Silo 1 – Zona superior | Anillo 6 y 7

OPCIÓN No. 1

E: OPCIÓN M1
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 03:16 p. m.

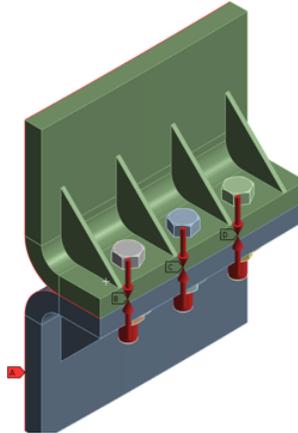
- A** Bolt Pretension: 40250 N
- B** Bolt Pretension 2: 40250 N
- C** Bolt Pretension 3: 40250 N
- D** Imported Cut Boundary Constraint



OPCIÓN No. 2

F: OPCIÓN M2
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 03:34 p. m.

- A** Imported Cut Boundary Constraint
- B** Bolt Pretension: 40250 N
- C** Bolt Pretension 2: 40250 N
- D** Bolt Pretension 3: 40250 N



OPCIÓN No. 3

G: OPCIÓN M3
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 03:59 p. m.

- A** Imported Cut Boundary Constraint
- B** Bolt Pretension: 40250 N
- C** Bolt Pretension 2: 40250 N
- D** Bolt Pretension 3: 40250 N

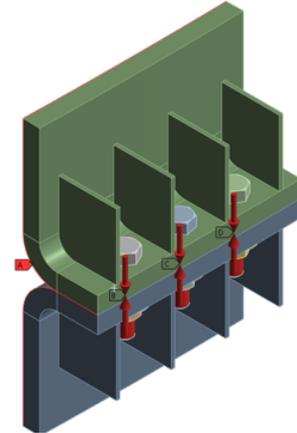
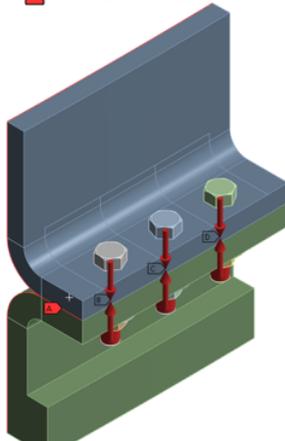


Fig. 40 Condiciones de frontera de sub modelos de Silo 1 – Zona media | Anillo 4 y 5

OPCIÓN No. 1

H: OPCIÓN I1
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 05:24 p. m.

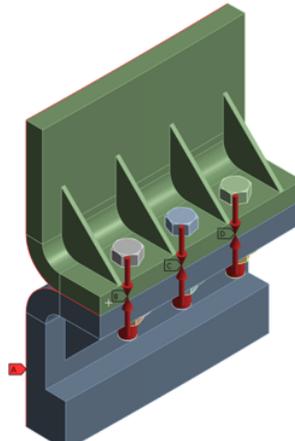
- A** Imported Cut Boundary Constraint
- B** Bolt Pretension: 40250 N
- C** Bolt Pretension 2: 40250 N
- D** Bolt Pretension 3: 40250 N



OPCIÓN No. 2

I: OPCIÓN I2
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 06:39 p. m.

- A** Imported Cut Boundary Constraint
- B** Bolt Pretension: 40250 N
- C** Bolt Pretension 2: 40250 N
- D** Bolt Pretension 3: 40250 N



OPCIÓN No. 3

J: OPCIÓN I3
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 06:52 p. m.

- A** Bolt Pretension: 40250 N
- B** Bolt Pretension 2: 40250 N
- C** Bolt Pretension 3: 40250 N
- D** Imported Cut Boundary Constraint

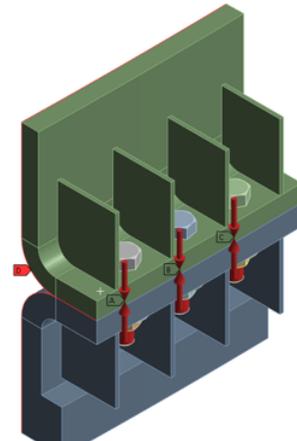
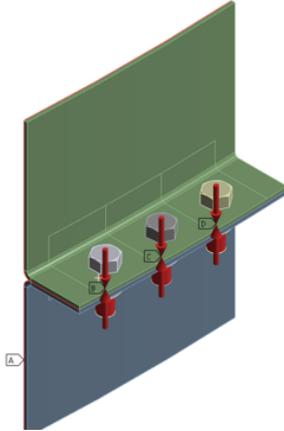


Fig. 41 Condiciones de frontera de sub modelos de Silo 1 – Zona inferior | Anillo 2 y 3

OPCIÓN No. 1

L: OPCIÓN S1
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 07:14 p. m.

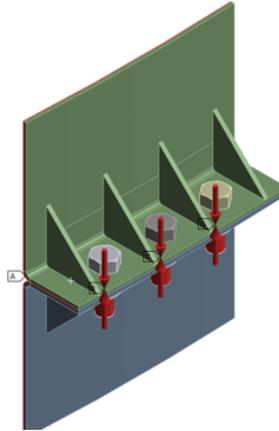
- A Imported Cut Boundary Constraint
- B Bolt Pretension: 40250 N
- C Bolt Pretension 2: 40250 N
- D Bolt Pretension 3: 40250 N



OPCIÓN No. 2

M: OPCIÓN S2
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 07:27 p. m.

- A Imported Cut Boundary Constraint
- B Bolt Pretension: 40250 N
- C Bolt Pretension 2: 40250 N
- D Bolt Pretension 3: 40250 N



OPCIÓN No. 3

N: OPCIÓN S3
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 07:39 p. m.

- A Imported Cut Boundary Constraint
- B Bolt Pretension: 40250 N
- C Bolt Pretension 2: 40250 N
- D Bolt Pretension 3: 40250 N

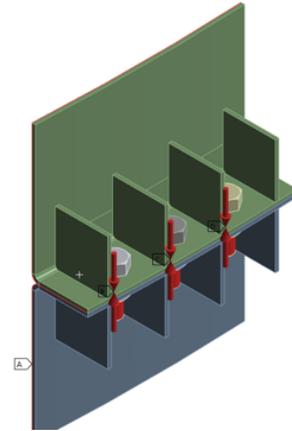
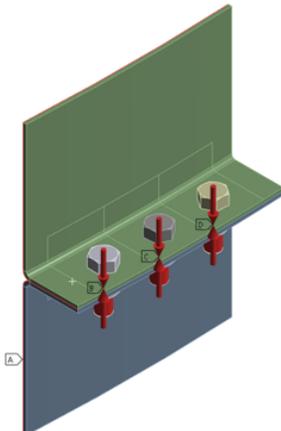


Fig. 42 Condiciones de frontera de sub modelos de Silo 2 – Zona superior | Anillo 4 y 5

OPCIÓN No. 1

O: OPCIÓN I1
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 07:52 p. m.

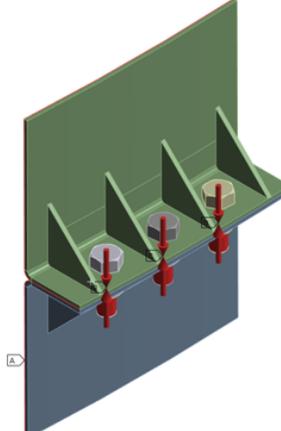
- A Imported Cut Boundary Constraint
- B Bolt Pretension: 40250 N
- C Bolt Pretension 2: 40250 N
- D Bolt Pretension 3: 40250 N



OPCIÓN No. 2

P: OPCIÓN I2
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 08:06 p. m.

- A Imported Cut Boundary Constraint
- B Bolt Pretension: 40250 N
- C Bolt Pretension 2: 40250 N
- D Bolt Pretension 3: 40250 N



OPCIÓN No. 3

Q: OPCIÓN I3
 Static Structural
 Time: 1. s
 25/04/2023 08:18 p. m.

- A Imported Cut Boundary Constraint
- B Bolt Pretension: 40250 N
- C Bolt Pretension 2: 40250 N
- D Bolt Pretension 3: 40250 N

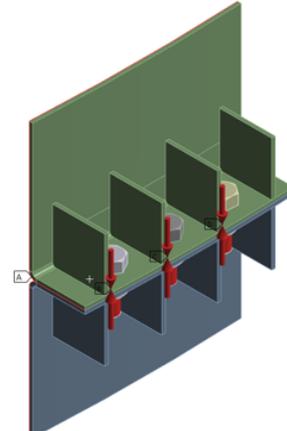


Fig. 43 Condiciones de frontera de sub modelos de Silo 2 – Zona inferior | Anillo 3 y 4

3.2.4 Resultados obtenidos en sub modelos

Fue posible visualizar los esfuerzos y deformaciones de cada junta atornillada propuesta y de cada uno de sus componentes con los resultados obtenidos en esta parte del estudio, estos resultados se

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

pueden ver en las Figuras 44 - 49 de los sub modelos del Silo 1 y los del Silo 2 pueden visualizarse en las Figuras 50 - 53, los valores resultantes se enlistaron en la Tabla XI.

Tabla XI

Resultados de esfuerzos y deformaciones en sub modelos

ZONA	OPCIÓN	Silo 1		Silo 2	
		Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (mm)
SUPERIOR	1	540.04	0.86	720.44	0.69
	2	529.19	0.88	716.05	0.69
	3	535.59	0.88	716.43	0.69
MEDIA	1	594.87	0.92	/	/
	2	580.97	0.92	/	/
	3	586.82	0.91	/	/
INFERIOR	1	632.39	0.77	723.33	0.47
	2	551.91	0.74	719.94	0.46
	3	552.05	0.74	719.34	0.46

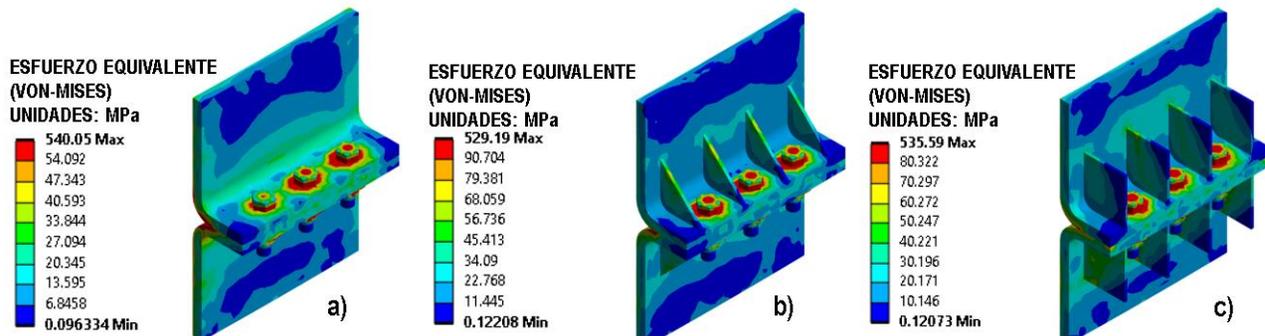


Fig. 44 Esfuerzos obtenidos en sub modelo de Silo 1 en la zona superior | Anillos 6 y 7

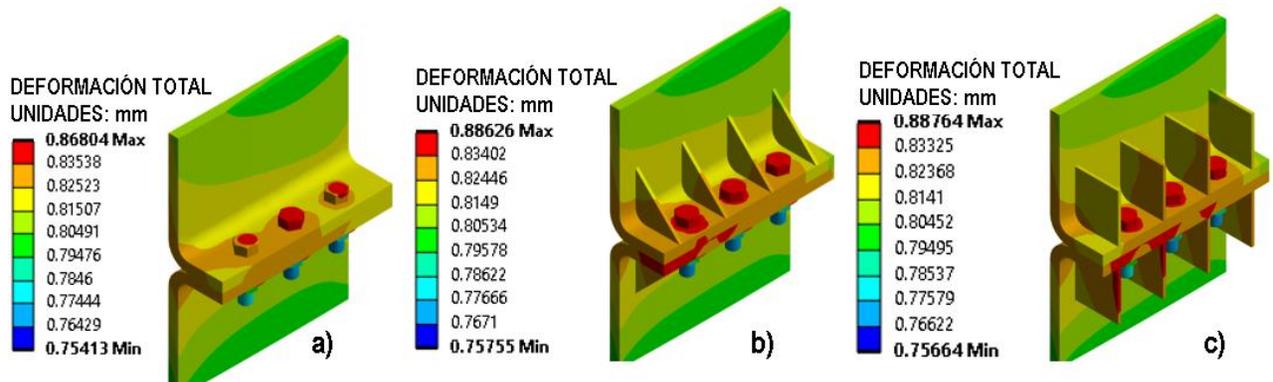


Fig. 45 Deformaciones obtenidos en sub modelo de Silo 1 en la zona superior | Anillos 6 y 7

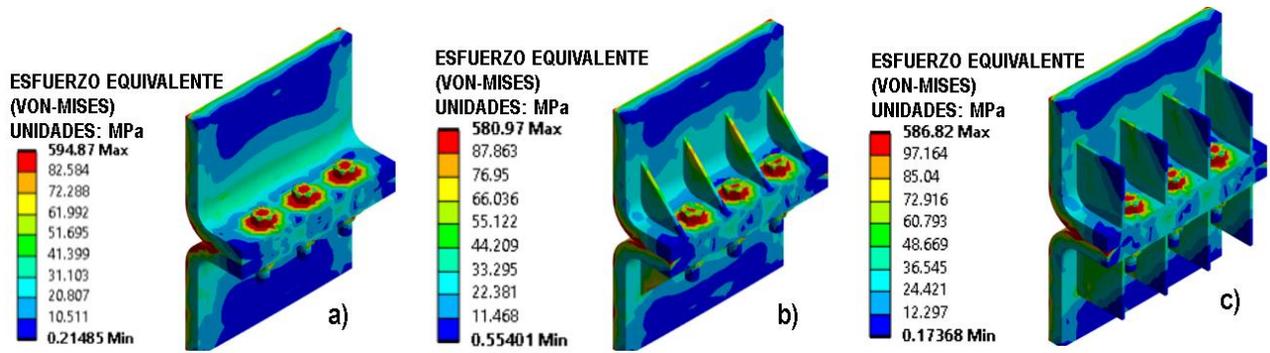


Fig. 46 Esfuerzos obtenidos en sub modelo de Silo 1 en la zona media | Amillos 4 y 5

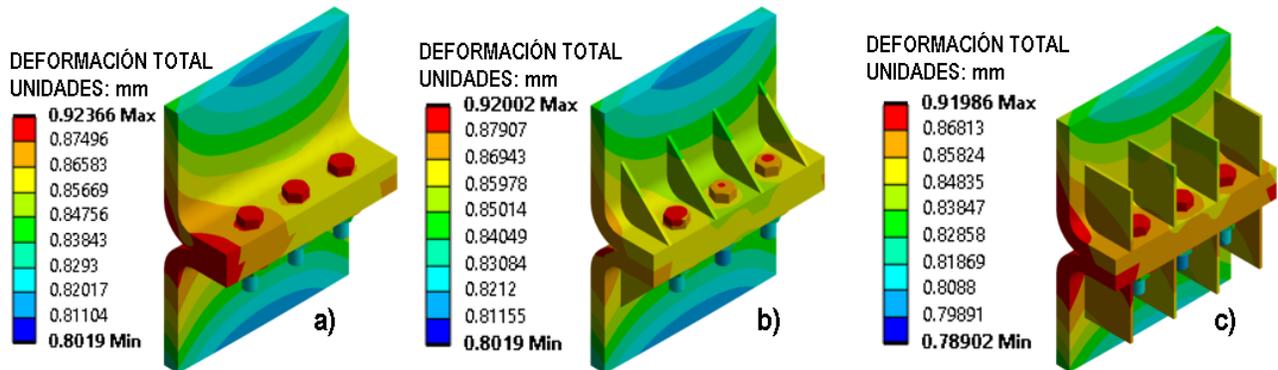


Fig. 47 Deformaciones obtenidos en sub modelo de Silo 1 en la zona media | Amillos 4 y 5

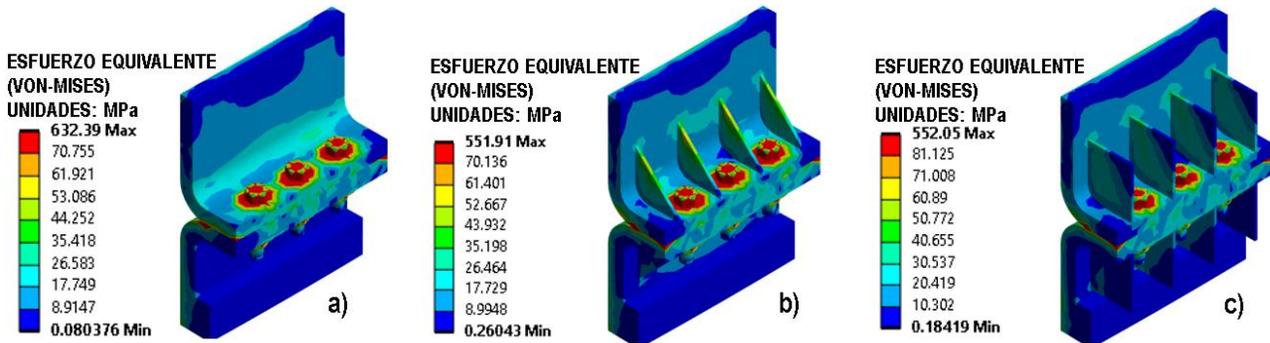


Fig. 48 Esfuerzos obtenidos en sub modelo de Silo 1 en la zona inferior | Anillos 2 y 3

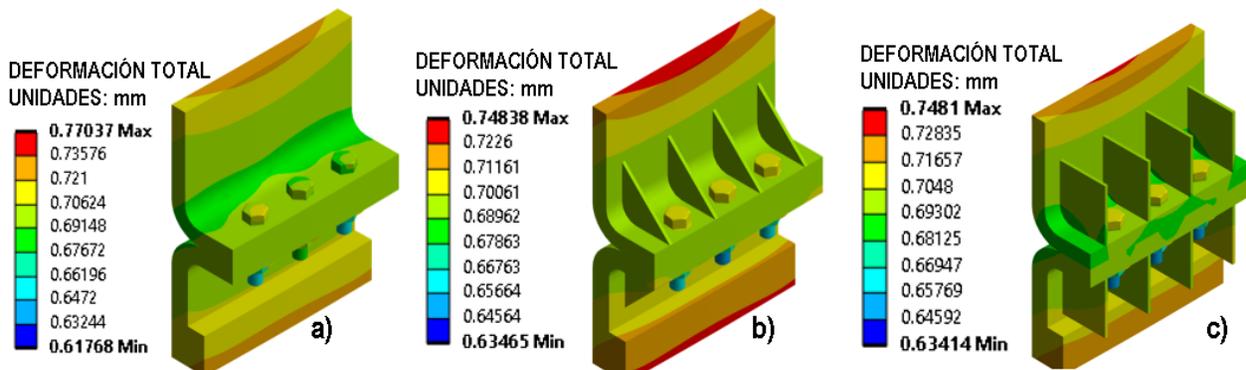
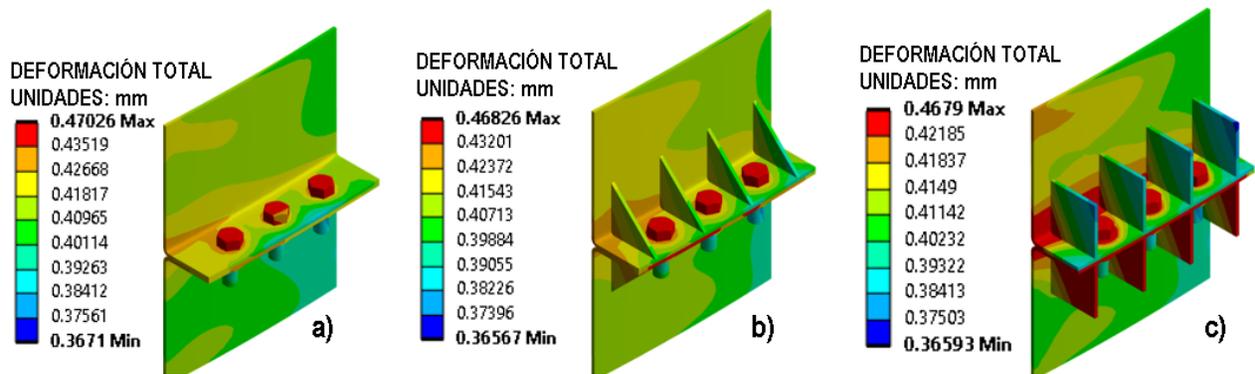
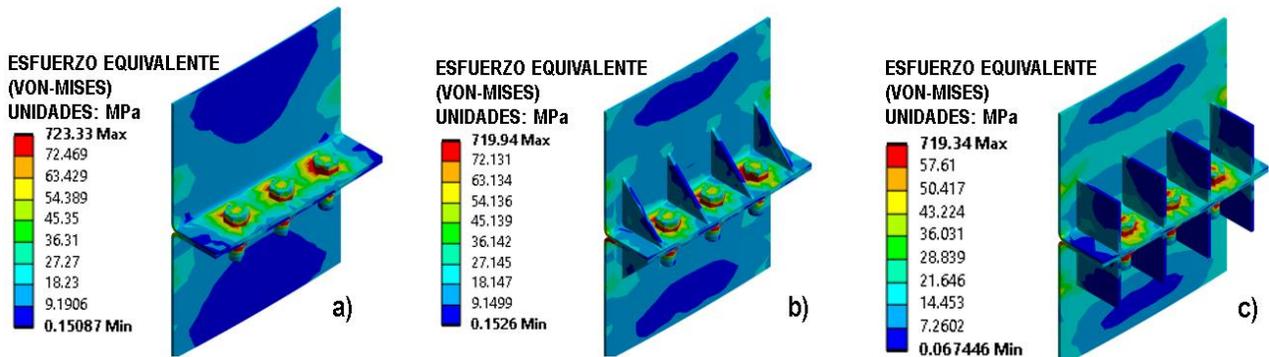
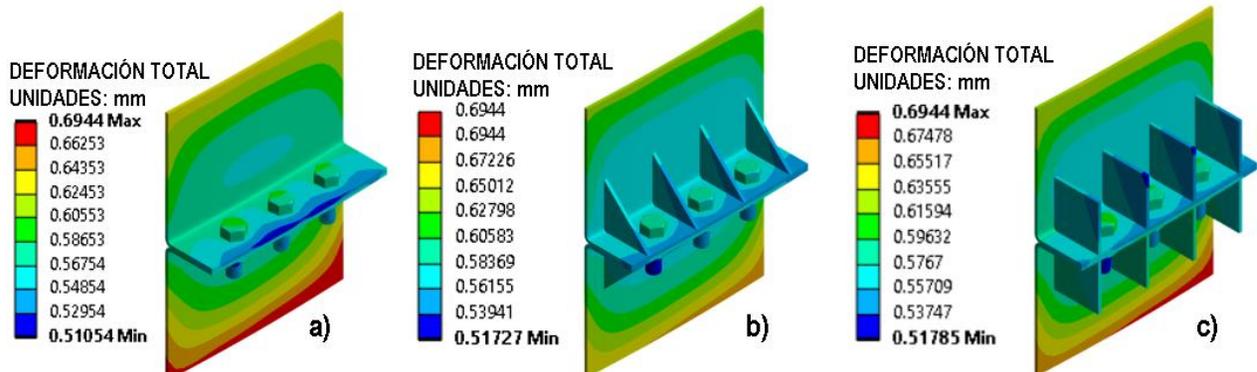
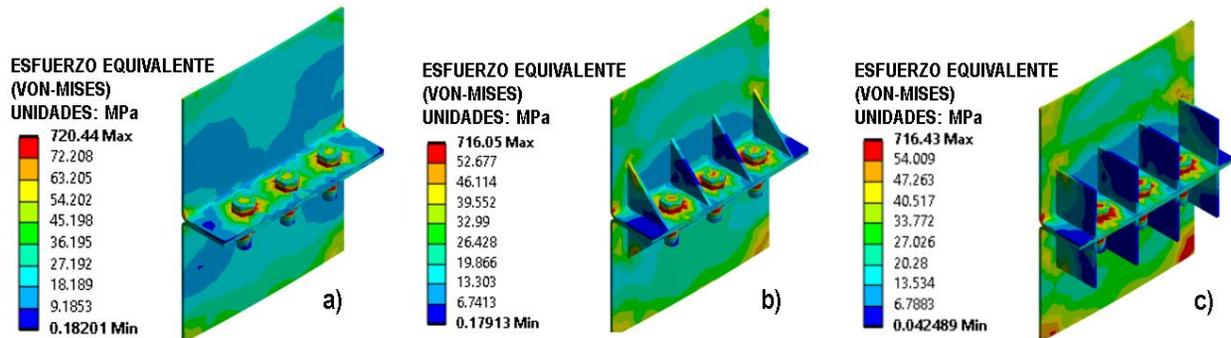


Fig. 49 Deformaciones obtenidos en sub modelo de Silo 1 en la zona inferior | Anillos 2 y 3



Hasta el momento, los resultados generales obtenidos de las uniones atornilladas no permiten visualizar a detalle la distribución de esfuerzos en cada uno de los componentes de las uniones atornilladas, por lo que se aisló cada uno de los componentes para ver el esfuerzo equivalente que recibe cada componente de las uniones atornilladas a detalles, estos resultados se pueden ver en las Figuras 54-62 de los sub modelos del Silo 1 y los del Silo 2 pueden visualizarse en las Figuras 63-68, los valores resultantes se enlistaron en la Tabla XII. Aquí es importante mencionar que el uso de cartelas en el Silo 1 en la zona superior los esfuerzos aumentaban, mientras en la zona media e inferior los esfuerzos disminuían. En el silo 2 el uso de cartelas en la zona superior e inferior en placas los esfuerzos aumentaban, pero en sus juegos de tornillería los esfuerzos disminuían ligeramente.

Tabla XII

Resultados de esfuerzos en componentes de sub modelos

ZONA	PIEZA	Silo 1			Silo 2		
		Propuesta 1 (MPa)	Propuesta 2 (MPa)	Propuesta 3 (MPa)	Propuesta 1 (MPa)	Propuesta 2 (MPa)	Propuesta 3 (MPa)
SUPERIOR	Placas	181.44	200.33	196.25	147.53	155.58	154.68
	Tornillo	372.79	525.86	520.69	614.22	610.25	610.29
	Rondana	384.96	380.64	382.54	277.84	280.94	280.85
	Tuerca	540.05	529.19	535.59	720.44	716.05	716.43
MEDIA	Placas	351.77	371.99	402.95	/	/	/
	Tornillo	412.30	489.88	412.47	/	/	/
	Rondana	409.43	406.77	416.70	/	/	/
	Tuerca	594.87	580.97	586.82	/	/	/
INFERIOR	Placas	276.12	184.86	195.73	152.62	160.98	156.41
	Tornillo	570.60	410.64	410.57	606	603.76	603.72
	Rondana	431.26	403.60	403.89	275.66	276.46	275.05
	Tuerca	632.39	551.91	552.05	723.33	719.94	719.34

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

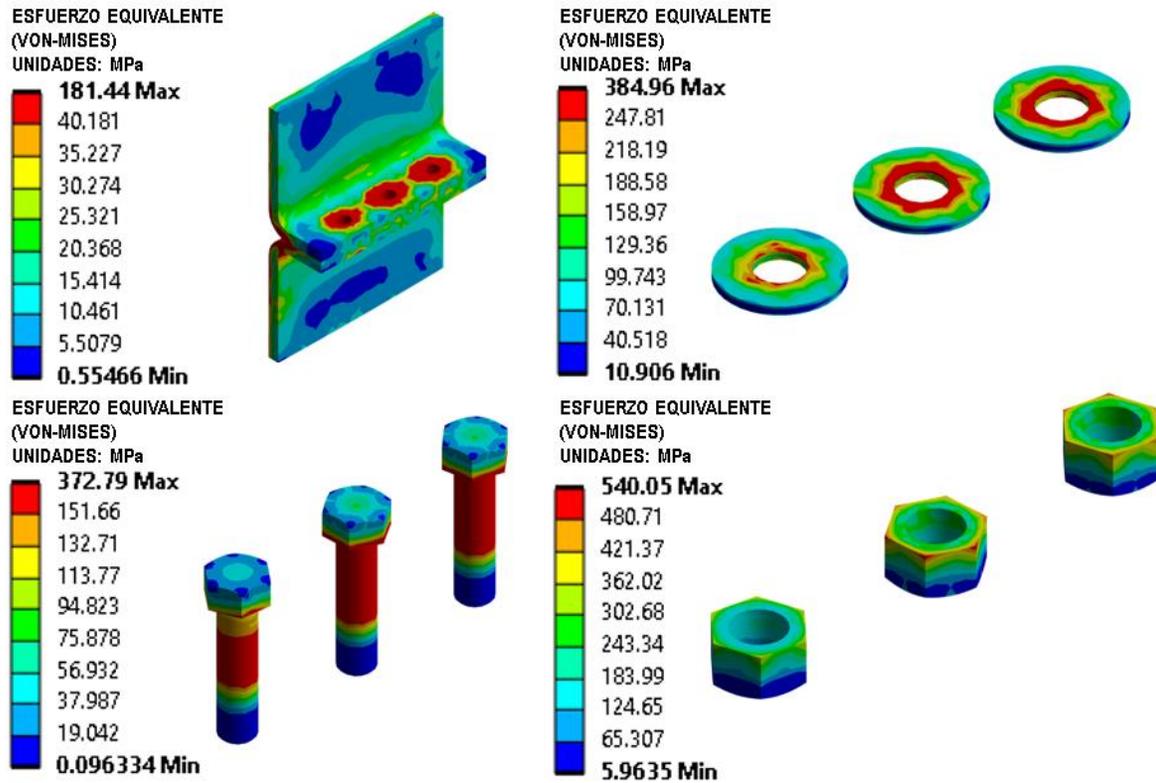


Fig. 54 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 1 de la zona superior del Silo 1 | Anillo 6 y 7

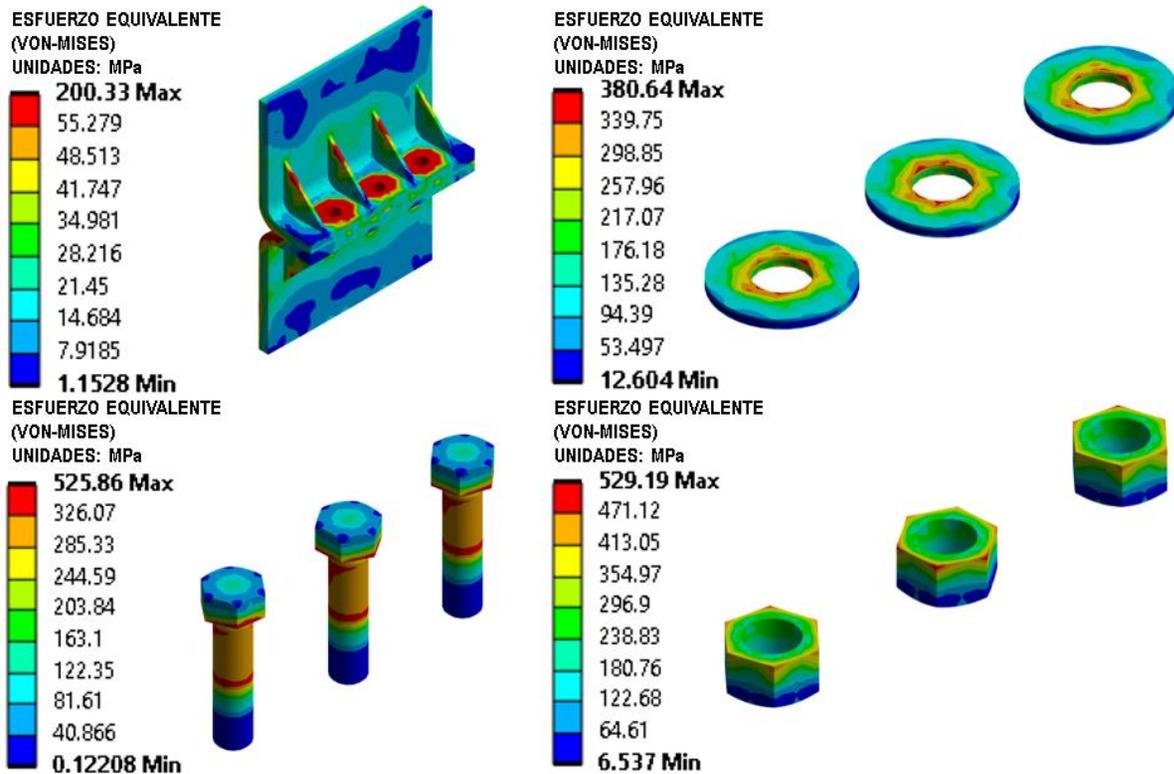


Fig. 55 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 2 de la zona superior del Silo 1 | Anillo 6 y 7

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

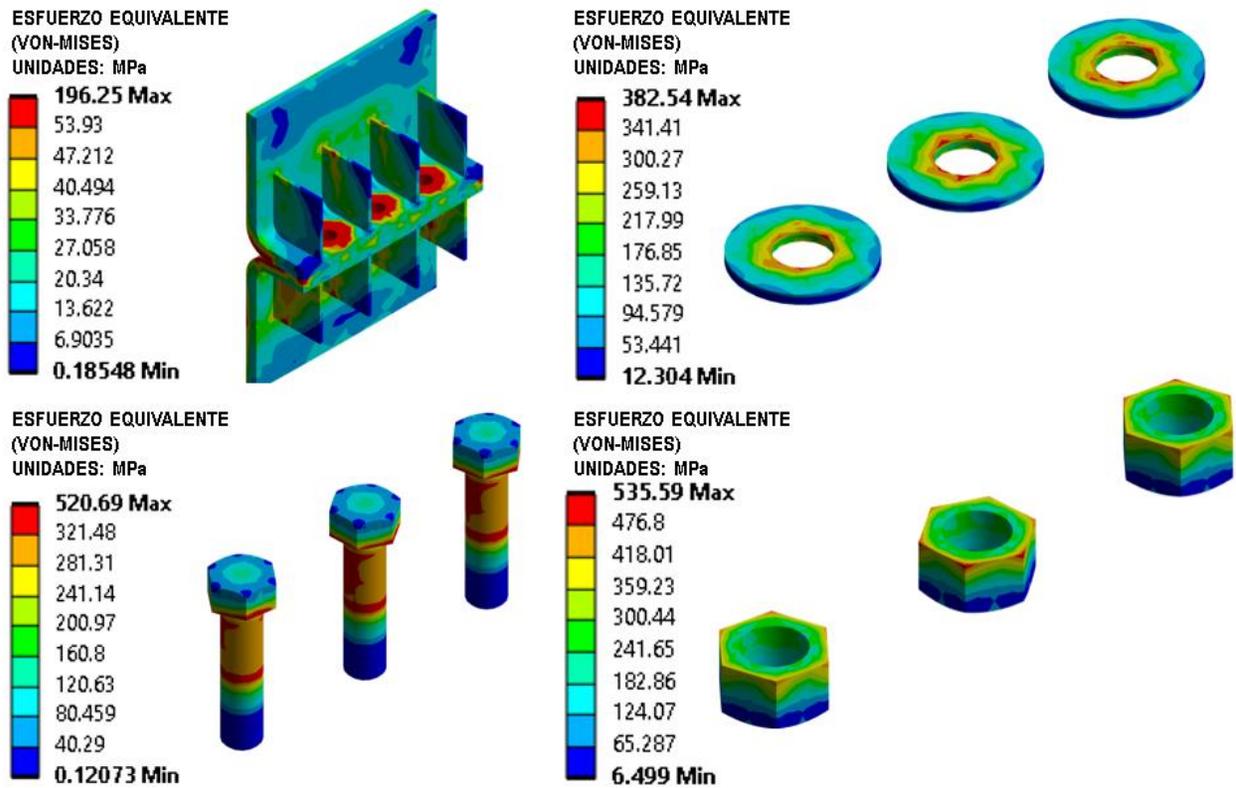


Fig. 56 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 3 de la zona superior del Silo 1 | Anillo 6 y 7

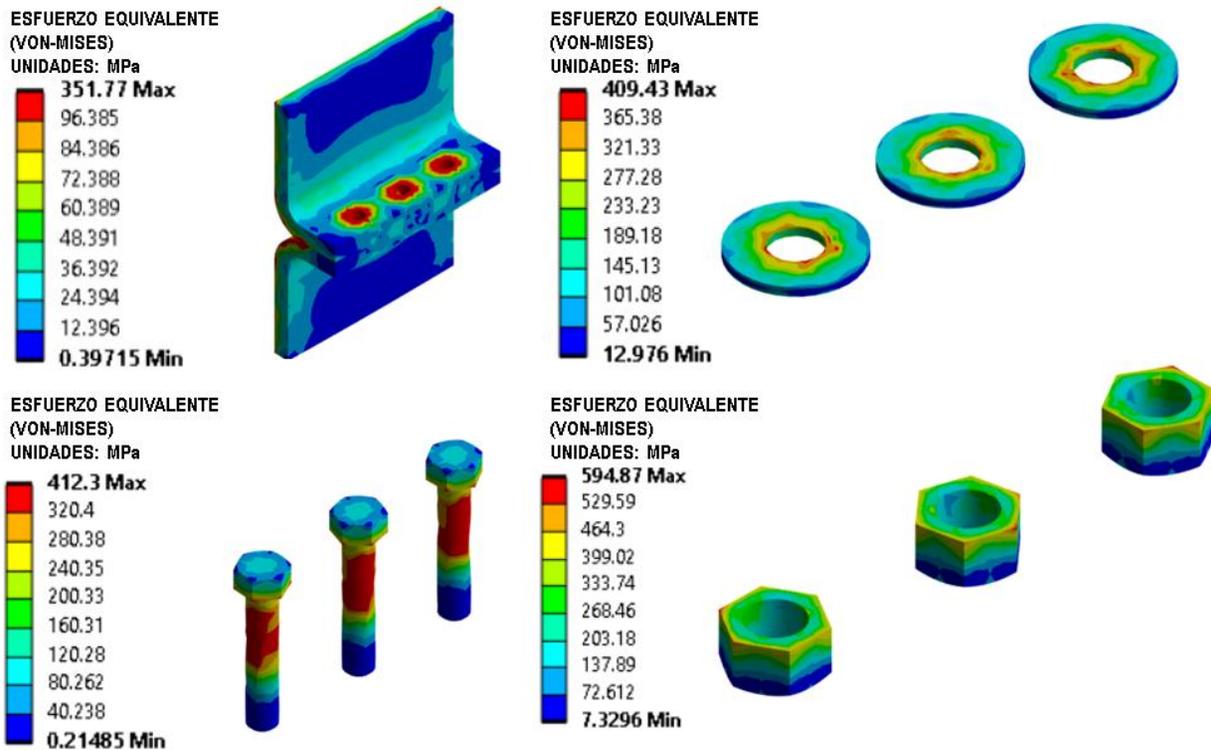


Fig. 57 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 1 de la zona media del Silo 1 | Anillo 4 y 5

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

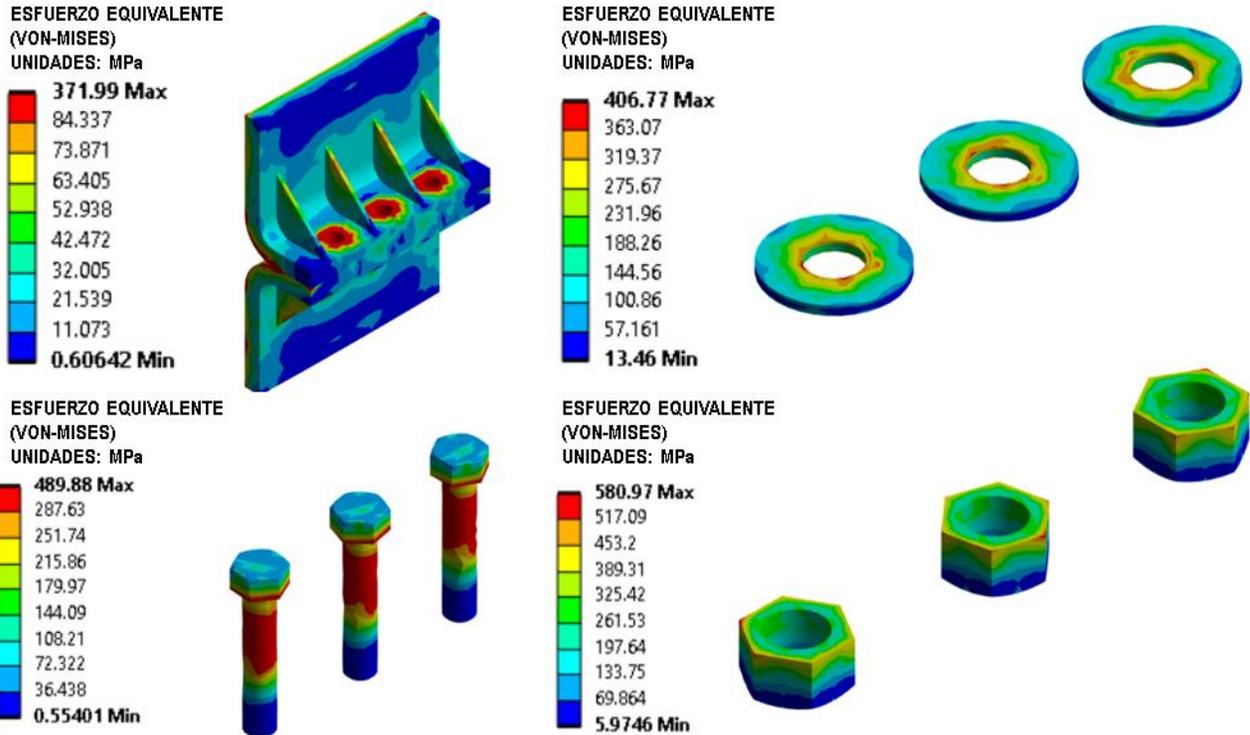


Fig. 58 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 2 de la zona media del Silo 1 | Anillo 4 y 5

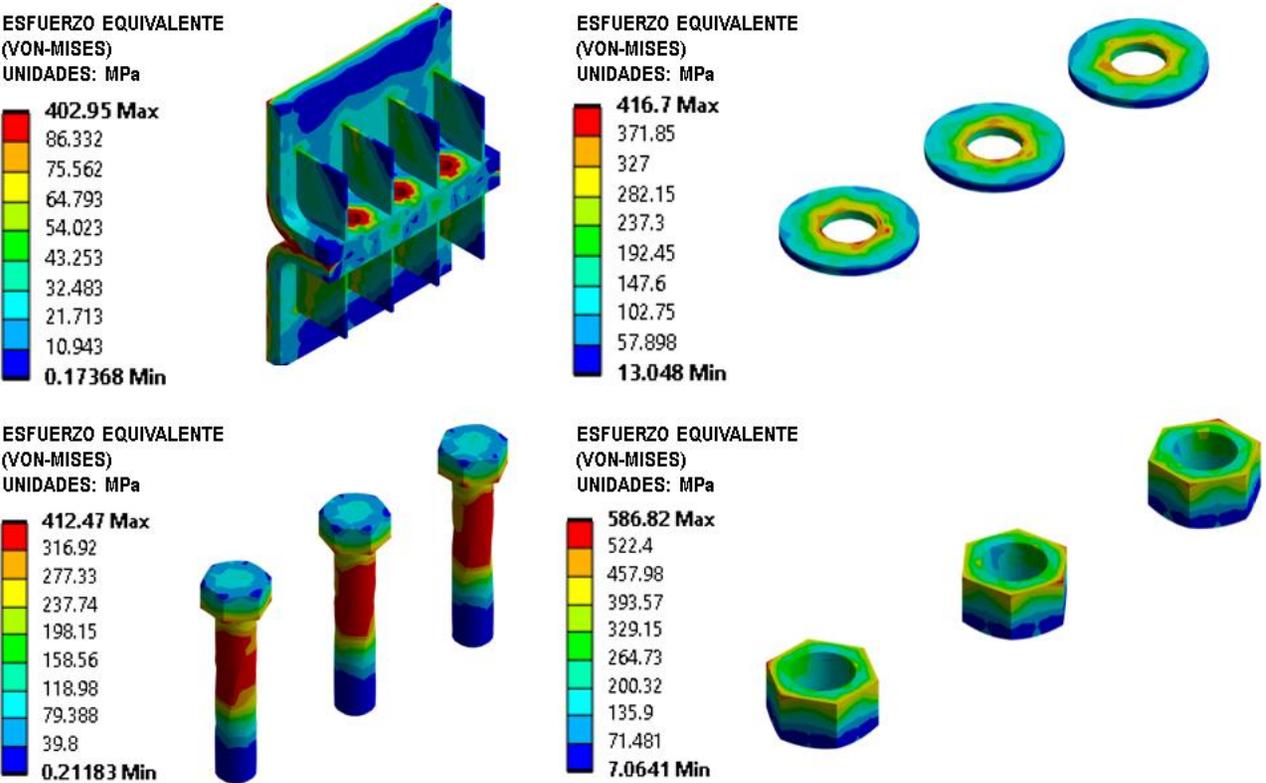


Fig. 59 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 3 de la zona media del Silo 1 | Anillo 4 y 5

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

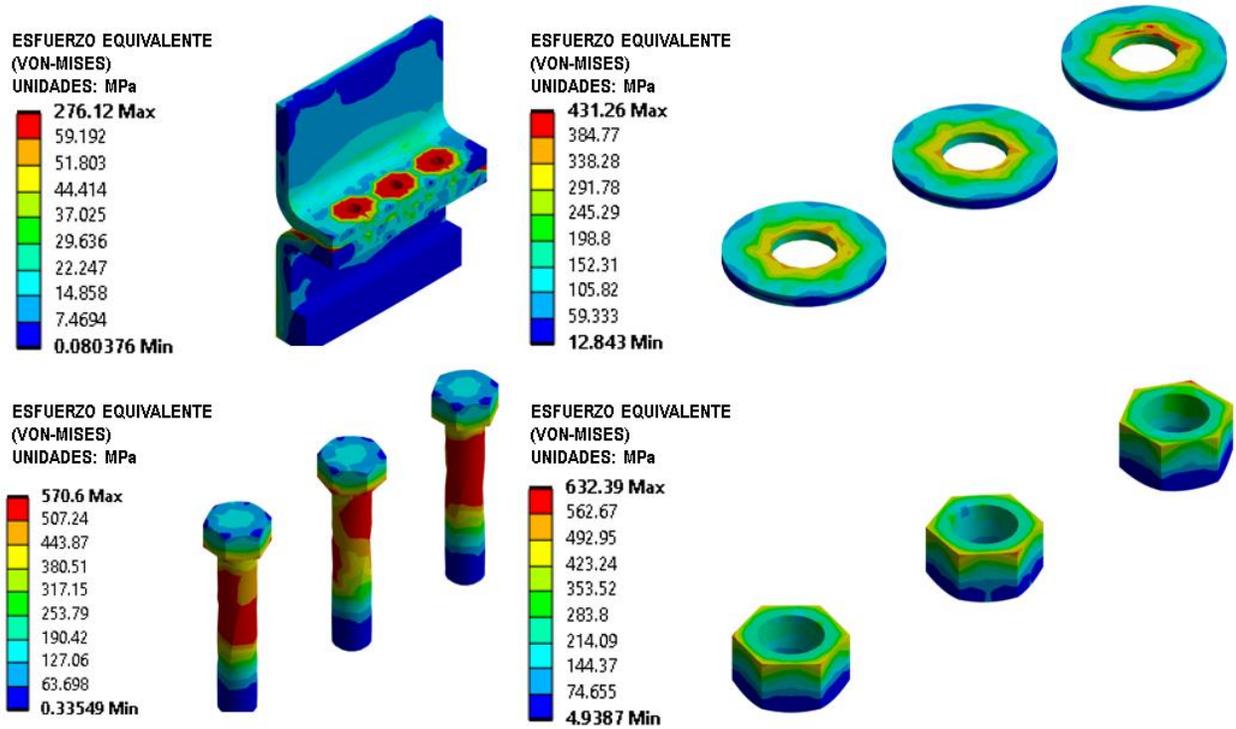


Fig. 60 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 1 de la zona inferior del Silo 1 | Anillo 2 y 3

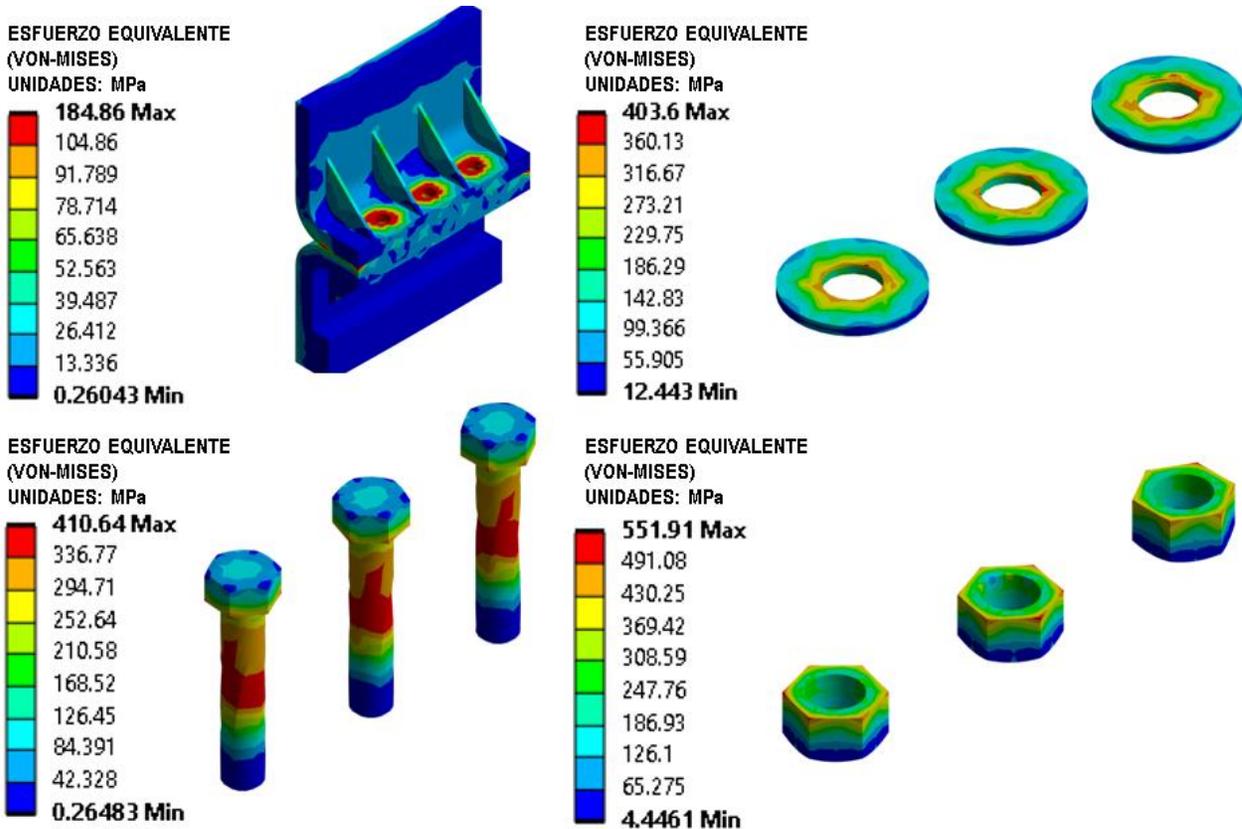


Fig. 61 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 2 de la zona inferior del Silo 1 | Anillo 2 y 3

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

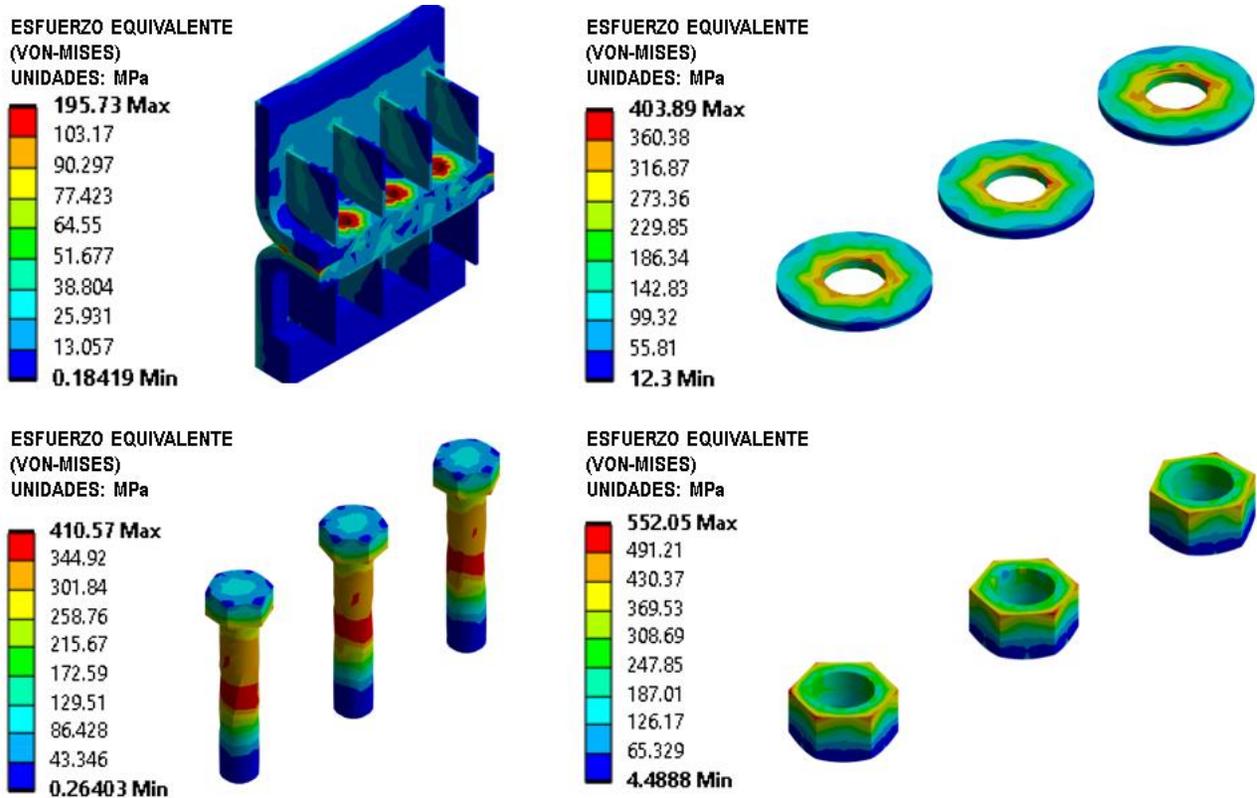


Fig. 62 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 3 de la zona inferior del Silo 1 | Anillo 2 y 3

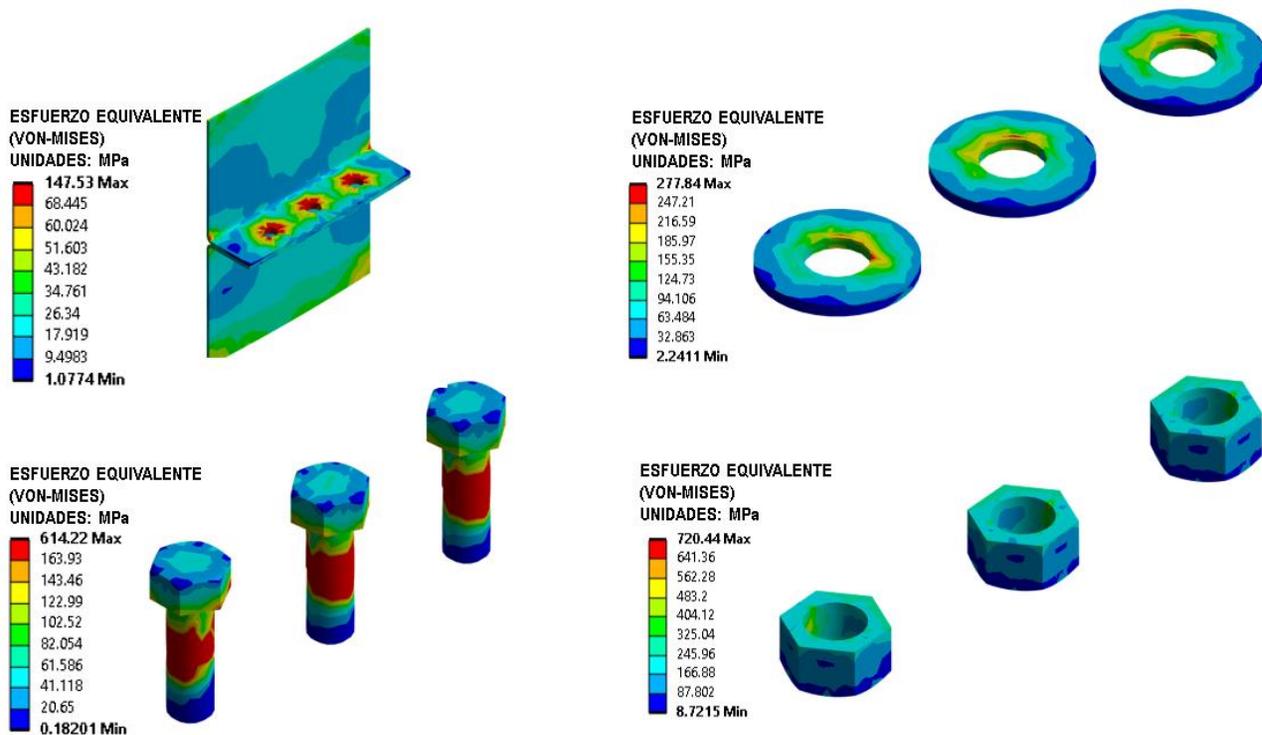


Fig. 63 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 1 de la zona superior del Silo 2 | Anillo 4 y 5

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

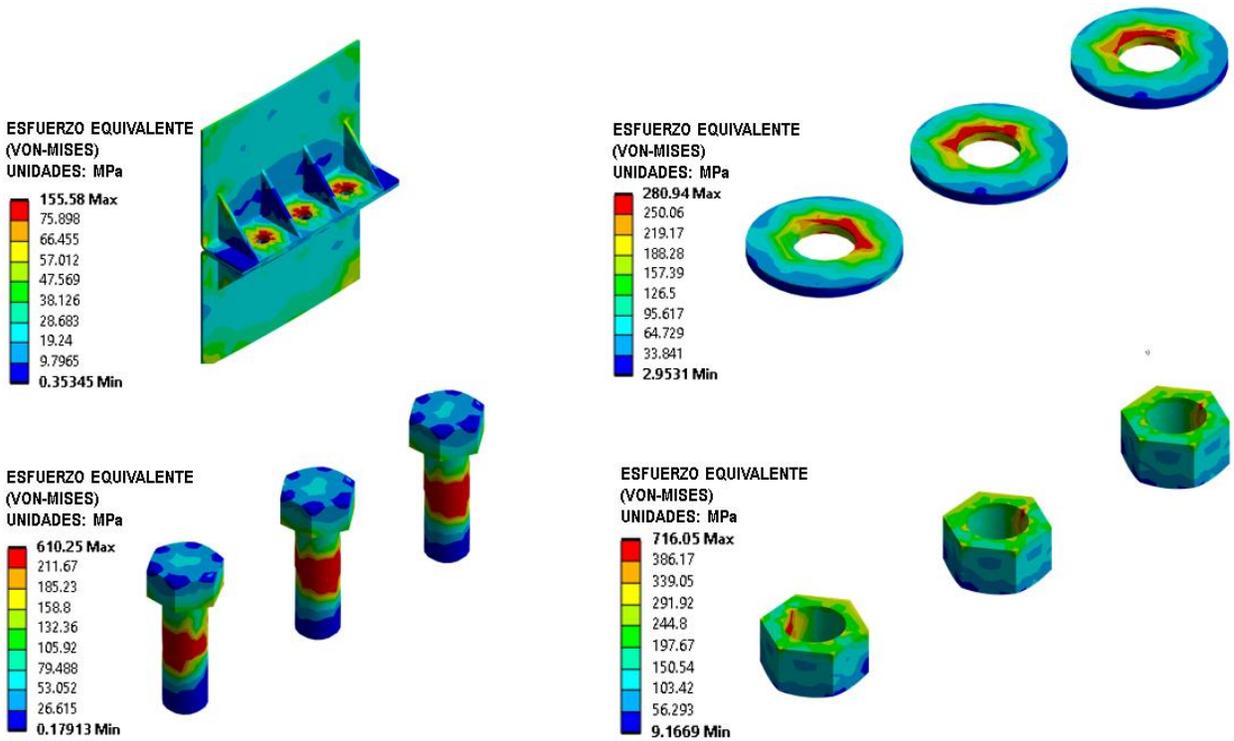


Fig. 64 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 2 de la zona superior del Silo 2 | Anillo 4 y 5

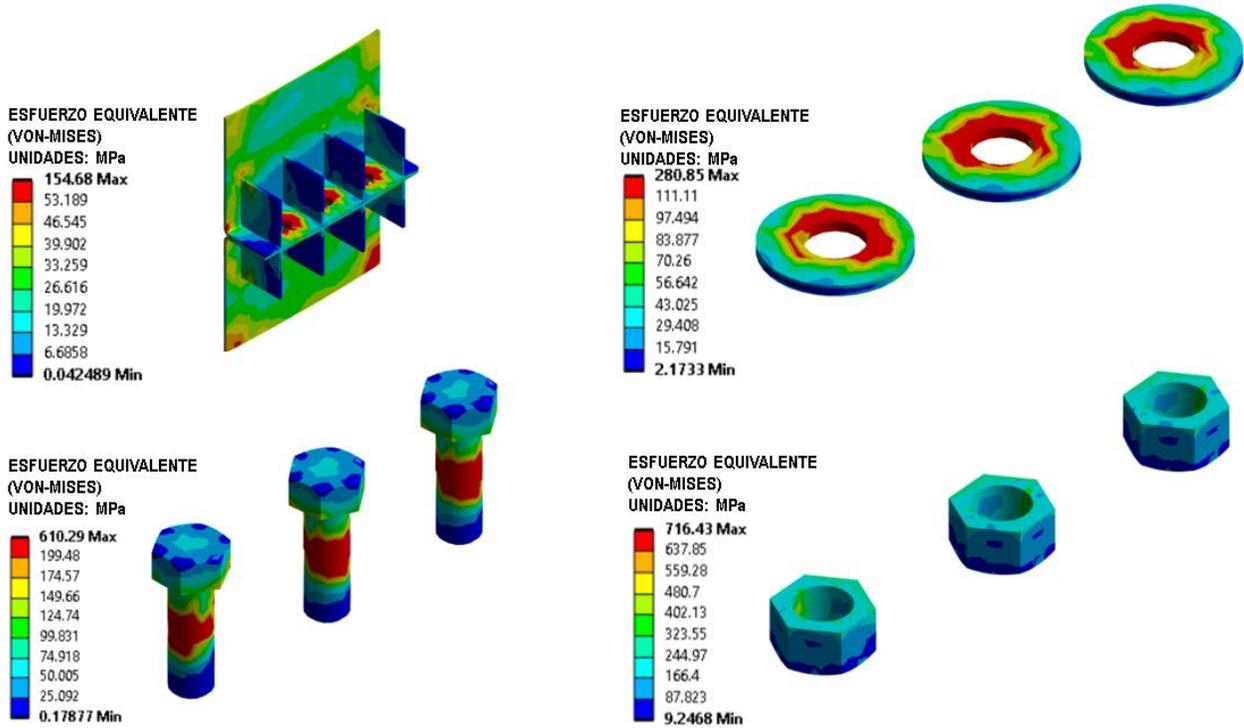


Fig. 65 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 3 de la zona superior del Silo 2 | Anillo 4 y 5

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

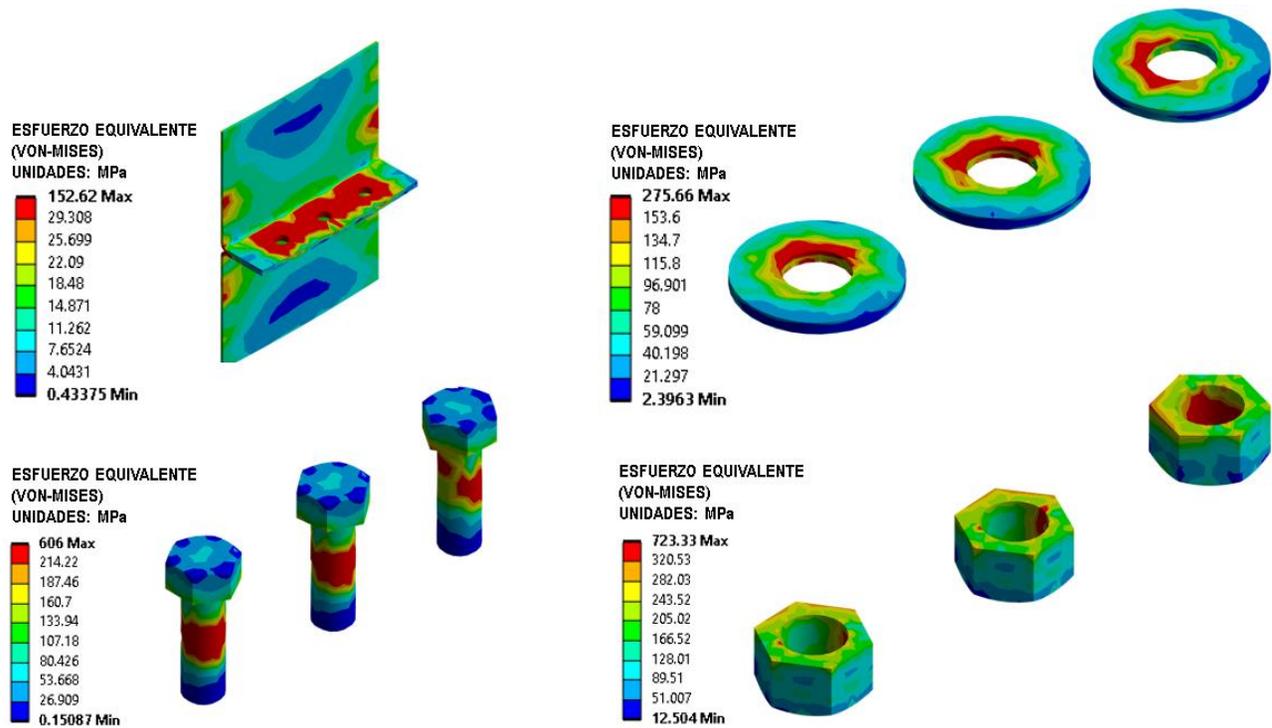


Fig. 66 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 1 de la zona inferior del Silo 2 | Anillo 3 y 4

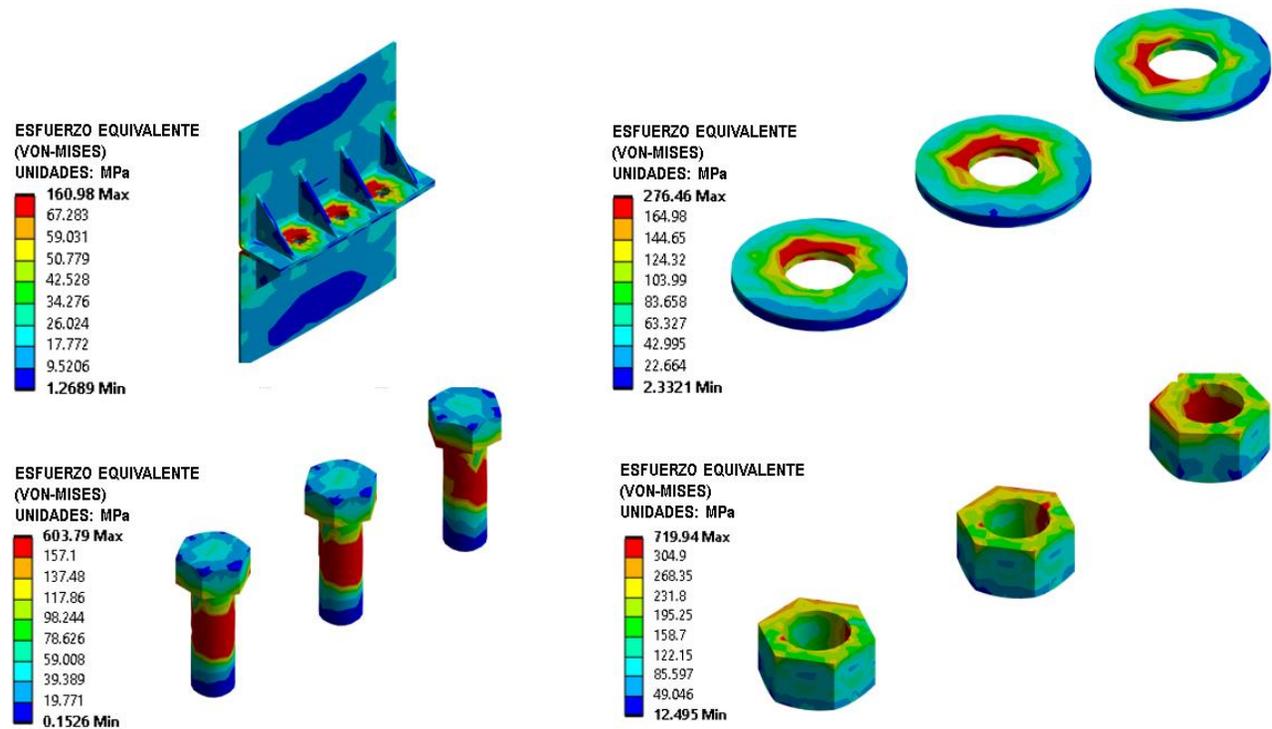


Fig. 67 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 2 de la zona inferior del Silo 2 | Anillo 3 y 4

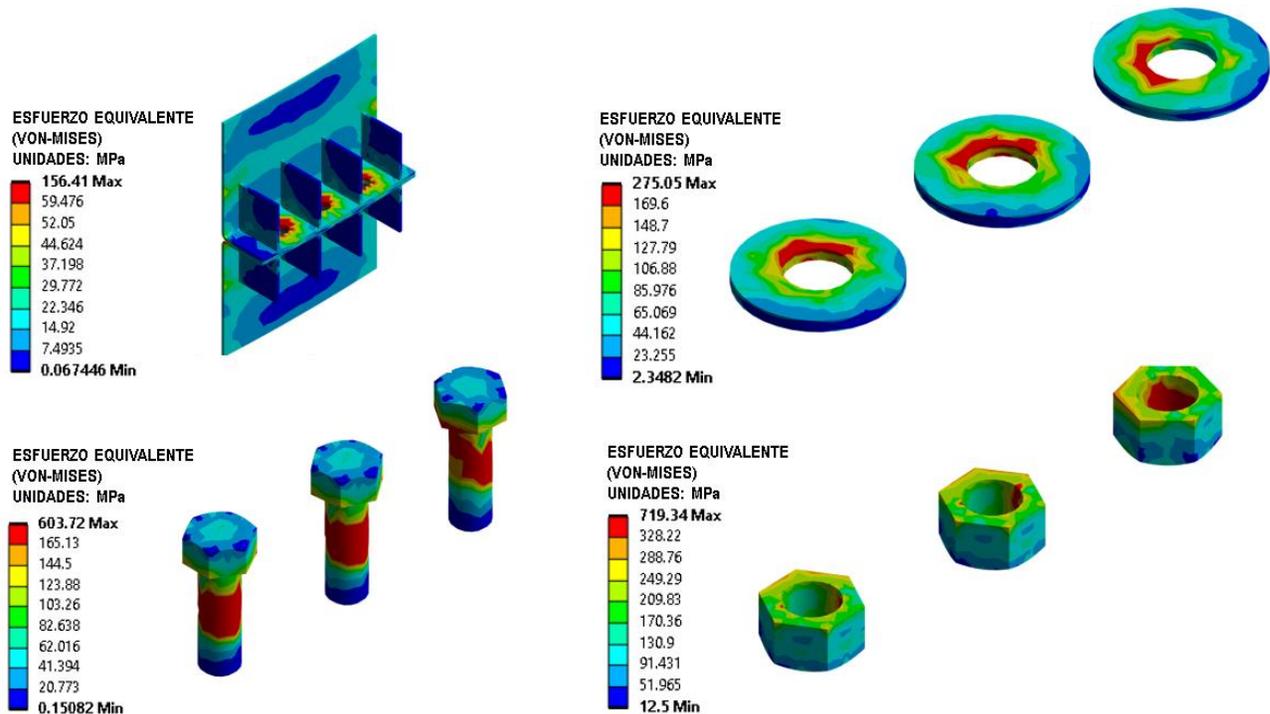


Fig. 68 Esfuerzos obtenidos en sub modelo opción 3 de la zona inferior del Silo 2 | Anillo 3 y 4

3.2.5 Estado de contacto entre placas de sub modelos

Conociendo los esfuerzos máximos de las uniones atornilladas en general y de cada uno de sus componentes, se analizaron cada uno de los sub modelos para conocer el estado de contacto entre las placas. El estado de contacto de las propuestas de uniones atornilladas del Silo 1 se pueden ver en la Figura 69 y en la Figura 70 se muestra la presión de contacto de cada unión atornillada, las del Silo 2 se muestran en la Figura 71 y en la Figura 72 las presiones de contacto.

En el Silo 1, al ser un silo de alta capacidad el uso de cartabones no representa un cambio representativo para mejorar el estado de contacto en la zona superior e inferior, pero en la zona media el uso de cartabones triangulares y cuadras hace que haya menos zona de contacto, por lo que se puede decidir el poder descartar el uso de cartelas en usos de alta capacidad. Por otro lado, en el Silo 2 al ser de menor capacidad se puede visualizar que el uso de los cartabones no representa ningún cambio representativo en la zona superior e inferior, por lo que de igual manera se pueden descartar el uso de cartabones en este silo.

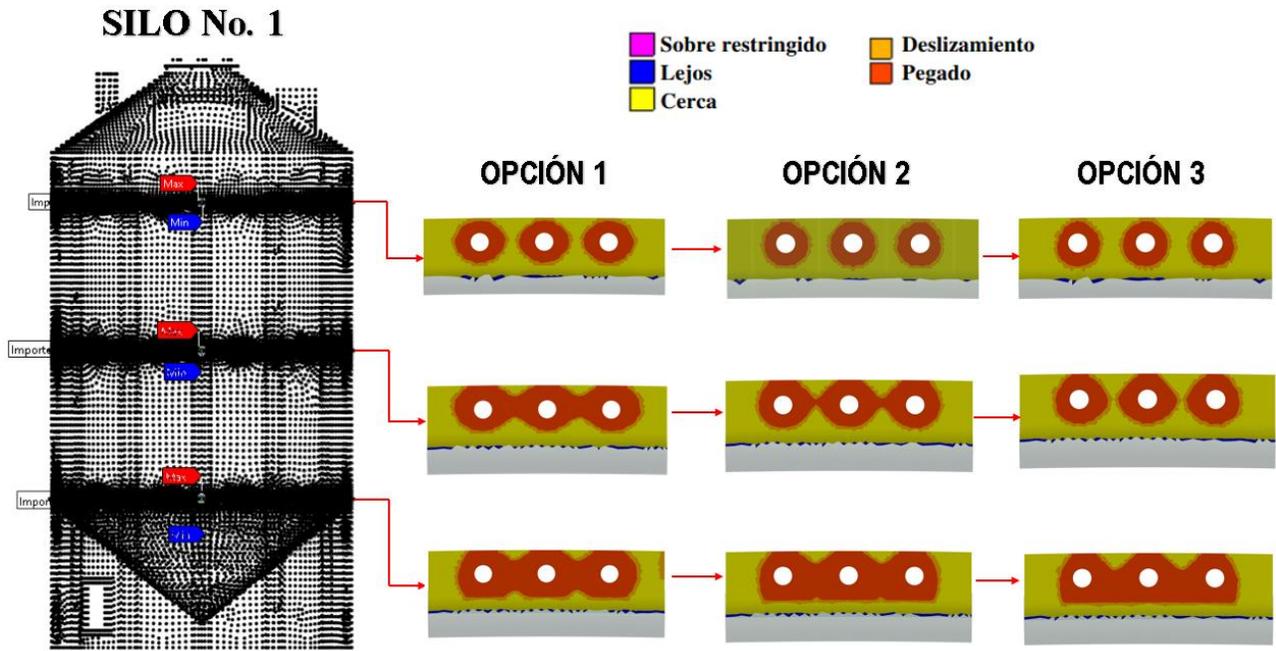


Fig. 69 Estado de contacto de sub modelos de Silo 1

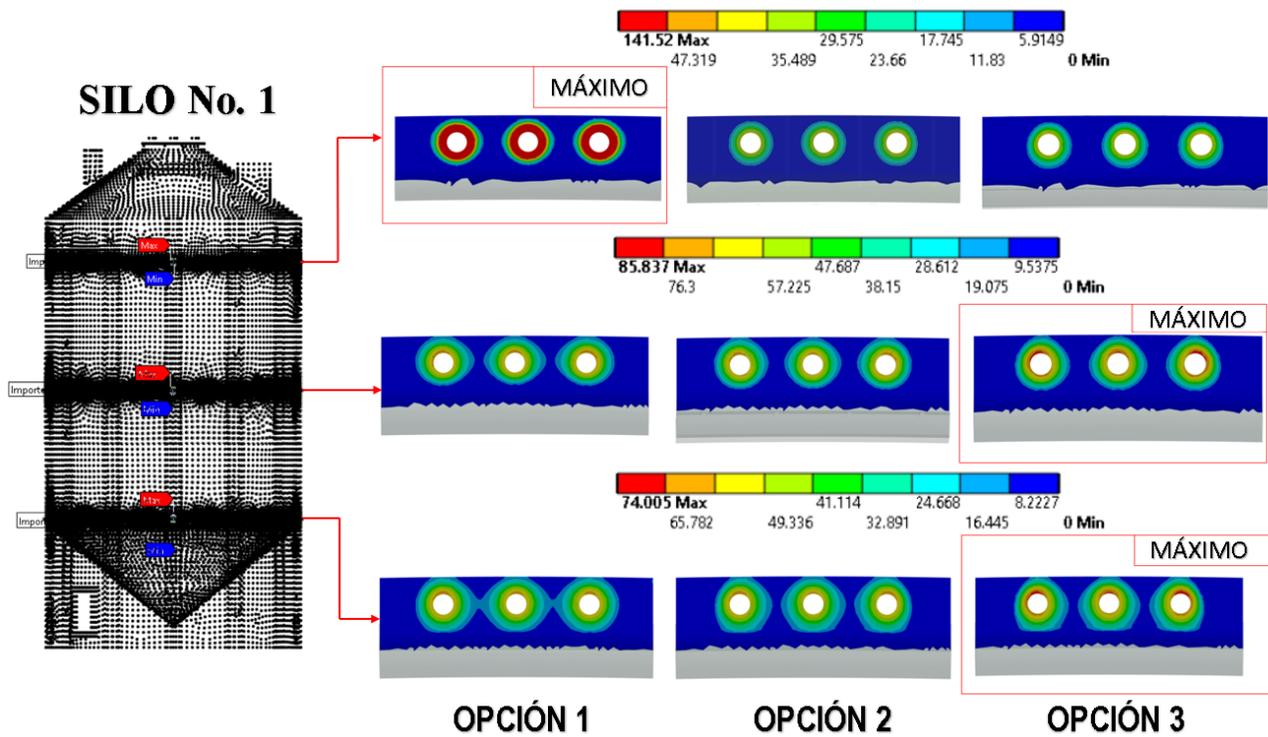


Fig. 70 Presión de contacto de sub modelos de Silo 1

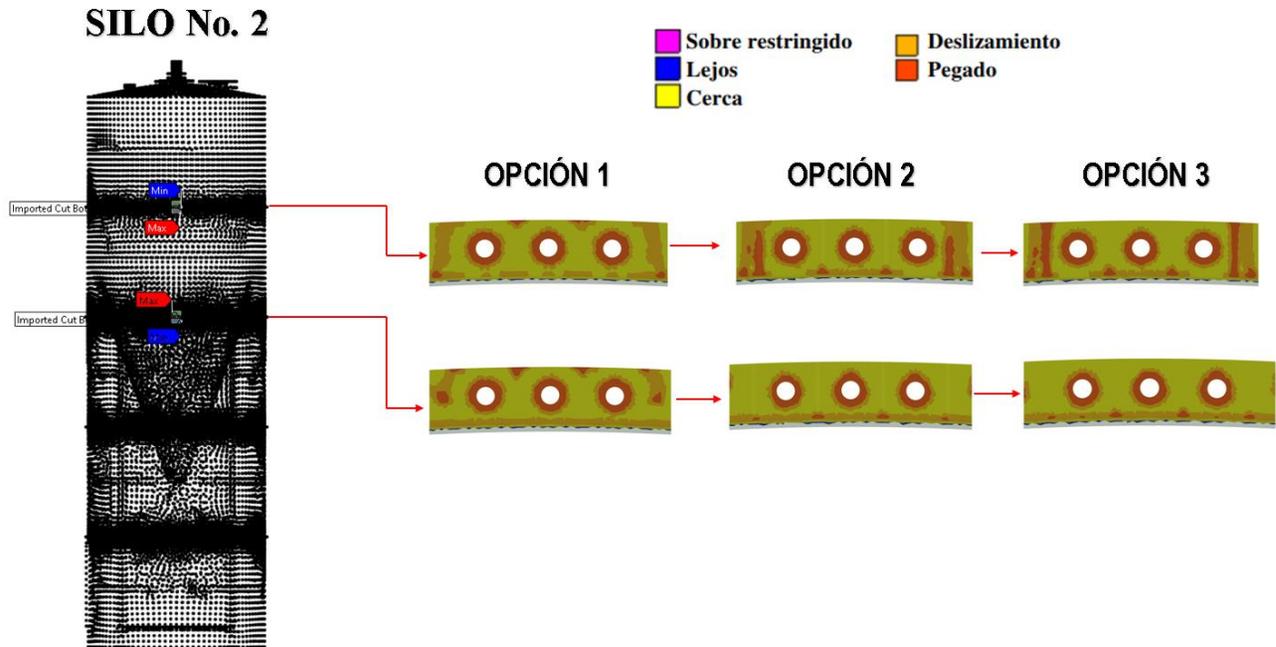


Fig. 71 Estado de contacto de sub modelos de Silo 2

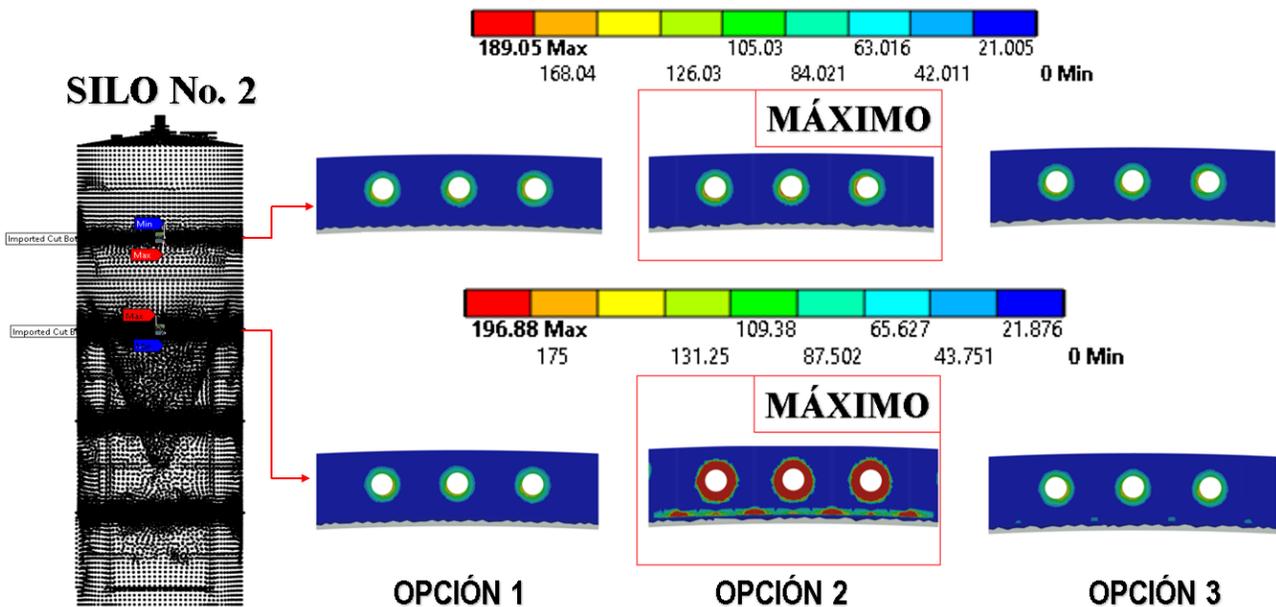


Fig. 72 Presión de contacto de sub modelos de Silo 2

En la tabla XIII y XIV se muestran los resultados enlistados y comparados entre las 3 zonas estudiadas del Silo 1 y el Silo 2 con sus 3 opciones de uniones atornilladas, de color rojo se denotan las presiones máximas que se presentaron y de color azul el mayor aumento de presión de cada opción atornillada en cada una de las zonas estudiadas de cada silo. En la parte superior del Silo 1 la opción 1 de unión atornillada fue la que obtuvo la mayor presión, pero la unión atornillada que tuvo el mayor aumento

Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad

de presión durante el proceso fue la opción 3. En la zona media e inferior la opción 3 fue la que tuvo la mayor presión y de igual manera el mayor aumento de presión.

Tabla XIII

Presiones resultantes de silo 1

ZONA	PRESIÓN	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
SUPERIOR	INICIAL (MPa)	146.16	115.63	113.72
	FINAL (MPa)	147.87	122.82	123
	AUMENTO DE PRESIÓN (MPa)	+ 1.71	+ 7.19	+ 9.28
MEDIA	INICIAL (MPa)	77.01	76.14	78.64
	FINAL (MPa)	79.96	81.14	85.83
	AUMENTO DE PRESIÓN (MPa)	+ 2.95	+ 5	+ 7.19
INFERIOR	INICIAL (MPa)	69.34	69.14	69.55
	FINAL (MPa)	71.24	72.51	74.89
	AUMENTO DE PRESIÓN (MPa)	+ 1.9	+ 3.37	+ 5.34

En las zona superior e inferior del Silo 2 la opción número 2 fue la que tuvo la mayor presión y de igual manera obtuvo el mayor aumento esta.

Tabla XIV

Presiones resultantes de silo 2

ZONA	PRESIÓN	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
SUPERIOR	INICIAL (MPa)	188.32	188.29	188.41
	FINAL (MPa)	188.70	189.05	188.98
	AUMENTO DE PRESIÓN (MPa)	+ 0.38	+ 0.76	+ 0.57
INFERIOR	INICIAL (MPa)	189.56	191.98	188.98
	FINAL (MPa)	193.72	196.88	192.61
	AUMENTO DE PRESIÓN (MPa)	+ 4.16	+ 4.90	+ 3.63

3.2.6 Costo total de los Silos 1 y 2

Se calcularon los pesos totales de ambos silos y el costo total en sus 3 propuestas, considerando la fecha de elaboración de este proyecto (JUNIO 2023) el costo por Kg del acero ASTM A36 se encuentra en \$29 MXN, teniendo en cuenta esta información en las tablas XV y XVI se desglosa el peso y el costo total de cada uno de los elementos que conforman ambos silos.

Tabla XV

Peso y costo de componentes individuales del Silo 1

COMPONENTE	ESPESOR (mm)	Masa ASTM A36(Kg/m ²)	Área total componente (m ²)	Masa total componente (kg)	Costo (MXN)	Costo (US)
TAPA	3.18	24.92	104.04	2,590	\$ 75,187.63	\$ 4,296.44
REF SUPERIORES	25.40	199.39	1386.96	276,550	\$ 8,019,832.68	\$ 458,276.15
ROLO 7	11.11	87.23	47.83	4,170	\$ 120,994.12	\$ 6,913.95
ROLO 6	11.11	87.23	70.81	6,180	\$ 179,125.93	\$ 10,235.77
ROLO 5	15.88	124.62	70.81	8,820	\$ 255,905.92	\$ 14,623.20
ROLO 4	15.88	124.62	70.81	8,820	\$ 255,905.92	\$ 14,623.20
ROLO 3	15.88	124.62	70.81	8,820	\$ 255,905.92	\$ 14,623.20
ROLO 2	15.88	124.62	70.81	8,820	\$ 255,905.92	\$ 14,623.20
ROLO 1	19.05	149.54	70.81	10,590	\$ 307,078.89	\$ 17,547.37
CONO	44.45	348.93	88.11	30,740	\$ 891,582.45	\$ 50,947.57
CINTURON	38.10	299.09	12.18	3,640	\$ 105,644.57	\$ 6,036.83
REF INFERIORES	25.40	199.39	52.92	10,550	\$ 305,999.85	\$ 17,485.71
PUERTA	6.35	49.85	2.41	120	\$ 3,484.02	\$ 199.09
CARTELAS TRIANGULARES	3.18	24.92	10.50	260	\$ 7,588.14	\$ 433.61
CARTELAS CUADRADAS	3.18	24.92	20.19	500	\$ 14,590.91	\$ 833.77
MASA TOTAL DEL SILO				381,200		

Tabla XVI

Peso y costo de componentes individuales del Silo 2

COMPONENTE	ESPESOR (mm)	Masa ASTM A36(Kg/m ²)	Área total componente (m ²)	Masa total componente (kg)	Costo (MXN)	Costo (US)
TAPA	3.18	24.92	13.67	340	\$ 9,879.04	\$ 564.52
ROLO 5	3.18	24.92	28.29	700	\$ 20,444.62	\$ 1,168.26
ROLO 4	3.18	24.92	28.29	700	\$ 20,444.62	\$ 1,168.26
ROLO 3	3.18	24.92	28.29	700	\$ 20,444.62	\$ 1,168.26
ROLO 2	4.76	37.39	28.29	1,060	\$ 30,675.13	\$ 1,752.86
ROLO 1	6.35	49.85	28.29	1,410	\$ 40,897.44	\$ 2,337.00
CONO	6.35	49.85	32.99	1,640	\$ 47,691.99	\$ 2,725.26
COLUMNAS	12.70	99.70	13.79	1,370	\$ 39,871.03	\$ 2,278.34
PLACA BASE SUP	25.40	199.39	0.25	50	\$ 1,445.58	\$ 82.60
PLACA BASE INF	38.10	299.09	0.61	180	\$ 5,290.90	\$ 302.34
CELDA DE PESAJE	25.40	199.39	0.36	70	\$ 2,081.63	\$ 118.95
CRUCETA BASE	4.76	37.39	3.37	130	\$ 3,654.12	\$ 208.81
LARGUEROS INFERIORES	4.76	37.39	4.12	150	\$ 4,467.36	\$ 255.28
MARCO PUERTA	4.76	37.39	0.75	30	\$ 813.23	\$ 46.47
CARTELAS TRIANGULARES	3.18	24.92	2.27	60	\$ 1,640.48	\$ 93.74
CARTELAS CUADRADAS	3.18	24.92	4.69	120	\$ 3,389.37	\$ 193.68
MASA TOTAL DEL SILO				7,710		

Tabla XVII

Costo total del Silo 1 en sus tres propuestas de diseño

COSTO DE SILO 1 EN SUS TRES OPCIONES DE UNIONES ATORNILLADAS

MONEDA	COSTO DEL SILO VERSIÓN No. 1	COSTO DEL SILO VERSIÓN No. 2 (CARTELA TRIANGULAR)	COSTO DEL SILO VERSIÓN No. 3 (CARTELA CUADRADA)
MXN	\$ 11,032,553.82	\$ 11,040,141.96	\$ 11,047,144.73
US	\$ 630,431.65	\$ 630,865.25	\$ 631,265.41

Tabla XVIII

Costo total del Silo 2 en sus tres propuestas de diseño

COSTO DE SILO 2 EN SUS TRES OPCIONES DE UNIONES ATORNILLADAS

MONEDA	COSTO DEL SILO VERSIÓN No. 1	COSTO DEL SILO VERSIÓN No. 2 (CARTELA TRIANGULAR)	COSTO DEL SILO VERSIÓN No. 3 (CARTELA CUADRADA)
MXN	\$ 248,101.30	\$ 249,741.79	\$ 251,490.67
US	\$ 14,177.22	\$ 14,270.96	\$ 14,370.90

Para la manufactura del silo 1, fueron considerados 7,200 cartelas en sus 6 uniones perimetrales entre anillos, en la opción 2 (cartelas cuadradas) el costo extra fue de \$7,588.14 MXN (\$433.61 US) y en la opción 3 (cartelas cuadradas) el costo adicional fue de \$14,590.91 MXN (\$833.77 US). Por otra parte, para la manufactura del silo 2, fueron considerados 2,000 cartelas en sus 4 uniones perimetrales entre anillos, en la opción 2 (cartelas cuadradas) el costo extra fue de \$1,640.48 MXN (\$93.74 US) y en la opción 3 (cartelas cuadradas) el costo adicional fue de \$3,398.37 MXN (\$193.68 US).

4 Conclusiones

Se ha desarrollado una nueva metodología para la evaluación de uniones atornilladas en silos metálicos modelados con superficies 3D en SolidWorks y evaluados con elementos finitos en ANSYS. La nueva metodología da como resultado un ahorro en recurso computacional, ya que el modelado con superficies permite utilizar un menor número de elementos y nodos, adicionalmente, el uso de sub modelos permitió evaluar zonas específicas del silo y poder realizar modificaciones al modelo principal generando opciones y finalmente conociendo los esfuerzos y deformaciones de cada uno de sus componentes.

Inicialmente fueron evaluados dos silos de 800 m^3 (Silo 1) y otro de 51.4 m^3 (Silo 2) para obtener sus esfuerzos y deformaciones durante la operación de trabajo de cada uno, posteriormente fueron evaluados con la ayuda de sub modelos, 3 opciones de unión atornillada en 3 puntos del Silo 1 y 2 puntos del Silo 2.

El uso de cartelas en las uniones atornilladas del silo 1 ayudaron a reducir el esfuerzo total resultante en un promedio del 2% en sus tres zonas de análisis; en el Silo 2 la reducción de esfuerzos tuvo un promedio alrededor del 1%.

Respecto a la presión de contacto de las 3 clases de uniones atornilladas en el Silo 1, la opción número 3 (cartelas cuadradas) fue la que obtuvo la mayor presión de contacto y en el Silo 2, la opción número 2 (cartelas triangulares) fue la que tuvo la mayor presión de contacto durante la operación del silo.

En conclusión, el uso de cartelas cuadradas en silos de alta capacidad apoya a reducir el esfuerzo y aumentar la presión del contacto de las uniones atornilladas perimetrales, mientras que de igual forma en los silos de baja capacidad el uso de cartelas triangulares ayuda a realizar la misma función.

Finalmente, es conveniente mencionar, que el uso de cualquier cartela agregada a las uniones atornilladas perimetrales en silos provoca un ligero aumento en el costo para su manufactura, debido al uso de materia prima y tiempo para su elaboración y ensamble.

5 Referencias

- [1] J. M. Rotter, *Guide for the economic design of circular metal silos*. New York: Spon Press, 2001.
- [2] Y. Garfinkel, D. Ben-Shlomo y T. Kuperman, "Large-scale storage of grain surplus in the sixth millennium BC: the silos of Tel Tsaf", *Antiquity*, vol. 83, n. ° 320, pp. 309–325, junio de 2009. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible:
- [3] Y. Mu et al., "Optimal scheduling method for belt conveyor system in coal mine considering silo virtual energy storage", *Applied Energy*, vol. 275, p. 115368, octubre de 2020. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115368>
- [4] K. Choi, Y. Endo y T. Suzuki, "Experimental study on electrostatic charges and discharges inside storage silo during loading of polypropylene powders", *Powder Technology*, vol. 331, pp. 68–73, mayo de 2018. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.007>
- [5] C. Sprong et al., "Cumulative dietary risk assessment overarching different regulatory silos using a margin of exposure approach: A case study with three chemical silos", *Food and Chemical Toxicology*, vol. 142, p. 111416, agosto de 2020. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111416>
- [6] T. Tefera et al., "The metal silo: An effective grain storage technology for reducing post-harvest insect and pathogen losses in maize while improving smallholder farmers' food security in developing countries", *Crop Protection*, vol. 30, n. ° 3, pp. 240–245, marzo de 2011. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.11.015>
- [7] X. Li, Z. Han, Q. Lin, Z. Wu, L. Chen y Q. Zhang, "Smart cooling-aeration guided by aeration window model for paddy stored in concrete silos in a depot of Guangzhou, China", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 173, p. 105452, junio de 2020. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105452>
- [8] A. M. Mehrehteran y S. Maleki, "Seismic response and failure modes of steel silos with isotropic stepped walls: The effect of vertical component of ground motion and comparison of buckling resistances under seismic actions with those under wind or discharge loads", *Engineering Failure Analysis*, vol. 120, p. 105100, febrero de 2021. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105100>
- [9] A. M. Mehrehteran y S. Maleki, "Seismic response and failure modes of steel silos with isotropic stepped walls: The effect of vertical component of ground motion and comparison of buckling resistances under seismic actions with those under wind or discharge loads", *Engineering Failure*

Analysis, vol. 120, p. 105100, febrero de 2021. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105100>

- [10] R. M. Gandia "Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under different conditions", Biosystems Engineering, 18 pp, Julio 2021.
- [11] A. Catillo Niño, "Aspectos históricos de la construcción de silos para almacenaje de granos en Colombia", MEMORIAS, vol. 1, pp. 2–19, 2018.
- [12] J. Wiącek et al., "Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls", Biosystems Engineering, vol. 209, pp. 216–231, septiembre de 2021. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.003>
- [13] Couto, A., Ruiz, A., & Aguado, P. J. (2012). Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions - Part I: Description. Computers and Electronics in Agriculture, 85, 164e173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.04.009>
- [14] G. Tang, L. Yin, Z. Li, C. Pan y H. Lai, "Structural performance of double-wall steel insulation silo with multiple bolted joints", Journal of Constructional Steel Research, vol. 139, pp. 411–423, diciembre de 2017. Accedido el 9 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.020>
- [15] R. M. Gandia "Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under different conditions", Biosystems Engineering, 18 pp, Julio 2021.
- [16] A. J. Sadowski, J. Michael Rotter Y J. Nielsen, "A theory for pressures in cylindrical silos under concentric mixed flow", Chemical Engineering Science, vol. 223, p. 115748, septiembre de 2020. Accedido el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115748>
- [17] W. N. Bayona Carvajal, "Estimación de esfuerzos inducidos durante el llenado y vaciado de silos metálicos para almacenamiento de cemento", maestría, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias - Bolívar, 2015. Accedido el 8 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0067868.pdf>
- [18] S. Reza, M. Sayed Soleimani y M. Naser Khaled, "Damage detection and localization in loose bolted joints", Procedia Structural Integrity, Volume 37, pp. 956–963, 2022. Accedido el 2 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321622001871?via=ihub#!>

- [19] Q. S. Cao, Y. Zhao y R. Zhang, "Wind induced buckling of large circular steel silos with various slenderness", *Thin-Walled Struct.*, vol. 130, pp. 101–113, septiembre de 2018. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.05.005>
- [20] P. Hajko, J. Tejchman y M. Wójcik, "Investigations of local/global buckling of cylindrical metal silos with corrugated sheets and open-sectional column profiles", *Thin-Walled Struct.*, vol. 123, pp. 341–350, febrero de 2018. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.037>
- [21] S. Maleki y A. M. Mehrethran, "3D wind buckling analysis of long steel corrugated silos with vertical stiffeners", *Eng. Failure Anal.*, vol. 90, pp. 156–167, agosto de 2018. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.031>
- [22] A. M. Mehrethran y S. Maleki, "3D buckling assessment of cylindrical steel silos of uniform thickness under seismic action", *Thin-Walled Struct.*, vol. 131, pp. 654–667, octubre de 2018. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.040>
- [23] P. Tu, V. Vimonsatit y J. Li, "Silo quake response spectrum of iron ore train load out bin", *Adv. Powder Technol.*, vol. 29, n.º 11, pp. 2775–2784, noviembre de 2018. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.07.026>
- [24] Y. Zhang, F. Jia, Y. Zeng, Y. Han y Y. Xiao, "DEM study in the critical height of flow mechanism transition in a conical silo", *Powder Technol.*, vol. 331, pp. 98–106, mayo de 2018. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.024>
- [25] Y. Zhang, F. Jia, Y. Zeng, Y. Han y Y. Xiao, "DEM study in the critical height of flow mechanism transition in a conical silo", *Powder Technol.*, vol. 331, pp. 98–106, mayo de 2018. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.024>
- [26] Ö. Zeybek, C. Topkaya y J. Michael Rotter, "Analysis of silo supporting ring beams resting on discrete supports", *Thin-Walled Struct.*, vol. 135, pp. 285–296, febrero de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.11.001>
- [27] Q. S. Cao, Y. Zhao, L. Xing, R. Zhang y B. Y. Li, "Nonlinear buckling of cylindrical steel silos with fabrication cracks", *Powder Technol.*, vol. 353, pp. 219–229, julio de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.080>

- [28] S. Maleki y A. M. Mehrehteran, "3D wind buckling analysis of steel silos with stepped walls", *Thin-Walled Struct.*, vol. 142, pp. 236–261, septiembre de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.05.007>
- [29] C. Bywalski y M. Kamiński, "A case study of the collapse of the over-chamber reinforced concrete ceiling of a meal silo", *Eng. Struct.*, vol. 192, pp. 103–112, agosto de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.100>
- [30] P. Iwicki, K. Rejowski y J. Tejchman, "Determination of buckling strength of silos composed of corrugated walls and thin-walled columns using simplified wall segment models", *Thin-Walled Struct.*, vol. 135, pp. 414–436, febrero de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.11.018>
- [31] J. M. Rotter, R. J. Goodey y C. J. Brown, "Towards design rules for rectangular silo filling pressures", *Eng. Struct.*, vol. 198, p. 109547, noviembre de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109547>
- [32] L. E. Jayachandran, B. Nitin y P. S. Rao, "Simulation of the stress regime during grain filling in bamboo reinforced concrete silo", *J. Stored Products Res.*, vol. 83, pp. 123–129, septiembre de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.06.011>
- [33] M. Zaki y M. S. Siraj, "Study of a flat-bottomed cylindrical silo with different orifice shapes", *Powder Technol.*, vol. 354, pp. 641–652, septiembre de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.06.041>
- [34] M. Zaki y M. S. Siraj, "Study of a flat-bottomed cylindrical silo with different orifice shapes", *Powder Technol.*, vol. 354, pp. 641–652, septiembre de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.06.041>
- [35] M. Zaki y M. S. Siraj, "Study of a flat-bottomed cylindrical silo with different orifice shapes", *Powder Technol.*, vol. 354, pp. 641–652, septiembre de 2019. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.06.041>
- [36] Q. Chen, R. Li, W. Z. Xiu, V. Zivkovic y H. Yang, "Measurement of granular temperature and velocity profile of granular flow in silos", *Powder Technol.*, vol. 392, pp. 123–129, noviembre de 2021. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.007>
- [37] R. M. Gandia, F. C. Gomes, W. C. D. Paula y P. J. Aguado Rodriguez, "Evaluation of pressures in slender silos varying hopper angle and silo slenderness", *Powder Technol.*, vol. 394, pp. 478–495,

diciembre de 2021. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.087>

[38] L.-T. Sheng, S.-S. Hsiau y C.-Y. Wen, "Experimental investigation on air bubble dynamics during fine powder discharge in a silo", *Adv. Powder Technol.*, diciembre de 2020. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.11.021>

[39] Q. Zhou, C. Liang, J. Hu, X. Chen, D. Liu y J. Ma, "Effect of particle segregation on non-uniform electrostatic charge distribution in cylindrical silo during loading binary particles with size ratio of 2.5:1 centrally", *Powder Technol.*, vol. 378, pp. 772–784, enero de 2021. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.018>

[40] Q. Zhou et al., "Understanding influence of metal protrusion on electrostatic discharge in conical-cylindrical silo based on electric field simulation", *Adv. Powder Technol.*, vol. 32, n.º 8, pp. 2781–2790, agosto de 2021. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.05.046>

[41] G. Gao, X. Wang, J. Wu, X. Li, R. Xu y X. Zhang, "An adaptive grain-bulk aeration system for squat silos in winter: Effects on intergranular air properties and grain quality", *Smart Agricultural Technol.*, vol. 3, p. 100121, febrero de 2023. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100121>

[42] A. Grabowski, M. Nitka y J. Tejchman, "Micro-modelling of shear localization during quasi-static confined granular flow in silos using DEM", *Comput. Geotechnics*, vol. 134, p. 104108, junio de 2021. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104108>

[43] Eurocodigo 1: Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos, UNE- EN 1991-4:2006, Asociación Española de Normalización y certificación, Madrid, España, 2011. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0039040>

[44] A. P. BORESI, R. J. SCHMIDT y O. M. SIDEBOTTOM, *ADVANCED MECHANICS OF MATERIALS*, 5a ed. Canada: JOHN WILEY & SONS, INC., 1932. Accedido el 21 de abril de 2023. [En línea]. Disponible: <https://shahroodut.ac.ir/fa/download.php?id=1111170277> CITA EN EL TEXTO:[1, p. XXXX]+

[45] J. C. Arnáiz Martínez, "El Método de los Elementos Finitos en el Análisis Estructural. Publicaciones de la E.T.S.I.A (Escuela Superior de Ingenieros Aeronáuticos), 1998. CITA EN EL TEXTO: [2, p. XXXX]

[46] "Realización de submodelado en Ansys Mechanical — Lección 6". Cursos de Innovación Ansys. <https://courses.ansys.com/index.php/courses/numerically-accurate-results/lessons/performing-submodeling-in-ansys-mechanical-lesson-6/> (accedido el 21 de abril de 2023).

[47] ANSYS, Inc. Introduction to ANSYS Mechanical, Appendix B Submodeling Technique, 2015.

[48] "MEF Método de elementos finitos - CAD CAE INGENIERÍA". CAD CAE INGENIERÍA. <https://cad-cae.com/mef-metodo-de-elementos-finitos/> (accedido el 21 de marzo de 2023).

[49] E. Napoles Padron, R. González-Carbonell y E. Olivares Diaz, Una introducción al Análisis por Elementos Finitos: Aplicaciones y ejemplos. Editorial Universitaria, 2015. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/283151622_Una_introduccion_al_Analisis_por_Elementos_Finitos_aplicaciones_y_ejemplos

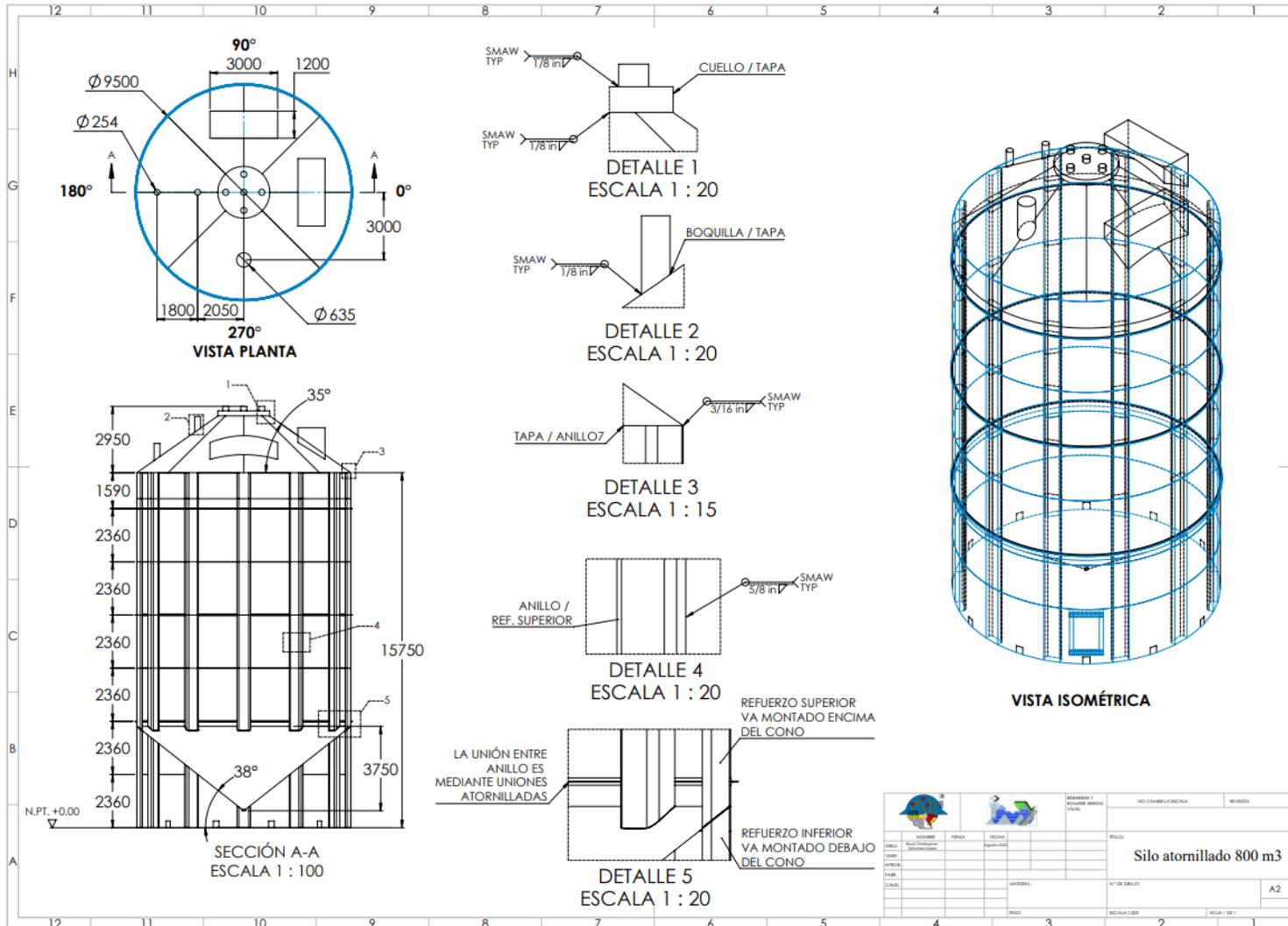
[50] C. Giordani y D. Leone, "Cementos", en Catedra Ingenieria Civil, Rosario, Argentina. Departamento de Ingenieria Civil, pp. 1–10. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: [https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Cementos\(1\).pdf](https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Cementos(1).pdf)

[51] D. F. O. PERALVO, "DISEÑO DE UN SILO DE FONDO CÓNICO PARA ALMACENAR MAÍZ CON CAPACIDAD DE 25 TONELADAS CON CARGA Y DESCARGA", Tesis de grado, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, Quito, 2016. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13116/1/UPS-KT01282.pdf>

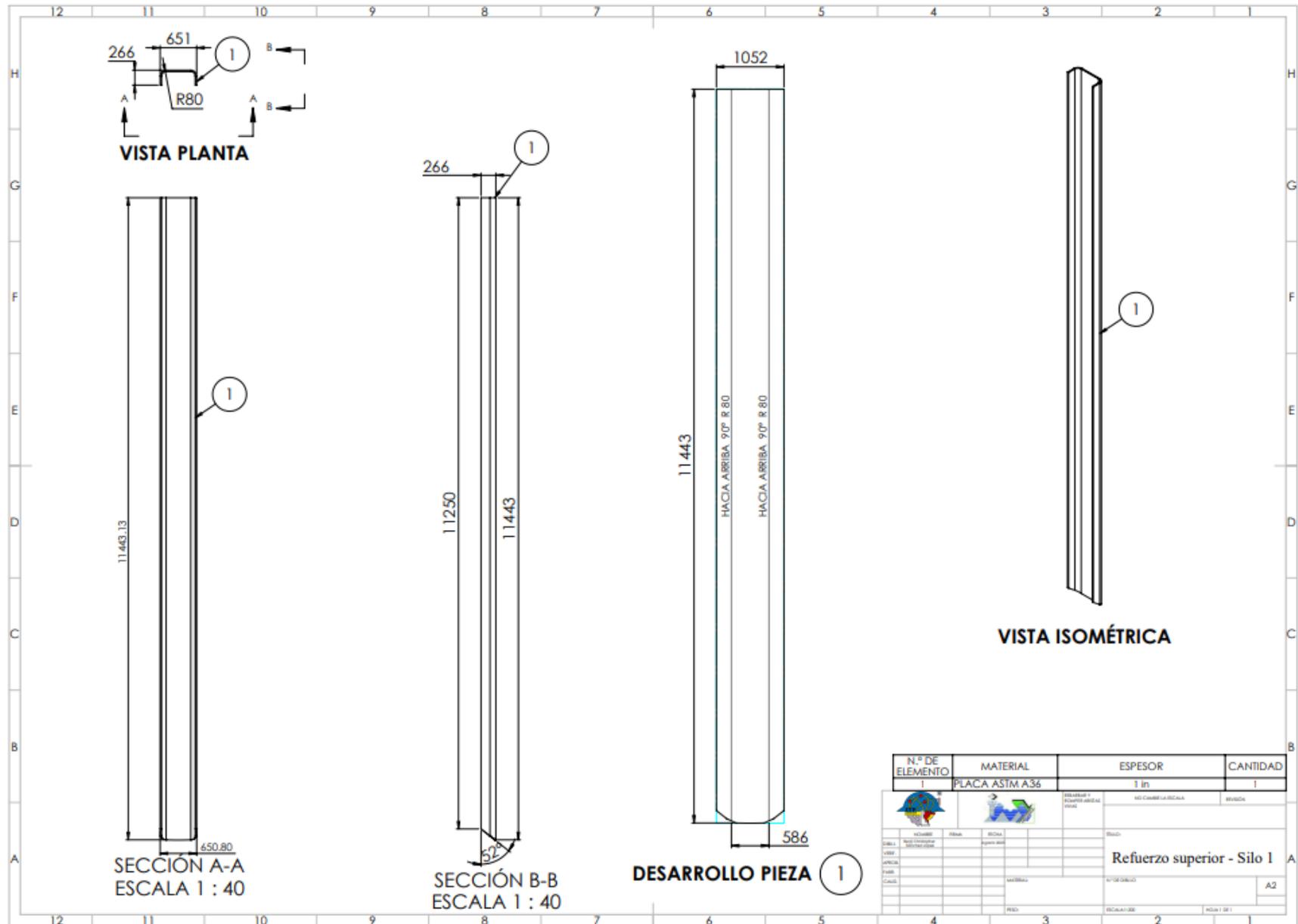
[52] D. F. O. PERALVO, "DISEÑO DE UN SILO DE FONDO CÓNICO PARA ALMACENAR MAÍZ CON CAPACIDAD DE 25 TONELADAS CON CARGA Y DESCARGA", Tesis de grado, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, Quito, 2016. Accedido el 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13116/1/UPS-KT01282.pdf>

6 Anexos

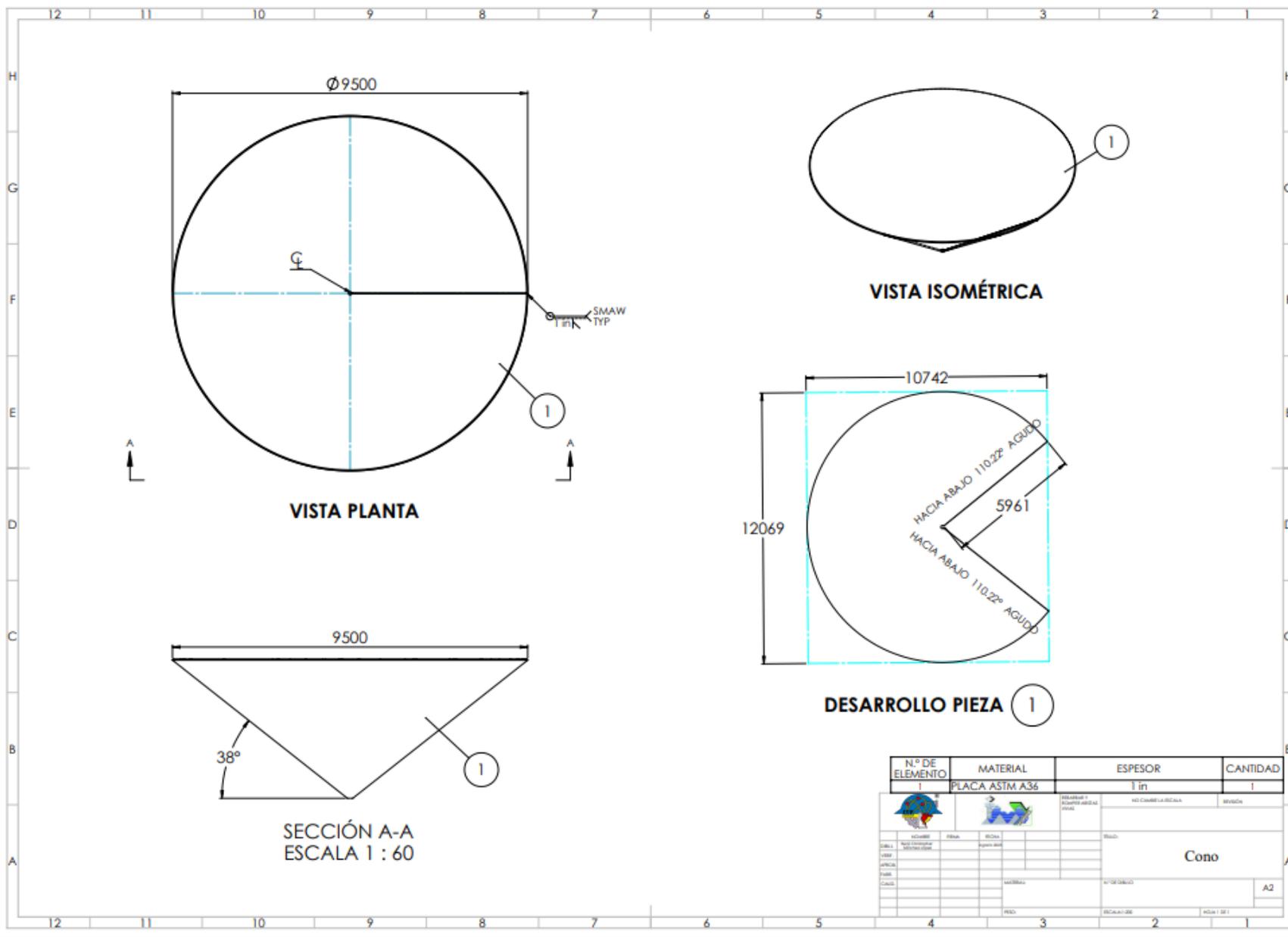
Anexo A Plano de fabricación de silo 1



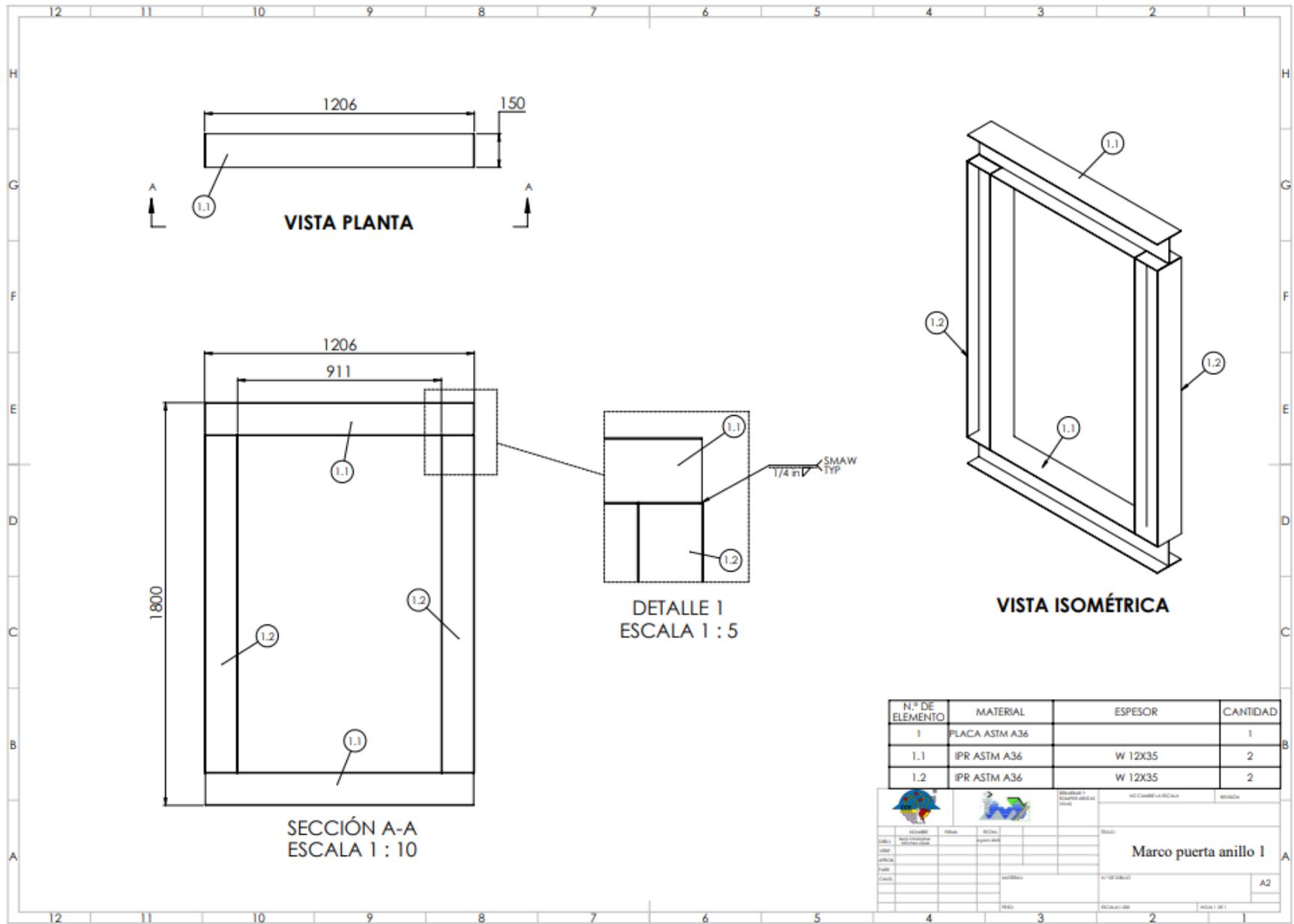
Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad



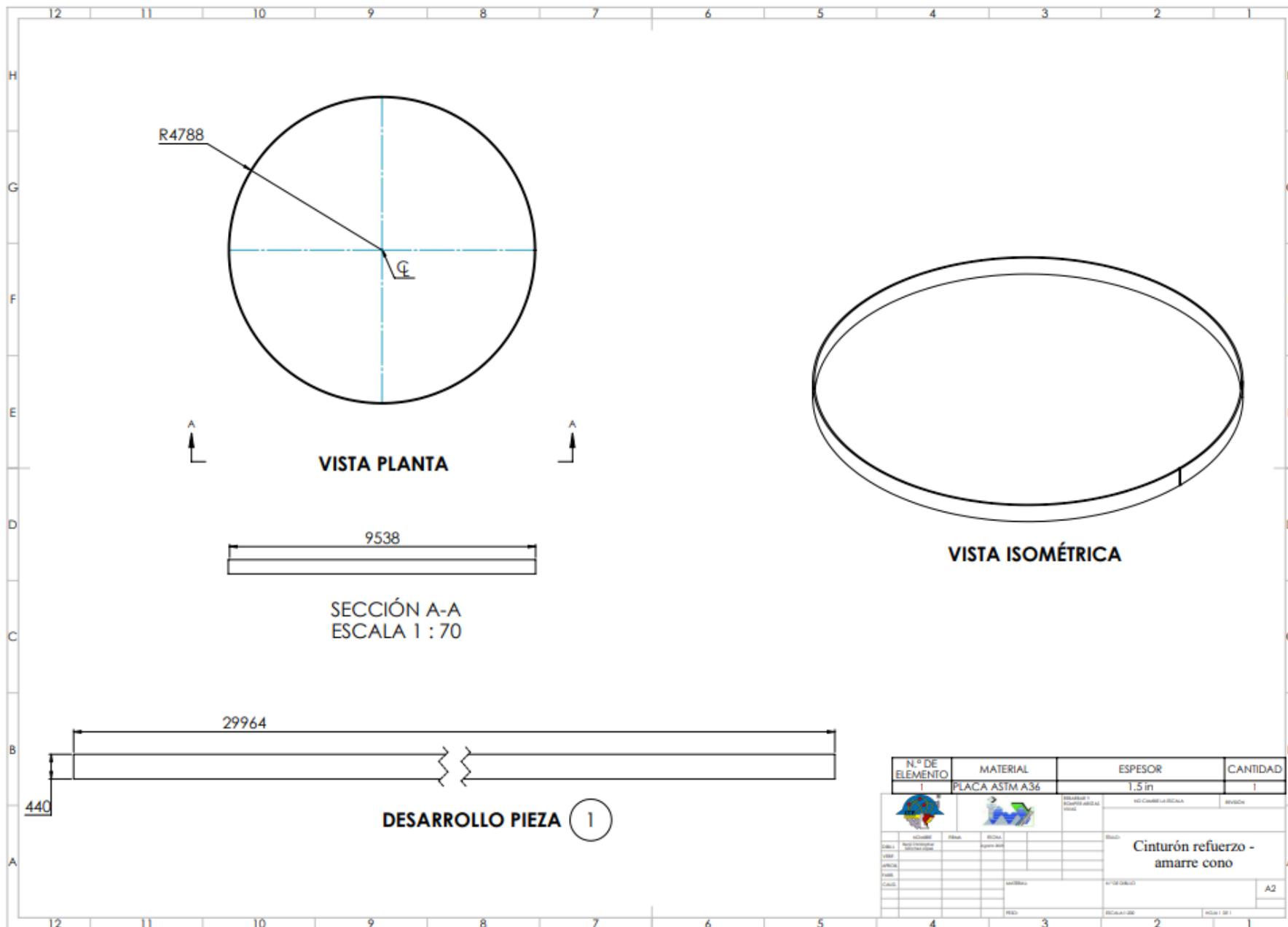
Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad



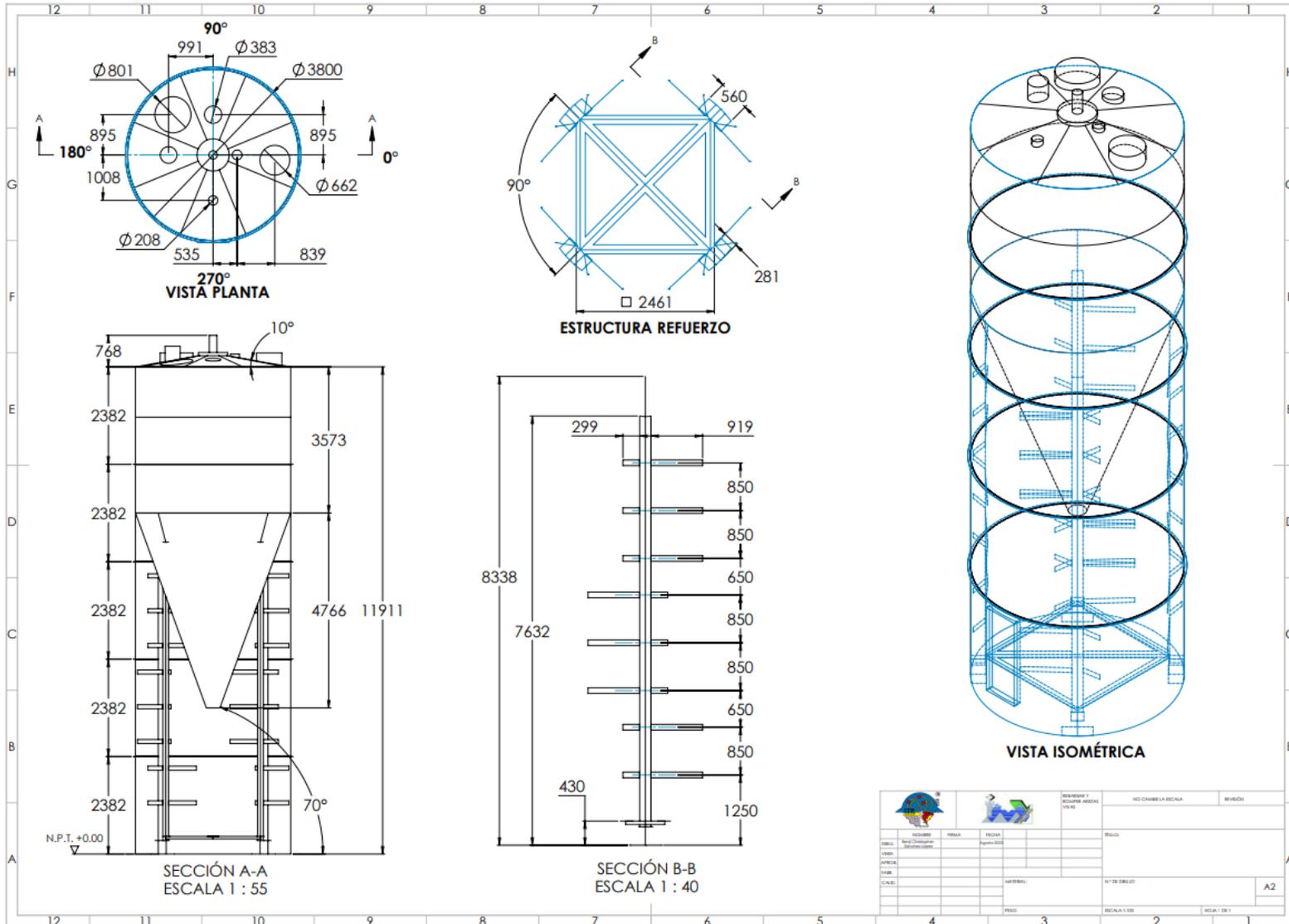
Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad



Diseño de uniones atornilladas reforzadas en silos de alta capacidad



Anexo B Plano de fabricación de silo 2



Anexo C Artículo SOMIM



MEMORIAS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA INGENIERÍA MECÁNICA EN MÉXICO
XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
21 AL 23 DE SEPTIEMBRE DE 2022 BOGOTÁ, COLOMBIA



Tema A1a. Diseño Mecánico: Juntas atornilladas

“Análisis de juntas atornilladas perimetrales para silos de alta capacidad”

Benji C. Sánchez López^{*a}, Mario E. Rodríguez Castillo^a, Luis M. Palacios Pineda^a, Ignacio Ramírez Vargas^a.

^aTecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Pachuca, Carr. México-Pachuca km 87.5, Pachuca, Hgo. CP 42080, México

**Autor contacto. Dirección de correo electrónico: m21201049@pachuca.tecnm.mx*

RESUMEN

El uso de silos de alta capacidad resulta imprescindible para las industrias que almacenan enormes cantidades de productos granulares. La metodología utilizada para esta investigación se realizó en primera instancia, utilizando el software Solidworks® realizando los modelos 3D de las juntas atornilladas propuestas. Posteriormente, se calculó la precarga para el tornillo de sujeción y se realizaron simulaciones con el método MEF en Ansys®, con lo cual se realizó una gráfica que muestra las condiciones de operación de cada junta atornillada hasta obtener el esfuerzo máximo que iguala al límite de fluencia del tornillo, mientras eran sometidas a esfuerzos de tipo cortante y normales a tensión con coeficientes de fricción de 0.15 y 0.20. Finalmente, se realizó una tabla comparativa que muestra el contacto entre placas de cada junta atornillada propuesta, comprobando que la utilización de cartabones permite que el contacto entre placas se mantenga de manera estable durante su operación.

Palabras Clave: Solidworks, ANSYS, junta atornillada, MEF, límite de fluencia.

ABSTRACT

The use of high capacity silos is necessary for industries that store massive quantities of granular products. The methodology used for this research was initially developed, using the Solidworks® software, making the 3D models of the proposed bolted joints. Subsequently, the preload for the fastening bolt was calculated and simulations were carried out with the FEA method in Ansys®, with which a graph was made that shows the operating conditions of each bolted joint until obtaining the maximum stress that equals the bolt's stress yield while they were subjected to shear and normal tension stresses with friction coefficients of 0.15 and 0.20. Finally, a comparison table was made that displays the contact between plates of each proposed bolted joint, corroborating that the use of bevels allows the contact between plates to be maintained in a stable manner during its operation.

Keywords: Clave: Solidworks, ANSYS, bolted joints, FEA, stress yield.

1. Introducción

Hoy en día, es común escuchar sobre el uso de contenedores/silos empleados para el almacenamiento de una amplia variedad de productos granulares en el sector industrial. Debido a la alta demanda de productos granulares en la sociedad, surge la necesidad en el sector empresarial por extender el ciclo de vida de estos en las distintas etapas, las cuales corresponden a todo proceso industrial y a cada una de las veces que se necesita transportar de un punto a otro el material a granel [1]. En la Fig. 1, se observa una breve descripción de la utilización de los Silos durante las distintas etapas previamente mencionadas.



Figura 1. El papel del almacenamiento de sólidos a granel en los procesos industriales

Los productos granulares almacenados en dichos contenedores tienen un interés económico sobresaliente para las industrias/compañías que ofrecen estos productos en grandes cantidades, los cuales deben ser resguardados bajo condiciones específicas [2].

Los silos se ven presentes en industrias, tales como: la minera [3], la agrícola [4], la química [5], la alimenticia [6], la plástica [7], entre otras. Mas aún, cuando se habla de silos, se pueden encontrar una amplia variedad de diseños/arquitecturas de estos equipos, entre los cuales se encuentran silos de hormigón [8], silos de tela, silos de acero [9], entre otros. Actualmente, los silos de acero han tenido un auge sobresaliente en el almacenamiento de material a granel, debido a su eficiencia estructural y/o facilidad de construcción/ensamblaje en la industria.

Un silo que almacena 800 toneladas de material a granel es considerado de alta capacidad; dicho contenedor, fue desarrollado con el fin de obtener mayores ganancias obtenidas con evaluaciones y proyecciones a partir de la producción de material a granel y su venta [10].

Sin embargo, estos presentan algunos problemas, tales como la poca estabilidad debido a los bajos espesores de pared; pandeo debido a la fricción individual de las partículas del material contra las paredes del silo y/o presiones simétricas durante la descarga del producto [1, 11]. Por lo que, con el paso de los años, se continúa estudiando ampliamente el

comportamiento mecánico de las paredes del silo para enfrentar este problema. Dado que, durante su llenado, almacenado y descarga, el silo sufre distintas presiones provocando esfuerzos axiales en sus paredes [9].

La presión se define como un esfuerzo normal aplicado a la pared del silo, el cual es conformado por el contacto individual de partículas [12]. Debido a que cada material presenta distintas propiedades/características como: densidad, ángulo de reposo, coeficientes de rozamiento, entre otras. El tipo de material es un factor crítico en el cálculo estructural del silo, específicamente para el producto a almacenar, porque este afecta la presión ejercida al silo [13].

Actualmente, el estudio enfocado a la predicción de presiones en un silo es un caso abierto, debido a las dificultades que esto conlleva [13], sin mencionar que existe un bajo número de estaciones experimentales que ayuden a facilitar los cálculos de presiones de manera fiable, para el diseño de estos equipos a nivel mundial [14].

De manera que, la teoría publicada por Janssen enfocada al cálculo de presiones, establece una ecuación reconocida, la cual considera el equilibrio de fuerzas en una parte elemental del material almacenado dentro del mismo. Sin embargo, las hipótesis consideradas para el cálculo y diseño de silos son únicamente para el estado estático y de materiales poco comprensibles que no disminuyen su volumen al ser sometidos a presiones o compresiones durante cada una de las etapas de proceso por las cuales pasa un silo [15].

Es por ello que, este trabajo de investigación se centra en el análisis de las juntas atornilladas dado que frecuentemente presentan fallas/afectaciones que dependiendo de su nivel de gravedad pueden tener un impacto representativo en la estabilidad y fiabilidad de las conexiones de cada uno de los componentes que conforman al silo [11, 16]. Para el cálculo de la junta atornillada, se utiliza la metodología conocida como el diseño de uniones no permanentes [17]. Los modelos 3D de las juntas atornilladas propuestas son diseñadas en el Software SolidWorks® y sometidas a prueba de elementos finito en el Software ANSYS®.

2. Metodología

La estructura de este manuscrito se muestra de manera gráfica en la Fig. 2, donde se pueden observar cada uno de los pasos que se siguieron para poder determinar los valores máximos de operación a los que las juntas atornilladas fueron sometidas.



Figura 2. Metodología de diseño

2.1. Juntas atornilladas

La aplicación de uniones atornilladas puede verse presente en armaduras para el ensamble de estructuras metálicas [18], en componentes aeronáuticos [19], en componentes ferroviarios [20], en bridas [21], entre otros.

Para la manufactura de silos, unos de los objetivos principales es la reducción del número de tornillos para su ensamble y aún más el conocer a fondo el desempeño de los tornillos y uniones bajo condiciones de operación y de diseño, que pongan a prueba su estabilidad estructural sin superar el límite de fluencia del tornillo con el que son ensambladas.

Para poder comprender la resistencia de cada una de las juntas atornilladas propuestas en este artículo, fue importante conocer el comportamiento estructural del tornillo con el que fueron ensambladas, puesto que la geometría de cada junta atornillada determina los valores máximos de operación que más adelante se mencionaran.

Por otra parte, se desarrollaron los modelos de juntas atornilladas mostradas en la Fig. 4 para ser

implementadas en las uniones perimetrales entre anillos/rolos del silo tal y como se muestra en la Fig. 3.

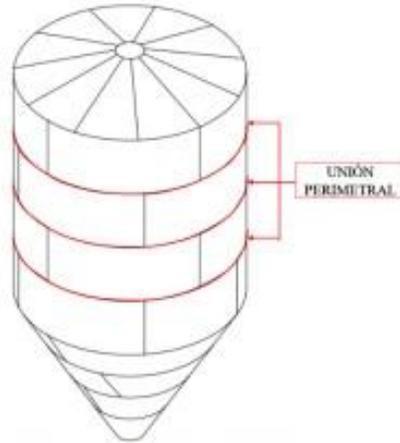


Figura 3. Esquema de silo atornillado

2.2. Componentes de las juntas atornilladas

Los componentes que integran a las juntas atornilladas son mostrados en las Figs. 4(a)-(d), donde se puede apreciar que se conforman de un tornillo, una tuerca y una rondana de 0.0127m (1/2”), al igual de un par de placas de 0.0476m (3/16”) de espesor con diferentes geometrías.

Las geometrías de juntas atornilladas surgieron con la idea de poder eficientizar los modelos de uniones de silos de la actualidad, a partir de las siguientes características que aumentarían su rendimiento durante la operación de cada una:

- Número de dobleces en las placas
- Utilización de cartelas / cartabones
- Coeficientes de rozamiento

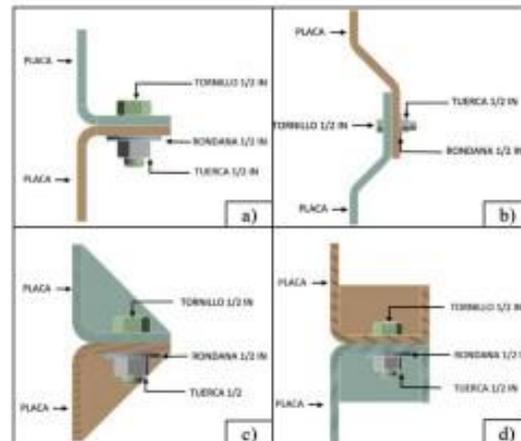


Figura 4. Componentes junta atornillada

2.3. Relación de fuerzas ejercidas

En este análisis se sometieron a prueba las juntas atornilladas, como se muestran en las Figs. 5(a)-(d), donde la fuerza F generara un esfuerzo normal a tensión y la fuerza V un esfuerzo cortante. Durante el análisis, se obtuvieron los rangos máximos de operación en que las juntas pueden soportar esfuerzos de cortante o tensión puro o una combinación entre ambos esfuerzos, que hagan que el límite de fluencia del tornillo llegue a su límite.

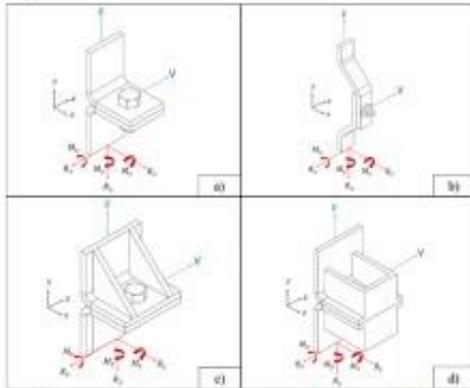


Figura 5. Diagrama cuerpo libre de juntas atornilladas consideradas

2.4. Análisis MEF a juntas atornilladas

Para conocer el rango máximo de operación de cada junta atornillada, se desarrollaron pruebas basadas por elemento finito utilizando ANSYS®, en su módulo estático estructural. Para el análisis, se utilizaron 2 coeficientes de rozamiento (0.15 y 0.20), los cuales son utilizados para componentes fabricados con acero. En las Figs. 6(a)-(d) se puede observar las que las condiciones de frontera fueron asignadas a los 4 modelos y se obtuvo de esta manera sus esfuerzos resultantes con la combinación de esfuerzos normales y cortantes.

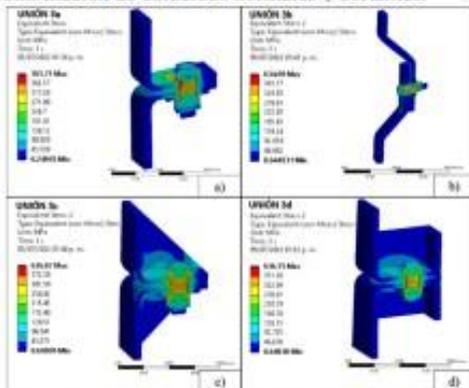


Figura 6. Distribución de esfuerzos en juntas atornilladas

2.5. Detalles constructivos de juntas atornilladas

Una vez determinadas las geometrías, los componentes y las condiciones de frontera, se analizó el número de dobleces que se necesitaron para poder formar cada junta atornillada. De igual manera, se analizó la cantidad de material en m² que se utilizó en los cartabones y la soldadura correspondiente para su ensamble de los cartabones de las configuraciones 4c y 4d.

Tabla 1 – Especificaciones técnicas de juntas atornilladas

Unión	Número dobleces	Material para cartabones (m ²)	Soldadura (m)
4a	2	0	0
4b	4	0	0
4c	2	0.006	0.33
4d	2	0.014	0.42

2.6. Cálculo de la carga de prueba y precarga

Para poder conocer la resistencia máxima de cada una de las juntas atornilladas mencionadas anteriormente, primerio se debe conocer el comportamiento que presentan cuando solo se aplica únicamente la precarga (F_i) sin ningún esfuerzo adicional, para conocer este valor, se emplearon las ecs. (1) –(2) utilizando un 75% del valor de la carga de prueba (F_p) para tornillos ASTM A325 tipo 3 con diámetro nominal de 0.0127m (1/2”), debido a que los tornillos utilizados para el ensamble de silos, comúnmente son sustituidos en algunos casos durante el mantenimiento de esta clase de equipos.

$$F_p = A_t S_p \quad (1)$$

$$F_i = 0.75 F_p \quad (2)$$

Donde:

F_p Carga de prueba

F_i Precarga

A_t Área de esfuerzo de tensión

S_p Resistencia de prueba mínima

Tabla 2 – Parámetros de precarga

Parámetro	Resultado
A_t (mm ²)	91.54
S_p (MPa)	586.1
F_p (KN)	53.65
F_i (KN)	40.24

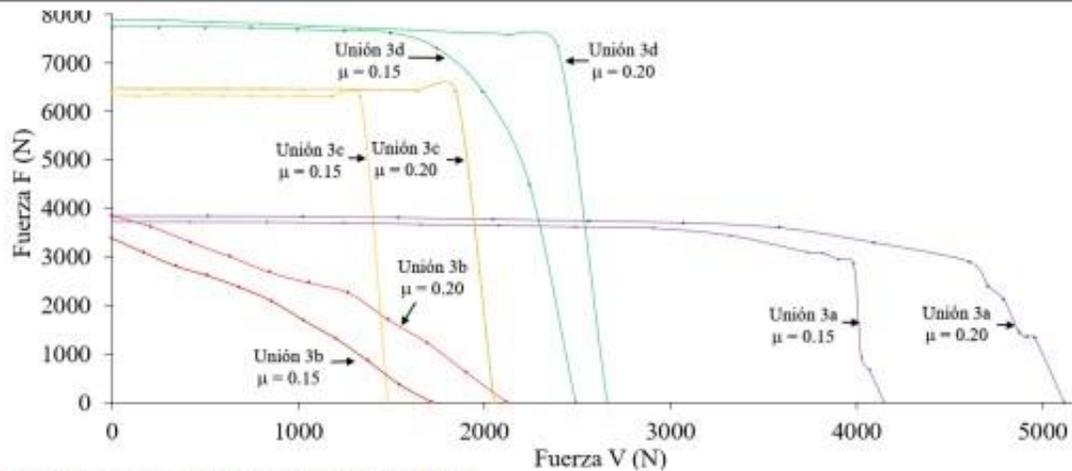


Figura 7. Rango de operación de juntas atornilladas

2.7. Rangos de operación de juntas atornilladas

Como se muestra en la fig. 7, el eje X indica la fuerza V y en el eje Y la fuerza F aplicada en las 4 juntas atornilladas. Cada uno de los puntos que se muestran a lo largo de cada curva son la combinación de fuerzas normales y cortantes, que provoca en el tornillo de la junta, soporte un esfuerzo normal. Para cada caso la zona de esfuerzos menores a su resistencia a la fluencia del tornillo (634 MPa ASTM A325) corresponde a la zona previa de la primera curva de cada junta con ambos coeficientes de fricción.

Por ejemplo, si se tuviera el caso en el que la junta 3a tuviera una combinación de fuerza V de 3,000 N y de fuerza F de 2,000 N, el esfuerzo resultante sería aún menor que el límite de fluencia del tornillo; más sin en cambio si el esfuerzo resultante entre la combinación de las fuerzas V y F fuera mayor, podría optarse por una unión atornillada distinta para poder garantizar la estabilidad estructural del sistema que estamos diseñando.

Como se muestra en la tabla 3 y 4, la junta atornillada 4a es la más resistente en esfuerzos de tipo tensión en ambos coeficientes de rozamiento, y la junta atornillada 4d es la más resistente en esfuerzos de tipo cortante en ambos coeficientes de rozamiento.

2.8. Relación entre coeficientes de rozamiento

Una vez definidas las geometrías, componentes y condiciones de frontera establecidos, se realizaron las pruebas y se trazaron las curvas de los rangos de operación operación con la que cuenta cada junta atornillada. Como se puede notar en la Fig. 7, la variación que existe entre ambos coeficientes de rozamiento hace que exista

un aumento en la resistencia de las juntas atornilladas en los 4 casos que fueron estudiados, por lo que se puede deducir que dependiendo del tipo de fricción que exista entre componentes, puede ayudar a tener silos más estables, y no tener que utilizar refuerzos estructurales que puedan hacer más costosa la manufactura de silos atornillados.

Tabla 3 – Valores máximos y mínimos de operación con coeficiente de rozamiento de 0.15

UNIÓN	FUERZAS	
	V (N)	F (N)
3a	4,150	3,720
3b	2,120	3,850
3c	1,480	6,347
3d	2,490	7,740

Tabla 4 – Valores máximos y mínimos de operación con coeficiente de rozamiento de 0.20

UNIÓN	FUERZAS	
	V (N)	F (N)
3a	5,115	3,845
3b	1,720	3,375
3c	2,050	6,470
3d	2,660	7,900

Tabla 5 – Variación (%) entre coeficientes de rozamiento

UNIÓN	Variación (%)	
	Fuerza V	Fuerza F
3a	18.86	3.25
3b	18.86	12.33
3c	27.80	1.90
3d	6.39	2.02

3. Estado del contacto entre placas y esfuerzos máximos en tornillo de unión

Conociendo los valores máximos de resistencia de cada una de las juntas atornilladas propuestas, se realiza un análisis de contacto entre las placas, como se ilustra en la fig. 8, todas las placas de las juntas atornilladas se separan y se deslizan entre sí, aun cuando ninguna fuerza V y F son aplicadas sobre ellas y solo es aplicada la precarga.

Posteriormente, mientras la fuerza se incrementaba, tanto en esfuerzo normal a tensión (F) y esfuerzo cortante (V), la condición de contacto entre placas de cada una de las 4 configuraciones de juntas atornilladas evolucionaba de tal manera que en las configuraciones 3a y 3b en la condición $\sigma_{max} = S_y$ se puede notar que estaban a punto de separarse totalmente.

Por otra parte, las configuraciones 3c y 3d, en la misma condición mencionada ($\sigma_{max} = S_y$), se puede notar que mientras las fuerzas iban aumentando a tal punto que el esfuerzo resultante igualaba al límite de fluencia del tornillo, su condición de contacto aumentaba, de tal manera que las placas sufrían un estado de compression entre sí.

Finalmente, en la Fig. 9, se puede observar la distribución de esfuerzos resultante en el tornillo durante las pruebas, donde su valor resultante era igual o menor a su resistencia a la fluencia (634 MPa).

4. Conclusiones

La investigación permitió demostrar que la utilización de cartelas/cartabones contribuyen a que las juntas atornilladas en condición de máximos esfuerzos no se separen de las placas en ninguna ocasión de su operación, esto último, se puede ver claramente en las configuraciones 3c y 3d en la fig. 8.

Las configuraciones que requieren de más preparación durante su manufactura son los tipos 3c y 3d debido a que se utiliza más placa y soldadura para su elaboración.

En definitiva, las configuraciones 3c y 3d son las que más resisten en esfuerzos normales a tensión (F) y la configuración 3a es la que mas resiste en esfuerzos tipo cortante (V).

Finalmente, el análisis ha demostrado que la resistencia de las juntas atornilladas, se relaciona directamente con la geometría con la que cuentan, gracias a ello podemos determinar que union atornillada es la mejor en cada uno de los sistemas que se deseen diseñar y poder obtener una optimización en tiempo de manufactura y en la cantidad de materia prima para su fabricación.

Los resultados obtenidos podran ser utilizados por diseñadores de silos para contar con un antecedente de diseño que les permita aumentar la resistencia máxima de sus componentes atornillados.

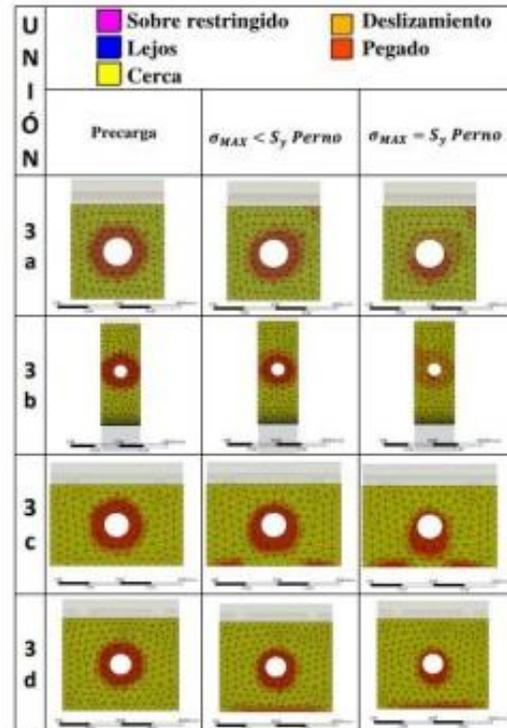


Figura 8. Condición de contacto entre placas

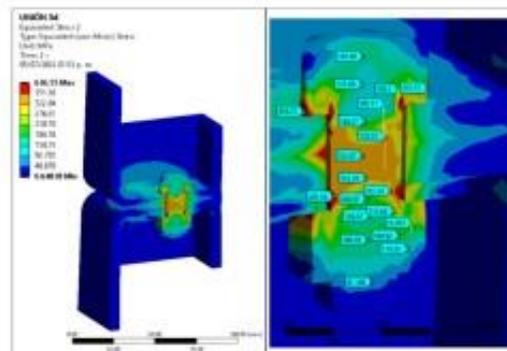


Figura 9. Distribución de esfuerzos en tornillo unión 3d

Referencias

- [1] J. M. Rotter, *Guide for the economic design of circular metal silos*. New York: Spon Press, 2001.
- [2] Y. Garfinkel, D. Ben-Shlomo y T. Kuperman, "Large-scale storage of grain surplus in the sixth millennium BC: the silos of Tel Tsaf", *Antiquity*, vol. 83, n. ° 320, pp. 309–325, junio de 2009. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1017/s0003598x00098458>
- [3] Y. Mu et al., "Optimal scheduling method for belt conveyor system in coal mine considering silo virtual energy storage", *Applied Energy*, vol. 275, p. 115368, octubre de 2020. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115368>
- [4] T. Tefera et al., "The metal silo: An effective grain storage technology for reducing post-harvest insect and pathogen losses in maize while improving smallholder farmers' food security in developing countries", *Crop Protection*, vol. 30, n. ° 3, pp. 240–245, marzo de 2011. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.11.015>
- [5] C. Sprong et al., "Cumulative dietary risk assessment overarchiving different regulatory silos using a margin of exposure approach: A case study with three chemical silos", *Food and Chemical Toxicology*, vol. 142, p. 111416, agosto de 2020. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ft.2020.111416>
- [6] D. G. Mogale, M. Kumar, S. K. Kumar y M. K. Tiwari, "Grain silo location-allocation problem with dwell time for optimization of food grain supply chain network", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 111, pp. 40–69, marzo de 2018. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.01.004>
- [7] K. Choi, Y. Endo y T. Suzuki, "Experimental study on electrostatic charges and discharges inside storage silo during loading of polypropylene powders", *Powder Technology*, vol. 331, pp. 68–73, mayo de 2018. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.007>
- [8] X. Li, Z. Han, Q. Lin, Z. Wu, L. Chen y Q. Zhang, "Smart cooling-aeration guided by aeration window model for paddy stored in concrete silos in a depot of Guangzhou, China", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 173, p. 105452, junio de 2020. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105452>
- [9] A. M. Mehrethran y S. Maleki, "Seismic response and failure modes of steel silos with isotropic stepped walls: The effect of vertical component of ground motion and comparison of buckling resistances under seismic actions with those under wind or discharge loads", *Engineering Failure Analysis*, vol. 120, p. 105100, febrero de 2021. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105100>
- [10] A. Catillo Niño, "Aspectos históricos de la construcción de silos para almacenaje de granos en Colombia", *MEMORIAS*, vol. 1, pp. 2–19, 2018.
- [11] G. Tang, L. Yin, Z. Li, C. Pan y H. Lai, "Structural performance of double-wall steel insulation silo with multiple bolted joints", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 139, pp. 411–423, diciembre de 2017. Consultado el 9 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.020>
- [12] J. Wiącek et al., "Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls", *Biosystems Engineering*, vol. 209, pp. 216–231, septiembre de 2021. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.003>
- [13] A. J. Sadowski, J. Michael Rotter y J. Nielsen, "A theory for pressures in cylindrical silos under concentric mixed flow", *Chemical Engineering Science*, vol. 223, p. 115748, septiembre de 2020. Consultado el 3 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115748>
- [14] R. M. Gandia, F. C. Gomes, W. C. d. Paula, E. A. d. Oliveira Junior y P. J. Aguado Rodriguez, "Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under different conditions", *Biosystems Engineering*, vol. 209, pp. 180–199, septiembre de 2021. Consultado el 9 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.001>
- [15] W. N. Bayona Carvajal, "Estimación de esfuerzos inducidos durante el llenado y vaciado de silos metálicos para almacenamiento de cemento", maestría, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias - Bolívar, 2015. Consultado el 8 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0067868.pdf>
- [16] S. Reza, M. Sayed Soleimani y M. Naser Khaled, "Damage detection and localization in loose bolted joints", *Procedia Structural Integrity*, Volume 37, pp. 956–963, 2022. Consultado el 2 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321622001871?via=ihub#>

- [17] Diseño en ingeniería mecánica de Shigley - 9. edición. McGraw-Hill Educación, 2012
- [18] A. Foces Mediavilla y A. M. Garrido Hernández, "Análisis de uniones atornilladas viga-pilar realizadas con chapa frontal a tope", Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, vol. 23, n.º 1, pp. 33–53, 2007. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/2099/10343>
- [19] Á. Olmedo Marcos, "Estudio numérico de uniones atornilladas en estructuras aeronáuticas", Tesis, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2010. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10016/10847>
- [20] Y. Hu, A. Chit Tan, C. Liang y Y. Li, "Failure analysis of fractured motor bolts in high-speed train due to cardan shaft misalignment", Engineering Failure Analysis, vol. 122, p. 105246, abril de 2021. Accedido el 1 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105246>
- [21] C. Li, X. Miao, R. Qiao y Q. Tang, "Modeling method of bolted joints with micro-slip features and its application in flanged cylindrical shell", Thin-Walled Structures, vol. 164, p. 107854, 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107854>.