

*MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL*

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO Y ESTUDIO DE UN TANQUE DE
AGUA HORIZONTAL CON SOPORTES
FABRICADO EN PRFV**

Escuela de Doctorado y Estudios de Postgrado

Universidad de La Laguna

Curso 2022/2023

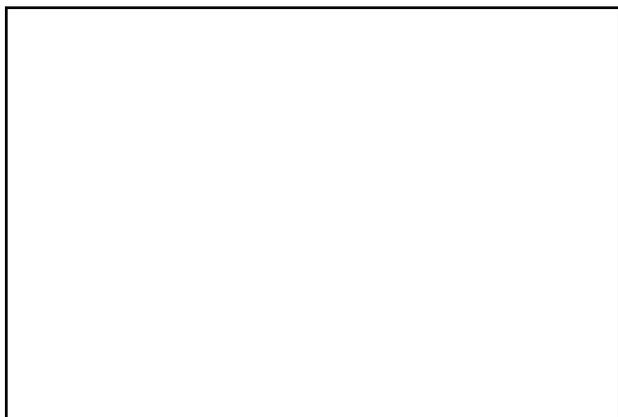
Autora: Silvia Álvarez Díaz

Tutor: Carmelo Militello Militello

7 DE JULIO DE 2023

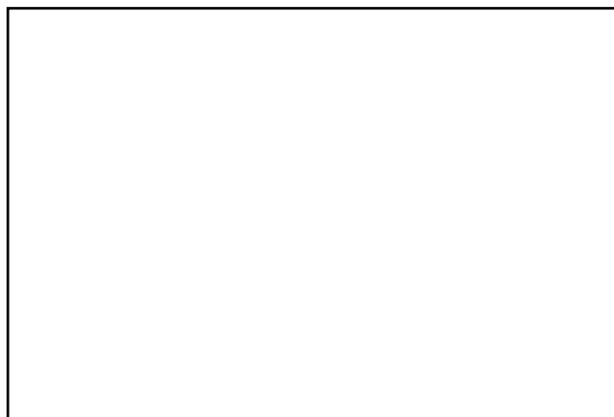
La publicación de este Trabajo Fin de Máster solo implica que el estudiante ha obtenido al menos la nota mínima exigida para superar la asignatura correspondiente, no presupone que su contenido sea correcto, aunque si aplicable. En este sentido, la ULL no posee ningún tipo de responsabilidad hacia terceros por la aplicación total o parcial de los resultados obtenidos en este trabajo. También pone en conocimiento del lector que, según la ley de protección intelectual, los resultados son propiedad intelectual del alumno, siempre y cuando se haya procedido a los registros de propiedad intelectual o solicitud de patentes correspondientes con fecha anterior a su publicación.

Santa Cruz de Tenerife a 7 de Julio de 2023



Fdo. _____

Tutor: Carmelo Militello Militello



Fdo. _____

Silvia Álvarez Díaz

RESUMEN

El presente trabajo de fin de máster tiene como objetivo el diseño y verificación de un recipiente cilíndrico horizontal de 30.000l con cabezales toriesféricos y cuatro apoyos para colocación en superficie, fabricado y diseñado en PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio). El objetivo principal es evaluar cómo las cargas a las que estará sometido el depósito durante su vida útil afectan a su resistencia estructural. Para ello se analizan las posibles situaciones más desfavorables y se comprueba que el equipo sea capaz de resistir las cargas originadas.

El estudio comienza con una revisión de las especificaciones del depósito, incluyendo dimensiones, espesores de las capas de PRFV, tipo de material que se va a utilizar y la toma de datos del proceso de fabricación. Luego, se hará uso del software de diseño asistido por computadora SolidWorks, en el que se realiza el modelado 3D del depósito creando distintas superficies para cada zona donde varíe el espesor. Se crea el modelo con las características y medidas dadas por el fabricante y se estudian diferentes situaciones, con la aplicación de cargas y condiciones de contorno.

ABSTRACT

The present Master's thesis aims to design and verify a horizontal cylindrical container with torispherical heads and four supports for surface placement, with a capacity of 30,000 liters, manufactured and designed in FRP (Fiber Reinforced Polyester). The main objective is to evaluate how the loads to which the tank will be subjected during its lifespan affect its structural strength. For this purpose, the possible most unfavorable situations are analyzed, and it is verified that the equipment can withstand the generated loads.

The study begins with a review of the tank specifications, including dimensions, thicknesses of the FRP layers, type of material to be used, and data collection of the manufacturing process. Next, the computer-aided design software SolidWorks will be used, in which the 3D modeling of the tank is performed by creating different surfaces for each area where the thickness varies. The model is created with the characteristics and dimensions provided by the manufacturer, and different scenarios are studied by applying loads and boundary conditions.

MEMORIA

TABLA DE CONTENIDO

1.	TÍTULO	4
2.	OBJETO DEL PROYECTO	4
3.	ANTECEDENTES	4
4.	NORMATIVA	5
5.	INTRODUCCIÓN AL POLIÉSTER REFORZADO EN FIBRA DE VIDRIO	7
5.1	MATERIALES COMPUESTOS	7
5.2	HISTORIA DEL PRFV	8
5.3	POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRFV)	10
5.3.1	<i>Fibra de vidrio</i>	11
5.3.2	<i>Resina de poliéster</i>	14
5.3.3	<i>Aceleradores</i>	15
5.3.4	<i>Catalizadores</i>	15
5.3.5	<i>Gelcoat</i>	15
5.4	CARACTERÍSTICAS DEL PRFV	16
5.5	PROCESO DE FABRICACIÓN	17
6.	DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO	19
6.1	CARACTERÍSTICAS	20
6.2	CARGAS A SOPORTAR	20
7.	CARACTERÍSTICAS DEL LAMINADO	21
7.1	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL LAMINADO	21
7.2	ESPESOR DEL LAMINADO	24
8.	PROGRAMA DE CÁLCULO	25
8.1	DISEÑO DEL EQUIPO	25
8.2	SIMULACIÓN DE LAS DISTINTAS SITUACIONES	26
8.2.1	<i>Presión hidrostática</i>	29
8.2.2	<i>Prueba hidráulica</i>	33
8.2.3	<i>Desplazamiento de soporte a 10mm del suelo</i>	35
8.2.4	<i>Carga de viento</i>	37
8.2.5	<i>Presión de vacío</i>	42
8.2.6	<i>Cargas de transporte</i>	50
8.3	RESUMEN DE RESULTADOS	58
9.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	59
10.	CONCLUSIONES	60
11.	BIBLIOGRAFÍA	61

TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Estructura de los composites. Fuente: [2]</i>	7
<i>Ilustración 2. Fábrica de hilos de fibra 1932. Fuente: [4]</i>	8
<i>Ilustración 3. Aplicación en la aviación</i>	8
<i>Ilustración 4. Trámex PRFV</i>	9
<i>Ilustración 5. Aplicaciones actuales del PRFV. Fuente: [5]</i>	9
<i>Ilustración 6. Composición del PRFV</i>	10
<i>Ilustración 7. Cinta de Fibra. Fuente: [7]</i>	12
<i>Ilustración 8. Manta de fibra de vidrio MAT [7]</i>	12
<i>Ilustración 9. Fibra multiaxial [7]</i>	12
<i>Ilustración 10. Tejido de Vidrio Roving [7]</i>	13
<i>Ilustración 11. Fibra de vidrio compuesta [7]</i>	13
<i>Ilustración 12. Velo [7]</i>	13
<i>Ilustración 13. Resina de poliéster</i>	14
<i>Ilustración 14. Acelerador de cobalto</i>	15
<i>Ilustración 15. Gel Coat [10]</i>	16
<i>Ilustración 16. Moldeo por contacto. Fuente: [13]</i>	17
<i>Ilustración 17. Dimensiones del depósito de estudio. Fuente: elaboración propia</i>	19
<i>Ilustración 18. Propiedades y constantes elásticas del laminado</i>	24
<i>Ilustración 19. Espesores según tipo de fibra empleada</i>	25
<i>Ilustración 20. Resultado final del depósito</i>	26
<i>Ilustración 21. Propiedades de laminado MAT 450g con resina de poliéster ortoftálica</i>	28
<i>Ilustración 22. Sujeciones para estudio de presión hidrostática</i>	30
<i>Ilustración 23. Mallado del depósito – carga hidrostática</i>	31
<i>Ilustración 24. Tensiones de Von Mises para presión hidrostática</i>	31
<i>Ilustración 25. Desplazamientos para presión hidrostática</i>	32
<i>Ilustración 26. Tensión de Von Misses - Prueba hidrostática</i>	33
<i>Ilustración 27. Desplazamientos-Ensayo hidráulico</i>	34
<i>Ilustración 28. Insertar desplazamiento de soporte</i>	35
<i>Ilustración 29. Malla carga de viento</i>	36
<i>Ilustración 30. Resultado Tensión de Von Mises - Desplazamiento soporte 10mm</i>	36
<i>Ilustración 31. Resultado desplazamiento - Desplazamiento soporte 10mm</i>	37
<i>Ilustración 32. Línea de partición-carga de viento</i>	38
<i>Ilustración 33. Mallado depósito - carga de viento</i>	39
<i>Ilustración 34. Tensión de Von Misses - carga de viento</i>	40
<i>Ilustración 35. Resultado de desplazamiento - carga de viento</i>	40
<i>Ilustración 36. Modo 1 - Análisis por pandeo - Carga de viento</i>	42
<i>Ilustración 37. Efecto de vacío de un depósito. Fuente: [16]</i>	43
<i>Ilustración 38. Línea de partición - carga de vacío</i>	44
<i>Ilustración 39. Presión de vacío</i>	45
<i>Ilustración 40. Presión no uniforme del agua</i>	46
<i>Ilustración 41. Malla carga de vacío</i>	46
<i>Ilustración 42. Tensiones con cargas de vacío</i>	47
<i>Ilustración 43. Desplazamientos con cargas de vacío</i>	47
<i>Ilustración 44. Modo 1- Análisis pandeo - carga de vacío</i>	48
<i>Ilustración 45. Modo 2- Análisis pandeo - carga de vacío</i>	49
<i>Ilustración 46. Modo 3- Análisis pandeo - carga de vacío</i>	49
<i>Ilustración 47. Croquis para pletina</i>	50
<i>Ilustración 48. Croquis orejeta</i>	50
<i>Ilustración 49. Restricción vertical en todas las orejetas</i>	51
<i>Ilustración 50. Restricción transversal en orejetas de uno de los laterales</i>	52
<i>Ilustración 51. Restricción longitudinal para orejetas de uno de los extremos</i>	52
<i>Ilustración 52. Mallado - carga de transporte</i>	53

<i>Ilustración 53. Resultado de tensiones - carga de transporte</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 54. Tensiones máximas en las orejetas del recipiente.....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 55. Resultado de desplazamiento-carga de transporte</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 56. Restricción transversal en un lado de un soporte.</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 57. Sujeción en la dirección vertical para los 4 soportes de los extremos en ambos lados ..</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 58. Sujeción longitudinal en uno de los soportes de los laterales</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 59. Resultado análisis de pandeo - carga de transporte - modo 1.....</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 60. Resultado análisis de pandeo - carga de transporte - modo 2.....</i>	<i>57</i>

1. TÍTULO

“Diseño y estudio de un tanque para almacenamiento de agua horizontal con soportes fabricado en PRFV”

2. OBJETO DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como principal objetivo, el diseño de un depósito utilizando poliéster reforzado con fibra de vidrio como material principal. Este depósito se diseñará para su uso en un contexto específico, proporcionando un almacenamiento seguro y confiable para diversos líquidos o sustancias, teniendo en cuenta las distintas cargas que va a soportar. El poliéster reforzado con fibra de vidrio es un material ampliamente utilizado en la industria debido a su resistencia a la corrosión, durabilidad y capacidad para soportar condiciones ambientales adversas.

3. ANTECEDENTES

El poliéster reforzado con fibra de vidrio es un material compuesto formado por resina de poliéster y fibra de vidrio. Esta combinación confiere al material propiedades mecánicas superiores, como alta resistencia a la tracción, rigidez, resistencia a la compresión y bajo peso específico. Además, el poliéster reforzado con fibra de vidrio es altamente resistente a la corrosión química y eléctrica, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de almacenamiento de líquidos.

El presente TFM comienza con una introducción del material, así como las propiedades y características de este. Posteriormente, se indican las especificaciones del depósito, como sus dimensiones, material a utilizar, propiedades del laminado y los espesores que va a tener cada superficie. A continuación, se emplea el software de diseño asistido por ordenador SolidWorks para realizar el modelo a través de superficies y se analizan las siguientes situaciones:

1. Estudio de la carga de presión hidrostática a la que va a estar sometida el depósito si se llenase hasta la altura superior de la boca de hombre.
2. Ensayo hidráulico exigido por la norma para recipientes a presión.

3. Estudio del efecto en el equipo por el desplazamiento de un soporte en la dirección vertical, situación que puede ocurrir por desnivel en el suelo o por fallo en la fabricación.
4. Estudio estático y estudio de pandeo del efecto de la presión del viento con el depósito vacío, con una velocidad de viento calculada según el Eurocódigo 1 de la Norma UNE-EN 1991-1-4 y la norma UNE-EN 13121-3.
5. Estudio estático y estudio de pandeo del depósito medio lleno, simulando que se conecta a una salida de agua sin una apertura superior para permitir la entrada de aire, lo que genera una disminución de presión, creando presión de vacío.
6. Estudio estático y estudio de pandeo del efecto de las cargas originadas por la elevación del depósito por orejetas en los extremos laterales, para su transporte.

Los resultados obtenidos en los distintos análisis se comparan con los criterios de tensiones y deformaciones establecidos, para determinar si el depósito cumple con dichos requisitos.

Por último, se resumen las conclusiones obtenidas del estudio, se discuten las limitaciones y se proponen recomendaciones para mejorar el diseño del recipiente

4. NORMATIVA

La normativa principal aplicada es la UNE-EN 13121: “*Tanques y depósitos aéreos de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV)*”, la cual establece los requisitos técnicos y las pautas de fabricación para garantizar la calidad, seguridad y fiabilidad de los depósitos fabricados con poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Esta normativa es fundamental para el diseño del proyecto, ya que proporciona directrices y criterios que deben seguirse durante todas las etapas del proceso de fabricación del depósito. Algunos aspectos clave abordados por la UNE-EN 13121 incluyen:

- Diseño estructural: La normativa establece los requisitos para el diseño estructural del depósito, incluyendo las consideraciones de resistencia mecánica, estabilidad y

1. MEMORIA

capacidad de carga. Esto asegura que el depósito pueda soportar las condiciones de almacenamiento previstas y minimiza el riesgo de fallos estructurales.

- Propiedades del material: La normativa define los requisitos para el poliéster reforzado con fibra de vidrio utilizado en la fabricación del depósito. Esto incluye la composición y las propiedades físicas y químicas del material, como la resistencia a la corrosión, la resistencia al fuego y la compatibilidad con los productos químicos a almacenar.
- Proceso de fabricación: La UNE-EN 13121 establece los procedimientos y las pautas para la fabricación del depósito, desde la selección de los materiales hasta los métodos de unión y acabado. Esto garantiza que se sigan prácticas adecuadas durante la producción para obtener un producto final de alta calidad y durabilidad.
- Inspección y pruebas: La normativa incluye requisitos para la inspección y las pruebas del depósito, tanto durante el proceso de fabricación como en las etapas finales. Esto ayuda a verificar que el depósito cumple con los estándares establecidos y garantiza su seguridad y rendimiento.

Esta normativa se divide en cuatro partes, utilizando para el caso de estudio la parte 3: diseño y fabricación

Por otro lado, otra de las normas que se han consultado han sido:

- UNE-EN 1991-1-4: Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.
- UNE-EN 13445-3: Recipientes a presión no sometidos a llama. Parte 3: Diseño.

5. INTRODUCCIÓN AL POLIÉSTER REFORZADO EN FIBRA DE VIDRIO

5.1 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos formados por dos o más componentes, normalmente en forma de partículas o fibras, que dan lugar a un compuesto final con propiedades superiores a las de los materiales separados. En general, suelen estar compuesto de una matriz y un refuerzo y el objetivo principal de su uso es lograr, en un único producto, las propiedades que no se encuentran en un solo material [1].

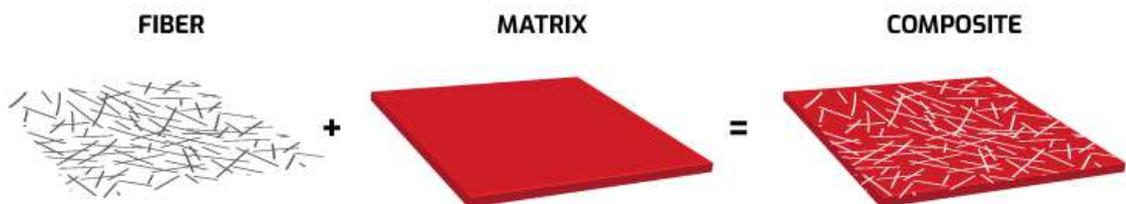


Ilustración 1. Estructura de los composites. Fuente: [2]

La matriz es el componente continuo y suele ser un polímero, como una resina termoendurecible o termoplástica. La matriz proporciona resistencia a la tracción, resistencia química y protección al refuerzo. Además, ayuda a mantener unidas las fibras de refuerzo y a distribuir las cargas aplicadas.

El refuerzo, por otro lado, es el componente discontinuo y está formado por fibras o partículas que se incorporan a la matriz. Las fibras más comunes utilizadas como refuerzo en los composites incluyen fibra de vidrio, fibra de carbono, aramida (como la fibra de Kevlar) y fibras cerámicas. Estas fibras proporcionan resistencia mecánica, rigidez y otras propiedades específicas al composite.

La combinación de la matriz y el refuerzo en un material compuesto aprovecha las fortalezas de cada componente. La matriz protege y une las fibras de refuerzo, mientras que las fibras aportan rigidez y resistencia a la tracción al composite en general. Esto resulta en

1. MEMORIA

un material que exhibe propiedades mecánicas mejoradas, como alta resistencia específica (relación entre resistencia y peso), alta rigidez y resistencia a la fatiga.

5.2 Historia del PRFV

En 1932 comienzan a producirse, a nivel industrial, las primeras fibras de vidrio de pequeño diámetro, resultado de las investigaciones realizadas por Owens-Illionois y Corning Glass Works en Estados Unidos, Modigliani en Italia, SaintGobain en Francia, etc. Más tarde, en 1936 du Pont desarrolló la resina de poliéster [3]



Ilustración 2. Fábrica de hilos de fibra 1932. Fuente: [4]

Durante la II Guerra mundial comienza el uso del poliéster reforzado con fibra de vidrio para piezas de aviones y equipos de radares electrónicos.



Ilustración 3. Aplicación en la aviación

En la década de los años 50 empezó a utilizarse para la fabricación de embarcaciones y láminas translúcidas. A partir de entonces se siguió utilizando en la industria del automóvil

DISEÑO Y ESTUDIO DE UN TANQUE DE AGUA HORIZONTAL FABRICADO EN PRFV

y aeronáutica. Luego, en los años 60, comenzó a intensificarse el interés por el PRFV en el ámbito de la industria de la construcción.

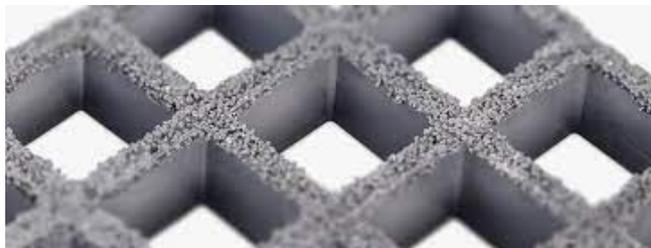


Ilustración 4. Trámex PRFV

Entre los años 1975 y 1980 surgieron las primeras empresas dedicadas a la fabricación de piezas náuticas (carrocerías de ensamblaje, lanchas, veleros, etc.).

En la actualidad, el PRFV tiene numerosas aplicaciones, ya que se utiliza en todos los sectores del mercado. A nivel del consumidor final, en tablas de surf, barcos, lanchas, piezas decorativas como sillas, muebles y mesas; depósitos de agua, piscinas, tuberías, perfiles y rejillas, cubiertas, jardineras, etc.

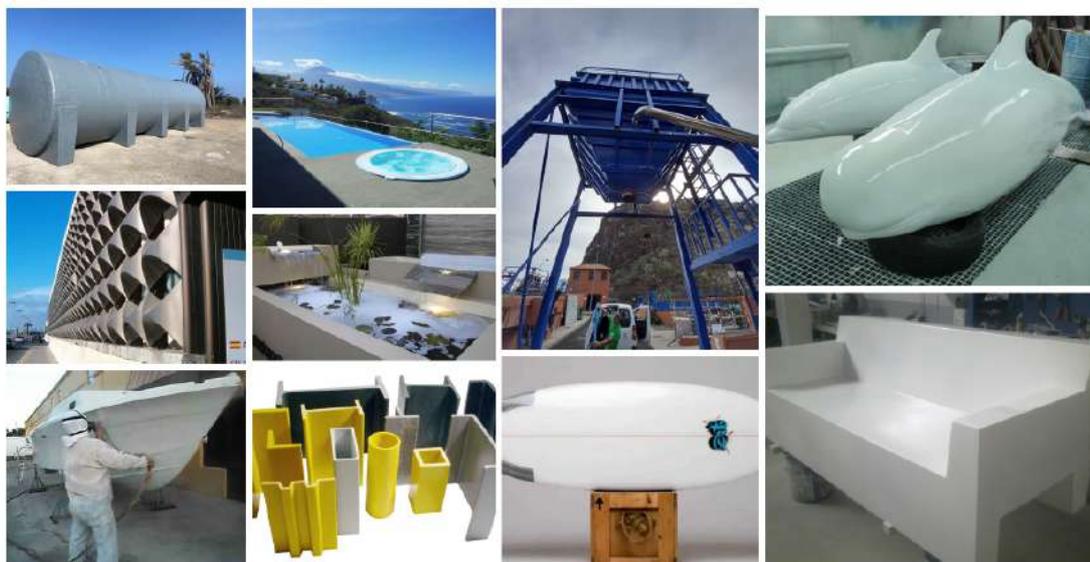


Ilustración 5. Aplicaciones actuales del PRFV. Fuente: [5]

5.3 Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)

La unión del poliéster con fibra de vidrio (PRFV) es uno de los materiales compuestos más utilizados, donde la resina de poliéster aporta resistencia química mientras que la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional y la resistencia al calor, la aporta la fibra. Es un material de baja tecnología de fabricación, de gran durabilidad, resistencia a la humedad y no es conductor de electricidad. En la actualidad el PRFV se utiliza en diferentes sectores industriales, como en aviación y en el sector aeroespacial, en la industria automotriz, en la náutica, en electrónica, en medicina, etc.

El PRFV se compone de:

- Una capa interior o de barrera que proporciona la resistencia ante el producto que va a contener la pieza, una estanqueidad absoluta y una baja rugosidad para disminuir las pérdidas de carga. Esta capa irá constituida por resinas de poliéster isoftálica utilizada con una capa de tejido de fibra de vidrio de alto gramaje 450gr/m².
- Capa estructural que aporta las características de resistencia mecánica. Está constituida por resinas de poliéster ortoftálica, capas de fibra de vidrio de 450gr/m² y tejido complejo de fibra de vidrio roving 500 + Mat 450gr/m².
- Capa externa que se compone Gelcoat Viniléster para aportar la protección necesaria frente a productos químicos, intemperie, humedad o cualquier agresión del entorno (abrasión, corrosión, acción de la radiación UV y cambios de temperaturas).

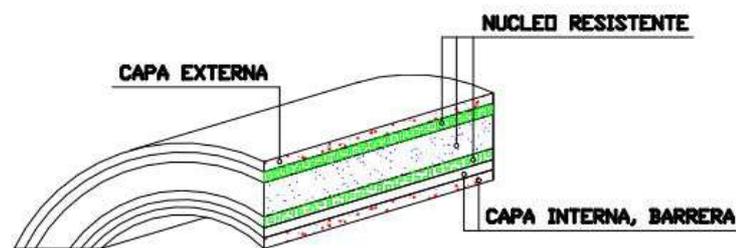


Ilustración 6. Composición del PRFV.

5.3.1 *Fibra de vidrio*

La fibra de vidrio se consigue calentando vidrio hasta fundirlo, para posteriormente, hacerlo pasar por unos finos orificios y conseguir filamentos delgados de vidrio. Estos filamentos se impregnan con un cubrimiento químico que le da la propiedad a la fibra para adherirse a otro material. Esta fibra se enrolla en un tambor para formar una bobina o carrete que se entrelaza y se forma una malla [6].

Sus propiedades son:

- **Bajo mantenimiento** gracias a sus características intrínsecas
- **Versatilidad** por la amplia gama de tamaños, filamentos, tipos de fibra, etc.
- **Buen aislante térmico** por su bajo coeficiente de expansión térmica y conductividad relativamente alta, provocando que el calor se disipe rápidamente.
- La fibra de vidrio es un material **económico** frente a otro tipo de tejidos
- No conduce la electricidad, por lo que es buen **aislante eléctrico**
- Tiene un peso específico inferior, haciendo que sea un **material ligero**

Las clases de fibra de vidrio que podemos encontrar son:

- **Tipo E:** es el tipo de fibra más empleado, destaca por sus características dieléctricas y es utilizada para el refuerzo de *composites*.
- **Tipo R:** posee buenas propiedades mecánicas que la hacen idónea para los sectores de aviación, espacial y armamento.
- **Tipo D:** Se utiliza en radares y ventanas electromagnéticas por su poder dieléctrico.
- **Tipo AR:** Destaca por su resistencia a los álcalis debido a su alto contenido en óxido de circonio.
- **Tipo C:** Se distingue por su alta resistencia a agentes químicos.

Además, podemos encontrarnos la fibra de vidrio en el mercado en diferentes formas:

- **Cintas:** para refuerzos estructurales locales, empleando resinas de tipo termoestable.

1. MEMORIA



Ilustración 7. Cinta de Fibra. Fuente: [7]

- **Mantas de fibra de vidrio (MAT):** Es el más utilizado en laminados de PRFV.



Ilustración 8. Manta de fibra de vidrio MAT [7]

- **Multiaxiales:** pueden ser biaxiales, formado por dos capas de tejido unidireccional orientadas a $+45^\circ$ y a -45° , respectivamente. Se utiliza para procesos de contacto a mano, infusión e inyección o RTM. Pueden ser de tejido de fibra de vidrio cuatriaxial donde existen cuatro capas de tejido unidireccional orientadas a 0° , $+45^\circ$, 90° y -45° ; y triaxial formado por tres capas de tejido unidireccional.



Ilustración 9. Fibra multiaxial [7]

- **Tejidos de fibra de vidrio (WOVEN ROVING):** Para laminados que precisen mayor resistencia a la tracción: piezas de gran tamaño y con refuerzo estructural de altas prestaciones.



Ilustración 10. Tejido de Vidrio Roving [7]

- **Filamentos de fibra de vidrio (ROVING):** Para el refuerzo de capas de tejido de vidrio.



Ilustración 11. Fibra de vidrio compuesta [7]

- **Velos:** Para amortiguamiento entre el *gelcoat* y las capas de refuerzo o para refuerzo del *gelcoat*.



Ilustración 12. Velo [7]

1. MEMORIA

5.3.2 Resina de poliéster

La resina de poliéster es una resina de polímero insaturado termoendurecible, que surge al policondensar un diácido con un dialcohol y un monómero insaturado(estireno) [8]

Las resinas de poliéster son termoestables, por tanto, son maleables hasta el momento en el que se calientan, pero esta propiedad les hace ser sensibles al agrietamiento si se le aplica una mayor presión. Asimismo, tienen gran resistencia a agentes químicos, a la tracción, a la torsión, al agua y a los rayos UV. Esto les hace ser un material utilizado en numerosas aplicaciones, desde refuerzo hasta su empleo en la creación de piezas en moldes, utilizándose conjuntamente con la fibra de vidrio. Aunque este producto también es compatible con otros materiales, como el hierro, vidrio, hormigón o madera, lo que permite su aprovechamiento para capas de recubrimiento final.

Existen varios tipos:

- Resinas de poliéster isoftálica: Poseen gran resistencia al agua y a agentes químicos. Además, son más viscosas, poseen mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia al impacto, que las ortoftálicas.
- Resinas de poliéster ortoftálica: Son más rígidas y con tiempos de gelificación más largos que la anterior.

Tiene varias aplicaciones como puede ser la creación de piezas en moldes, como depósitos de agua, aplicaciones como material de refuerzo al aplicarlo con fibra de vidrio, impermeabilización y revestimientos, etc



Ilustración 13. Resina de poliéster

5.3.3 *Aceleradores*

Normalmente las resinas se venden ya mezcladas con este producto, principalmente los que son a base cobalto, cuyo fin es el de reducir el tiempo de solidificación de la resina y endurecerla. Asimismo, este producto interviene en el color y en el aspecto que tendrá la pieza una vez terminada.



Ilustración 14. Acelerador de cobalto

5.3.4 *Catalizadores*

Los catalizadores son aquellos productos destinados a las resinas de poliéster insaturado, utilizado en aplicaciones industriales, con el fin de que estas solidifiquen. Su principal función es la del endurecimiento de la resina, acelerando el proceso de curado, siendo más rápido cuanto mayor sea la cantidad de catalizador. Suelen ser peróxidos orgánicos, dado que los catalizadores puros son inestables químicamente y pueden llegar a descomponerse con riesgo de explosión. El más utilizado es el Peróxido de Metil Etil Cetona, conocido comercialmente como MEK. [9]

Para que la pieza final se ajuste a las condiciones finales determinadas, se debe definir un porcentaje de endurecimiento apropiado para la misma (suele oscilar entre un 1% y un 4%). Si la cantidad de endurecedor es mayor, la pieza final es más frágil que disminuyendo la cantidad, quedando más flexible.

5.3.5 *Gelcoat*

El *gelcoat* es un material utilizado para las superficies de los laminados de PRFV con los objetivos de proteger la pieza contra efectos de intemperie y humedad, y otorgar a la

1. MEMORIA

pieza final el acabado deseado (color, textura lisa y brillo), además de servir como base de pinturas.

Normalmente se utiliza sobre la superficie de los moldes, por lo que nos dará las características superficiales del mismo. Se utiliza en varios sectores por sus características resistentes, como en la industria del automóvil, de la construcción, en decoración, en parques temáticos, etc.



Ilustración 15. Gel Coat [10]

5.4 Características del PRFV

Las características principales son [11]:

- Facilidad de manejo y versatilidad en el diseño: muy fácil de moldear y fabricar, dando posibilidades infinitas en cuanto a diseño.
- Ligereza: peso inferior al acero y a otros metales.
- Buena resistencia a la corrosión y humedad.
- Resistencia específica alta dado a su peso específico de $1.8\text{kg}/\text{dm}^3$.
- Inerte a gran cantidad de compuestos por sus propiedades mecánicas.
- Resistencia a tracción del material de los $500\text{ kg}/\text{cm}^2$ con vidrio proyectado, hasta los $10000\text{ kg}/\text{cm}^2$ con vidrio unidireccional.
- La resina del poliéster reforzado con fibra de vidrio hará que soporte más o menos temperaturas extremas.
- El laminado del PRFV tiene varias formas de crearse, se puede crear con una o varias mallas superpuestas en una única dirección o colocadas de forma perpendicular, dependiendo de la función exacta que vaya a tener el poliéster reforzado con fibra de vidrio.

- Durabilidad/calidad: la vida útil de las piezas fabricadas con este material es mayor que con piezas fabricadas con otro tipo de material.
- Aislante eléctrico y térmico.

5.5 Proceso de fabricación

Existen varios procesos de fabricación utilizados para compuestos de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV): Moldeo por proyección, moldeo por contacto, Moldeo por inyección, Pultrusión, etc. Para la fabricación del tanque de estudio, se utiliza el método de moldeo por contacto (Hand Lay-UP). Este proceso implica la aplicación manual de capas sucesivas de resina de poliéster y refuerzo de fibra de vidrio sobre un molde. Se utiliza una brocha o rodillo para impregnar las fibras con resina y se aplica presión manual para eliminar las burbujas de aire.



Ilustración 16. Moldeo por contacto. Fuente: [13]

El detalle del proceso de fabricación de este recipiente se aporta en el Anexo. Los pasos habituales que se siguen para su fabricación, en el caso de un depósito cilíndrico, son:

1. Se prepara un molde según las características del tanque. Normalmente se fabrica con listones y chapas de madera, aunque pueden existir moldes fabricados de este mismo material con unas medidas estándar.

1. MEMORIA

2. Se funde una plancha con una capa del laminado que se va a utilizar para luego embobinarla en el molde de madera. Los materiales que se utilizan dependen del líquido a contener, las características del entorno, etc. La resina, normalmente ya acelerada, se mezcla con el catalizador en la proporción adecuada según las especificaciones del fabricante, impregnándose sobre la fibra de vidrio mediante rodillos.
3. Se embobina la plancha al molde.
4. Se añaden el resto de las capas hasta llegar a un espesor determinado. Para ello se utiliza el mismo procedimiento, aplicando la resina sobre la fibra de vidrio mediante rodillos sobre el embobinado.
5. Se fabrican las tapas y soportes con la misma técnica, fundiendo sobre moldes previamente fabricados.
6. Se sueldan las tapas y soportes al cuerpo del depósito con la misma técnica y material.
7. Se cura la pieza para que el material solidifique. Este paso depende del tiempo y la resina utilizada, así como del uso de aditivos.
8. Se desmoldea la pieza.
9. Se realiza un acabado final: recorte de bordes, lijado, inspección de calidad, pintado, etc.

Es importante tener en cuenta la técnica de fabricación a la hora de simular el recipiente en el programa, ya que el moldeo manual del PRFV resulta complejo a la hora de trasladarlo al simulador por varias razones: por un lado, los espesores varían en cada zona del equipo, además no es seguro que los espesores teóricos (que serán la suma de las capas añadidas) coincidan los reales, ya que el proceso de fabricación depende de la experiencia y el buen trabajo del laminador. Además, las propiedades del laminado no se encuentran bien definidas, ya que varían según el tipo de material, la calidad y del mismo proceso de fabricación.

Para hacer la simulación lo más real posible, se modela el recipiente con superficies y se le aplica a cada una, su espesor correspondiente. Mientras que, las propiedades del laminado se calculan de la forma más precisa posible, como se muestra en el apartado 7.1.

6. DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO

Los depósitos fabricados en PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio) son ampliamente utilizados para el almacenamiento de líquidos en diversas industrias debido a sus propiedades y ventajas. Los depósitos pueden fabricarse de diferentes formas y para diferentes posiciones, la elección del tipo de tanque dependerá de los requisitos específicos de su aplicación, incluyendo el tipo de líquido, el espacio disponible, las condiciones de operación y los estándares/regulaciones aplicables.

En el caso de estudio, se diseña un depósito cilíndrico horizontal con cuatro soportes para contener y almacenar agua, como se muestra en la Ilustración 22. Estos equipos están formados por un cuerpo cilíndrico horizontal con forma tubular y con cabezales planos, toriesféricos o esféricos en sus extremos, aportando gran capacidad de almacenamiento y adaptabilidad a diferentes entornos. Suelen tener una abertura en la parte superior tanto para el llenado y vaciado, como para el acceso de personas a su interior. Los soportes se colocan de forma equidistante en la parte inferior del depósito para asegurar su estabilidad.

El equipo de estudio es un depósito cilíndrico horizontal de 30.000l de volumen para colocación en superficie compuesto de cuatro soportes, cabezales toriesféricos y boca de hombre para el acceso a su interior. El tanque tiene un largo de 6480mm y un diámetro de 2500mm, mientras que los soportes tienen una altura de 1250mm y un ancho de 400mm, como se muestran en la Ilustración 23.

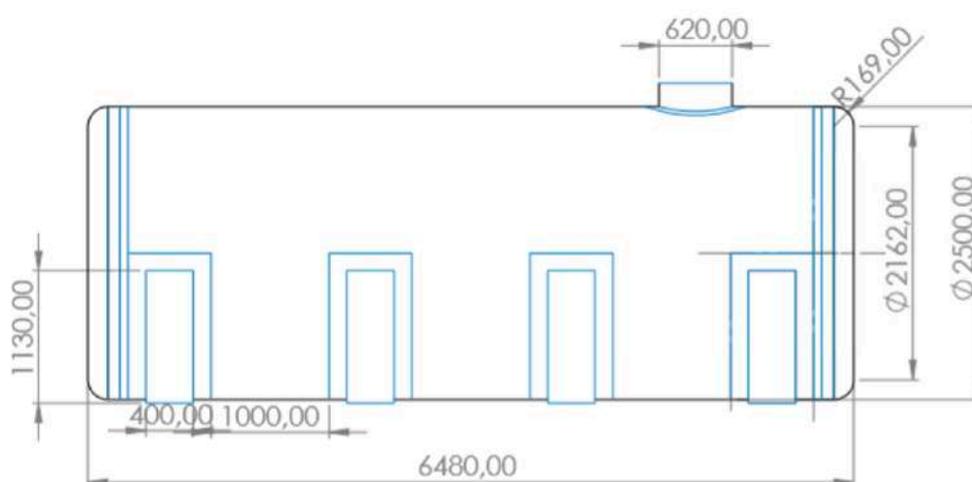


Ilustración 17. Dimensiones del depósito de estudio. Fuente: elaboración propia

6.1 Características

Las principales características del depósito son las siguientes:

- **Configuración**
 - Depósito cilíndrico horizontal
 - Cabezales toriesféricos tipo KLOPPER
 - Cuatro soportes para colocación en superficie
 - Boca de hombre superior 630mm
- **Dimensiones del depósito:**
 - Diámetro del depósito: 2500mm
 - Largo del depósito: 6480mm
 - Volumen útil: 30.000l
- **Dimensiones de las patas:**
 - Largo y alto: 1250mm
 - Ancho: 400mm
- **Materiales para la fabricación:**
 - Fibra Mat 450g
 - Resina de Poliéster Insaturado (Resichim 11-TA)
 - Peróxido MEKP
- **Fluido a contener:** agua no potable
- **Espesores mínimos**
 - Cilindro: 6 mm
 - Cabezales: 10 mm
 - Soldaduras: 15 mm

6.2. Cargas a soportar

El depósito debe diseñarse de tal forma que se garantice su funcionamiento de forma segura, siendo capaz de soportar tanto las siguientes cargas, como la combinación de ellas. Algunas de estas cargas son:

1. **Carga estática del contenido.** En este caso se trata de la carga hidrostática que es la presión ejercida por el agua almacenada en el depósito. La carga hidrostática

depende de la altura de la columna de agua y se distribuye de manera uniforme en las paredes y la base del depósito.

2. **Carga de viento:** El depósito debe ser capaz de resistir las fuerzas generadas por el viento. La magnitud de esta carga depende de la velocidad y dirección del viento, así como de la forma y exposición del depósito.
3. **Carga de peso propio:** Incluye el peso de los materiales de construcción del depósito, así como los accesorios y refuerzos estructurales.
4. **Cargas por efecto de vacío.**
5. **Cargas localizadas en los soportes, orejetas y otras fijaciones**
6. **Cargas aplicadas durante el transporte**

7. CARACTERÍSTICAS DEL LAMINADO

Para definir el laminado, vamos a necesitar definir sus propiedades mecánicas, así como las capas de este para conseguir el espesor de diseño.

7.1 Propiedades mecánicas del laminado

Las propiedades mecánicas de las resinas de poliéster se ven mejoradas al combinarse con fibras de vidrio, estas se obtienen cuando la resina completa el proceso de curado y endurece totalmente.

El laminado típico de PRFV, como se comentó en el apartado 5.4, se encuentra formado por una capa exterior, que protege el material de los agentes externos; una capa estructural, que posee altas propiedades mecánicas para lograr la integridad del laminado; y otra capa interior que posee las propiedades químicas y actúa como barrera química.

El laminado del PRFV es un material complejo, ya que sus propiedades dependen del tipo de refuerzo de fibra de vidrio, del ángulo de este refuerzo, del porcentaje de vidrio y de resina utilizado, de la secuencia de laminación, etc. Para hacer una aproximación de sus

1. MEMORIA

propiedades, se tienen en cuenta las propiedades del material por separado y se calculan las propiedades globales con el porcentaje de fibra y el porcentaje de resina utilizado.

Las propiedades de la resina utilizada son:

Propiedades y constantes elásticas de la resina	
Densidad	ρ_f 1200 kg/m ³
Módulo de elasticidad en tracción	E_f 3600 Mpa
Módulo de Poisson	ν_f 0,35
Módulo de corte	G_f 1333 Mpa
Límite de tracción	σ_f 4165,6 Mpa

Tabla 1. Propiedades de la resina de poliéster. Fuente: [12]

Las propiedades de la fibra de vidrio tipo E son:

Propiedades y constantes elásticas de la fibra tipo E	
Densidad	ρ_f 2580 kg/m ³
Módulo de elasticidad en tracción	E_f 72400 Mpa
Módulo de Poisson	ν_f 0,2
Módulo de corte	G_f 30167 Mpa
Límite de tracción	σ_f 58 Mpa

Propiedades y constantes elásticas de la fibra de vidrio tipo E. Fuente: [12]

Tabla 2.

Las propiedades físicas de los laminados dependen del espesor del laminado, gramaje superficial del refuerzo y las densidades de sus materiales. Para calcular el porcentaje de volumen de la fibra de vidrio y de resina se tiene en cuenta lo siguiente:

- **Porcentaje de volumen de fibra de vidrio:**

$$V_f = \frac{M_f}{V \cdot \rho_f}$$

Donde

- V_f : porcentaje en volumen de la fibra de vidrio (%)
- M_f : gramaje de la fibra de vidrio (kg/m²)
- ρ_f : densidad de la fibra de vidrio (kg/m³)

- V : volumen de 1 m² de lamina (m³)

$$V = t \cdot 1$$

- t : espesor teórico de la lamina

- **Porcentaje de volumen de resina:**

$$V_r = V_f - 1$$

Una vez tengamos los porcentajes de fibra y resina del laminado, se calculan las propiedades físicas utilizando la de cada material por su porcentaje de volumen.

- **Densidad del laminado:**

$$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_r \cdot V_r$$

$$\rho = 0,7 * \frac{1200kg}{m^3} + 0,3 * 2580 = \frac{1614kg}{m^3}$$

- **Módulo de elasticidad en tracción:**

$$E = E_f \cdot V_f + E_r \cdot V_r$$

$$E = 0,7 * 3600Mpa + 0,3 * 72400Mpa = 24240Mpa$$

- **Módulo de Poisson:**

$$v = v_f \cdot V_f + v_r \cdot V_r$$

$$v = 0,7 * 0,35 + 0,3 * 0,3 = 0,305$$

- **Módulo de corte:**

$$G = G_f \cdot V_f + G_r \cdot V_r$$

1. MEMORIA

$$0,7 * 1333Mpa + 0,3 * 30167Mpa = 9997,2Mpa$$

- **Límite de tracción:**

$$\sigma = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_r \cdot V_r$$

$$0,7 * 58Mpa + 0,3 * 4165,6Mpa = 1290,3Mpa$$

Por lo que las propiedades finales del laminado nos quedan:

Propiedades y constantes elásticas de laminado fibra tipo E + resina de poliéster		
Densidad	ρ_f	1614 kg/m ³
Módulo de elasticidad en tracción	E_f	24240 Mpa
Módulo de Poisson	ν_f	0,305
Módulo de corte	G_f	9997,2 Mpa
Límite de tracción	σ_f	1290,3 Mpa

Ilustración 18. Propiedades y constantes elásticas del laminado

7.2 Espesor del laminado

Es importante tener en cuenta el espesor del depósito, ya que este es el que aporta la resistencia estructural, por lo que debe de ser capaz de resistir las cargas y presiones a las que está sometido durante su funcionamiento. Además, el espesor debe asegurar la contención del fluido que almacena en su interior y debe proteger al equipo de su deterioro prematuro.

Cada elemento del recipiente tendrá un espesor determinado, por lo que se deben tener en cuenta las capas de laminado que se van a utilizar para llegar a este. El espesor del laminado variará según el tipo de Fibra que le pongamos al mismo. En nuestro caso, utilizamos Tela Mat 450g, por lo que el laminado tiene un espesor de 1mm. Por tanto, para llegar al espesor de diseño de nuestro depósito tendríamos la siguiente cantidad de capas para cada zona:

- Cilindro: 6 capas de laminado = 6mm de espesor
- Soportes: 7 capas de laminado = 7mm de espesor
- Boca de hombre: 8 capas de laminado = 8mm de espesor

- Cabezales: 10 capas de laminado = 10mm de espesor
- Soldaduras: 6 capas de laminado = 6mm de espesor.

TIPO DE FIBRA	CAPAS	CONSUMO RESINA	ESPESOR mm
VELO 30	1	300 gr/m ²	0,2 mm
MAT 225	1	550 gr/m ²	0,7 mm
MAT 300	1	700 gr/m ²	0,9 mm
MAT 450	1	900 gr/m ²	1 mm
TEJIDO 300	1	550 gr/m ²	1 mm
TEJIDO 500	1	900 gr/m ²	1,2 mm
TEJIDO 800	1	1300 gr/m ²	1,5 mm

Ilustración 19. Espesores según tipo de fibra empleada

8. PROGRAMA DE CÁLCULO

Para el diseño del depósito se hace uso del SolidWorks, un software de diseño y modelado 3D que ofrece una amplia gama de herramientas y capacidades avanzadas para diseñar y simular componentes y ensamblajes de forma precisa y eficiente. Para el diseño de un depósito o tanque de agua, SolidWorks, ofrece la posibilidad de diseñar el equipo y de realizar distintos análisis estructurales, pudiendo añadir diferentes cargas, verificar distintas situaciones, variar espesores, añadir refuerzos, etc. Por tanto, nos permite evaluar la resistencia y la integridad del depósito ante diferentes condiciones de carga, y actuar según los resultados obtenidos.

8.1. Diseño del equipo

Para el diseño del equipo en SolidWorks se han tenido en cuenta las características y dimensiones asumidas en el proyecto. Como varían los espesores en los distintos elementos, se diseña el recipiente a través de distintas superficies, de tal forma que podamos variar los mismos. Los pasos para realizar el tanque en el programa se muestran en el Anexo del documento. El resultado final del modelado 3D ha sido el que se muestra en la Ilustración 52.

1. MEMORIA

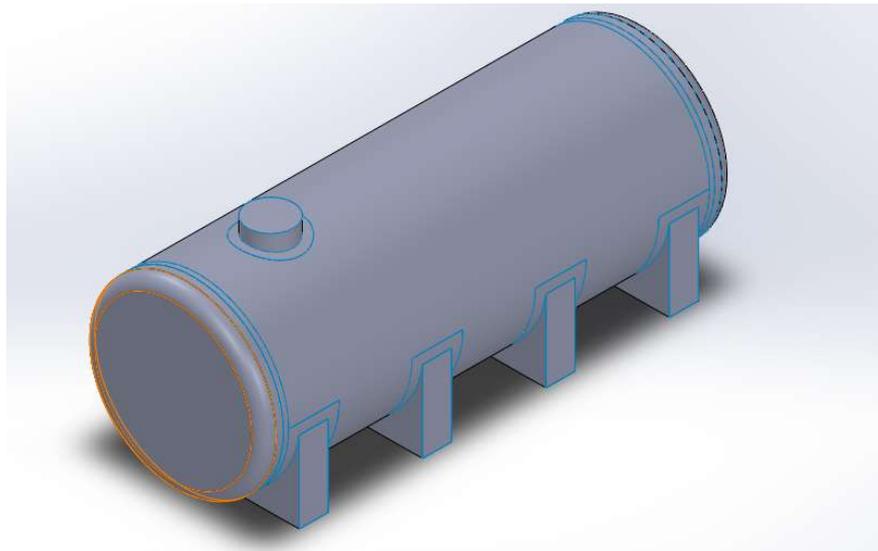


Ilustración 20. Resultado final del depósito

8.2. Simulación de las distintas situaciones

Tras el diseño del depósito en el apartado de modelado del SolidWorks, se somete a este a distintas situaciones de diseño. Según la norma UNE-EN 13121-3, estas situaciones deben seleccionarse teniendo en cuenta las circunstancias bajo las cuales el depósito debe cumplir su función, seleccionado aquellas que sean lo suficientemente severas y variadas para englobar todas las condiciones que se pueden producir durante la realización y el uso del depósito. Las situaciones que se han considerado son las siguientes:

1. **Presión hidrostática:** se calcula la presión ejercida por el agua almacenada en el depósito y se analiza junto con la carga del peso propio del equipo, sobre sus paredes. La carga hidrostática depende de la altura de la columna de agua y se calcula multiplicando esta por el peso específico del agua. En el análisis, se coge la altura más desfavorable, para tener la mayor carga posible, la cual coincide con el llenado del depósito hasta el tope de la boca de hombre.
2. **Prueba hidráulica:** La norma de los tanques y depósitos aéreos fabricados con PRFV, nos dice que, los depósitos sometidos a presión deben someterse a un ensayo de presión hidráulica. Para ello, deben someterse a una presión igual a 1,3 veces la presión de cálculo a temperatura ambiente.

3. **Carga producida por desplazamiento de un soporte en dirección vertical:** se desplaza uno de los soportes de los extremos para verificar que soporta las tensiones producidas y que no hay grandes desplazamientos. En este caso, se realiza el desplazamiento suponiendo el tanque lleno hasta el tope de la boca de hombre, que es la situación más desfavorable.
4. **Presión del viento con el depósito vacío.** Se calcula la velocidad del viento atendiendo a la normativa correspondiente y se realiza el ensayo con el depósito vacío, teniendo en cuenta solo el peso propio del equipo. Para este apartado, también se hace un estudio de pandeo, para evaluar las paredes del depósito contra las cargas de compresión.
5. **Depósito medio lleno con presión de vacío en el interior.** Se estudia el depósito con agua hasta una altura de 1m y se simula que se conecta a una salida de agua sin una apertura superior para permitir la entrada de aire, lo que genera una disminución de presión, creando presión de vacío en el interior.
6. **Cargas producidas por el transporte del depósito:** se añaden unos refuerzos al depósito que contienen orejetas de elevación y se simulará el efecto que provoca el levantamiento del mismo a través de las eslingas que se conectan a las orejetas.

En todos estos casos, se pretende determinar la capacidad del depósito para tener:

1. **Estabilidad estructural:** se espera que el equipo mantenga su integridad estructural bajo la carga de presión interna sin deformaciones plásticas o fallas catastróficas.
2. **Resistencia a la tensión y deformación:** Se busca determinar si el material del depósito es lo suficientemente resistente para soportar las tensiones generadas por la presión interna. Se verifica que las tensiones generadas no excedan los límites de resistencia del material multiplicado por un factor de seguridad.
3. **Estabilidad frente a desplazamientos:** Se evalúa la capacidad del depósito para resistir desplazamientos y deformaciones debido a la presión interna.

Para comenzar con las simulaciones, lo primero que se ha realizado es la creación de un nuevo material en la biblioteca del programa, ya que no se encontraban las propiedades del poliéster reforzado con fibra de vidrio. Estas han sido calculadas como se menciona en el

1. MEMORIA

apartado 7.1 del presente documento, multiplicando las propiedades de cada elemento por separado, por el porcentaje en peso que tienen en el compuesto. Este material se considera isotrópico ya que, al estar compuesto por fibras colocadas aleatoriamente en el tejido, se considera que tendrá las mismas propiedades en todas sus direcciones.

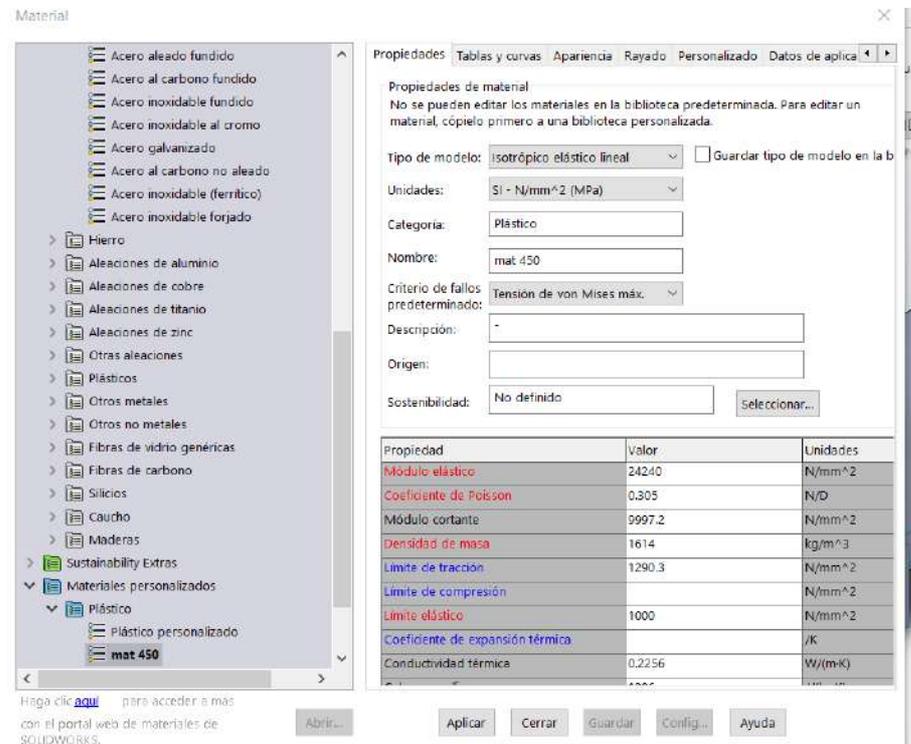


Ilustración 21. Propiedades de laminado MAT 450g con resina de poliéster ortoftálica

Como se calculó en el apartado 7.1 el límite de tracción es de 1290,3 N/mm². Para verificar que el depósito va a soportar las tensiones máximas que se van a producir las zonas más desfavorables, para las distintas situaciones de estudio, se multiplica el valor del límite de tracción por un factor de seguridad de 0,5. Por lo que las tensiones máximas permitidas al realizar los análisis deben ser inferiores a:

$$\text{Límite tracción de estudio} = \text{límite tracción del material} * 0,5 = 1290 * 0,5 = 645 \text{ N/mm}^2$$

Teniendo en cuenta, lo comentado anteriormente, se procede a realizar los estudios de las diferentes situaciones, así como los cálculos necesarios en cada una.

8.2.1 Presión hidrostática

La presión hidrostática es una de las acciones que más afectan al depósito, tanto en tensión como en deformación. La carga hidrostática depende de la altura de la columna de agua y se calcula multiplicando la altura por la densidad del agua. Esta carga se distribuye de manera uniforme en las paredes y la base del depósito. El cálculo es el siguiente:

$$Ph = \rho_{liq} \cdot g \cdot H_{liq}$$

Donde:

- Ph : presión hidroestática
- ρ_{liq} : densidad del líquido
- g : valor de la gravedad
- H_{liq} : altura del líquido

$$Ph = \frac{1000kg}{m^3} * \frac{9,8m}{s} * 2,730m = 26754N/m^2$$

Una vez calculada la carga, se inicia un nuevo estudio, se aplica el material creado (Mat 450g + resina ortoftálica) a todos los cuerpos y se añaden los distintos espesores para cada superficie. Luego, se establecen las sujeciones, para este caso son han sido:

- Sujeción fija a uno de los soportes: se pone una sujeción fija para dar estabilidad al depósito, logrando que no se mueva de su ubicación, ya que con esta condición se restringen todos los movimientos en esta superficie.
- Sujeción de rodillo en el resto de los soportes: se restringe el desplazamiento vertical de estos soportes, para simular el apoyo del recipiente en el suelo. Esto permite que se encuentren fijos al suelo pero que tengan libertad de movimiento en las direcciones no restringidas y permita la libre dilatación del recipiente.

1. MEMORIA

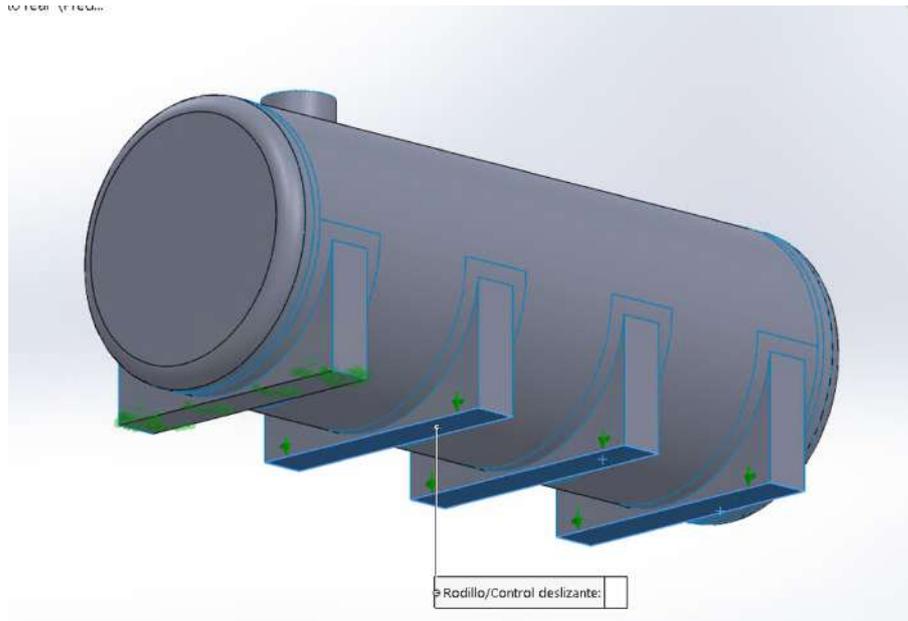


Ilustración 22. Sujeciones para estudio de presión hidrostática

Luego se añade la presión del líquido a contener, que en nuestro caso será agua, con la valor de la presión calculada anteriormente (26754 N/m²) para todas las superficies interiores del depósito que estén en contacto el líquido. Se aplica con una presión no uniforme y se sitúa en el centro del cilindro a la altura de la boca de hombre, que es la situación más desfavorable, introduciendo la siguiente expresión:

$$f = 1 - \left(\left(\frac{1}{h} \right) * ("z") \right) = 1 - \left(\left(\frac{1}{2730} \right) * ("z") \right)$$

Se añade la carga del peso propio del recipiente, a través de la gravedad en el centro del cilindro (9,81m/s²).

Se crea una malla fina basada en curvatura para que obtener resultados más precisos teniendo en cuenta las características geométricas y el comportamiento de la estructura en zonas con curvas.

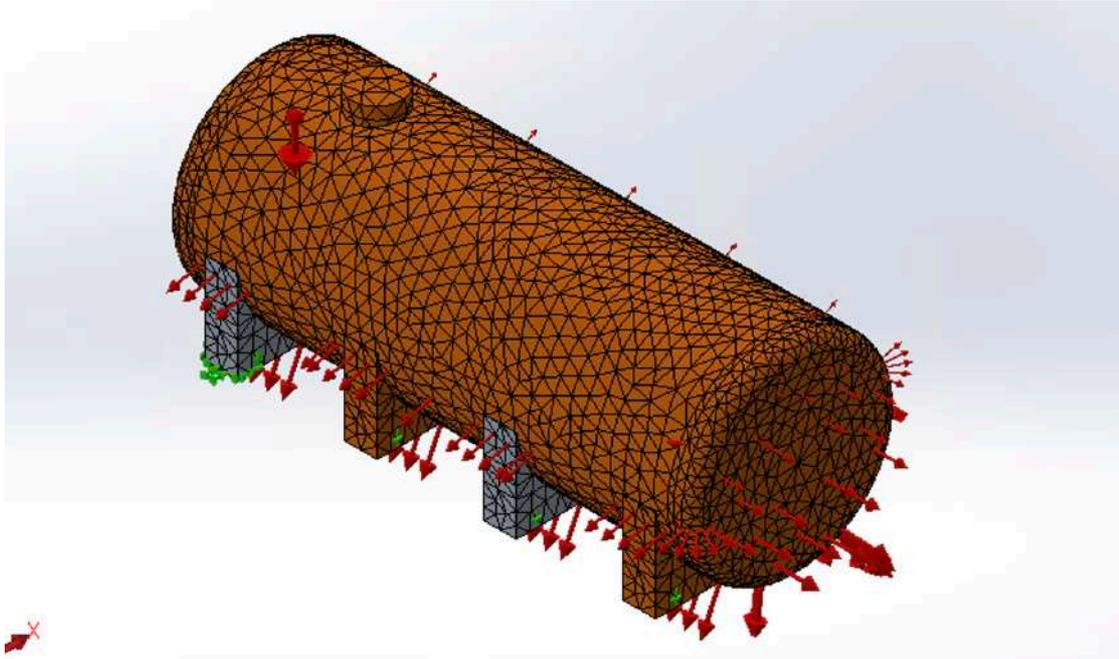


Ilustración 23. Mallado del depósito – carga hidrostática

Ejecutamos el estudio, obteniendo los siguientes resultados:

a. Tensión de Von Mises (Mpa)

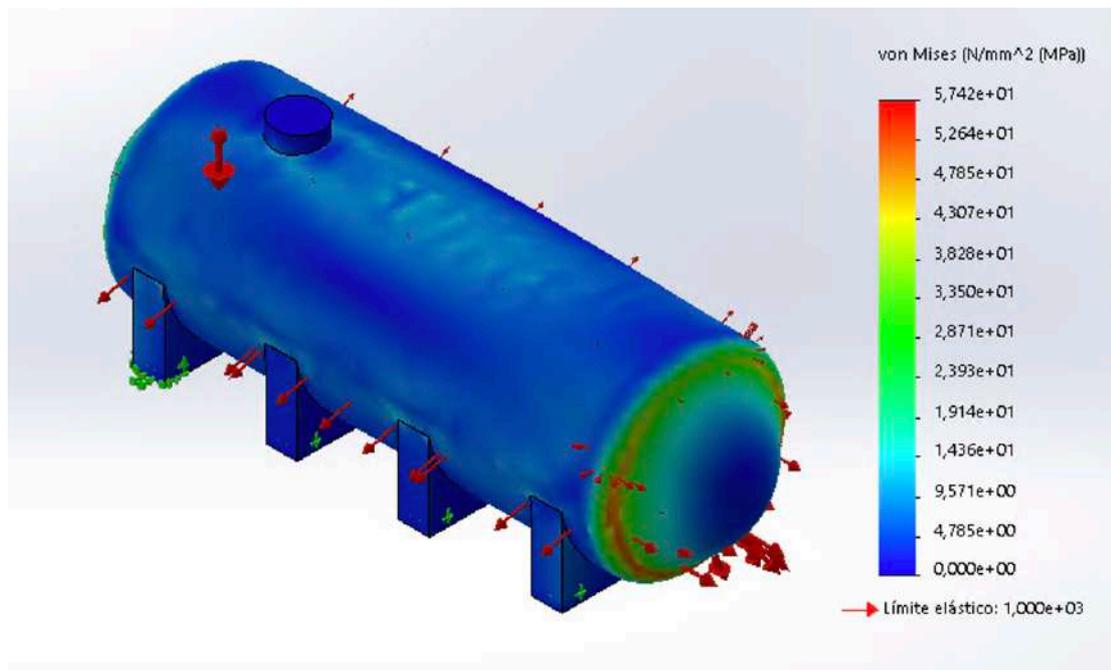


Ilustración 24. Tensiones de Von Mises para presión hidrostática

1. MEMORIA

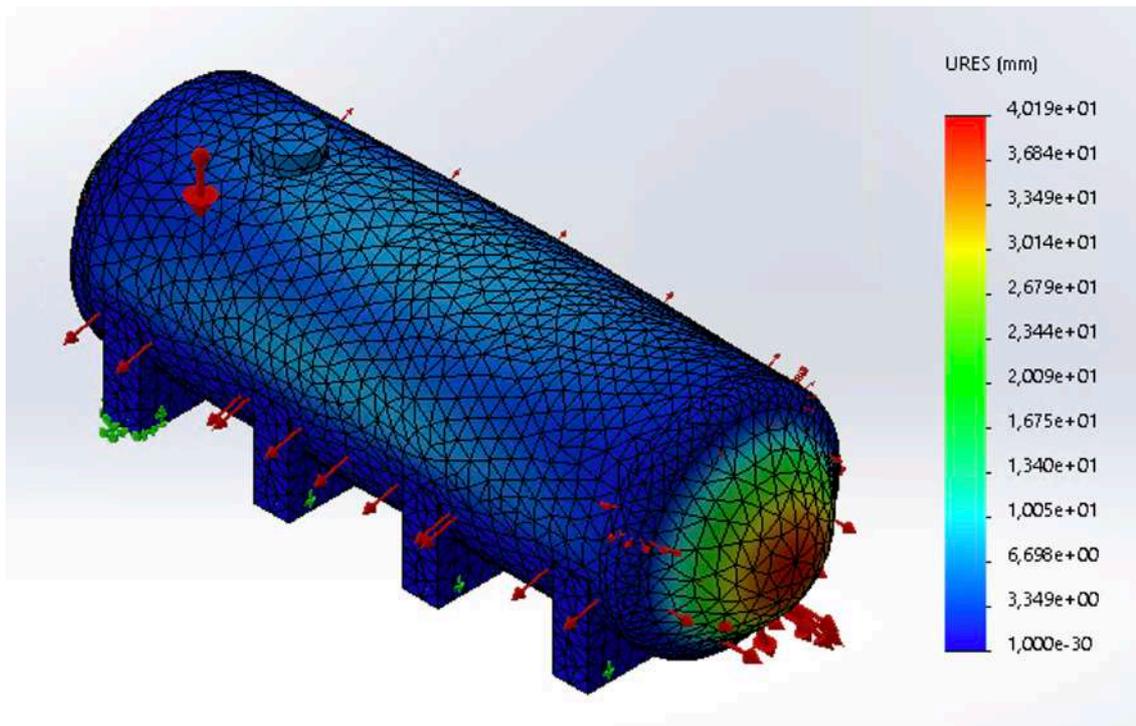
b. Desplazamientos (mm)

Ilustración 25. Desplazamientos para presión hidrostática

Como se observa en los resultados del estudio, la tensión de Von Mises máxima obtenida es de $57,42\text{N/mm}^2$, siendo muy inferior al límite de resistencia del material de seguridad (645N/mm^2). Sin embargo, los desplazamientos que sufre el depósito en los cabezales son muy elevados, llegando a 4 cm en la zona central de los cabezales. Por tanto, en este estudio se verifica que el depósito va a resistir las tensiones máximas que pueden llegar a darse, pero pudiendo sufrir una deformación grande en los cabezales. Para corregir esto último tendríamos que aumentar el espesor de este elemento o realizar un diseño con un cabezal esférico, ya que, por la forma de estos, se logra una distribución de tensiones más uniforme en toda la superficie y, en consecuencia, una mayor resistencia a concentración de tensiones y menores desplazamientos.

Estudio de presión hidrostática	
Tensión de Von Mises máxima	57,42 N/mm ²
Desplazamiento máximo	40,19 mm

Tabla 3. Resultado estudio de presión hidrostática

8.2.2 Prueba hidráulica

La norma UNE-EN 13121-3 nos dice que, para los depósitos sometidos a presión, debe realizarse un ensayo de presión hidráulica. Para ello, deben someterse a una presión igual a 1,3 veces la presión de cálculo a temperatura ambiente. Por tanto, variamos el valor de la presión hidrostática del caso anterior de 26754 N/m² a 34780,2 N/m². Creamos una malla y ejecutamos el estudio, obteniendo los siguientes resultados:

a. Tensión de Von Mises (Mpa)

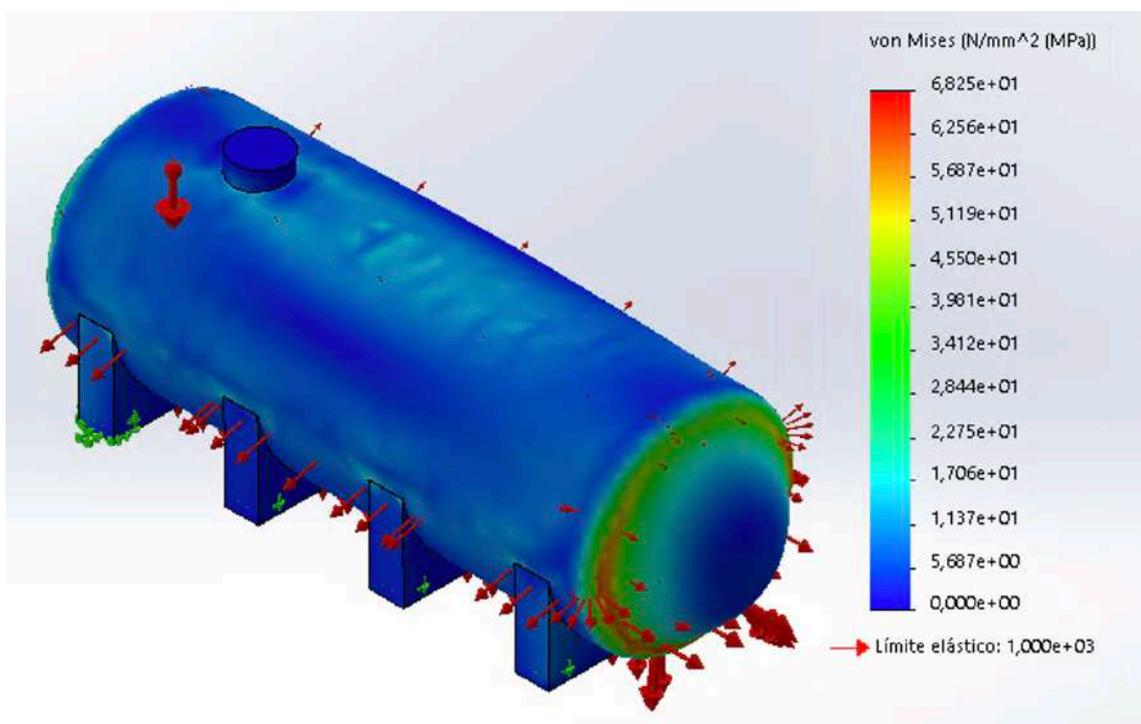


Ilustración 26. Tensión de Von Misses - Prueba hidrostática

1. MEMORIA

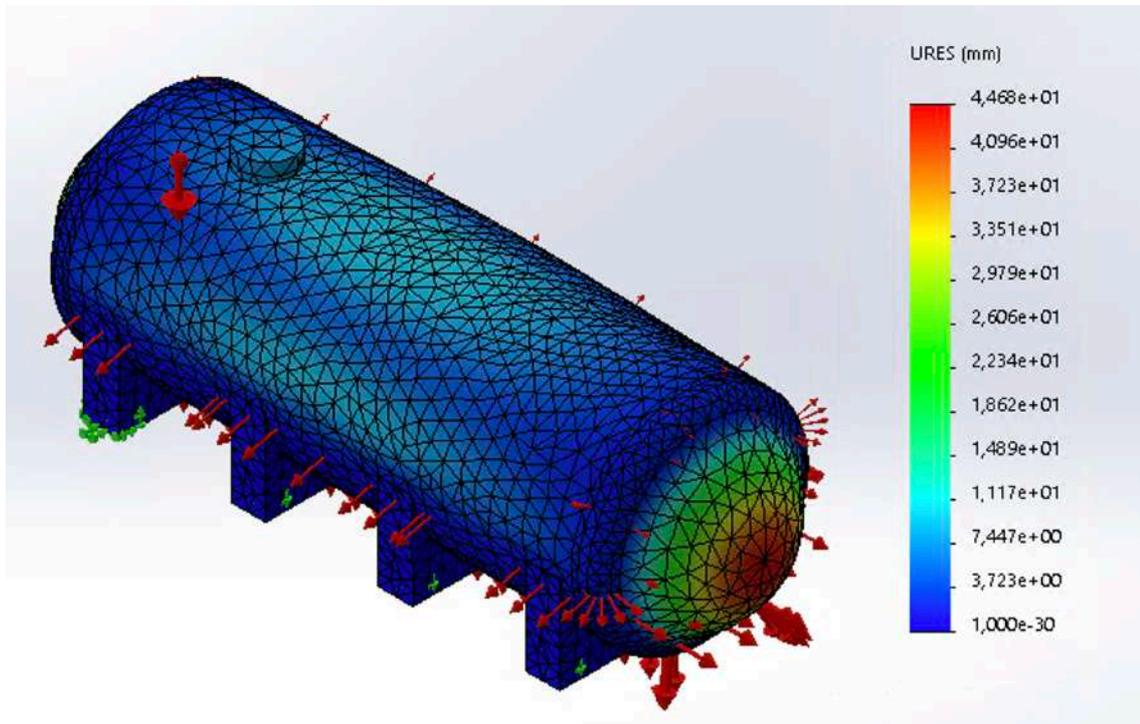
b. Desplazamientos (mm)

Ilustración 27. Desplazamientos-Ensayo hidráulico

Como se ve en las imágenes anterior y en la Tabla 4, la tensión máxima que debe soportar el recipiente es de 68,25N/mm², superior a la tensión máxima calculada en el caso anterior, pero sigue siendo inferior al límite de resistencia del material de seguridad (645N/mm²). Al igual que para el caso anterior, los desplazamientos que sufre el depósito en los cabezales son muy elevados, llegando a casi los 5 cm. La solución propuesta será la misma que la comentada en el punto anterior.

Ensayo de presión hidráulica	
Tensión de Von Mises máxima	68,25 N/mm ²
Desplazamiento máximo	44,68 mm

Tabla 4. Resultados prueba hidráulica

8.2.3 *Desplazamiento de soporte a 10mm del suelo*

En esta situación, se simula que uno de los soportes no se encuentra a la misma altura que el resto, ya sea porque el suelo no se encuentra nivelado o por fallo en fabricación del depósito. Este estudio lo realizamos aplicando las cargas hidrostáticas y la del peso propio.

Para ello, se ejecuta un nuevo estudio, se añade el material y espesores para cada superficie y se añaden las sujeciones que se muestran en la Ilustración 28.

- Se añade sujeción fija en un soporte de los extremos, sujeción de rodillo en los soportes interior, dejando el soporte del otro extremo sin restringir, ya que será el que desplazaremos.
- Se añade un “desplazamiento prescrito” en el soporte del extremo libre para realizar una traslación de 10mm en la dirección vertical.

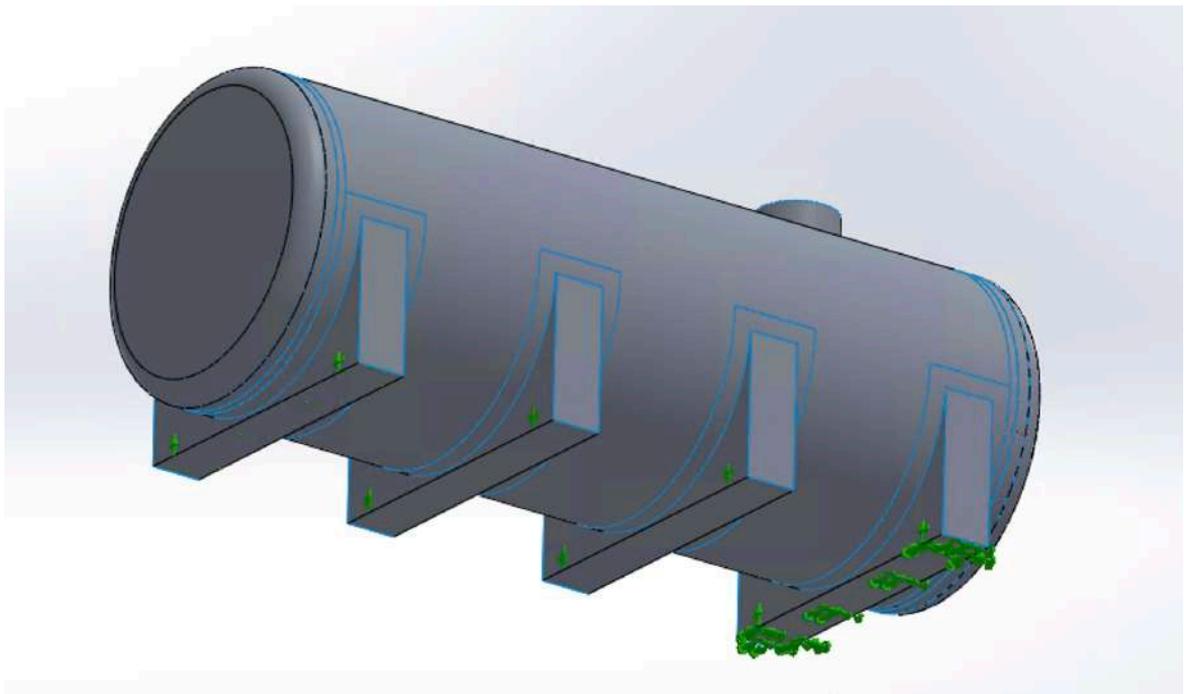


Ilustración 28. Insertar desplazamiento de soporte

1. MEMORIA

Se añaden las cargas hidrostáticas y la carga del peso propio, siendo la situación más desfavorable en la que el recipiente podría encontrarse si se diese este caso, y se crea una malla fina basada en curvatura.

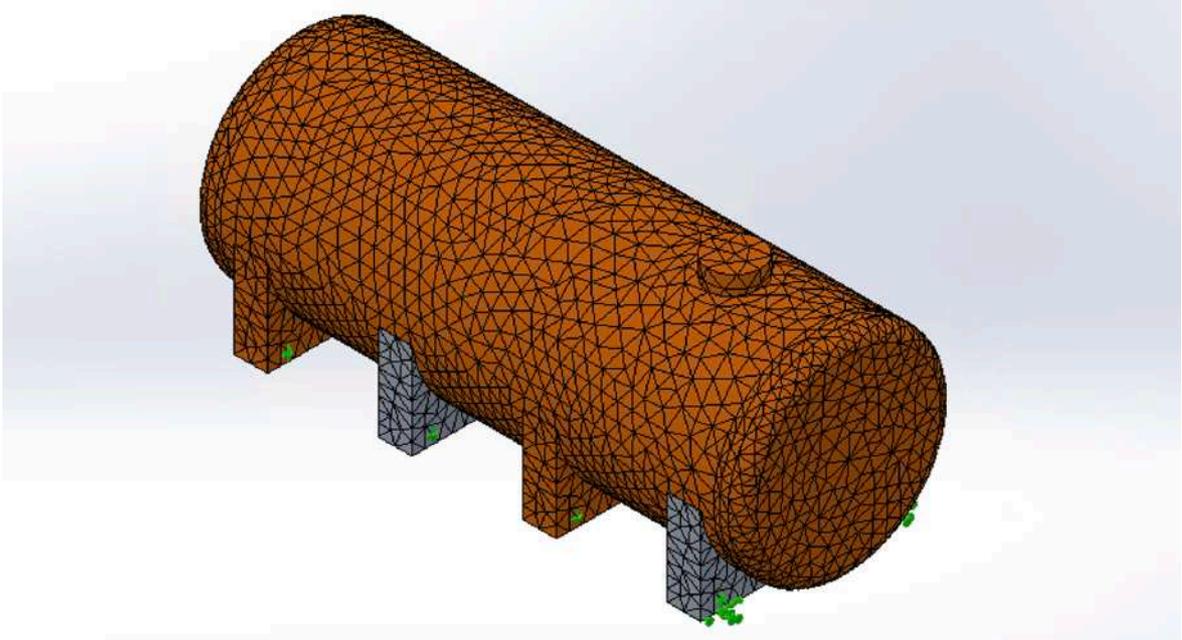


Ilustración 29. Malla carga de viento

Se ejecuta y se obtienen los siguientes resultados:

a. Tensión de Von Mises (Mpa)

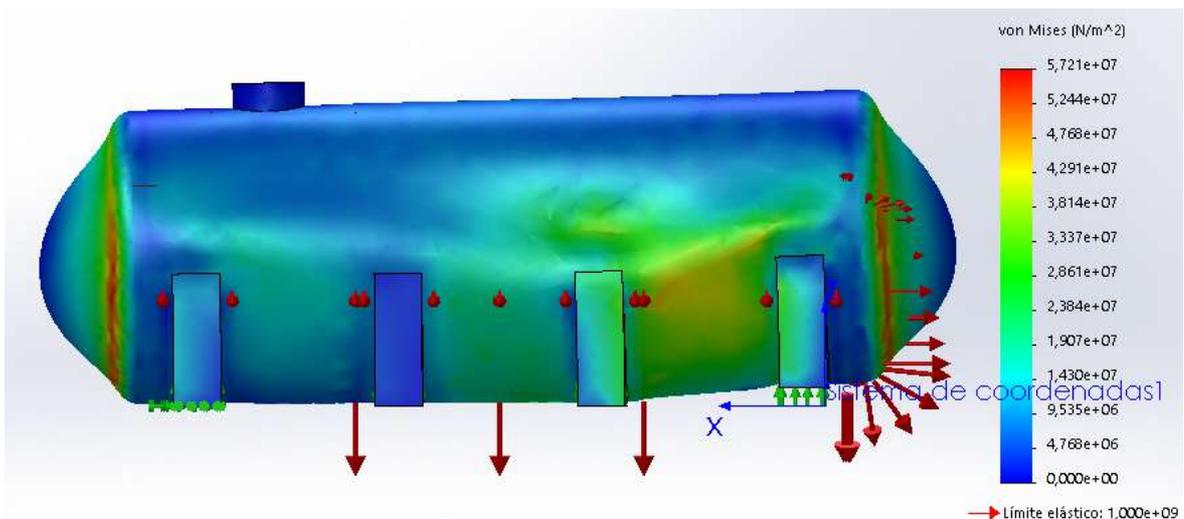


Ilustración 30. Resultado Tensión de Von Mises - Desplazamiento soporte 10mm

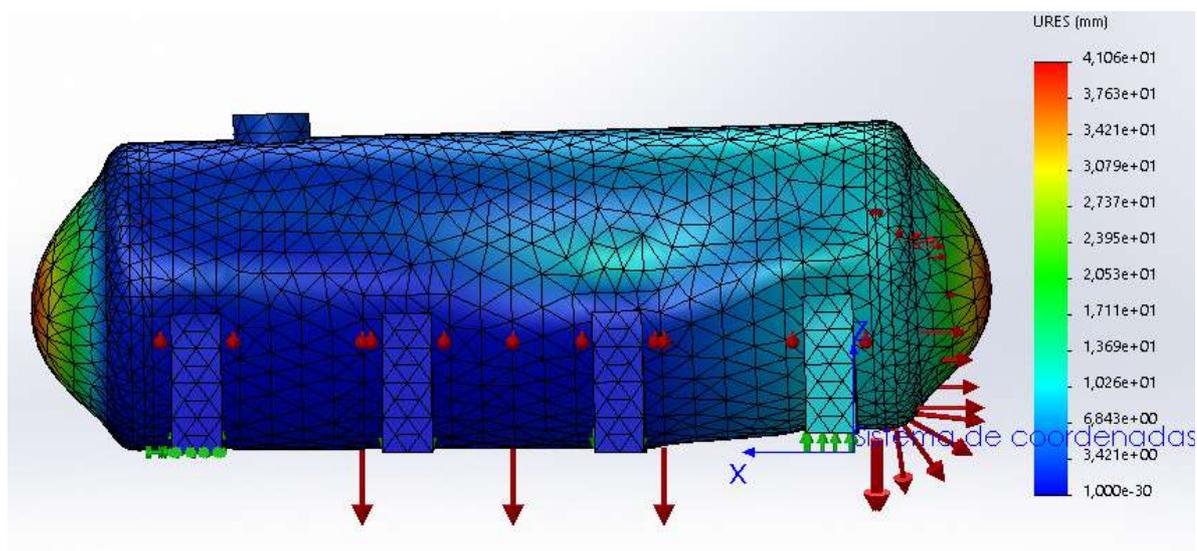
b. Desplazamientos (mm)

Ilustración 31. Resultado desplazamiento - Desplazamiento soporte 10mm

Como se observa en los resultados, el desplazamiento de uno de los soportes va a influir en las tensiones y en las deformaciones en la zona que lo rodea, sobre todo observamos un aumento de la tensión en el espacio entre este soporte y su contiguo. Sin embargo, los valores de tensión de Von Mises y de los desplazamientos máximos, los volvemos a encontrar en los cabezales del recipiente, lo que verifica el cambio de diseño que debe realizarse en estos.

Estudio desplazamiento del soporte 10mm

Tensión de Von Mises máxima	57,21 N/mm ²
Desplazamiento máximo	41,06 mm

Tabla 5. Resultados estudio desplazamiento soporte 10 mm

8.2.4 Carga de viento

El depósito debe ser capaz de resistir las fuerzas generadas por el viento. La magnitud de esta carga depende de la velocidad y dirección del viento, así como de la forma y exposición del depósito.

1. MEMORIA

Antes de realizar el estudio, debe calcularse la carga debida al viento con el Eurocódigo 1: Acciones en las estructuras, en la parte 1-4: Acciones generales – Acciones del viento (Norma UNE-EN 1991-1-4) y por la norma UNE-EN 13121-3.

Los pasos seguidos para calcular la carga de viento se muestran en el Anexo del documento, la cual nos ha dado el siguiente valor:

$$P_{wind} = 315,375 N/m^2$$

Para poder simular la carga de viento en el depósito, es necesario definir en el modelo, la superficie donde se va a aplicar dicha carga, por lo que se proyecta una línea en el modelo que me divida el recipiente en dos mitades a lo largo de su eje longitudinal, como se muestra en la Ilustración 31.

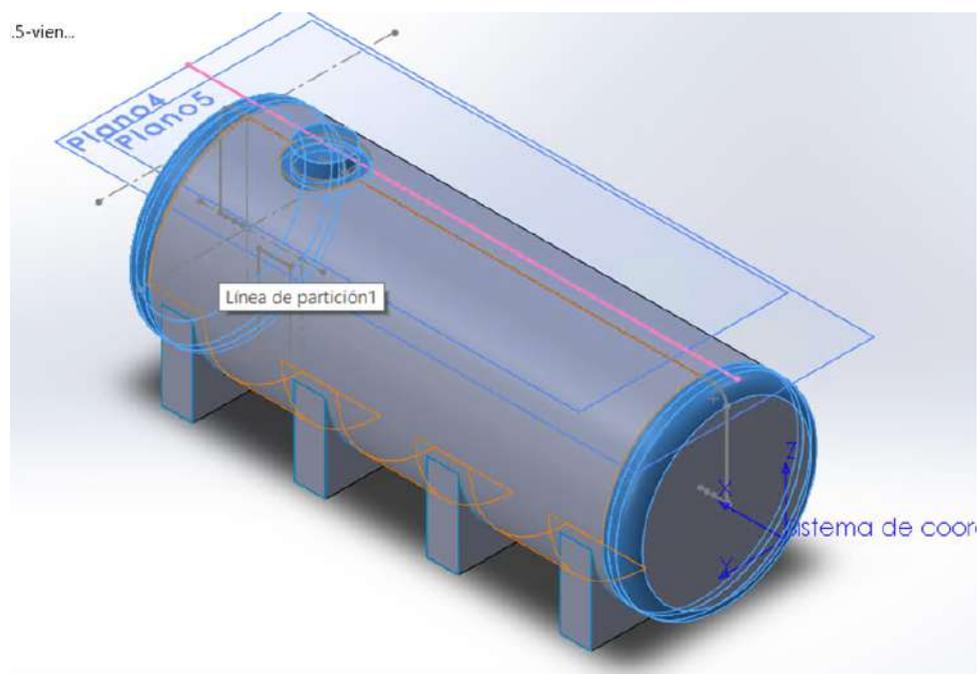


Ilustración 32. Línea de partición-carga de viento

Una vez definida la línea de partición en el modelo, se realiza un nuevo estudio estático con las siguientes sujeciones:

- Sujeción fija en uno de los soportes de los extremos

- Sujeción de rodillo con restricción en la dirección vertical y en la dirección del viento en el resto de soportes, para evitar que nos den grandes desplazamientos y porque son condiciones que pueden materializarse en el montaje.

Se añade el peso propio a través de la fuerza de la gravedad y la presión del viento calculada anteriormente, de $315,75\text{N/m}^2$, en todas las caras que vayan a estar en contacto con el:

- Superficie lateral del cilindro, parte frontal de los soportes y boca de hombre, ya que ahí la presión del viento se ejerce directamente
- Interior de los soportes, ya que el viento ejerce presión en esta zona por acumulación.

A medida que aumenta la altura del depósito sobre el suelo, la velocidad del viento varía, así como también lo hace por la rugosidad del terreno y otros factores ambientales. Sin embargo, esta variación no la tendremos en cuenta, por lo que añadiremos el mismo valor de presión en todas las superficies de contacto del depósito, obteniendo la situación más desfavorable.

Creamos malla fina basada en curvatura y ejecutamos, obteniendo los siguientes resultados:

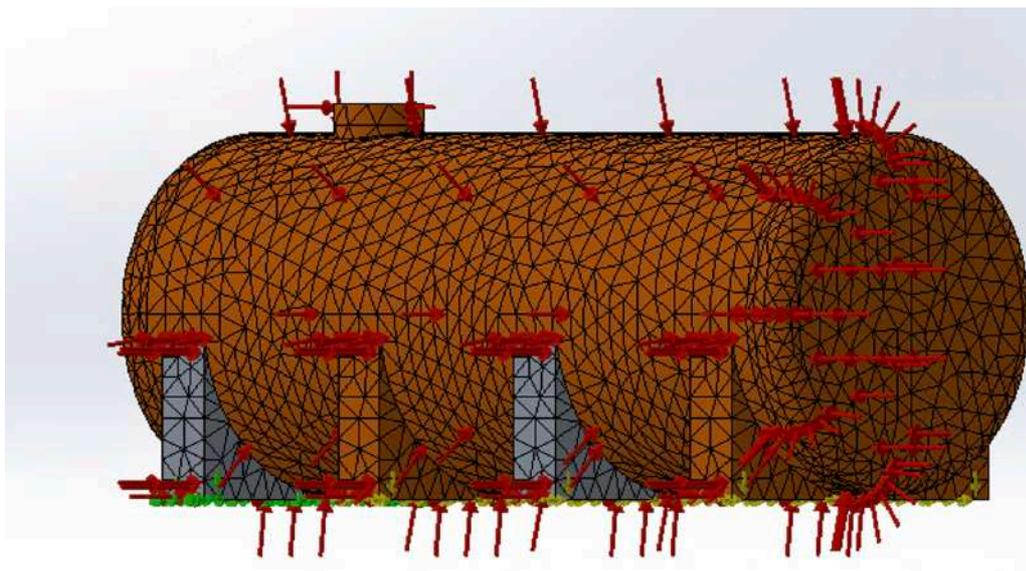


Ilustración 33. Mallado depósito - carga de viento

1. MEMORIA

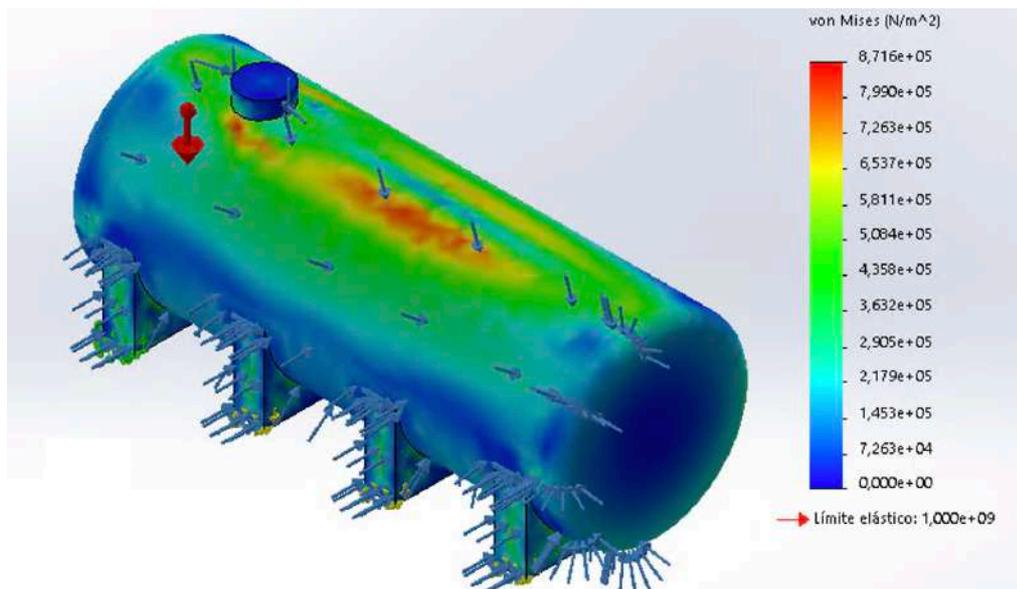
a. Tensión de Von Mises

Ilustración 34. Tensión de Von Mises - carga de viento

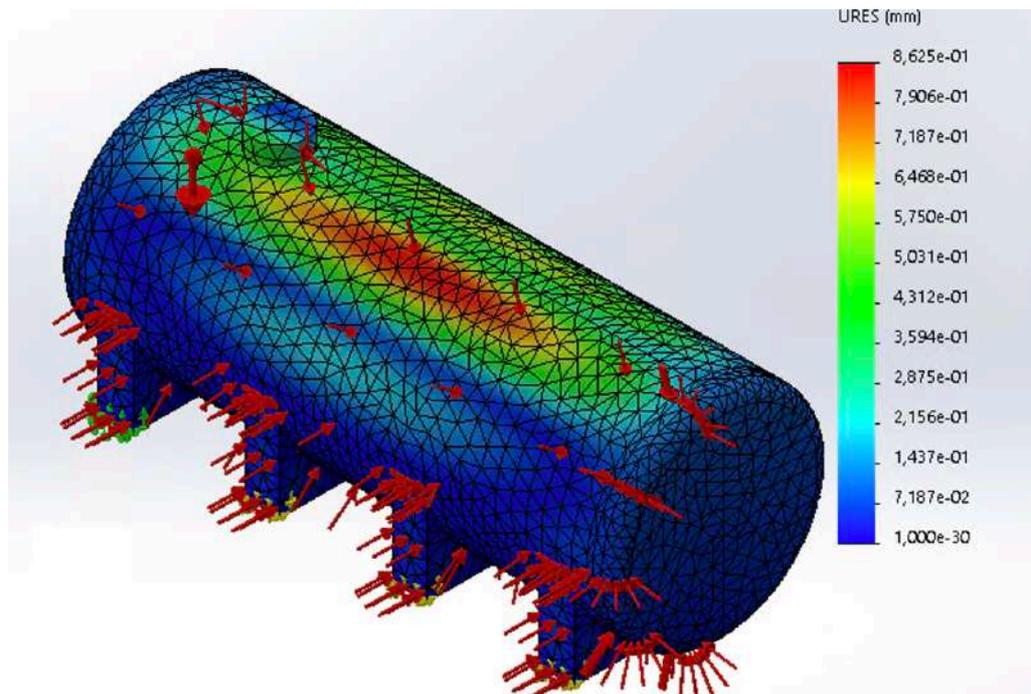
b. Desplazamientos (mm)

Ilustración 35. Resultado de desplazamiento - carga de viento

Como se observa en los resultados, la Tensión de Von Mises máxima se da en la parte superior del cilindro, así como las deformaciones máximas. Sin embargo, se observa que las cargas por el efecto del viento no van a producir problemas relevantes, ya que

DISEÑO Y ESTUDIO DE UN TANQUE DE AGUA HORIZONTAL FABRICADO EN PRFV

originan valores de tensión muy bajos en comparación con el límite de resistencia del material. Además, las deformaciones que pueden producirse son despreciables.

Estudio de carga de viento	
Tensión de Von Mises máxima	0,872 N/mm ²
Desplazamiento máximo	0,863 mm

Tabla 6. Resultados carga del viento

Para la carga de viento también se ha hecho un estudio de pandeo, ya que este efecto ocurre en estructuras delgadas que pierden su estabilidad deformándose lateralmente por cargas de compresión, como la carga de viento. Con este análisis evaluamos la capacidad de las superficies laterales del depósito para resistir las cargas de compresión y ver si no se originan grandes deformaciones o fallas por pandeo.

Para realizar este análisis se ejecuta un nuevo estudio en SolidWorks y seleccionamos “Análisis por pandeo”. Se añaden los espesores, sujeciones y mismas cargas que el caso anterior.

En este análisis se indica el número de modos que nos va a calcular el programa. El número de modos hace referencia a las formas de vibración o deformación que el modelo va a experimentar al someterse a cargas de compresión axial. Los modos representan las configuraciones más críticas que pueden ocurrir en la estructura y cada uno tienen asociada una carga crítica llamada “carga de pandeo”. Cada modo tiene un número, siendo el modo 1 la deformación más crítica, disminuyendo su valor a medida que aumenta el número de modo. Para verificar que nuestro depósito cumple a pandeo, consideramos como factor de carga mínimo admisible de 3.

Se crea la malla, se ejecuta y se ven los resultados.

1. MEMORIA

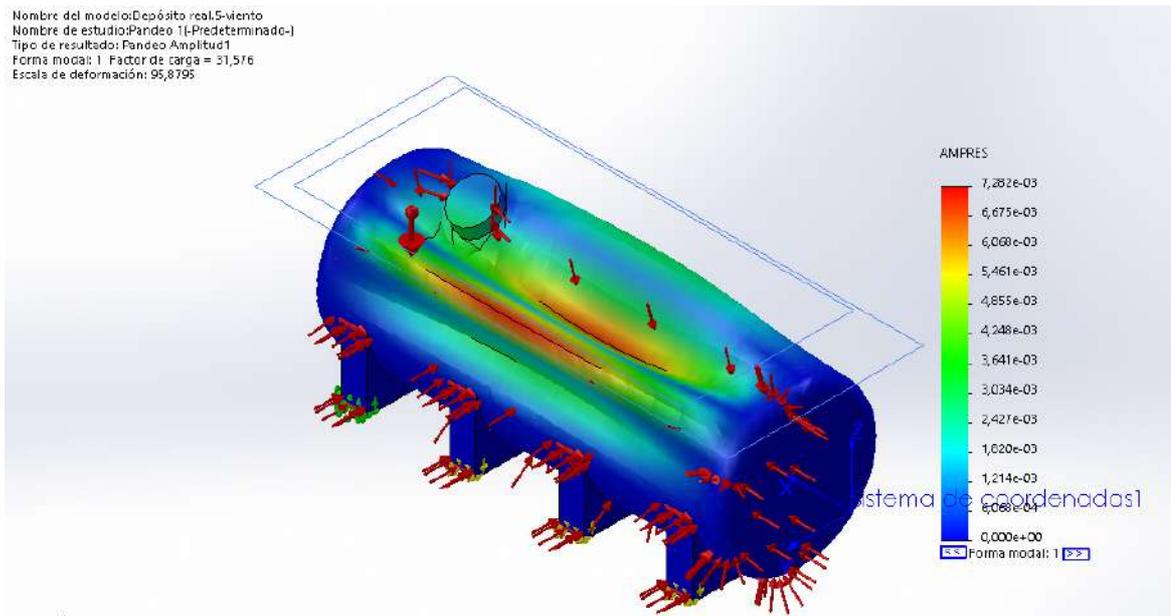


Ilustración 36. Modo 1 - Análisis por pandeo - Carga de viento

Como se puede ver en la Ilustración 36, el factor de carga obtenido es de 31,576, lo que significa que la carga de viento debería multiplicarse por ese valor para conseguir que el recipiente pandee. Como el resultado obtenido es mayor que el factor de carga mínimo admisible (>3), se verifica que el recipiente resiste al pandeo por la carga de viento. Los otros modos calculados se muestran en el Anexo de este documento.

8.2.5 Presión de vacío

En este estudio se ve el comportamiento del recipiente en el caso de que estuviese conectado a una salida de toma de agua sin abertura superior para extraer el aire, creando una presión de vacío en las paredes del recipiente. Este fenómeno de vacío puede ejercer deformación en el depósito por las fuerzas de succión generadas en sus paredes, por lo que se realiza el ensayo para comprobar la resistencia estructural.

Para este análisis se ha estudiado el efecto que se produce en el vaciado de un depósito cerrado, como se muestra en la Ilustración 81, donde tenemos un depósito con una altura de agua inicial (h_0) y una presión inicial en la parte superior (P_0). Al abrir el orificio de salida de agua, el agua fluye hasta que llega un momento en el que se para. En este

momento, la presión del aire en el interior del depósito será menor que la atmosférica, esta diferencia corresponde con la columna de agua de altura h .

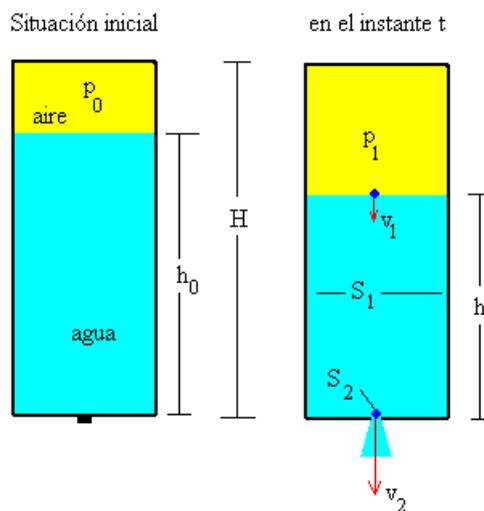


Ilustración 37. Efecto de vacío de un depósito. Fuente: [16]

La ecuación de Bernoulli para los puntos del fluido 1 y 2, es la siguiente:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh = p_{atm} + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

En el momento en el que el agua deja de fluir, las velocidades son iguales a 0:

$$p_1 + \rho gh = p_{atm}$$

Siendo p_1 la presión absoluta del aire en el interior del depósito. Si igualamos lo anterior a 0, la ecuación nos queda:

$$p_1 - p_{atm} + \rho gh = 0$$

Siendo $p_1 - p_{atm}$ la presión manométrica en la mirad superior del recipiente, que es la que tendremos que poner en estudio. Por tanto, esta presión nos queda:

$$P_{vacio} = -\rho gh$$

1. MEMORIA

Para la presión que existe en la mitad inferior del recipiente se debe añadir una presión variable, ya que, en la toma de salida, la presión es 0 y va disminuyendo hasta que llega a la línea que de contacto con el aire, donde su valor es igual a la presión de vacío ($P_{vacío} = -\rho gh$).

Una vez conocidas las presiones que actúan en cada mitad del recipiente, se crea en el modelo, una línea de partición en la mitad del depósito, en el plano de la vista lateral, que corresponde con el nivel de agua, como se observa en la Ilustración 38..

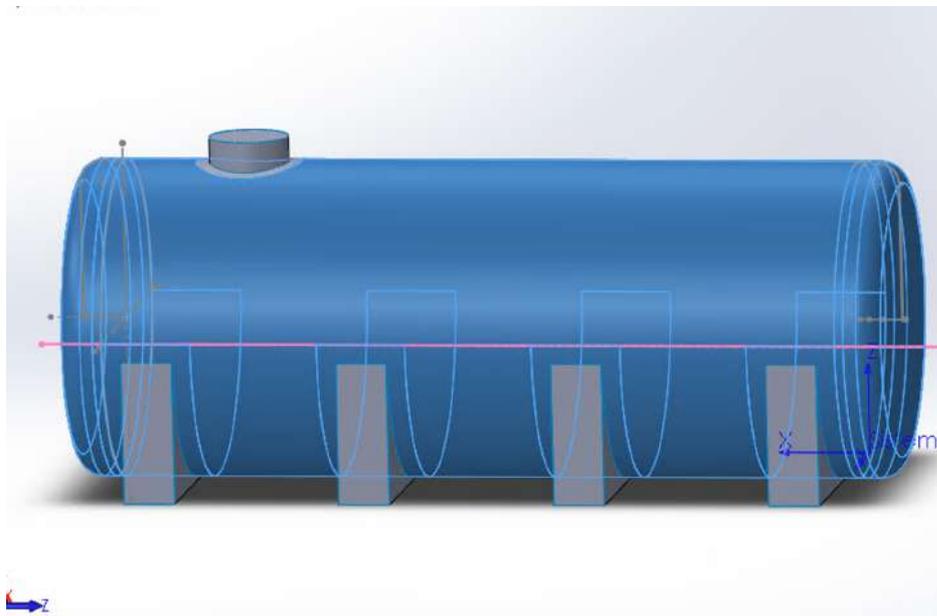


Ilustración 38. Línea de partición - carga de vacío

Posteriormente, se ejecuta un nuevo estudio estático, añadiendo los materiales y espesores determinados y las siguientes sujeciones:

- Sujeción fija en un soporte para restringir en él, todos los movimientos
- Sujeción de rodillo en el resto de los soportes para impedir el movimiento vertical de estos.

Se añade la carga del peso propio con la fuerza de la gravedad y las cargas de presión del agua y de vacío. En el caso la carga de vacío, para la mitad superior del depósito, se hizo

DISEÑO Y ESTUDIO DE UN TANQUE DE AGUA HORIZONTAL FABRICADO EN PRFV

un primer estudio con la altura del nivel de agua a la mitad del depósito (1250mm) pero el programa no ejecutó con esta altura, por lo que se redujo a un nivel de agua de 1000mm y si se obtuvieron resultados. Por lo que, por encima de la altura de 1000m, la presión de vacío que añadimos es:

$$P_{vacio} = -\rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1 = 9810N/mm^2$$

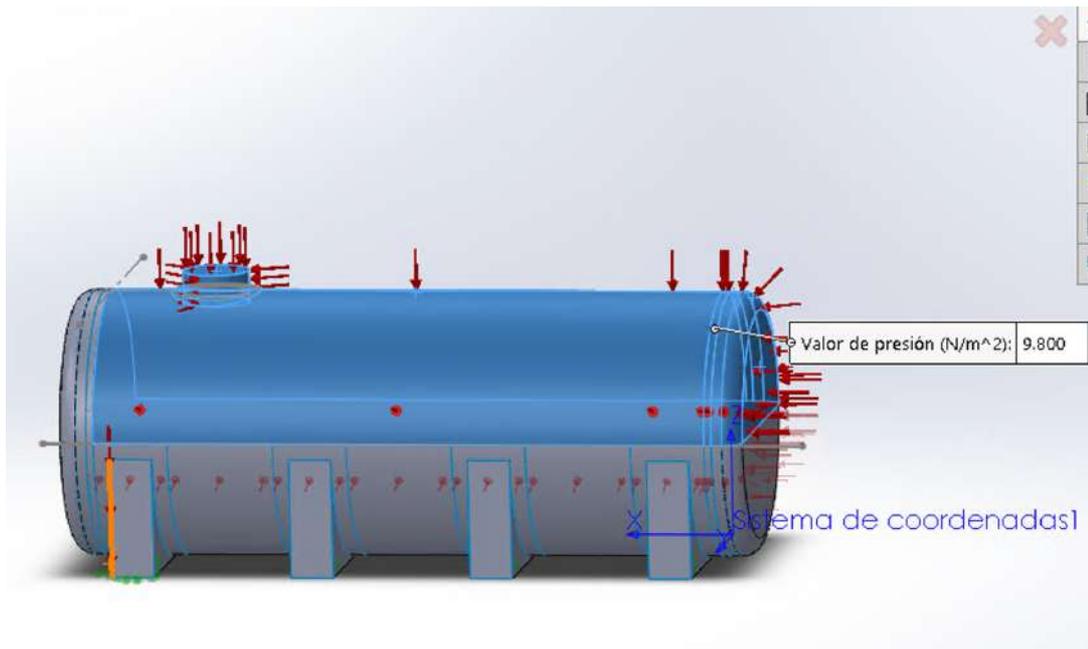


Ilustración 39. Presión de vacío

Cuando tenemos esta situación, la presión que tenemos en el fondo va disminuyendo al aumentar el nivel hasta alcanzar la superficie sin agua que se encuentra expuestas a una carga de vacío uniforme. Por lo que, para añadir la carga que ejerce el agua se debe aplicar una distribución no uniforme, como se muestra en la Ilustración 40.

1. MEMORIA

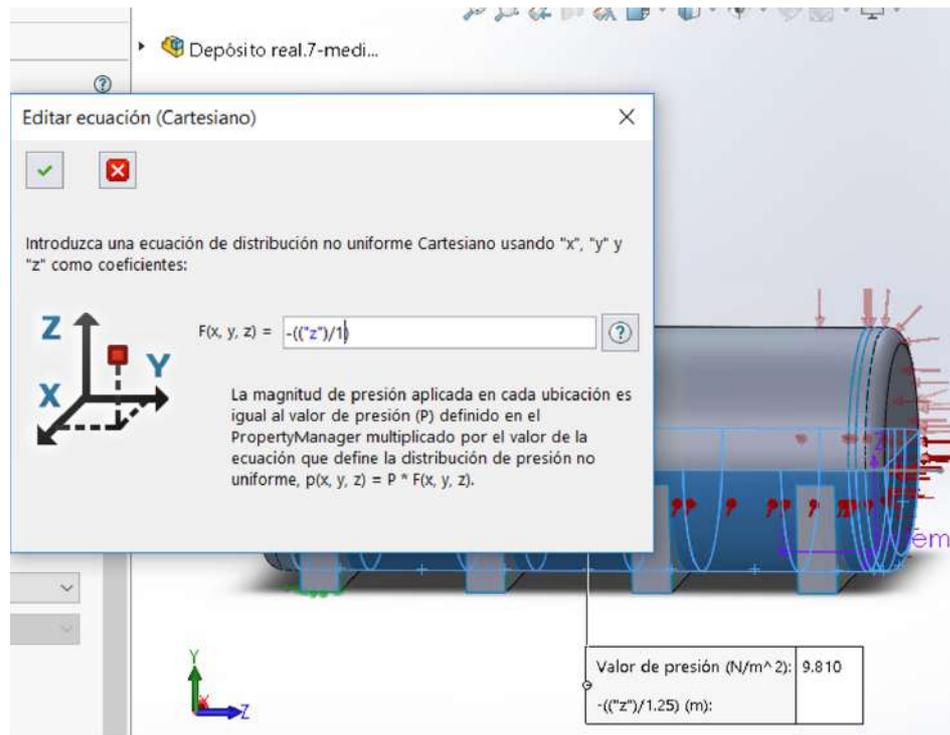


Ilustración 40. Presión no uniforme del agua

Mallamos con malla fina basada en curvatura

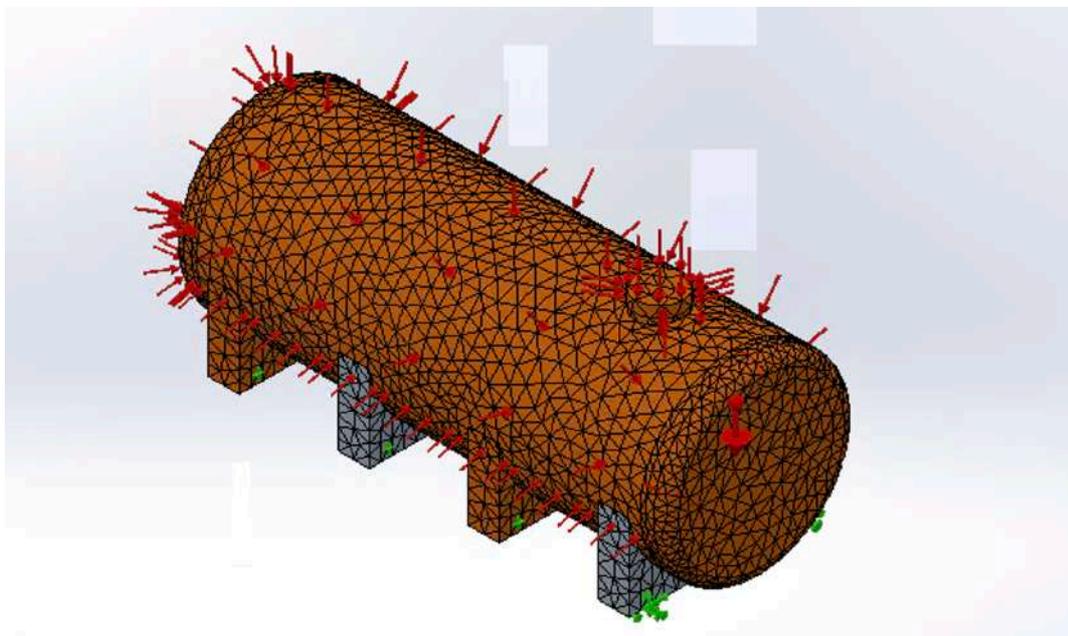


Ilustración 41. Malla carga de vacío

Ejecutamos y obtenemos los siguientes resultados.

DISEÑO Y ESTUDIO DE UN TANQUE DE AGUA HORIZONTAL FABRICADO EN PRFV

a. Tensión de Von Mises

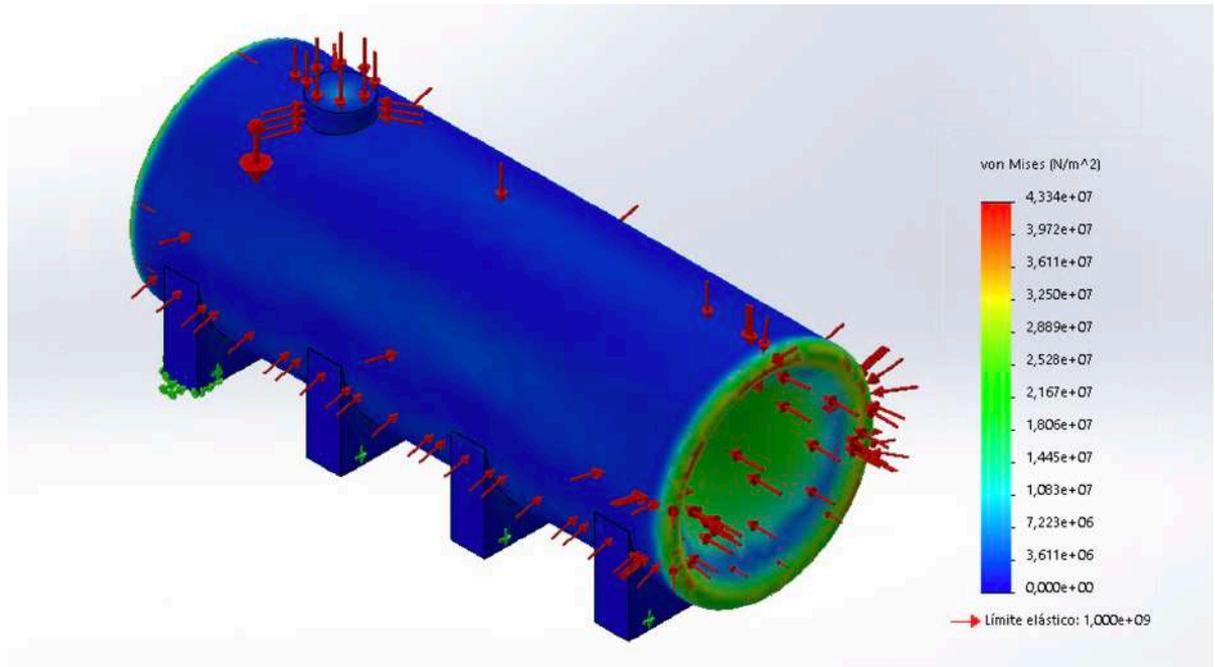


Ilustración 42. Tensiones con cargas de vacío

b. Desplazamientos

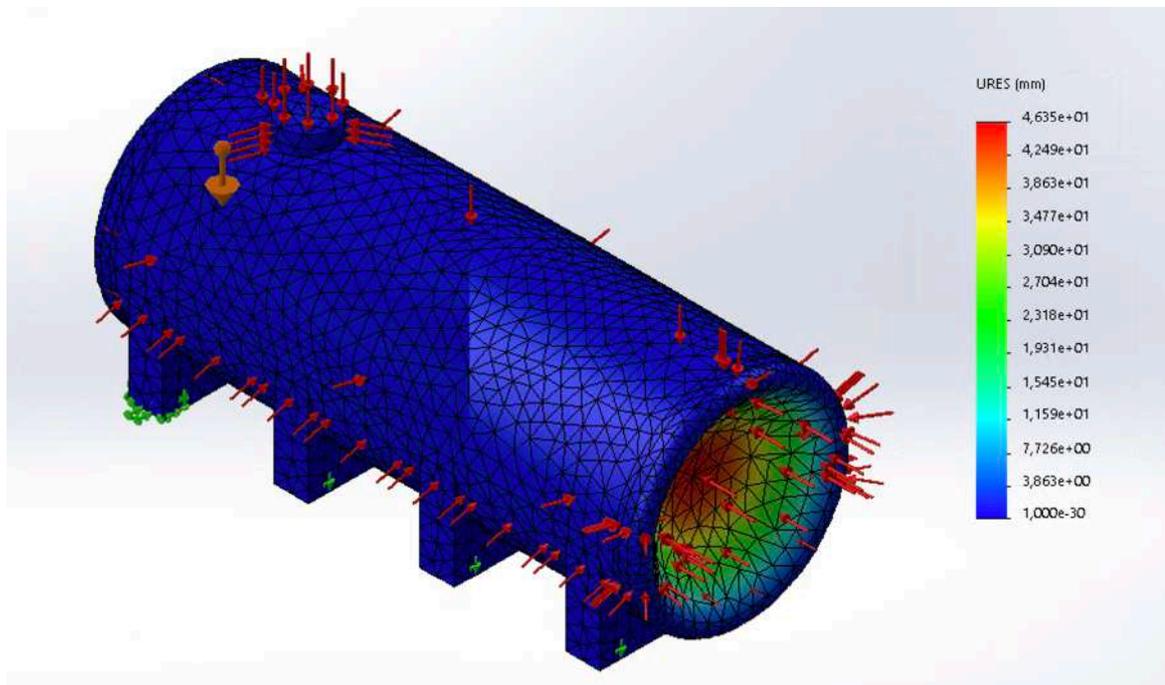


Ilustración 43. Desplazamientos con cargas de vacío

1. MEMORIA

Se obtiene una tensión de Von Mises máxima de 43,34 N/mm², valor inferior al límite de resistencia del material. Mientras que, en los cabezales, volvemos a encontrar grandes desplazamientos. La diferencia que se puede apreciar en este ensayo, es como las tensiones y las deformaciones son inversas a las anteriores, por el efecto de vacío que existe en el interior del recipiente.

Estudio con cargas de vacío	
Tensión de Von Mises máxima	43,34 N/mm ²
Deformación máxima	46,35 mm

Tabla 7. Resultados cargas de vacío

Para esta situación también tiene que hacerse un análisis de pandeo, ya que las presiones negativas están ejerciendo compresión sobre las superficies del recipiente. Para ello se ejecuta un nuevo estudio seleccionando “análisis de pandeo”, se introducen las mismas condiciones que en el análisis estático y se indican los modos a calcular.

Se crea malla y se ejecuta, obteniendo los siguientes resultados:

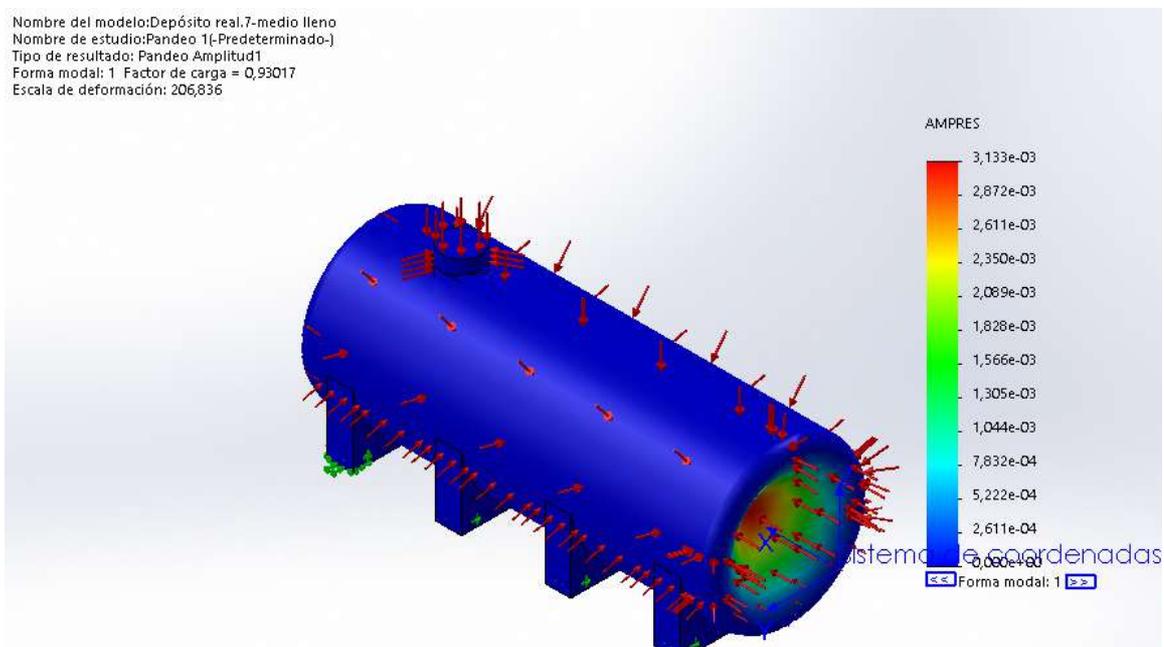
a. Modo 1

Ilustración 44. Modo 1- Análisis pandeo - carga de vacío

b. Modo 2

Nombre del modelo: Depósito real.7-medio lleno
Nombre de estudio: Pandeo 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Pandeo Amplitud1
Forma modal: 2 Factor de carga = 0,9323
Escala de deformación: 206,58

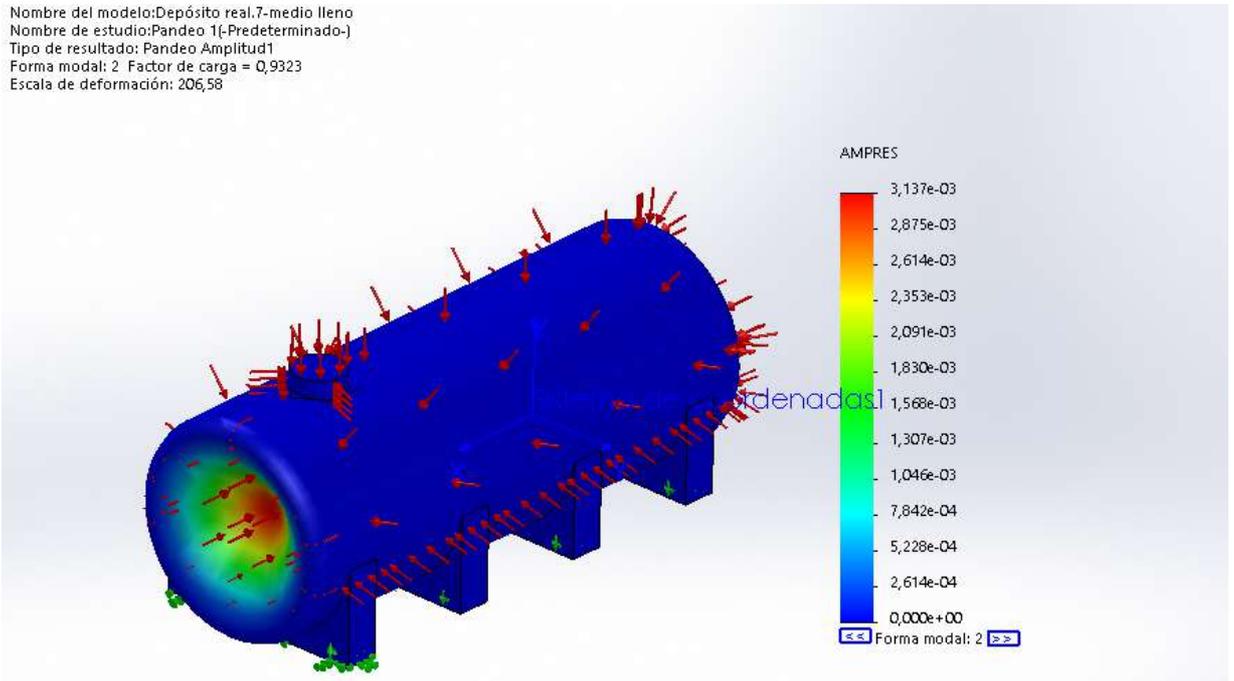


Ilustración 45. Modo 2- Análisis pandeo - carga de vacío

c. Modo 3

Nombre del modelo: Depósito real.7-medio lleno
Nombre de estudio: Pandeo 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Pandeo Amplitud1
Forma modal: 3 Factor de carga = 1,0785
Escala de deformación: 538,897

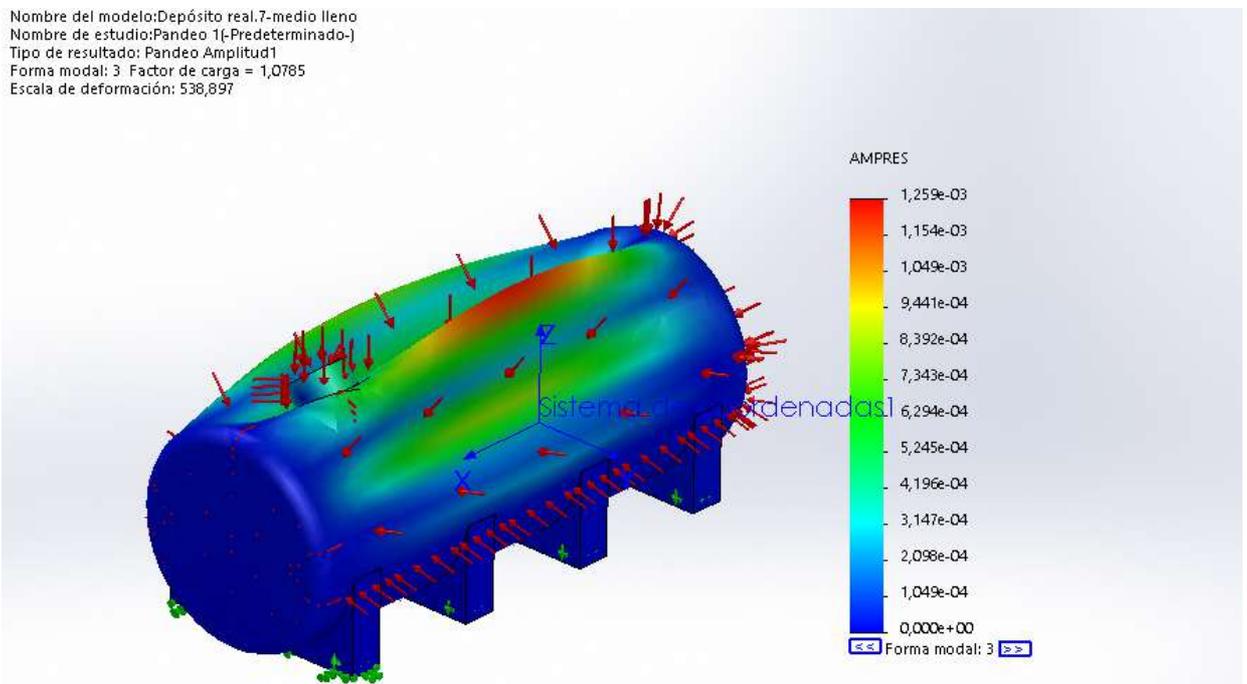


Ilustración 46. Modo 3- Análisis pandeo - carga de vacío

1. MEMORIA

Se observa en los resultados, que los dos primeros modos tienen un factor de carga inferior a 3, dando valores muy próximos a 1 (0,93017 y 0,9323), por lo que se comprueba que ante esta carga el recipiente pandeará. Por otro lado, tampoco se cumple con el factor de carga admisible que es igual a 3, por lo que no cumple con el límite de seguridad.

8.2.6 Cargas de transporte

En esta última situación, se analiza el efecto que se produce en el recipiente al ser transportado. Para ello, se han añadido al modelo tres refuerzos de acero de 80x4mm que rodean el cilindro, con unas orejetas de elevación de 100x150x15mm con un agujero de 80mm en cada extremo lateral para poder atar las eslingas y transportar el recipiente, como se muestra en las Ilustraciones 47 y 48..

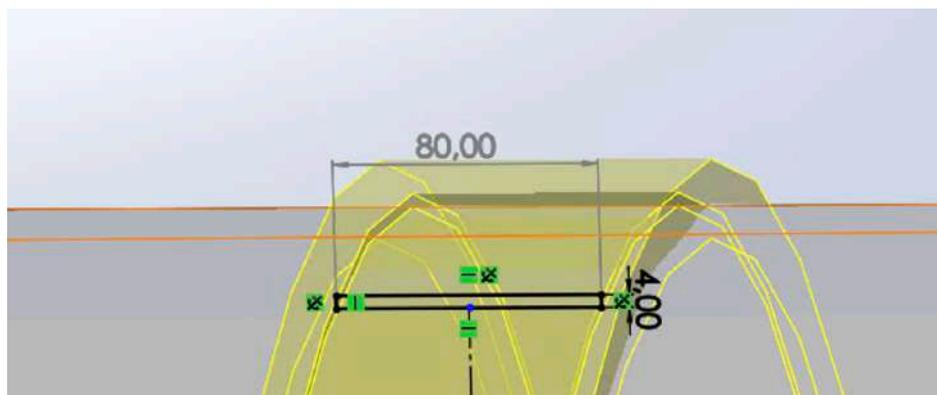


Ilustración 47. Croquis para pletina

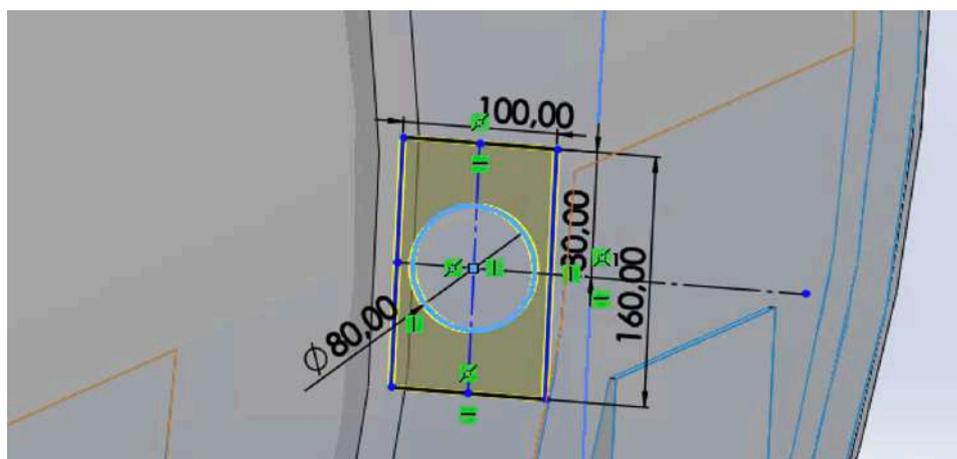


Ilustración 48. Croquis orejeta

Una vez añadidas las pletinas, se procede a realizar el estudio estático del recipiente. En este caso, al añadir el material, se selecciona Acero 1020 para las pletinas y orejetas.

Para añadir las sujeciones en este caso, se debe tener en cuenta que se simula la elevación del depósito para su transporte, con eslingas que se enganchan a las orejetas. Por tanto, pondremos las restricciones en estas y no en los soportes. Las restricciones impuestas han sido:

- Restricción en la dirección vertical, para todas las orejetas. Se seleccionan todas las caras inferiores de las orejetas y una arista vertical para restringir esa dirección, como se observa en la Ilustración 49. De esta manera simulamos que el depósito está atado a las eslingas en 3 puntos por cada lado, evitando el movimiento hacia arriba y hacia abajo. Además, al estar la sujeción en ambos lados, también se impide el giro de rotación sobre el propio eje del depósito.

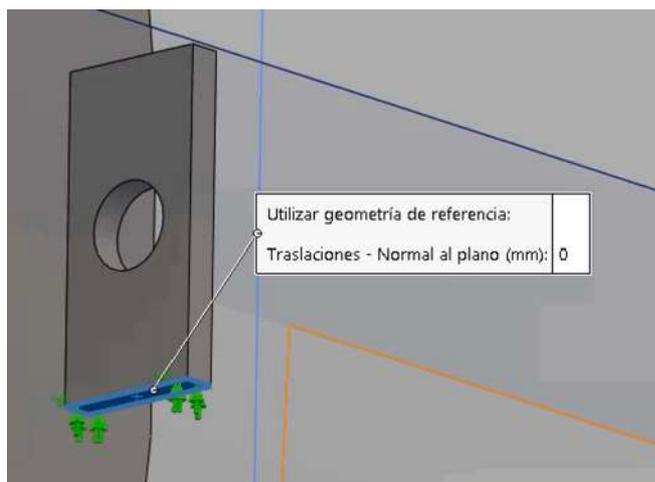


Ilustración 49. Restricción vertical en todas las orejetas

- Restricción en la dirección transversal para todas las orejetas de uno de los laterales como se observa en la Ilustración 50. Con esta restricción hacemos que el depósito no se desplace hacia los laterales, pero dejamos libertad de movimiento para que pueda comprimirse o traccionarse al no poner esta restricción por el lado opuesto.

1. MEMORIA

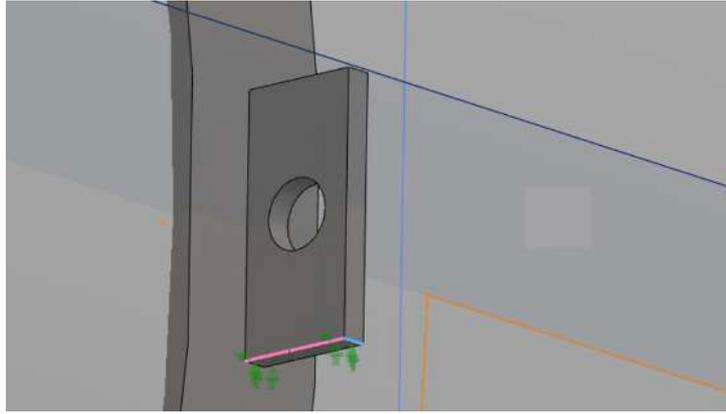


Ilustración 50. Restricción transversal en orejetas de uno de los laterales

- Restricción en la dirección longitudinal del recipiente para las orejetas de uno de los extremos (para ambas) como se observa en la Ilustración 51. Con esta última restricción, se consigue que el recipiente no se desplace longitudinalmente, permitiendo que el depósito pueda estirarse o comprimirse, al añadir la restricción solo en las orejetas de uno de los extremos.

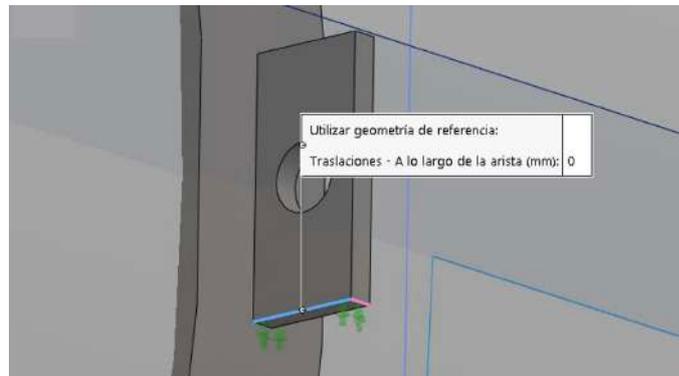


Ilustración 51. Restricción longitudinal para orejetas de uno de los extremos

Se añade la carga del peso propio, ya que se considera que el recipiente está vacío a la hora de transportarlo. Luego, se crea una malla muy fina basada en curvatura para que no existan problemas a la hora de mallar las pletinas y se ejecuta.

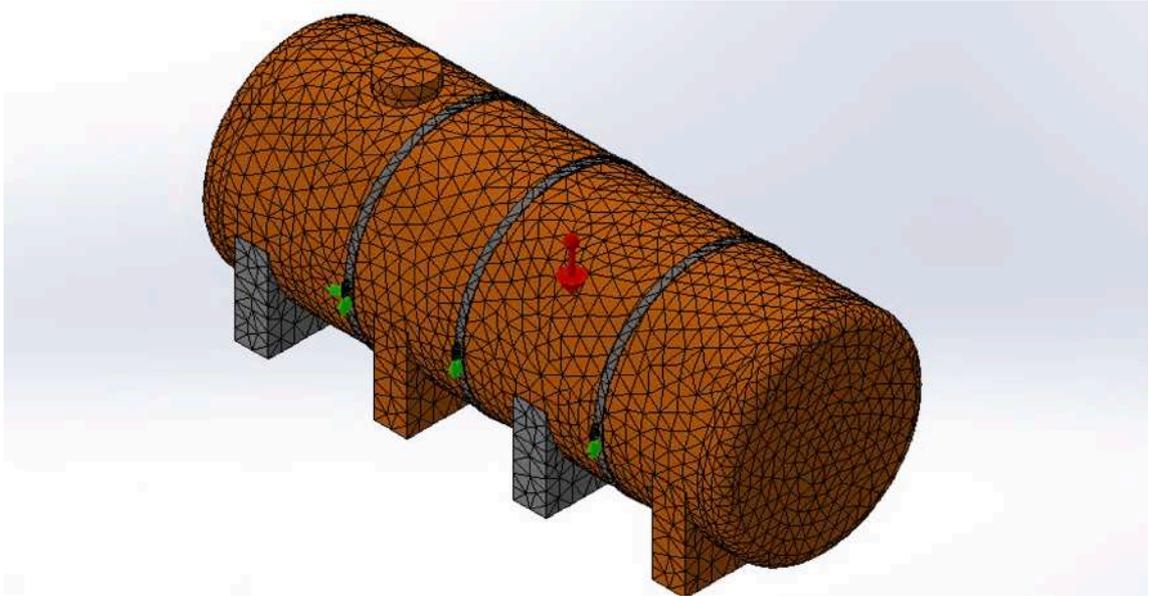


Ilustración 52. Mallado - carga de transporte

a. Tensión de Von Mises

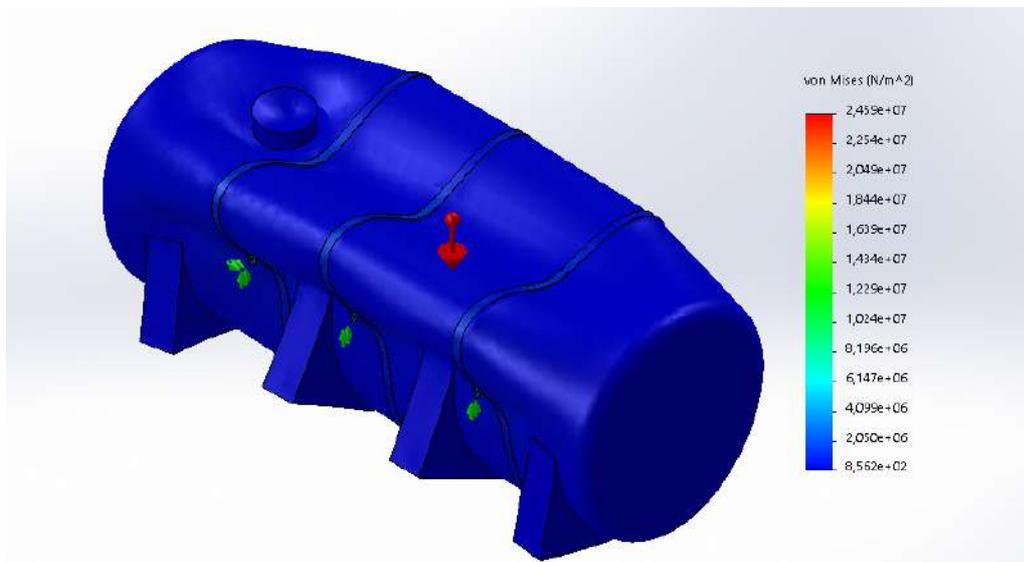


Ilustración 53. Resultado de tensiones - carga de transporte

1. MEMORIA

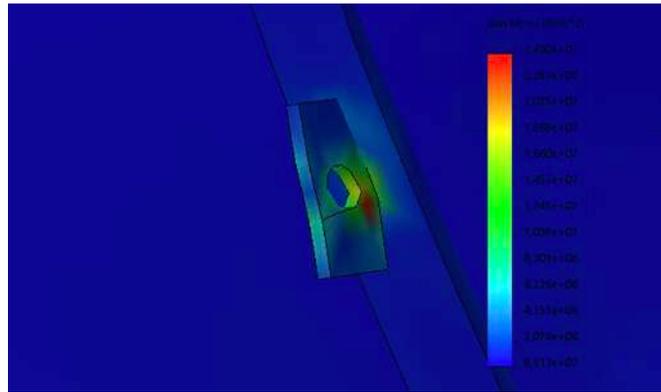


Ilustración 54. Tensiones máximas en las orejetas del recipiente

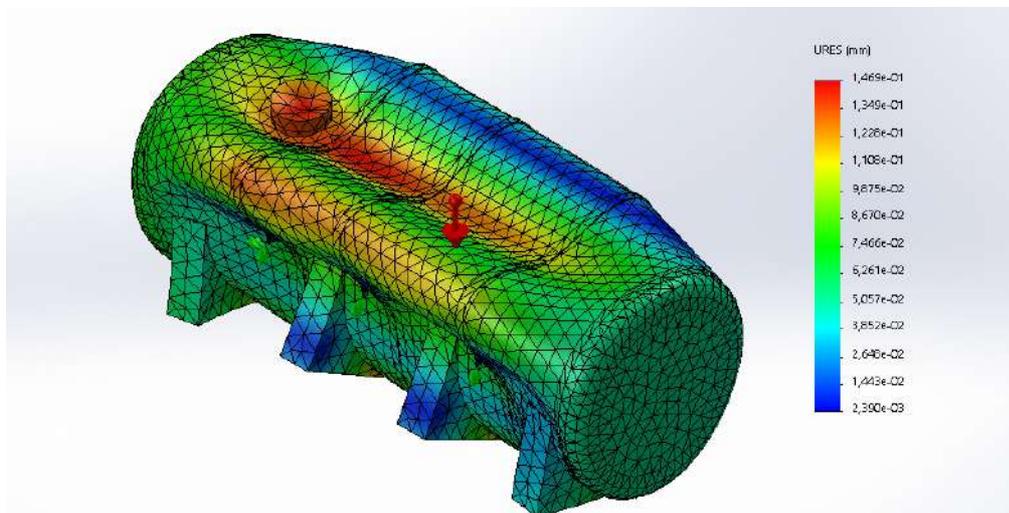
b. Desplazamiento

Ilustración 55. Resultado de desplazamiento-carga de transporte

En este caso se observa que los valores de las tensiones de Von Mises son muy bajas en todo el recipiente, ubicándose las mayores en el interior de las orejetas, ya que ahí es donde aplicamos las sujeciones que simulan el transporte del depósito y, por tanto, donde se crean los esfuerzos máximos. Por otro lado, la deformación es prácticamente nula, siendo mayor en la parte superior del tanque.

Estudio cargas de transporte

Tensión de Von Mises máxima	24,59 N/mm ²
Desplazamiento máximo	0,1469 mm

Tabla 8. Resultados de las cargas de transporte

Para esta situación de estudio, también se debe hacer un análisis por pandeo, ya que se debe evaluar la estabilidad del depósito frente a cargas de compresión axial. Aquí también se determinará la carga crítica y se considerará aceptable, cuando esta sea mayor que un factor igual a 3.

Al hacer el estudio, se han tenido en cuenta las mismas condiciones que en el análisis estático: espesores, materiales, sujeciones, presiones, etc. Sin embargo, cuando se ha ejecutado el modelo, no se ha conseguido llegar a ninguna solución, ya que, en el caso del pandeo, el programa no considera que los cuerpos sólidos de las pletinas estén unidos al recipiente.

Por tanto, la opción por la que se ha optado en su lugar ha sido considerar el izaje del recipiente por la parte superior de los soportes, simulando que solo vamos a tener las eslingas en los extremos, considerando la peor situación. Se eliminan los sólidos creados, correspondientes a las pletinas y orejetas de elevación y se ejecuta un nuevo estudio seleccionando “análisis por pandeo”. Se añade el material, espesores de cada superficie y las siguientes sujeciones en la parte superior de los soportes:

- Se restringe el desplazamiento transversal de uno de los soportes de los extremos, como se muestra en la Ilustración 56.

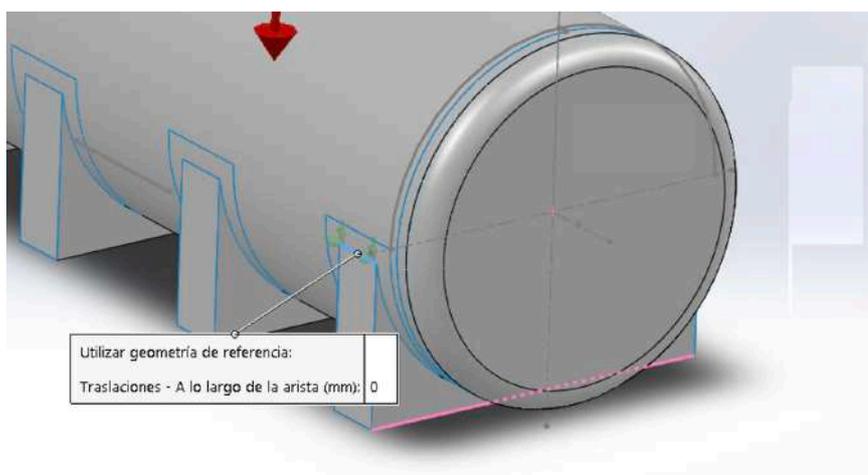


Ilustración 56. Restricción transversal en un lado de un soporte.

1. MEMORIA

- Sujeción en la dirección vertical para los 4 soportes de los extremos en ambos lados, como se muestra en la Ilustración 57.

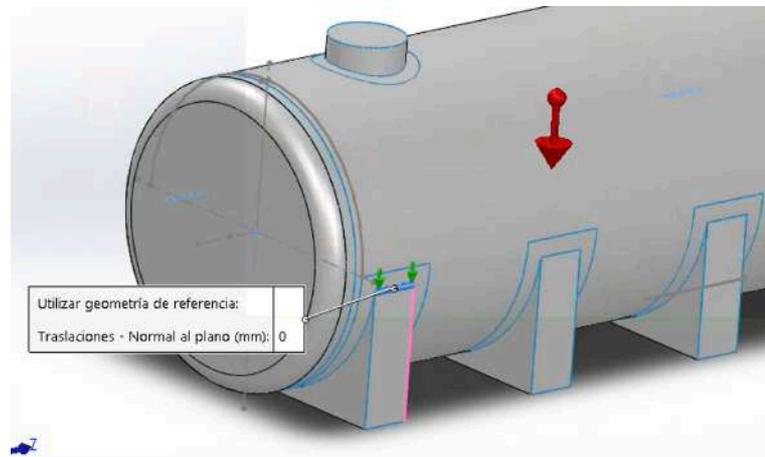


Ilustración 57. Sujeción en la dirección vertical para los 4 soportes de los extremos en ambos lados

- Sujeción longitudinal en uno de los soportes de uno de los laterales, como se muestra en la Ilustración 58.

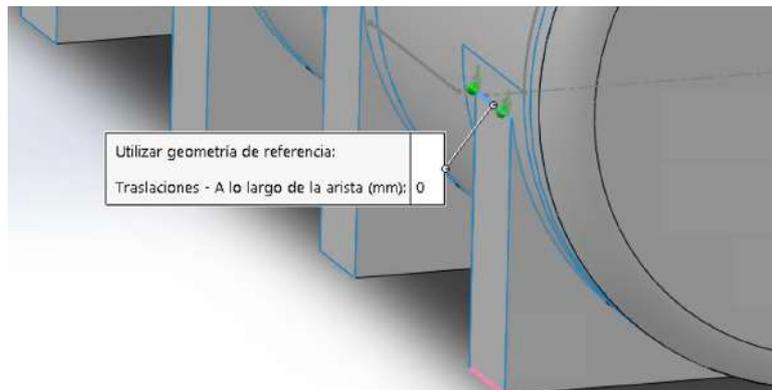


Ilustración 58. Sujeción longitudinal en uno de los soportes de los laterales

Se añade la carga del peso propio, se seleccionan el número de modos que queremos calcular, se malla con malla fina basada en curvatura y se ejecuta.

a. Modo 1

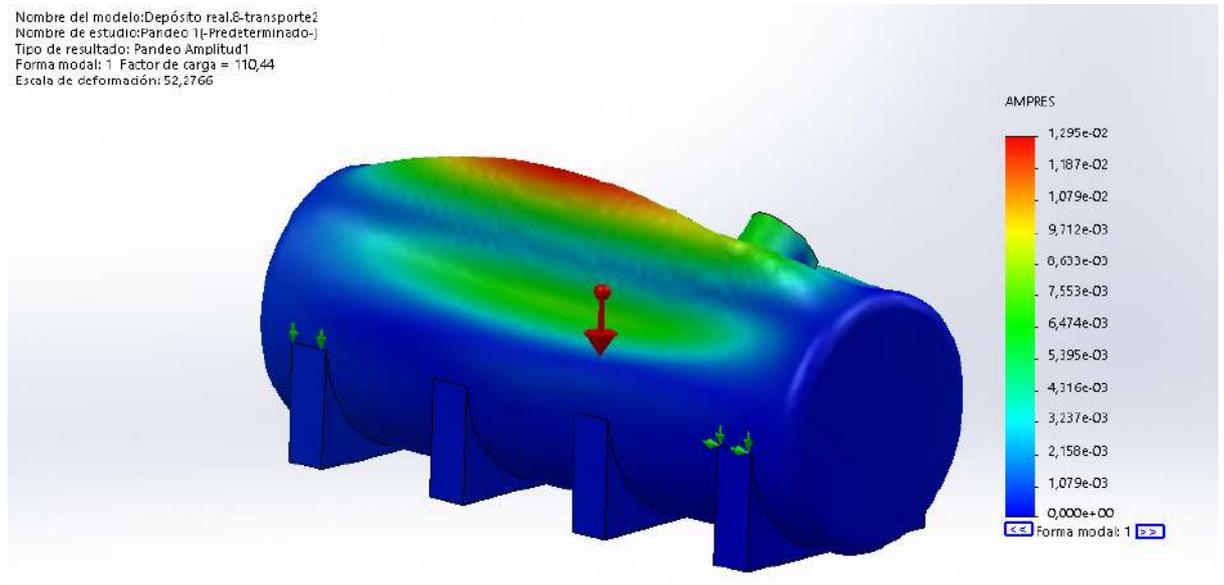


Ilustración 59. Resultado análisis de pandeo - carga de transporte - modo 1

b. Modo 2

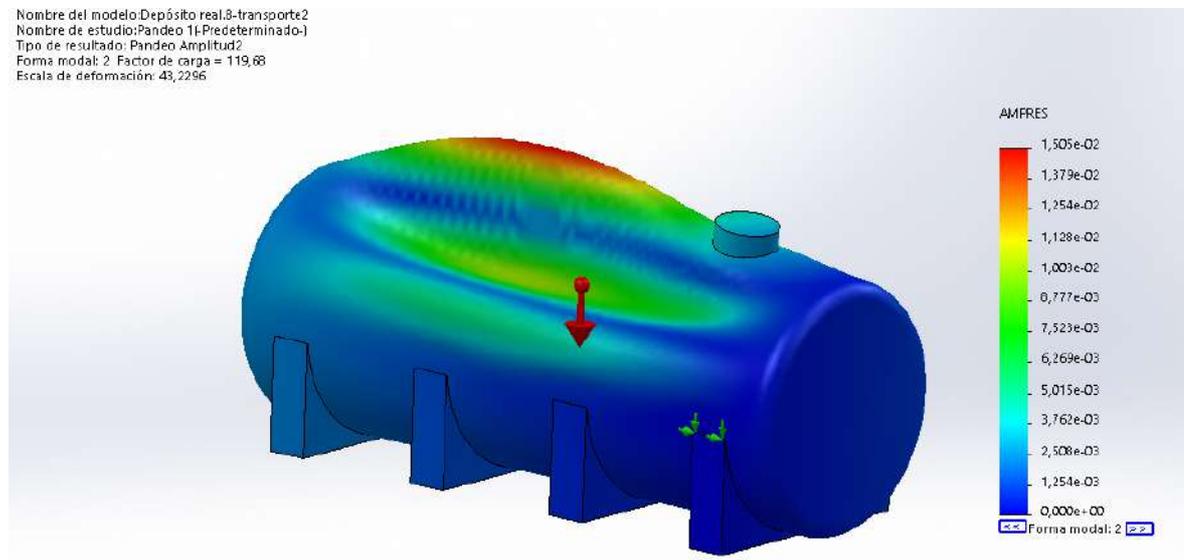


Ilustración 60. Resultado análisis de pandeo - carga de transporte - modo 2

Se verifica que el recipiente va a soportar las cargas por pandeo, ya que los factores de carga para los dos primeros modos son mayores que 110.

1. MEMORIA

8.3. Resumen de resultados

Tras los estudios realizados para posibles situaciones a las que puede estar sometido el recipiente, se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

	Presión hidrostática	Prueba hidráulica	Desplazamiento soporte	Carga de viento	Cargas de vacío	Cargas de transporte
Tensión de Von Mises máxima (N/mm ²)	57,42	68,25	57,21	0,872	43,34	24,59
Deformación máxima (mm)	40,19	44,68	41,06	0,863	46,35	0,1469
Factor de carga por pandeo (modo 1)	-	-	-	31,58	0,93	110,44

Tabla 9. Resumen de resultados

Con estos resultados se comprueba que las situaciones más desfavorables se originan con el depósito lleno de agua, ya que la carga de presión en estas situaciones es máxima al utilizar toda la capacidad del recipiente para contener el líquido. Se ha observado como la masa del agua influye significativamente en el peso total del depósito, aumentando las cargas en las paredes de este y creando grandes desplazamientos en zonas más desfavorables. Estas zonas han coincidido en la mayoría de los casos con los cabezales toriesféricos, por lo que se considera oportuno emplear en un diseño futuro, cabezales esféricos en su lugar. Con estos cabezales se consigue una mejor distribución de las tensiones por su forma curva, soportando mejor las cargas de presión sin deformarse o fallar.

Otro factor importante que se ha comprobado es como afecta el vacío en un depósito, ya que en esta situación se ha obtenido la mayor deformación del recipiente, llegando a casi 5 cm. Estos cambios en el nivel del agua dentro del depósito pueden ser muy comunes, ya que pueden haber cambios bruscos en los flujos de entrada o salida del agua, pérdidas o fugas en los recipientes, etc. Para evitar esto, se añade una válvula de vacío que se abren cuando se crea una presión negativa dentro del depósito, permitiendo que el aire entre y equilibre la presión, por lo que evita el efecto de vacío. En el caso del pandeo se colocan tubos de venteo en U en la superficie, donde ambos extremos estén hacia abajo con uno de ellos insertado en el recipiente para que quede conectado a la cámara interior; y el otro conectado a la atmósfera con una rejilla de protección para evitar la entrada de insectos y otros animales.

De acuerdo con lo anterior, se observa que las dos situaciones en donde existen menores tensiones y menores desplazamientos son aquellas donde el depósito se encuentra vacío, afectado solo por las cargas del peso propio del recipiente.

Por último, en los ensayos que se han hecho para pandeo, el resultado más desfavorable ha sido aplicando las cargas de vacío, ya que en este caso el depósito se encuentra sometido a compresión, generando fuerzas hacia el interior de las paredes del mismo con la carga crítica ubicada en los cabezales. Esto verifica la necesidad de cambiar el diseño de los cabezales a una forma esférica o aumentar el espesor de estos. También puede optarse por colocar un venteo a la atmósfera o una válvula de seguridad que disminuya la presión interna al abrirse automáticamente cuando pase de un valor determinado.

9. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para realizar una evaluación económica del coste de fabricación del depósito, se ha hecho una visita a una empresa canaria especialista en la fabricación de depósitos y otras piezas fabricadas en PRFV. En el Anexo se detalla la toma de datos del proceso productivo de un depósito similar al de estudio.

Los costes asociados a los materiales y la mano de obra son los que se muestran en el Anexo de este documento. Se ha tardado 9 días en la fabricación del recipiente, invirtiendo 55h de trabajo totales. Los costes de la mano de obra han sido de 715€, mientras que los costes de los materiales han sido de 5.101, 69€, siendo el coste total de 5816,60€. Los costes principales son debidos al MAT y de la Resina, de ahí la importancia de hacer un buen diseño del recipiente para disminuir la cantidad de materia prima.

10. CONCLUSIONES

Las conclusiones del proyecto son:

1. El análisis realizado en Solidworks ha servido para verificar que el depósito es capaz de resistir las cargas generadas por diferentes situaciones que pueden ocurrir, dentro de los límites establecidos.
2. Se han podido identificar las zonas críticas del depósito, que corresponden a los cabezales toriesféricos de este. Por lo que se concluye que se debe hacer una modificación de los mismos, ya sea aumentando su espesor o poniendo cabezales esféricos.
3. Se ha observado que las situaciones más desfavorables se dan cuando el depósito está sometido a las cargas de presión interna negativa (vacío) y cuando este se encuentra lleno de agua.
4. Por otro lado, se ha ampliado la información sobre este tipo de material y se ha visto la complejidad del mismo para determinar sus propiedades mecánicas, las cuales van a variar según el tipo de tejido a utilizar, el porcentaje en fibra y la orientación de estas. Así como variarán, según el tipo de resina que se emplee.

En general, el estudio ha proporcionado una comprensión del comportamiento del depósito frente a diferentes cargas y situaciones. Además de servir para ampliar el conocimiento y el manejo de esta herramienta para cálculos estructurales, ya sea para depósitos a presión como para cualquier otro equipo.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «<https://www.kacoverings.com/que-es-un-composite/>,» [En línea].
- [2] «<https://romeorim.com/what-are-composites/>,» [En línea].
- [3] «https://es.wikipedia.org/wiki/Plástico_reforzado_con_vidrio,» [En línea].
- [4] «<https://prfv.wordpress.com/>,» [En línea].
- [5] «<https://www.grupopid.com/>,» [En línea].
- [6] «<https://www.uni-her.com/blog/caracteristicas-fibra-de-vidrio/>,» [En línea].
- [7] «<https://www.castrocompositesshop.com/es/63-vidrio>,» [En línea].
- [8] «https://www.nazza.es/blog/8_Usos-resina-poliester.html,» [En línea].
- [9] «<https://www.mafisanpoliester.es/el-catalizador-en-la-fabricacion-de-poliester/>,» [En línea].
- [10] «<https://www.arquimi.com/blog/p18342-las-resinas-de-poliester-y-vinilester.html>,» [En línea].
- [11] «<https://panelesach.com/blog/prfv-conoce-todas-las-caracteristicas-del-poliester-reforzado-con-fibra-de-vidrio/>,» [En línea].
- [12] «https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/tesis/ingenie/bendezu_r_j/metod.htm,» [En línea].
- [13] «<https://www.globalcomposites.es/>,» [En línea].
- [14] «<https://www.matweb.com/>,» [En línea].
- [15] «Anexo Nacional AN/UNE 1991-1-4».
- [16] [En línea]. Available:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/fluidos/vaciado/vaciado_1.html.
- [17] P. Amurrio. [En línea]. Available: <https://www.poliesteramurrio.com/material-prfv/>. [Último acceso: 02 2023].
- [18] C. composites. [En línea].
- [19] «<https://melcomposites.es/motor-oil/>,» [En línea].
- [20] <https://quimibber.com/catalizadores/>. [En línea].
- [21] «<https://panelesach.com/blog/prfv-conoce-todas-las-caracteristicas-del-poliester-reforzado-con-fibra-de-vidrio/>,» [En línea].

ANEXOS

TABLA DE CONTENIDO

A.	CÁLCULO DE LA CARGA DE VIENTO	2
B.	DISEÑO DEL RECIPIENTE EN SOLIDWORKS	7
C.	PROCESO DE SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS	18
-	<i>Prueba hidráulica</i>	23
-	<i>Desplazamiento de soporte a 10mm del suelo</i>	24
-	<i>Carga de viento</i>	25
-	<i>Presión de vacío</i>	27
-	<i>Cargas de transporte</i>	29
D.	REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS SIMULACIONES	35
E.	PROCESO DE FABRICACIÓN DEL DEPÓSITO	50
F.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	53

A. CÁLCULO DE LA CARGA DE VIENTO

Los pasos seguidos para calcular la carga de viento son:

1. Cálculo de la velocidad básica fundamental del viento ($v_{b,0}$). Es la velocidad característica media del viento medida durante 10 min, independientemente de la dirección del viento y época del año a 10m sobre el nivel del suelo. Viene dada por:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

Donde:

- v_b : velocidad básica del viento.
- $v_{b,0}$: velocidad fundamental del viento.
- c_{dir} : factor direccional. Se determina en el Anexo Nacional y lo considera con un valor recomendado de 1,0.
- c_{season} : factor estacional que se determina en el Anexo nacional o puede considerar un valor recomendado de 1,0.

En nuestro caso se hace uso del Anexo Nacional del Eurocódigo 1 para obtener el valor de la velocidad básica fundamental del viento ($v_{b,0}$). Haciendo uso del Mapa de isotacas y teniendo en cuenta que el depósito se encuentra localizado en Canarias el valor de $v_{b,0}$ es de 29m/s

Además, se toma los valores recomendados en el mismo Anexo Nacional para el factor direccional y para el factor estacional, ambos con el valor de 1.

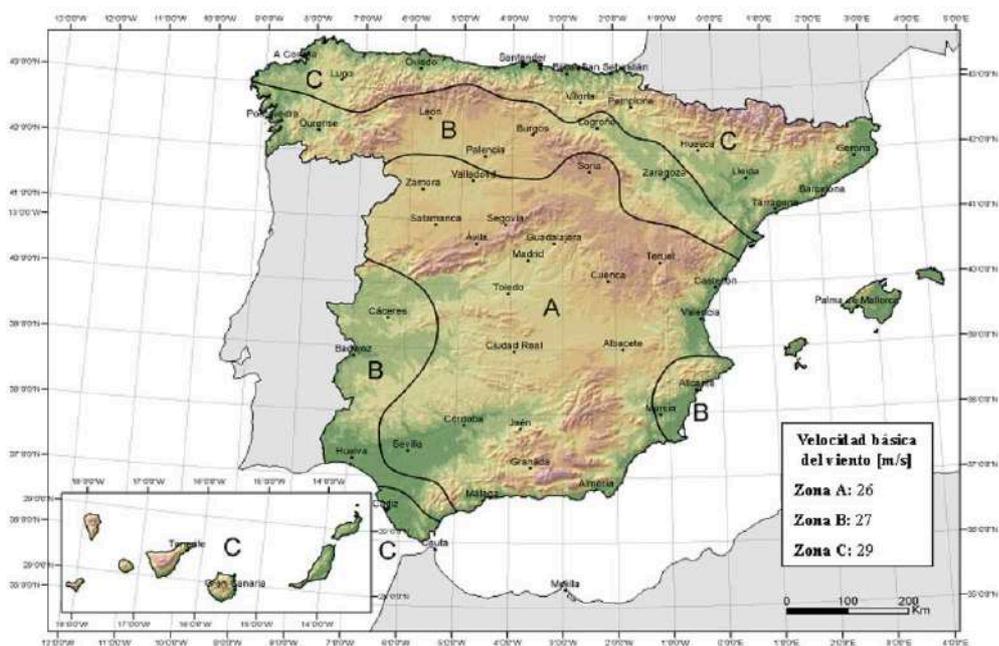


Ilustración 1. Mapa de isotacas del Anexo Nacional [7]

- Calculamos la velocidad media del viento a una altura z por encima del terreno, la cual depende de la rugosidad y de la orografía del terreno y de la velocidad básica del viento. El Anexo Nacional puede dar valores mapas o tablas para calcular la velocidad media del viento. La expresión para su cálculo viene dada por:

$$Vm(z) = C_r(Z) \cdot C_o(Z) \cdot V_b$$

Donde:

- $C_o(Z)$: coeficiente topográfico que se considera como 1,0
- $C_r(Z)$: factor de rugosidad, apartado 4.3.2 de la norma. Este factor tiene en cuenta la variabilidad de la velocidad media del viento en la localización de la estructura debido a la altura sobre el nivel del suelo y a la rugosidad del terreno situado a barlovento de la estructura en la dirección del viento considerada. Para determinarlo se hace uso de:

2. ANEXO

$$C_r(Z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{Z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

Donde

- z_0 es la longitud de la rugosidad que depende de la categoría del terreno. Los valores recomendados se muestran en la Tabla 4.1 de la norma.
- z_{min} : es la altura mínima que se encuentra definida en la Tabla 4.1 dependiendo de la categoría del terreno.
- z_{max} : se toma igual a 200m
- K_r : factor del terreno que viene dado por:

$$K_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

Donde

- $z_{0,II} = 0,05m$ (categoría II de la Tabla 4.1)

Tabla 4.1 – Categorías de terrenos y parámetros del terreno

Categoría de terreno		z_0 m	z_{min} m
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1,0	10
NOTA Las categorías de terrenos se ilustran en el capítulo A.1.			

Ilustración 2. Tabla 4.1 Categorías de terrenos y parámetros del terreno

Teniendo en cuenta que la categoría de nuestro terreno es la II, el valor de K_r es igual a 0,19. Por tanto, teniendo en cuenta la altura máxima a la que se encuentra nuestro

depósito (2,73m), sustituimos en la expresión del factor de rugosidad y nos da un valor de 0,76.

Por tanto, el valor de la velocidad media, teniendo en cuenta la altura de 2,73 metros por encima del terreno ($V_m(z)$) es de 22,04m/s.

3. Se calcula la presión correspondiente a la velocidad de pico ($q_p(z)$) a una altura z , la cual incluye la velocidad media del viento y las fluctuaciones de velocidad a corto plazo. El cálculo se realiza teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot v_m^2(z) = C_e(z) \cdot q_b$$

Donde:

- ρ_{aire} : densidad del aire que depende de la altitud, la temperatura y la presión barométrica esperada en la región durante las tormentas de viento. Se puede tomar el valor recomendado en el Anexo Nacional que es: 1,25kg/m³.
- q_b : es la presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento, dada por:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

- o $C_e(z)$: factor de exposición. Para terrenos donde $C_o(Z) = 1,0$, se puede calcular el factor de exposición en función de la altura sobre el terreno y de la categoría del mismo.

2. ANEXO

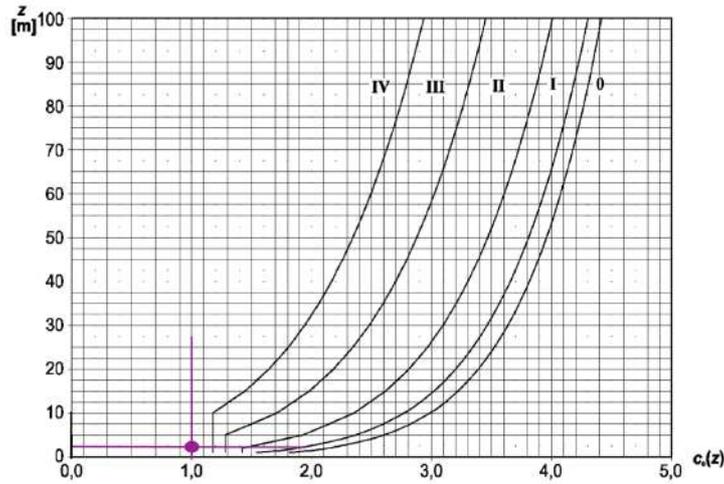


Ilustración 3. Coeficiente de exposición

Teniendo en cuenta que el depósito tiene una altura de 2,73 m, que $C_o(Z) = 1,0$ y que el terreno es de categoría II, se obtiene del gráfico, un valor de $C_e(z)$ igual a 0.

Por tanto, el valor de $q_p(z)$ será igual a:

$$q_p(z) = q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 29^2 = 525,625 \text{ N/m}^2$$

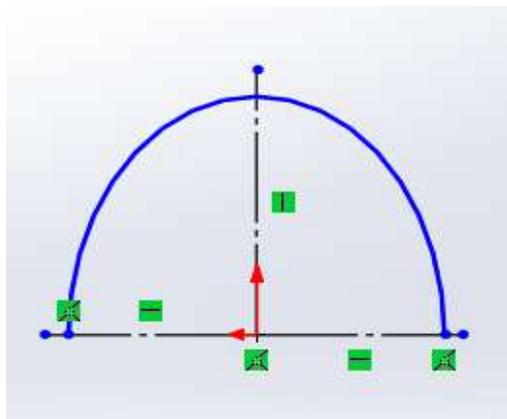
4. Según la normativa UNE EN 13121-3, apartado 9.2.2 “Cargas debidas al viento”, la presión exterior debida al viento, la carga P_{wind} para depósitos cerrados debe ser el valor de la presión dinámica máxima del viento ($q_p(z)$) por un factor de 0,6

$$P_{wind} = q_p \cdot 0,6 = 525,625 \text{ N/m}^2 \cdot 0,6 = 315,375 \text{ N/m}^2$$

B. DISEÑO DEL RECIPIENTE EN SOLIDWORKS

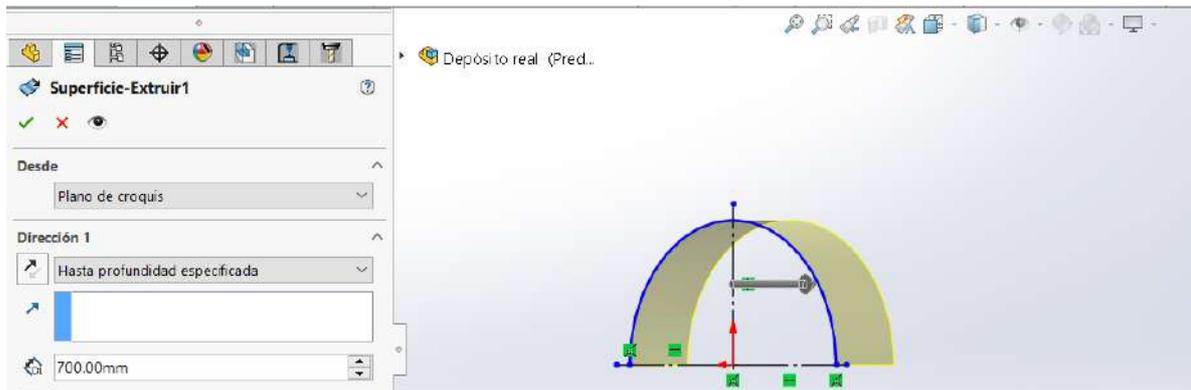
Para el diseño del equipo en SolidWorks se han tenido en cuenta las características y dimensiones asumidas en el proyecto. Los pasos realizados han sido:

1. Se crea un nuevo documento en SolidWorks y se selecciona “pieza”
2. Se dibuja medio depósito superior realizando un arco de radio de 1250mm (D/2) en el alzado.

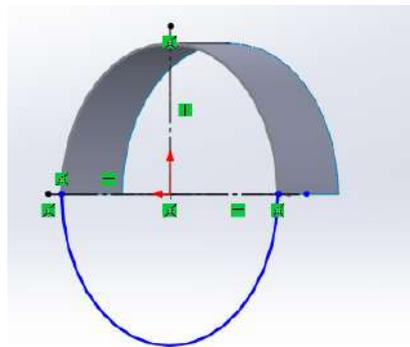


3. Extruímos una superficie de 700mm, de tal forma que pueda contener el soporte en su parte inferior. Para ello vamos a: superficie → extruir → hasta profundidad especificada: 700mm.

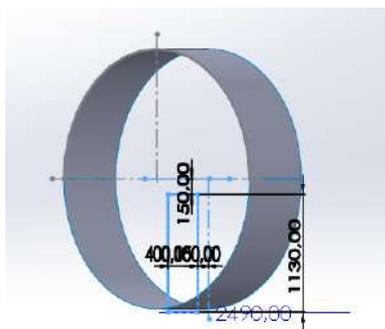
2. ANEXO



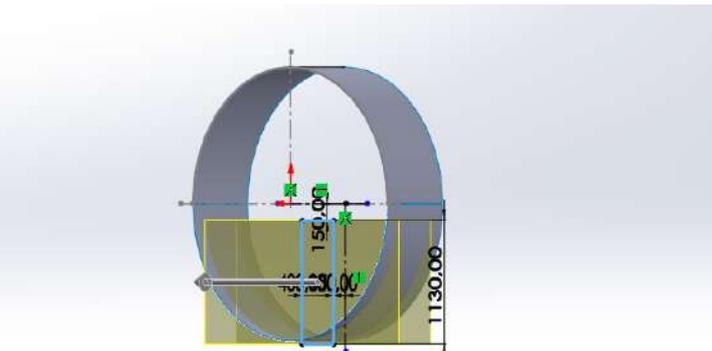
4. Se diseña el medio depósito inferior como se hizo en el paso anterior y se realiza la extrusión.



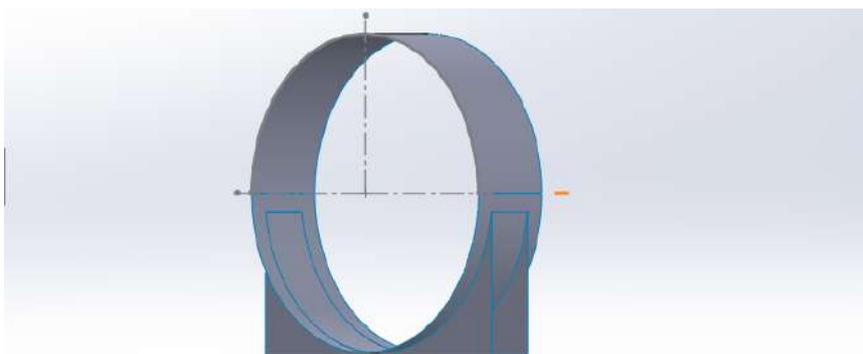
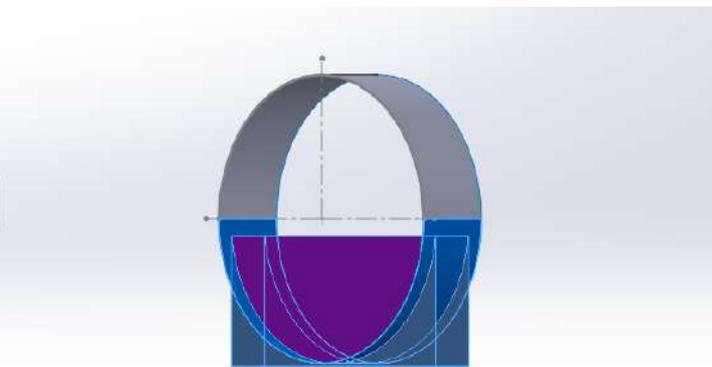
5. Se diseña uno de los soportes con las medidas dadas por el fabricante en la vista lateral, coincidiendo con el centro del cilindro.



6. Se extruye el soporte con el comando superficie en ambos lados. Para ello seleccionamos: superficie→extruir→dirección 1: Plano medio→2490mm. Se selecciona una distancia inferior al diámetro del cilindro para que los soportes no coincidan con el corte de las mitades del cilindro.

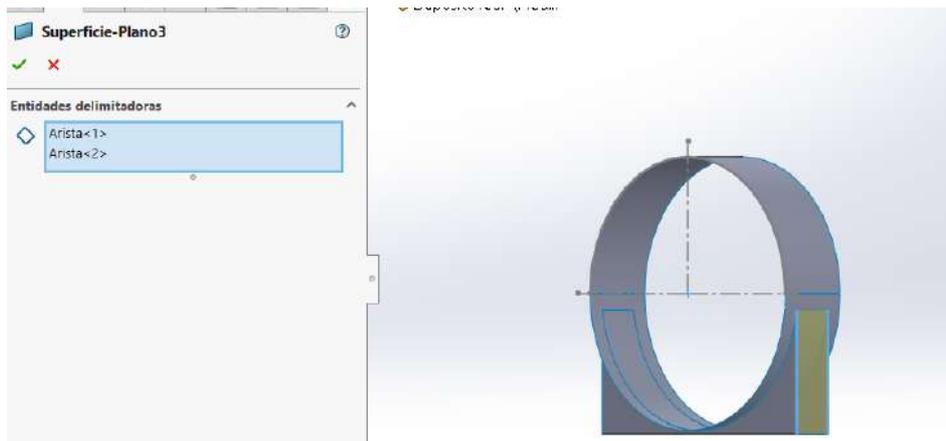


7. Se recorta la zona del soporte que se encuentra en el interior del depósito. Para ello se selecciona: superficie→recortar→herramienta de recortar: borde que rodea el soporte por la parte superior→eliminar selecciones: parte interior del soporte

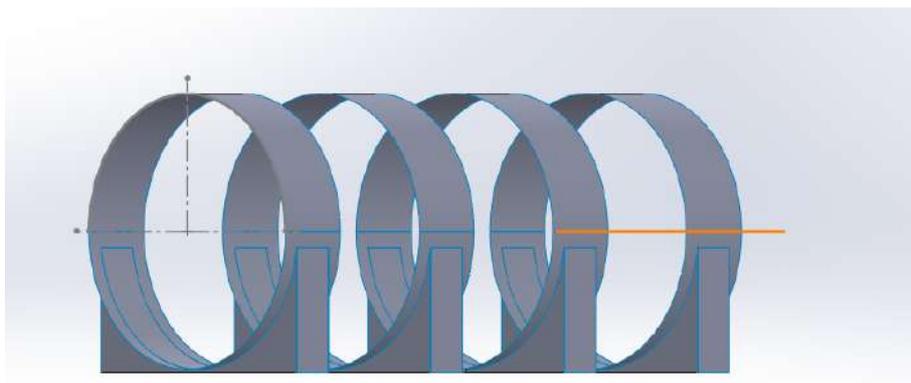
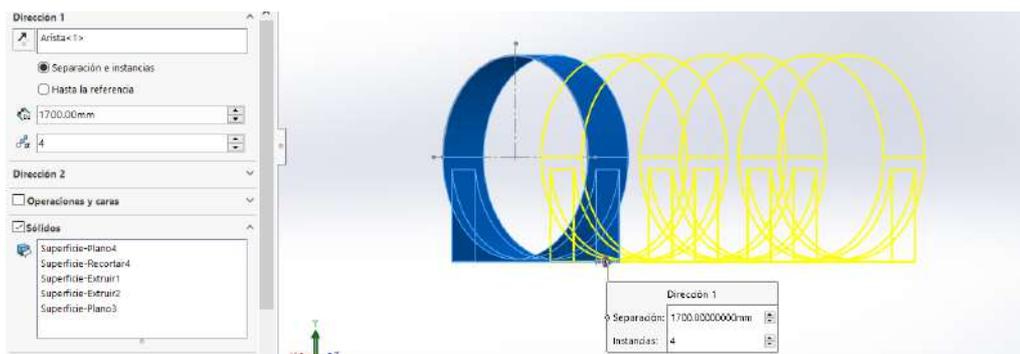


8. Se crean dos nuevas superficies para las zonas exteriores del soporte: superficie→plano→seleccionamos las 2 aristas de los laterales.

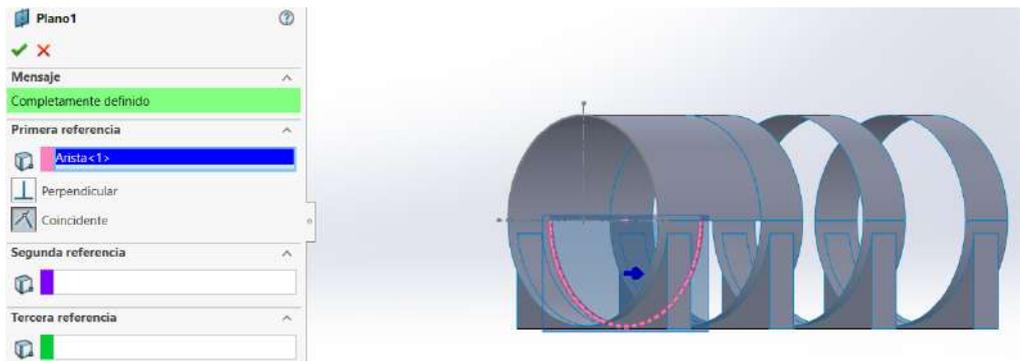
2. ANEXO



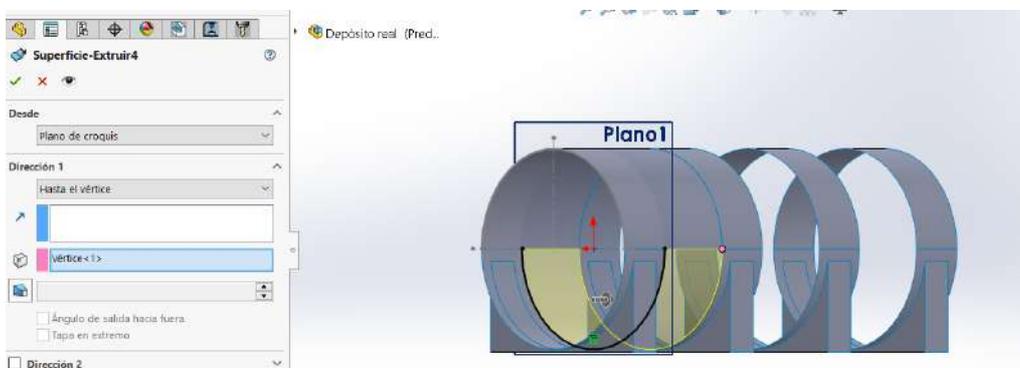
9. Se crea una matriz para la pieza creada, con una separación 1700mm. Para ello se selecciona: matriz → Dirección 1: se selecciona la arista horizontal inferior del soporte → Separación e instancias: 1700mm → Sólidos: se seleccionan todas las superficies creadas.



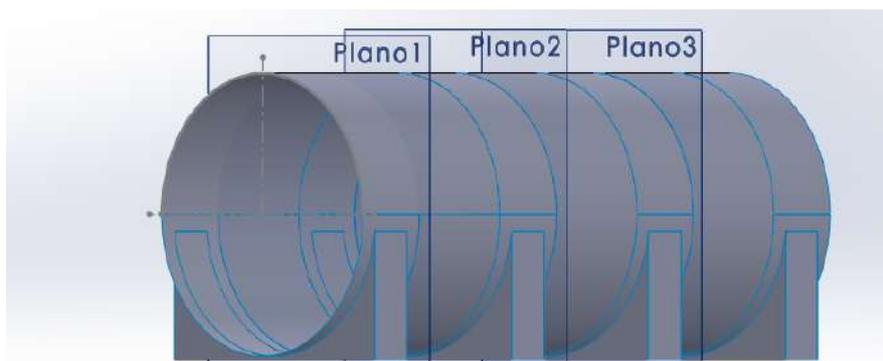
10. Se crea un plano en la parte interior del primer cilindro para poder crear dos nuevas superficies (superior e inferior) que se unan al cilindro siguiente: Plano → Primera referencia: arista interior.



11. Se realizan nuevas superficies para unir las partes inferiores y superiores de las zonas huecas del depósito: superficie → extruir → Hasta el vértice: se selecciona arista del extremo al que lo vamos a unir



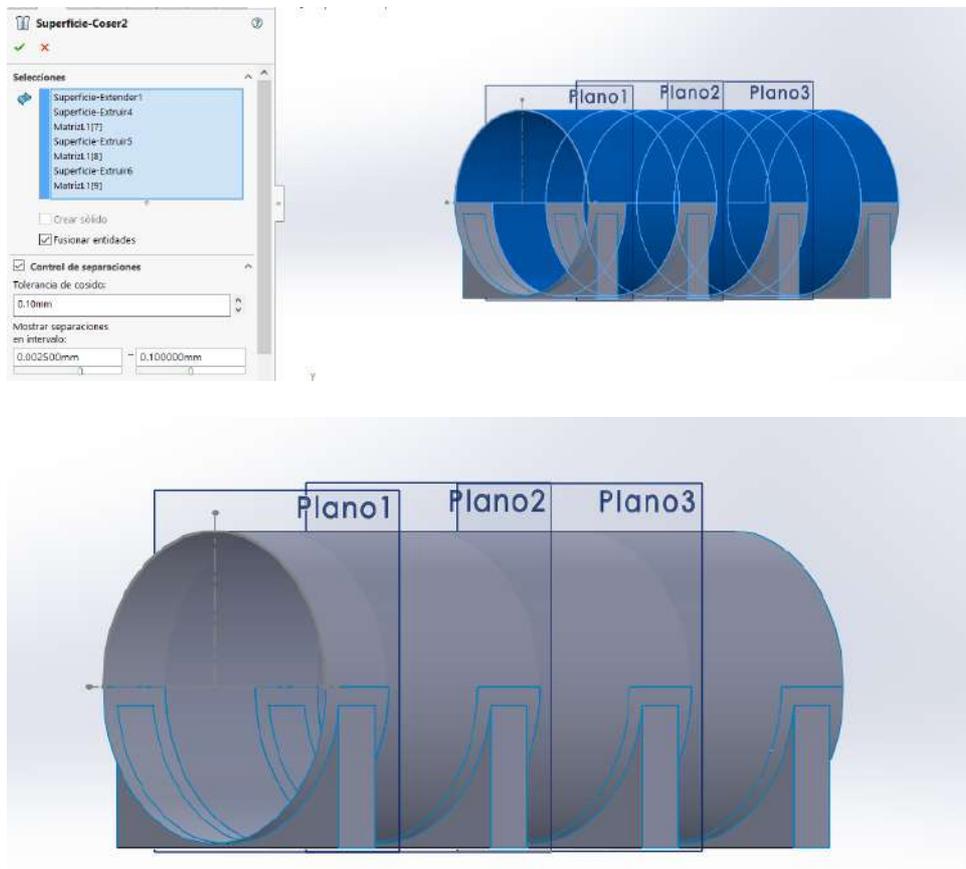
12. Se repite el mismo proceso para las dos zonas interiores que quedan huecas (se construyen planos y se crean superficies superiores e inferiores).



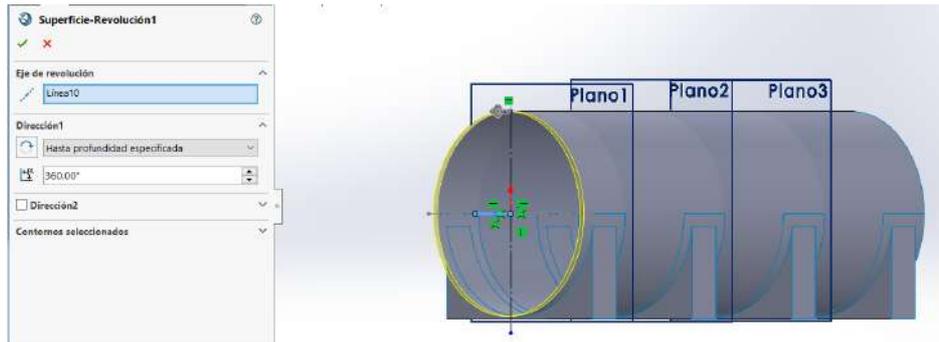
13. Para unir todas las superficies del cilindro del mismo espesor, se utiliza la función “coser”, para ello: superficie → coser → Selecciones: se seleccionan las distintas superficies a unir → se selecciona “fusionar entidades” → se

2. ANEXO

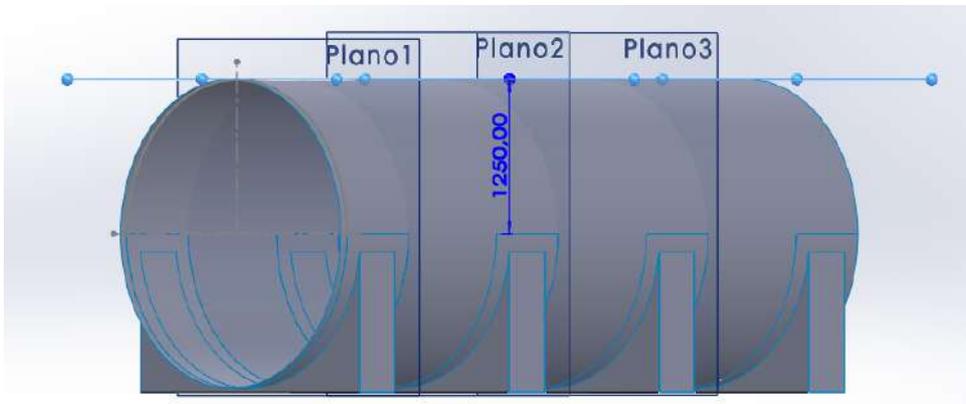
selecciona “control de parámetros”→Tolerancia de cocido: 0,10mm→Mostrar separaciones en intervalo: 0,002500mm – 0,100000mm..



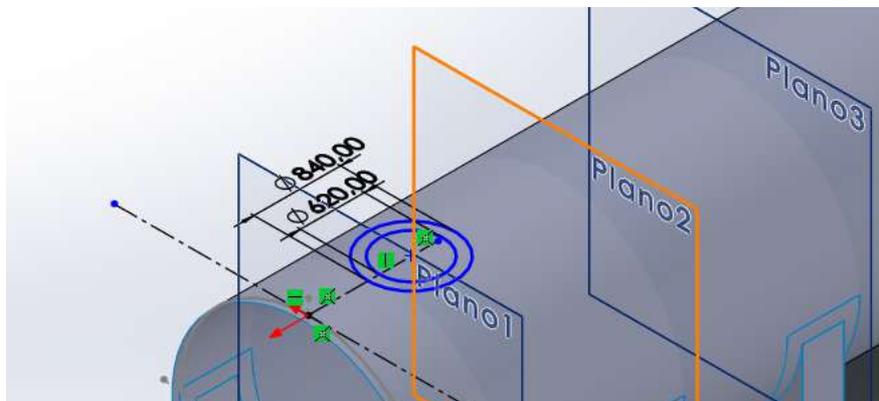
14. Se crea una nueva superficie de 70mm que coincide con la soldadura del cilindro con las tapas. Para ello se crea una línea en el croquis de la vista lateral y luego se revoluciona. Para esto último, se selecciona: superficie→revolución →eje de revolución: línea central→ Dirección 1→ Hasta profundidad especificada: 360°. Se realiza la misma operación para la otra cara del depósito.



15. Se crea un plano en la parte superior del depósito para añadir la boca de hombre.

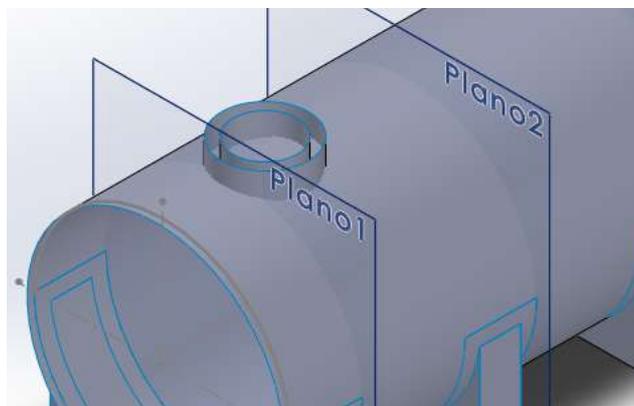
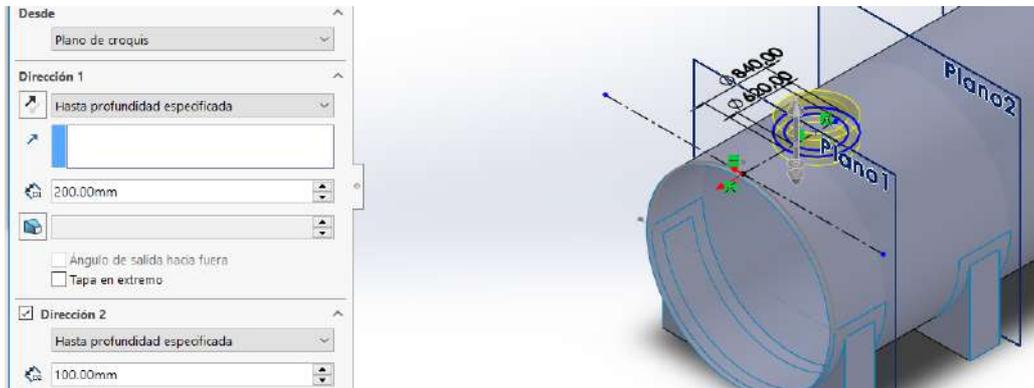


16. Se crea un croquis en el nuevo plano: se hacen dos círculos, uno de 620mm que corresponde con el diámetro de la boca de hombre y otro de 840 mm que nos servirá posteriormente para crear una nueva superficie para la soldadura de la boca de hombre.



2. ANEXO

17. Se hace una extrusión para los dos círculos creados, en donde se extruirán 200mm hacia afuera y 100mm hacia el interior del depósito.

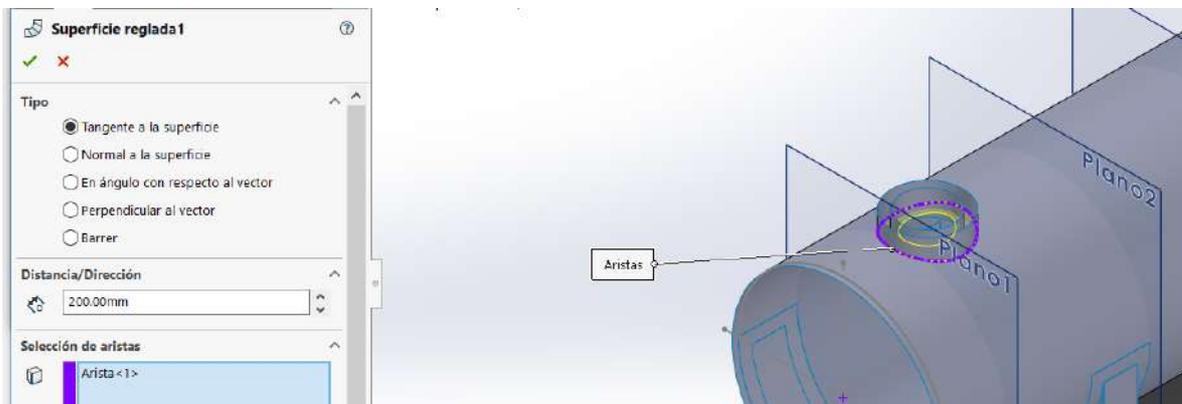


18. Se recorta el interior de la boca de hombre: Superficie→Recortar→Tipo de recorte: estándar → Herramienta de recortar: se selecciona la superficie del cilindro → Eliminar selección: se selecciona el interior de la boca de hombre.



19. Se crea una nueva superficie entre el cilindro de 840mm y la boca de hombre de 620mm, de tal forma que se obtenga una nueva superficie que represente la soldadura de la boca de hombre al depósito. Para ello se selecciona: superficie

reglada→tangente a la superficie→Distancia: 200mm→Selección de aristas:
arista del círculo de 840mm.

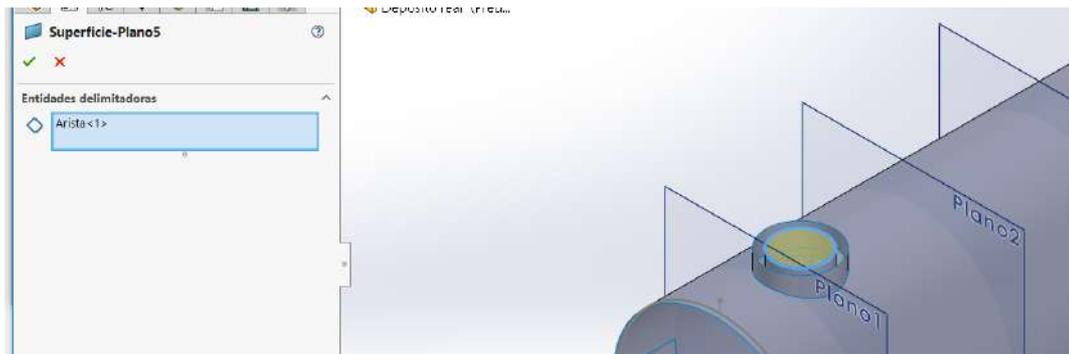


20. Se recorta la parte de la nueva superficie que se ha insertado en el interior de la boca de hombre. Se ha creado en el paso anterior, una superficie mayor para asegurar que las superficies están juntas.

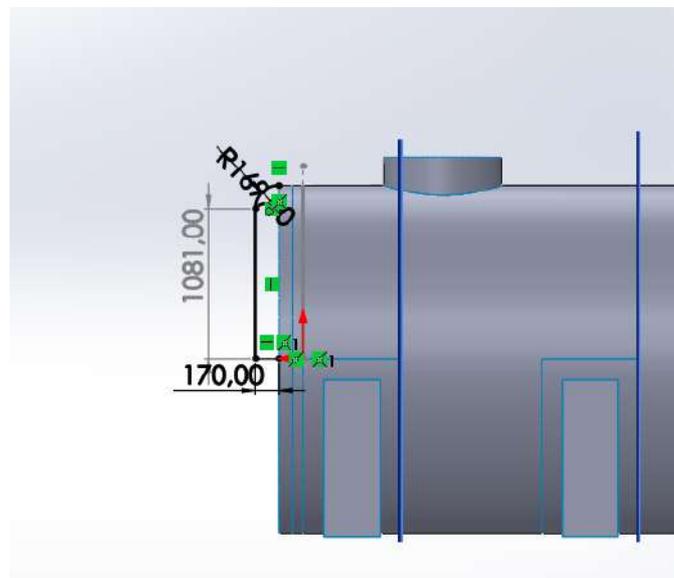


21. Se crea un plano que simboliza la tapa de la boca de hombre: superficie→plano→elementos delimitados: se selecciona el círculo interior.

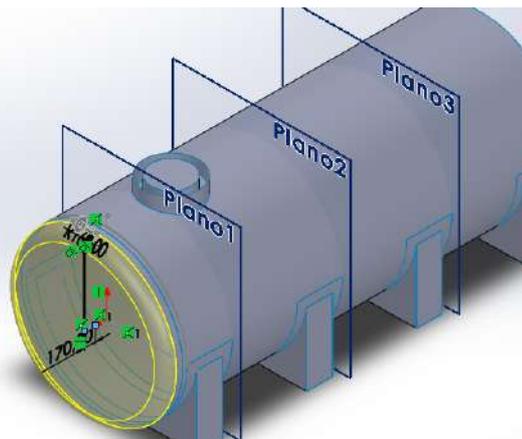
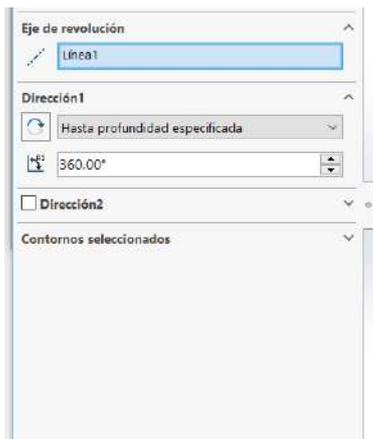
2. ANEXO



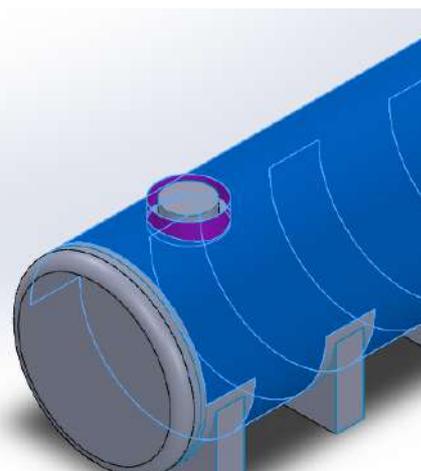
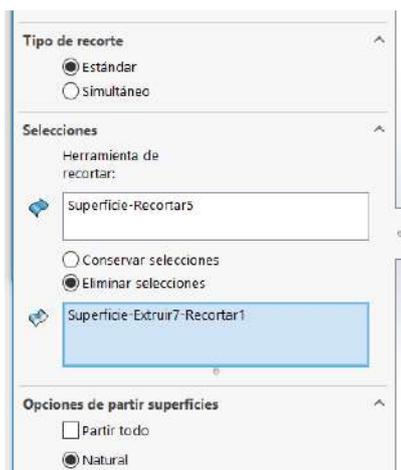
22. Se crea un plano en la vista lateral donde se diseñan las tapas del depósito.



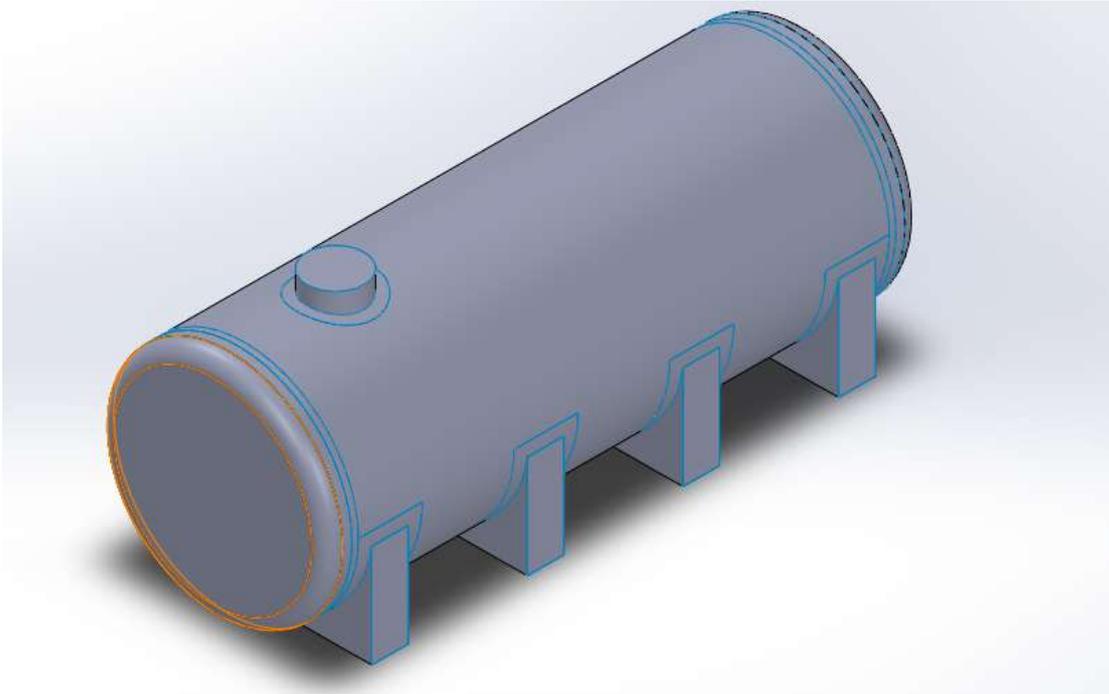
23. Se revoluciona el croquis para obtener la superficie de las tapas.



24. Se recorta la superficie del cilindro exterior que no nos interesa: superficie → recortar → Herramienta de recortar: se selecciona el cilindro del depósito → eliminar selecciones: se selecciona la superficie del cilindro exterior.



25. El resultado final es el siguiente:

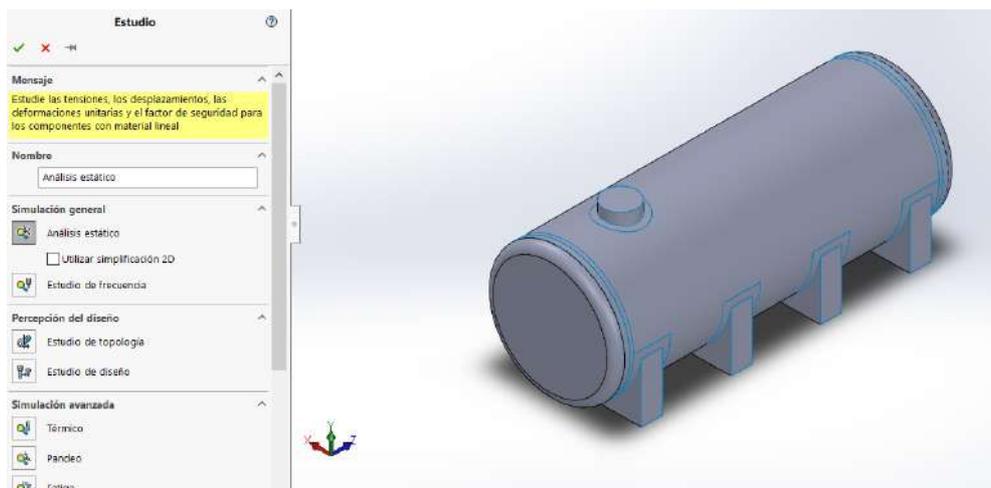


C. PROCESO DE SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS

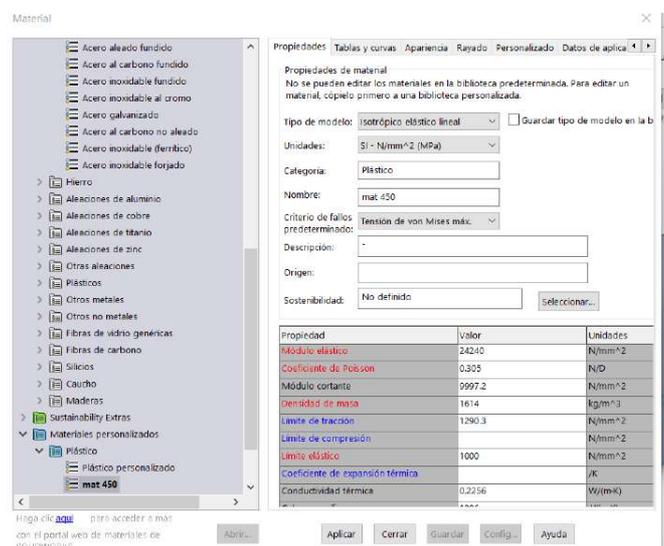
Se explican los pasos seguidos para las simulaciones de los distintos casos de estudio que se han realizado.

- Presión hidrostática

1. Se inicia un nuevo estudio, para ello seleccionamos: simulación → nuevo estudio → análisis estático.



2. Se aplica el material creado (Mat 450g + resina ortoftálica) a todos los cuerpos.



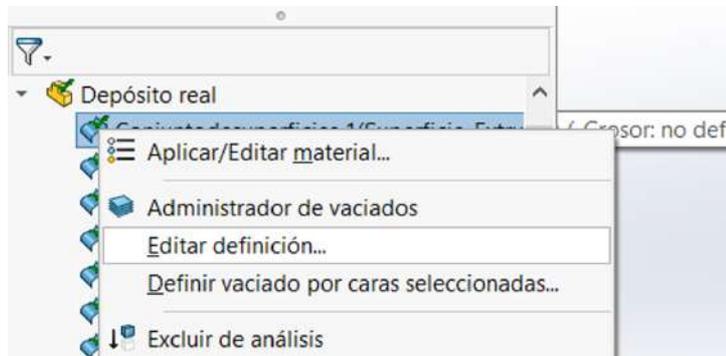
3. Se añaden los distintos espesores para cada superficie

- Cilindro: 6mm de espesor
- Soportes: 7mm de espesor
- Boca de hombre: 8mm de espesor
- Cabezales: 10mm de espesor
- Soldaduras: se debe añadir el total del espesor de la soldadura (6mm) más el espesor que tiene el cuerpo a unir, imitando el espesor final que tiene esa superficie.

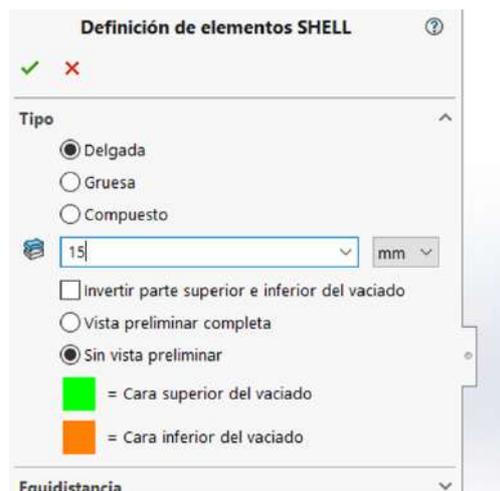
2. ANEXO

Para añadir al programa, los distintos espesores:

3.1 Seleccionamos la superficie a editar, clicamos en el botón derecho y vamos a “editar definición”

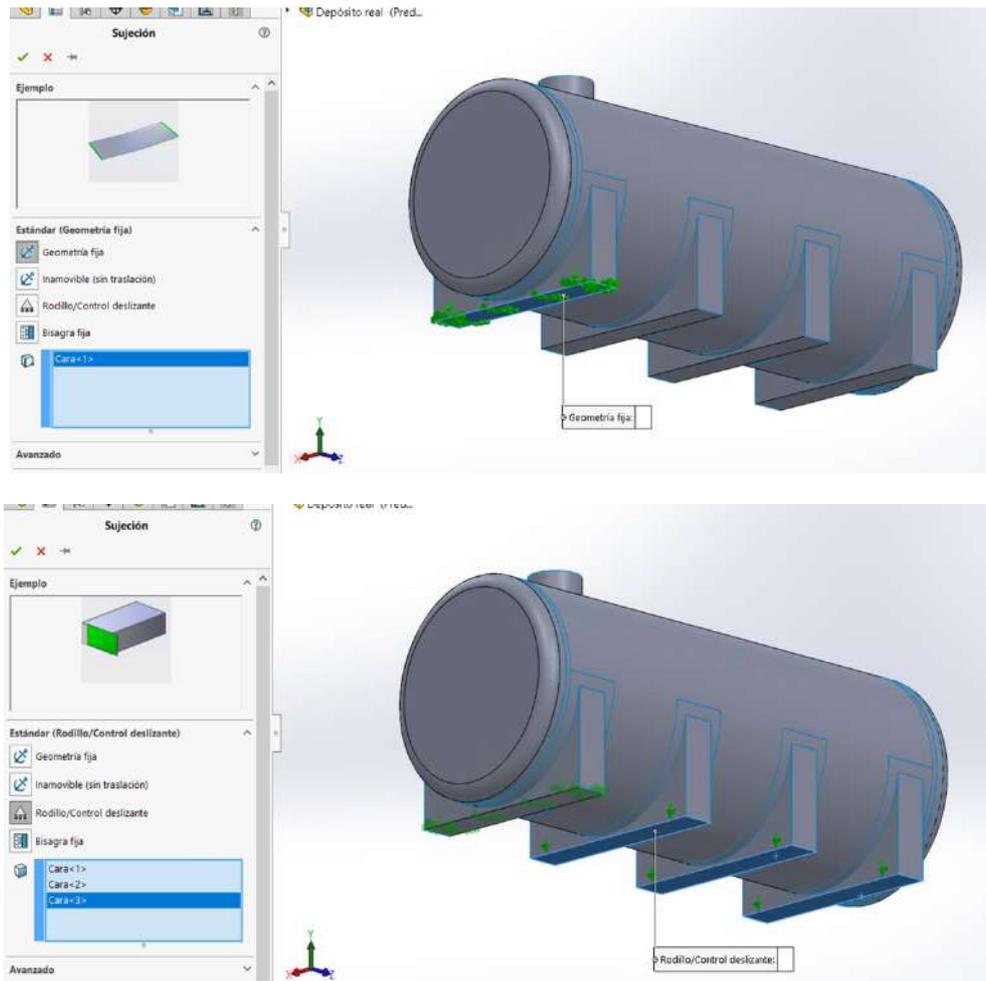


3.2 Dentro del menú, se añade el espesor determinado para cada superficie.



4. Se establecen las sujeciones:

- Sujeción fija a uno de los soportes: se pone una sujeción fija para dar estabilidad al depósito, logrando que no se mueva de su ubicación, ya que con esta condición se restringen todos los movimientos en esta superficie.
- Sujeción de rodillo en el resto de soportes: se restringe el desplazamiento vertical de estos soportes, para simular el apoyo del recipiente en el suelo. Esto permite que se encuentren fijos al suelo pero que tengan libertad de movimiento en las direcciones no restringidas.



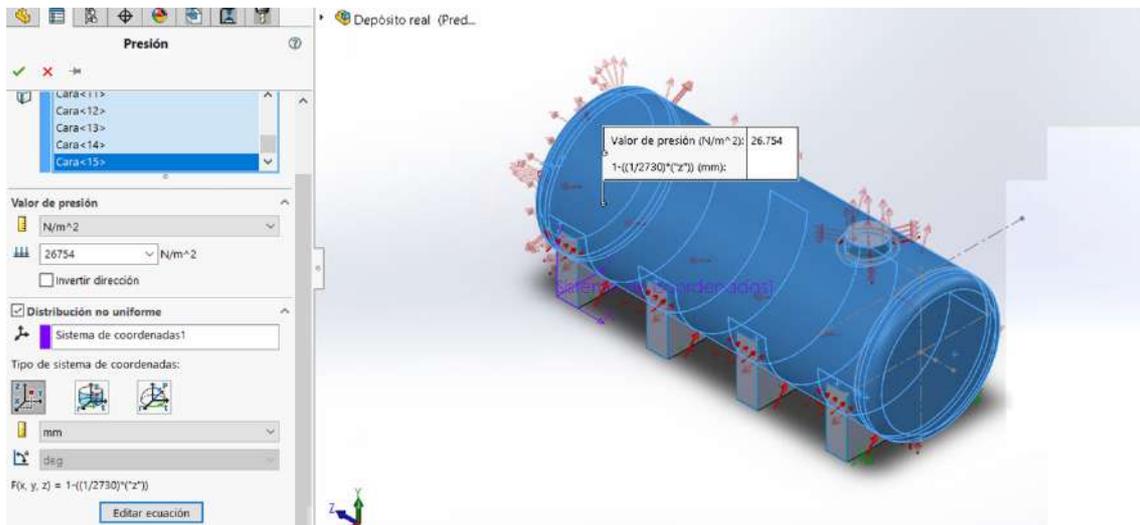
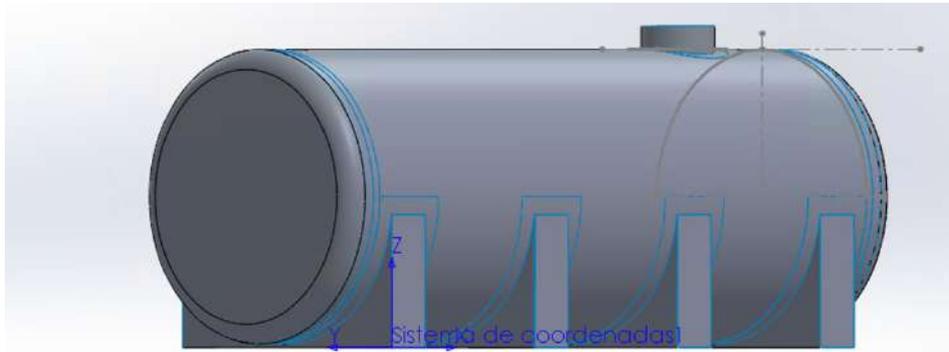
- Se añade la presión del líquido a contener, que en nuestro caso será agua. Para ello, vamos a: Asesor de cargas externas → Presión → clicamos en distribución no uniforme → seleccionamos un sistema de coordenadas creado por nosotros como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** → se seleccionan todas las superficies que estén en contacto con el agua → se añade el valor de la presión del agua, que se ha calculado anteriormente, con valor es de 26754 N/m².

Para aplicar la presión del agua en el centro del cilindro, debemos hacer una “distribución no uniforme”, por lo que clicamos en este apartado, nos situamos en el nuevo sistema de coordenadas y añadimos la función que me situé la carga en el lugar más desfavorable, que en este caso será a la altura de la tapa de la boca de

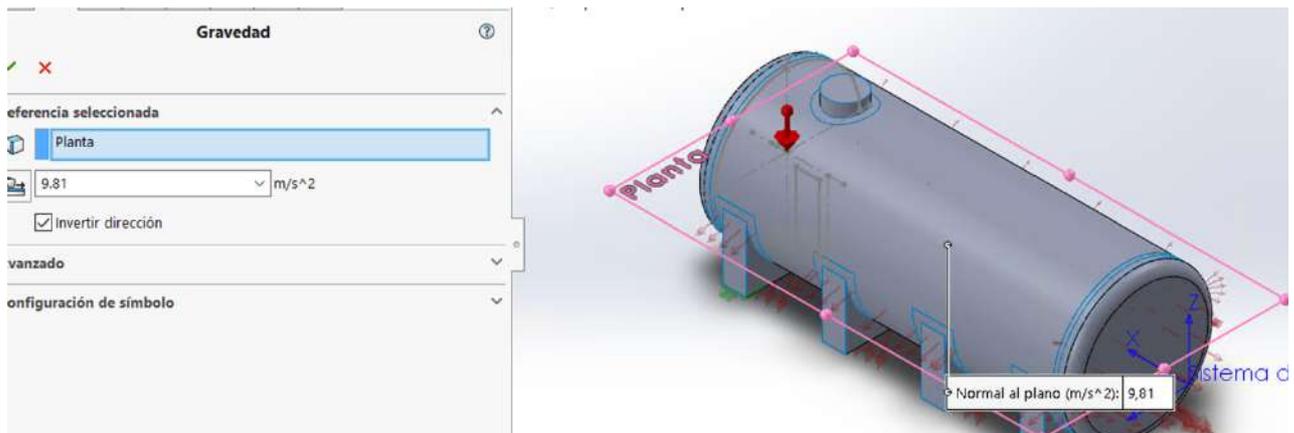
2. ANEXO

hombre, por si se llenase hasta arriba. Por lo que la función que se inserta en este apartado es:

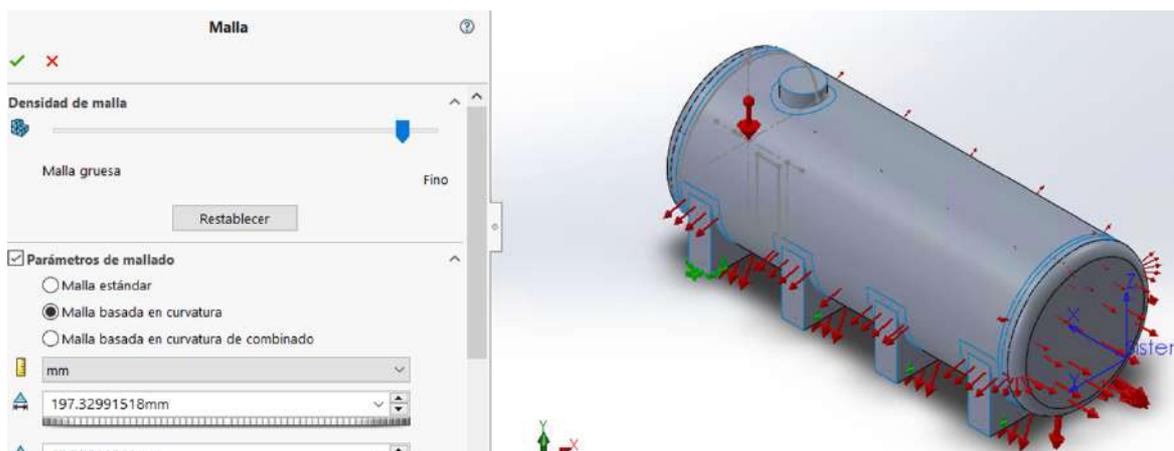
$$f = 1 - \left(\left(\frac{1}{h} \right) * ("z") \right) = 1 - \left(\left(\frac{1}{2730} \right) * ("z") \right)$$



- Añadimos la carga del peso propio del recipiente. Para ello, se añade la carga de gravedad: Asesor de cargas externas → gravedad → referencia seleccionada: plano de planta → añadimos el valor de la gravedad: 9,81m/s².



7. Mallamos el depósito con una malla fina basada en curvatura. Utilizamos este tipo de malla porque nos va a permitir tener resultados más precisos teniendo en cuenta las características geométricas y el comportamiento de la estructura en zonas con curvas y se ejecuta.



- *Prueba hidráulica*

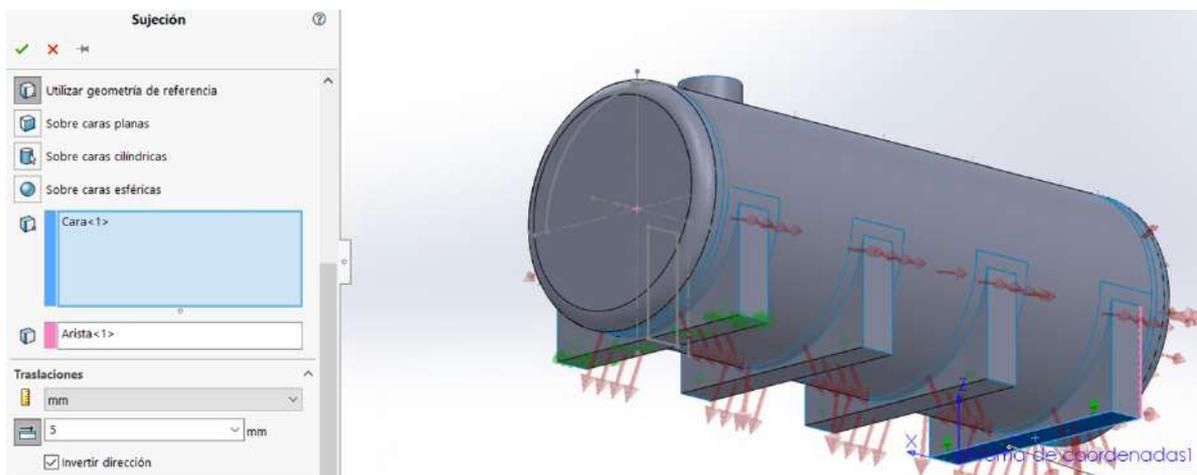
La norma UNE-EN 13121-3 nos dice que, para los depósitos sometidos a presión, debe realizarse un ensayo de presión hidráulica. Para ello, deben someterse a una presión igual a 1,3 veces la presión de cálculo a temperatura ambiente. Por tanto, variamos el valor de la presión hidrostática del caso anterior de 26754 N/m² a 34780,2 N/m². Creamos una malla y ejecutamos el estudio.

2. ANEXO

- ***Desplazamiento de soporte a 10mm del suelo***

En esta situación, se simula que uno de los soportes no se encuentra a la misma altura que el resto, ya sea porque el suelo no se encuentra nivelado o por fallo en fabricación del depósito. Este estudio lo realizamos aplicando las cargas hidrostáticas y la del peso propio. Los pasos a seguir son:

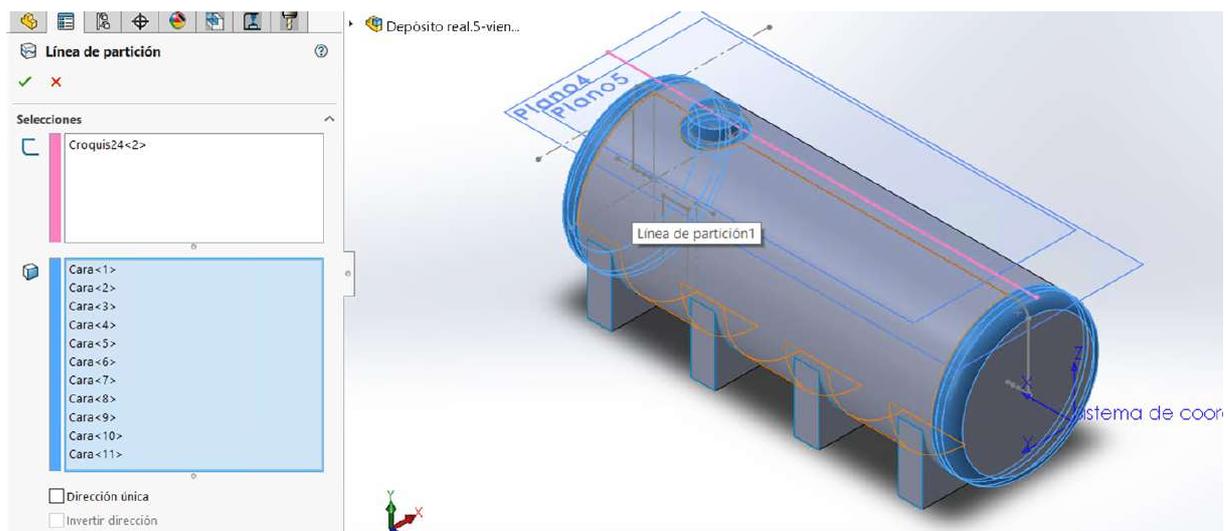
1. Se ejecuta un nuevo estudio, se añade el material y espesores para cada superficie.
2. Se añade sujeción fija en un soporte de los extremos, sujeción de rodillo en los soportes interior, dejando el soporte del otro extremo sin restringir, ya que será el que desplazaremos.
3. Se añaden las cargas hidrostáticas y la carga del peso propio, siendo la situación más desfavorable en la que el recipiente podría encontrarse si se diese este caso.
4. Se añade un desplazamiento en el soporte del extremo libre, siguiendo los siguientes pasos: seleccionamos “asesor de cargas externa”→ desplazamiento prescrito→ seleccionamos la cara que se ve a desplazar→ seleccionamos la arista en la dirección del desplazamiento→Traslaciones: 10mm.



5. Se crea una malla fina basada en curvatura y se ejecuta.

- *Carga de viento*

Para poder simular la carga de viento en el depósito, es necesario definir en el modelo, la superficie donde se va a aplicar dicha carga. Para ello: se crea un nuevo plano a la altura de la tapa de la boca de hombre → se dibuja una línea recta en todo el largo del depósito → se selecciona “línea de partición” → se selecciona la línea en el plano → se seleccionan todas las caras en donde se realice el corte.



Posteriormente, se ejecuta un nuevo estudio:

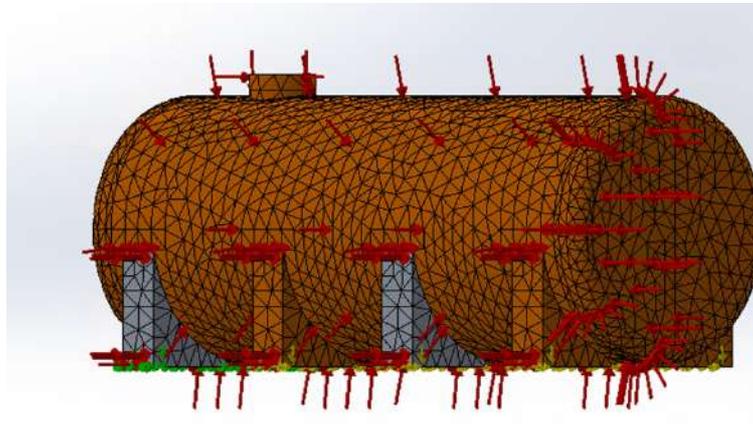
1. Se realiza un nuevo estudio y se selecciona “análisis estático”
2. Se añade el material y los espesores para cada superficie.
3. Se añade una sujeción fija en uno de los soportes, y sujeción de rodillo con restricción en la dirección vertical y en la dirección del viento en el resto de soportes, para evitar que nos den grandes desplazamientos.
4. Se añade el peso propio a través de la fuerza de la gravedad
5. Se añade la presión del viento calculada anteriormente, según la norma aplicada, de $315,75\text{N/m}^2$ en todas las caras que vayan a estar en contacto con el:
 - a. Superficie lateral del cilindro, parte frontal de los soportes y boca de hombre, ya que ahí la presión del viento se ejerce directamente

2. ANEXO

- b. Interior de los soportes, ya que el viento ejerce presión en esta zona por acumulación.

A medida que aumenta la altura del depósito sobre el suelo, la velocidad del viento varía, así como también lo hace por la rugosidad del terreno y otros factores ambientales. Sin embargo, esta variación no la tendremos en cuenta, por lo que añadiremos el mismo valor de presión en todas las superficies de contacto del depósito, obteniendo la situación más desfavorable.

6. Creamos malla fina basada en curvatura y ejecutamos, obteniendo los siguientes resultados:



Para la carga de viento también se ha hecho un estudio de pandeo siguiendo los siguientes pasos:

1. Se ejecuta un nuevo estudio, en este caso, seleccionamos “Análisis por pandeo”
2. Se añaden los espesores, sujeciones y cargas iguales al caso anterior.
3. Se añade el número de modos que nos va a calcular el programa. El número de modos hace referencia a las formas de vibración o deformación que el modelo va a experimentar al someterse a cargas de compresión axial. Los modos representan las configuraciones más críticas que pueden ocurrir en la estructura y cada uno tienen asociada una carga crítica llamada “carga de

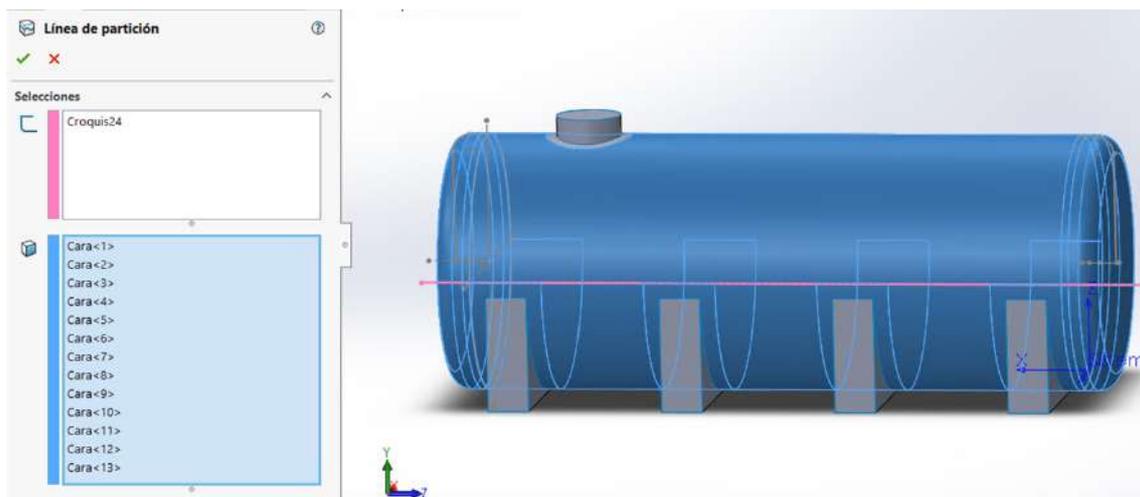
pandeo”. Cada modo tiene un número, siendo el modo 1 la deformación más crítica, disminuyendo su valor a medida que aumenta el número de modo. Para verificar que nuestro depósito cumple a pandeo, consideramos como carga crítica mínima permitida un factor igual a 1.

4. Ejecutamos y vemos los resultados.

- **Presión de vacío**

Conocidas las presiones que actúan en cada mitad del recipiente, se procede a realizar el estudio, para ello se realizan los siguientes pasos:

1. Se crea en el modelo, una línea de partición en la mitad del depósito, en el plano de la vista lateral, que corresponde con el nivel de agua que va a tener el depósito.



2. Se ejecuta un nuevo estudio, seleccionamos “análisis estático”, añadimos el material y los espesores de las distintas superficies.

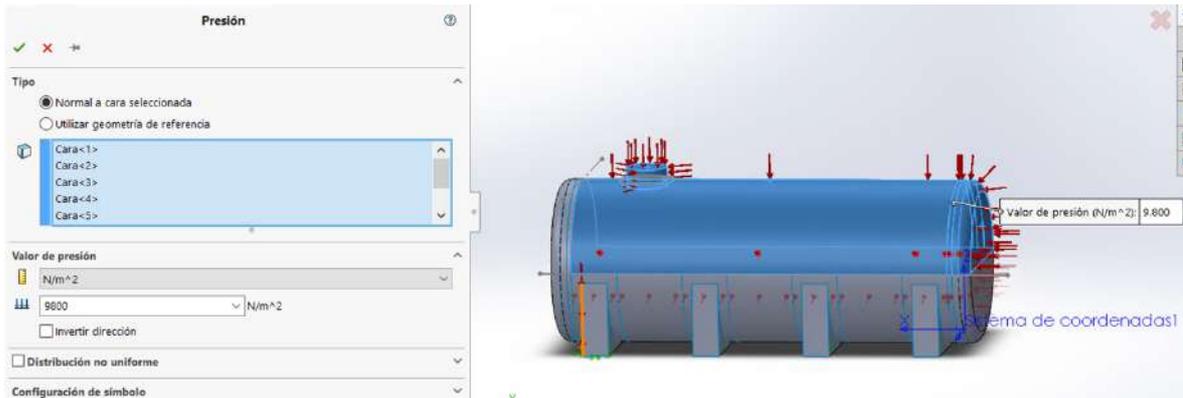
3. Se añaden las mismas sujeciones que para la carga hidrostática: sujeción fija en un soporte para restringir en él, todos los movimientos y sujeción de rodillo en el resto de los soportes para impedir el movimiento vertical de estos.

4. Se añade la carga del peso propio con la fuerza de la gravedad.

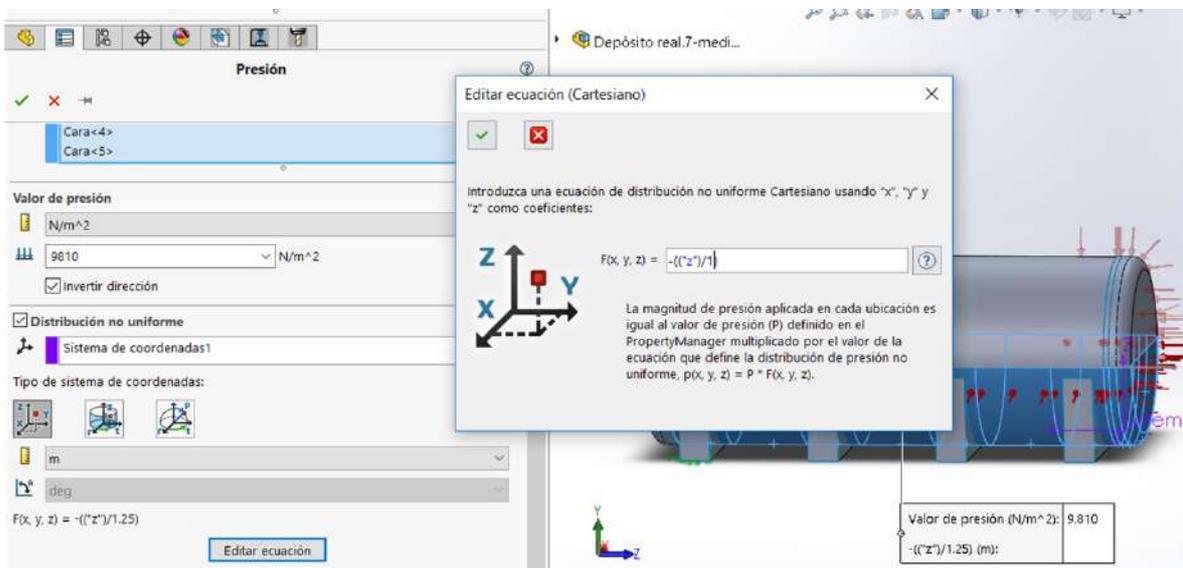
2. ANEXO

5. Se añaden las cargas de presión de vacío. En este caso, se hizo un primer estudio con la altura del nivel de agua a la mitad del depósito (1250mm) pero el programa no ejecutó con esta altura. Posteriormente, se realizó para una altura de 1000mm y si se obtuvieron resultados. Por lo que, para esta altura, la presión de vacío que añadimos a la parte superior es:

$$P_{vacio} = -\rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1 = 9810 N/mm^2$$



6. Se añaden las cargas producidas por el agua del interior, por lo que se agrega con distribución no uniforme



7. Mallamos con malla fina basada en curvatura y se ejecuta.

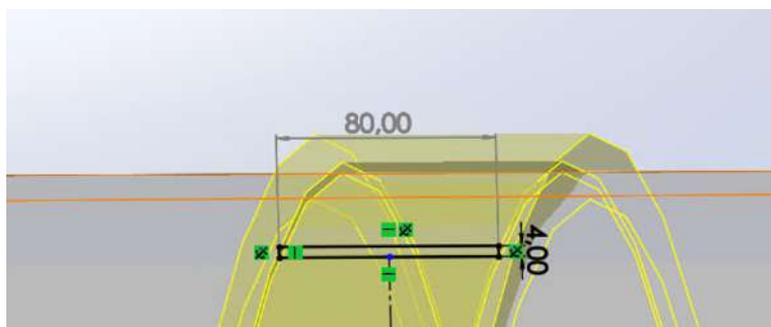
Para esta situación también tiene que hacerse un análisis de pandeo, ya que las presiones negativas están ejerciendo compresión sobre las superficies del recipiente

1. Se ejecuta un nuevo estudio y seleccionamos “análisis de pandeo”
2. Se copian las mismas condiciones que teníamos en el análisis estático
3. Se indican los modos a calcular.
4. Se crea malla y se ejecuta.

- ***Cargas de transporte***

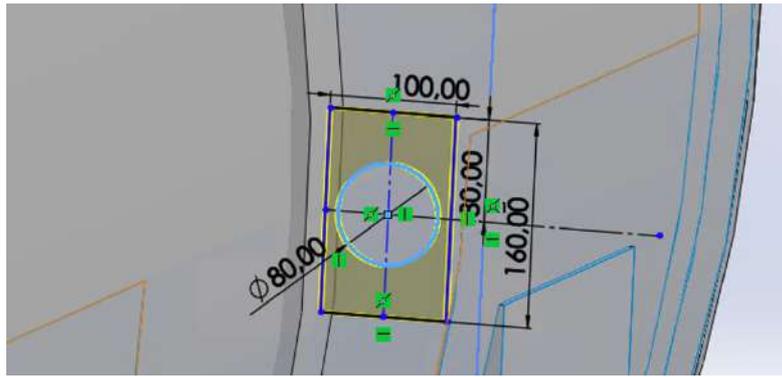
En esta última situación, se analiza el efecto que se produce en el recipiente al ser transportado. Para ello, se han añadido al modelo tres refuerzos de acero que rodean el cilindro, con unas orejetas de elevación en cada extremo lateral para poder atar las eslingas y transportar el recipiente. Los pasos seguidos a la hora de modelar han sido:

1. Se crea un rectángulo de 80x4mm en la parte superior del recipiente, en el plano de la vista lateral y se revoluciona como un sólido.

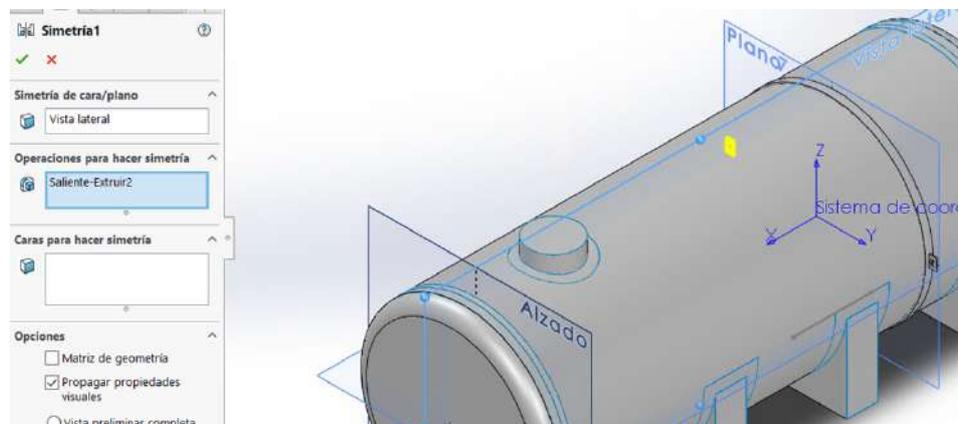


2. Se crea un nuevo plano en la mitad de la pletina y se crea un croquis de una orejeta de 100x150mm con un agujero de 80mm para que pueda ser atravesado por la eslinga. Posteriormente, se revoluciona con la opción “plano medio” con una medida de 15mm.

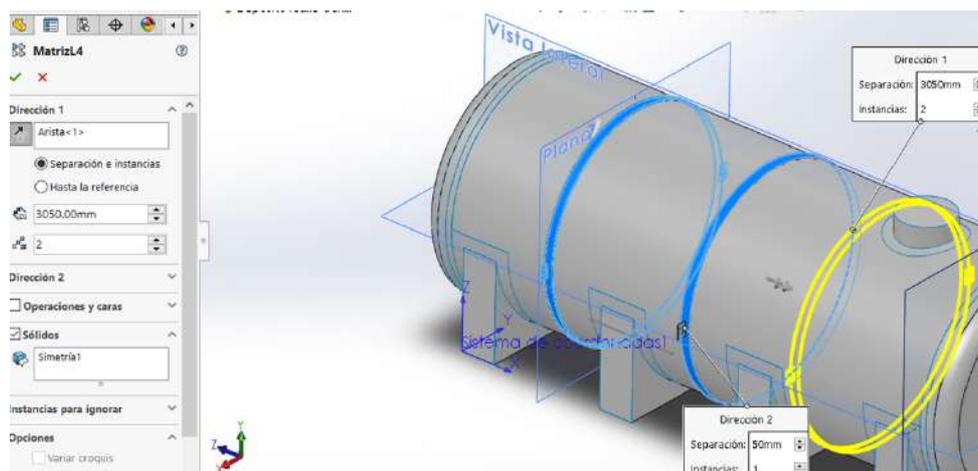
2. ANEXO



3. Se realiza simetría de la orejeta para tenerla a ambos lados del recipiente.

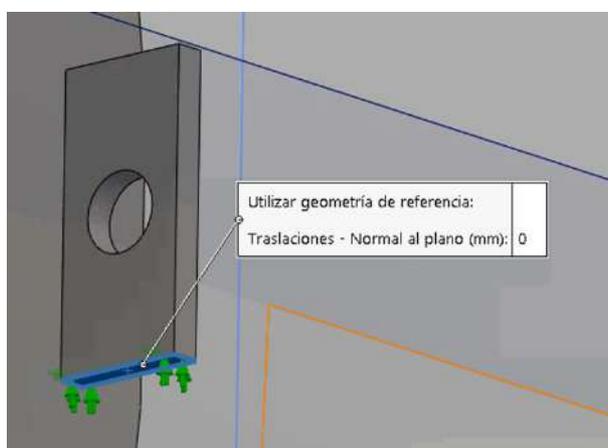


4. Se crea una matriz lineal para añadir dos pletinas más a lo largo del cilindro. La primera se coloca a 1700mm de la de referencia y la segunda a 3050mm para que no junte a la boca de hombre.

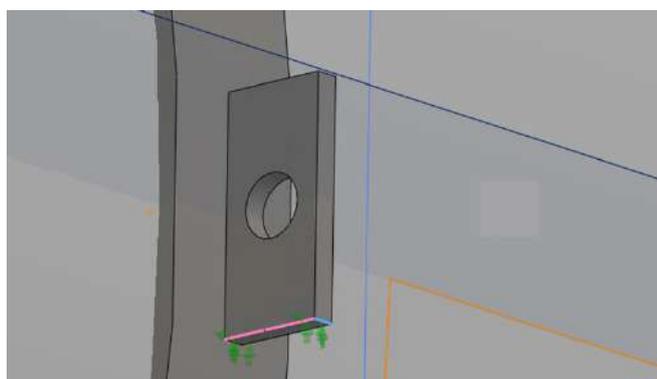


Una vez añadidas las pletinas, se procede a realizar el estudio estático del recipiente. Los pasos seguidos han sido:

1. Se crea un nuevo estudio y se selecciona “análisis estático”.
2. Se añaden los materiales. En el caso de las pletinas, se ha seleccionado Acero 1020.
3. Se añaden las sujeciones. En este caso, como se simula la elevación del depósito para su transporte, a través de las orejetas. Por tanto, pondremos las restricciones en estas y no en los soportes, ya que son las que van a unirse a las eslingas. Por tanto, las restricciones impuestas han sido:
 - a. Restricción en la dirección vertical, para todas las orejetas. Se seleccionan todas las caras inferiores de las orejetas y una arista vertical para restringir esa dirección.

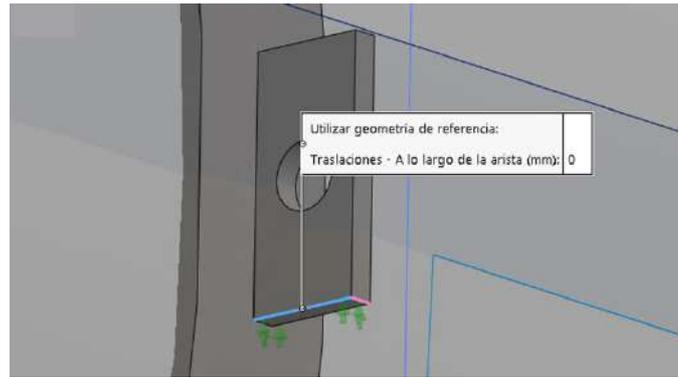


- a. Restricción en la dirección transversal para todas las orejetas de uno de los laterales.

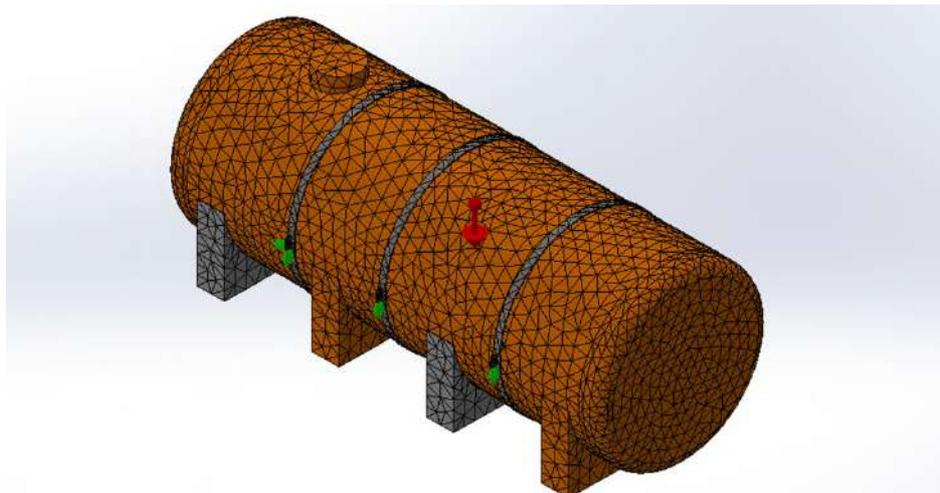


- b. Restricción en la dirección longitudinal del recipiente para las orejetas de uno de los extremos (para ambas).

2. ANEXO



4. Se añade la carga del peso propio, ya que se considera que el recipiente está vacío a la hora de transportarlo.
5. Se crea una malla muy fina basada en curvatura para que no existan problemas a la hora de mallar las pletinas y se ejecuta.



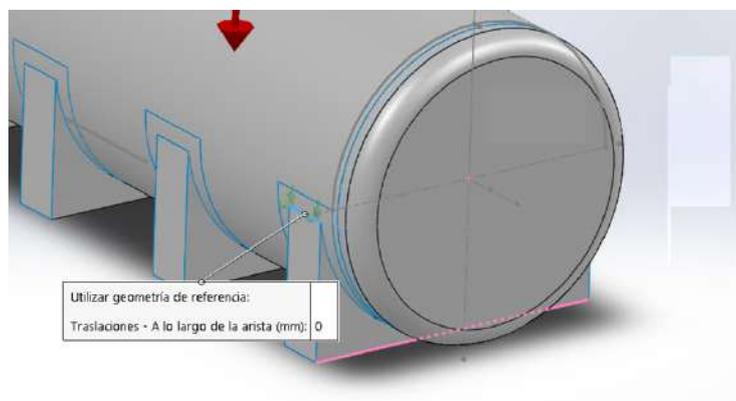
Para esta situación de estudio, también se debe hacer un análisis por pandeo, ya que se debe evaluar la estabilidad del depósito frente a cargas de compresión axial.

Al hacer el estudio, se han tenido en cuenta las mismas condiciones que en el análisis estático: espesores, materiales, sujeciones, presiones, etc. Sin embargo, cuando se ha ejecutado el modelo, no se ha conseguido llegar a ninguna solución, ya que, en el caso del pandeo, el programa no considera que los cuerpos sólidos de las pletinas estén unidos al recipiente.

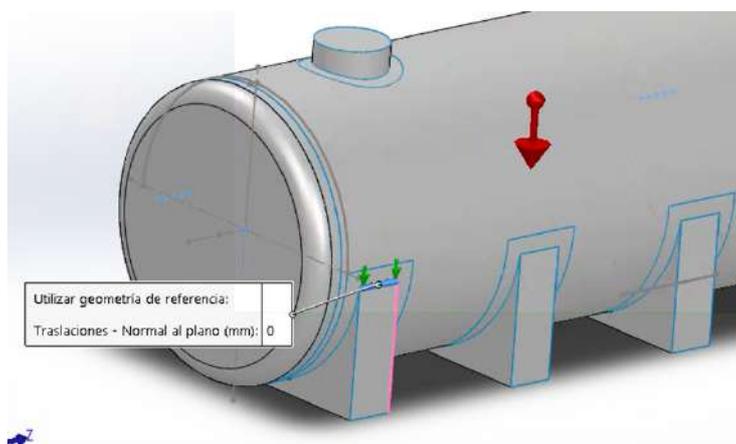
Por tanto, la opción por la que se ha optado en su lugar ha sido considerar el izaje del recipiente por la parte superior de los soportes, eliminando los sólidos creados, correspondientes a las pletinas y orejetas de elevación.

Los pasos seguidos han sido:

1. Ejecutan un nuevo estudio y seleccionar “análisis por pandeo”
2. Añadir material y espesores a cada superficie.
3. Añadir sujeciones en la parte superior de los soportes.
 - a. Se restringe el desplazamiento transversal de uno de los soportes de los extremos.

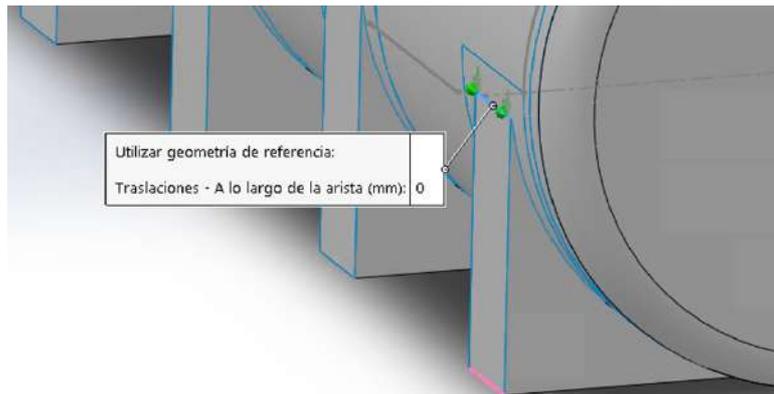


- b. Sujeción en la dirección vertical para los 4 soportes de los extremos en ambos lados.



- c. Sujeción longitudinal en uno de los soportes de uno de los laterales.

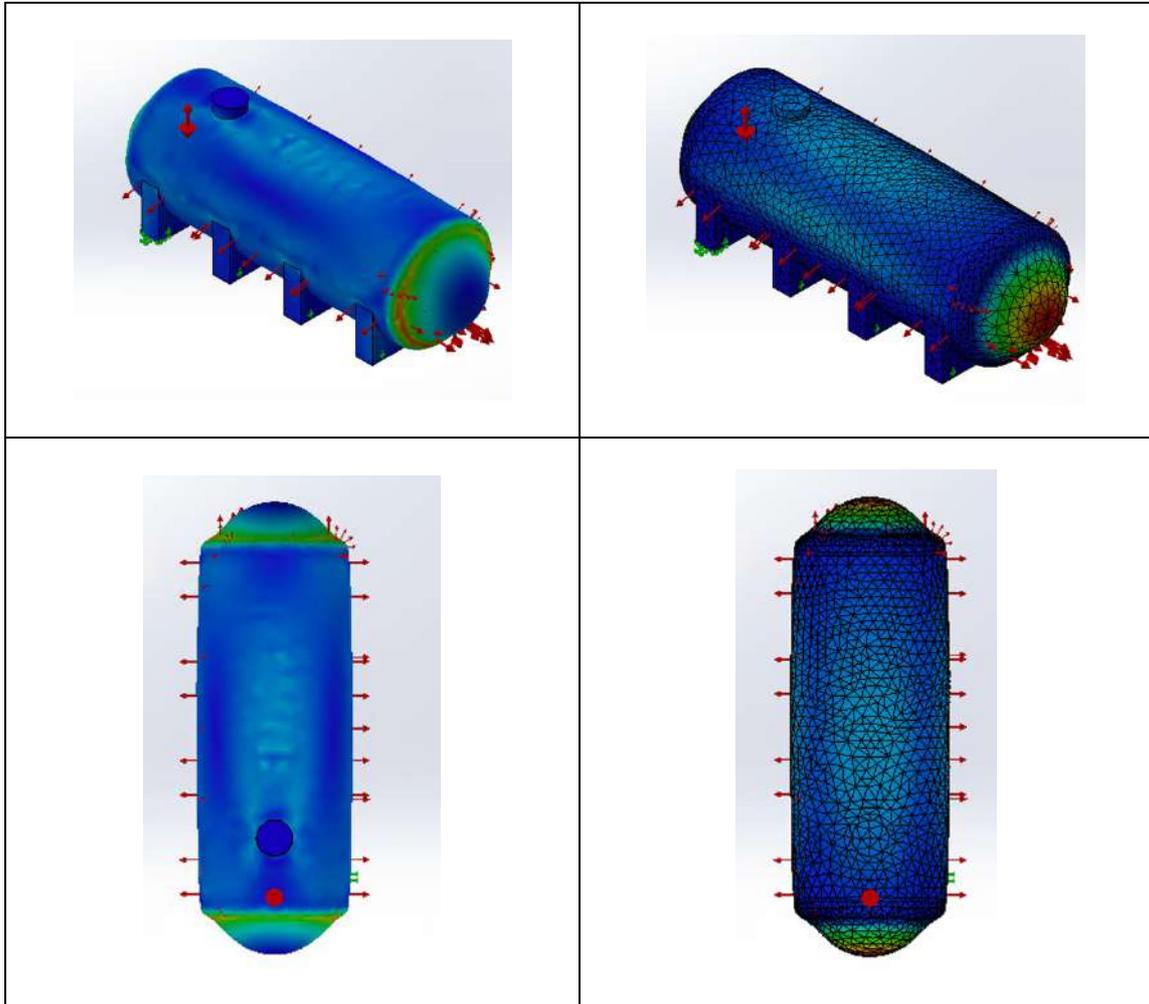
2. ANEXO



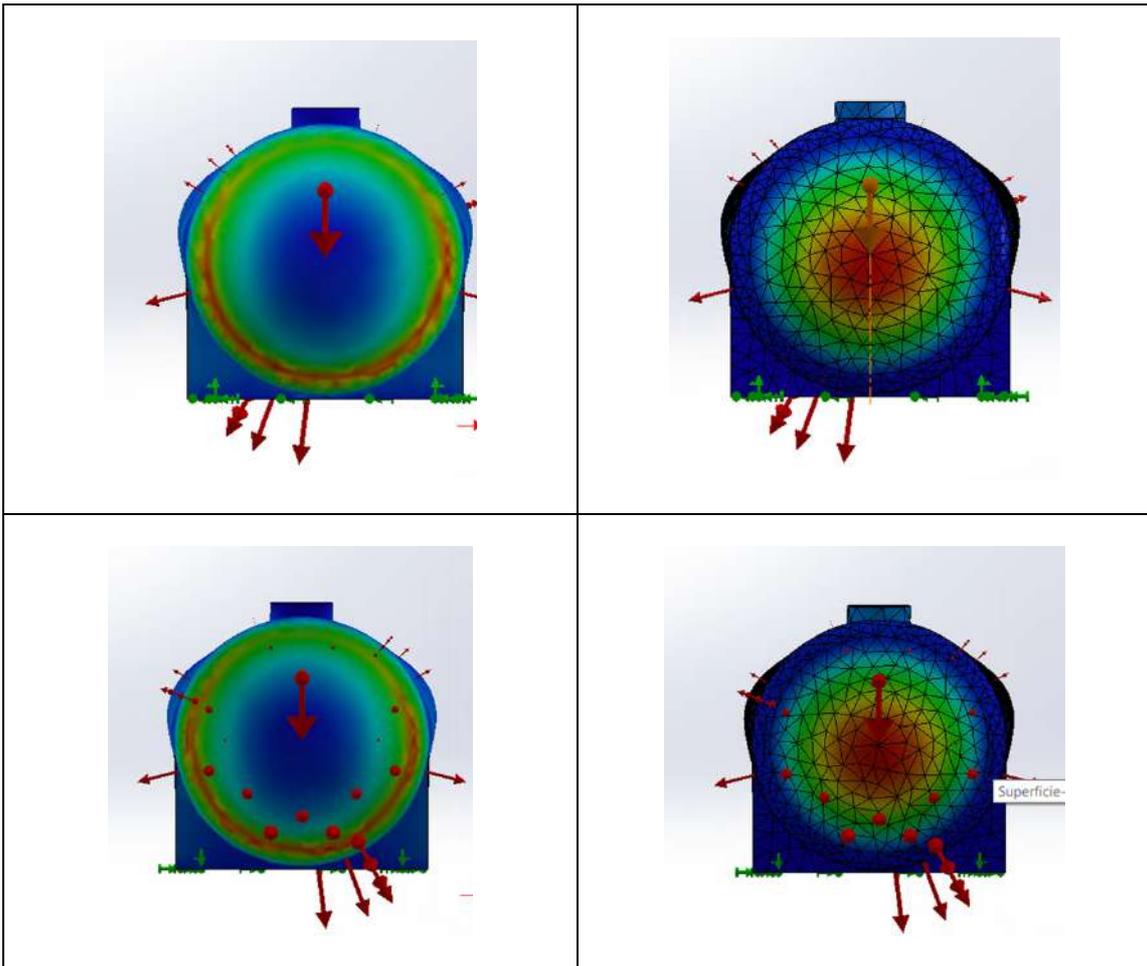
4. Se añade la carga del peso propio.
5. Se seleccionan el número de modos que queremos calcular.
6. Se malla con malla fina basada en curvatura y se ejecuta.

D. REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS SIMULACIONES

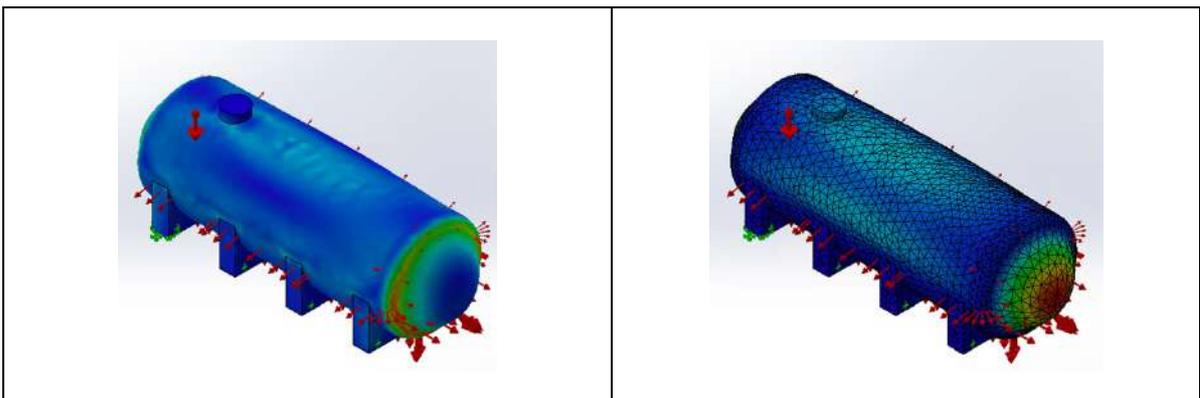
- Carga hidrostática

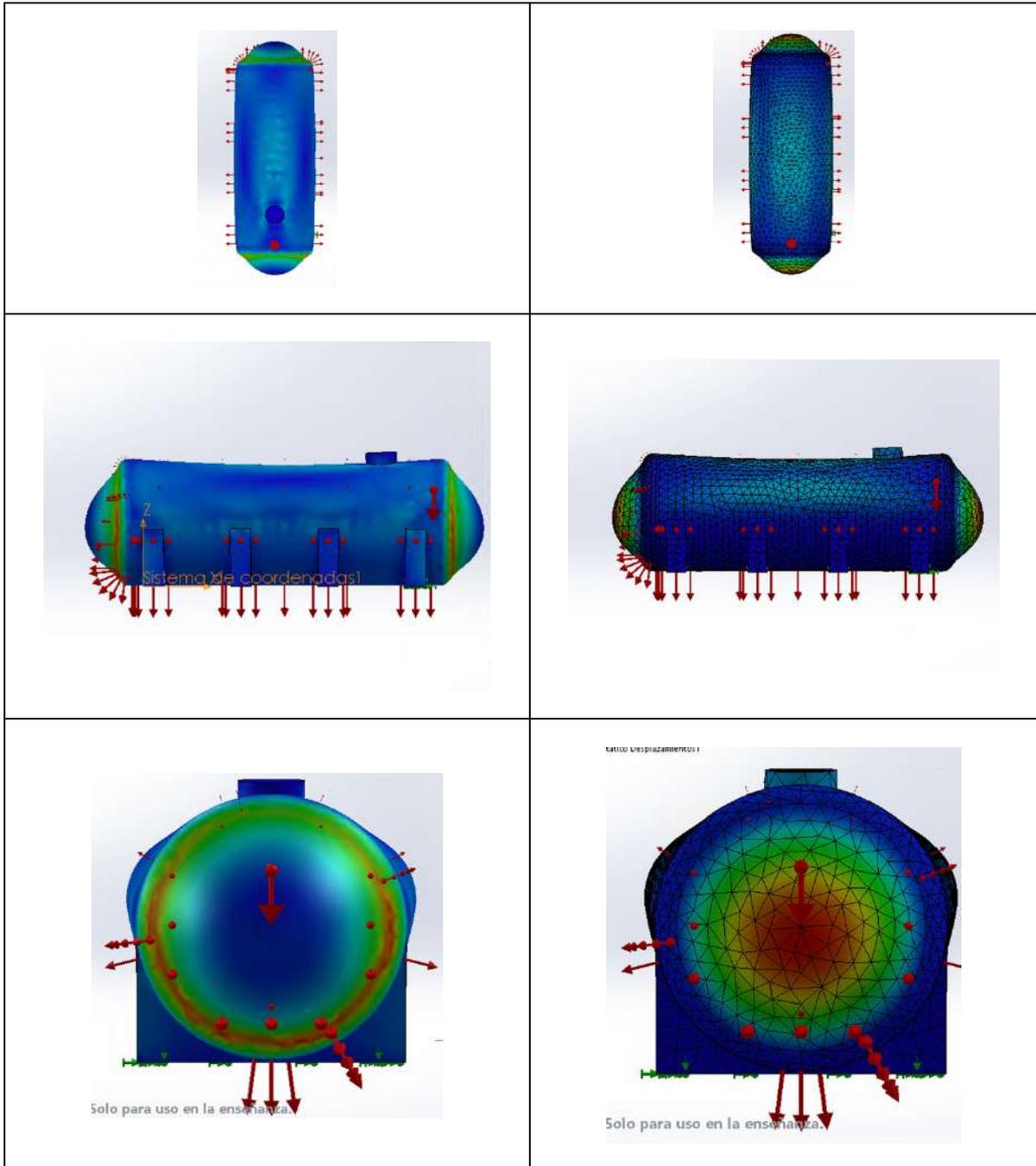


2. ANEXO

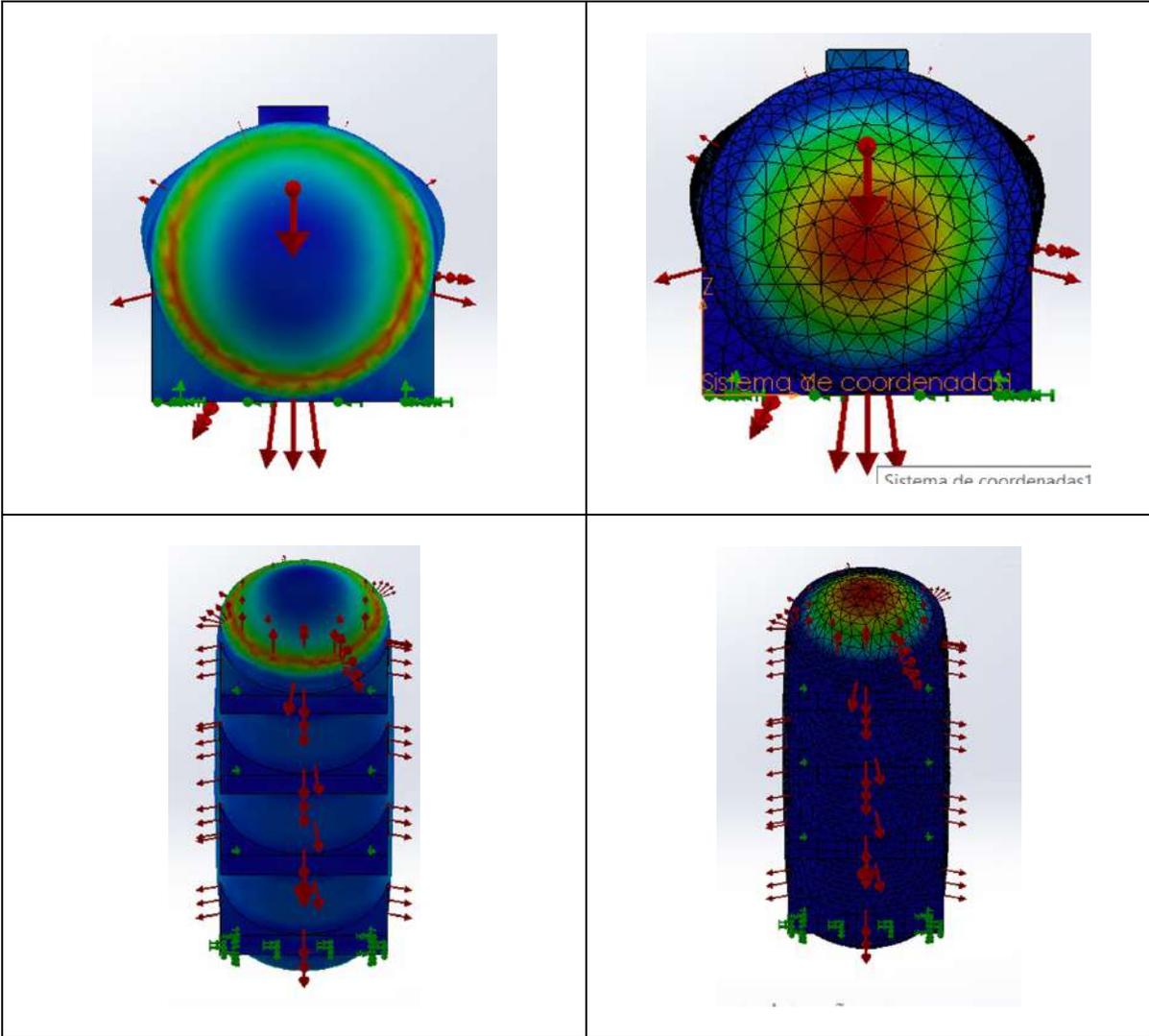


- Prueba hidráulica

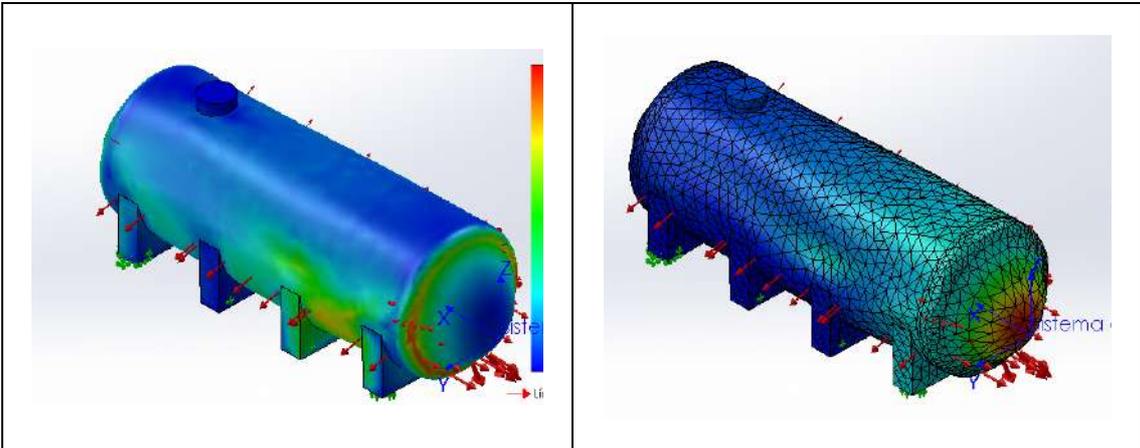


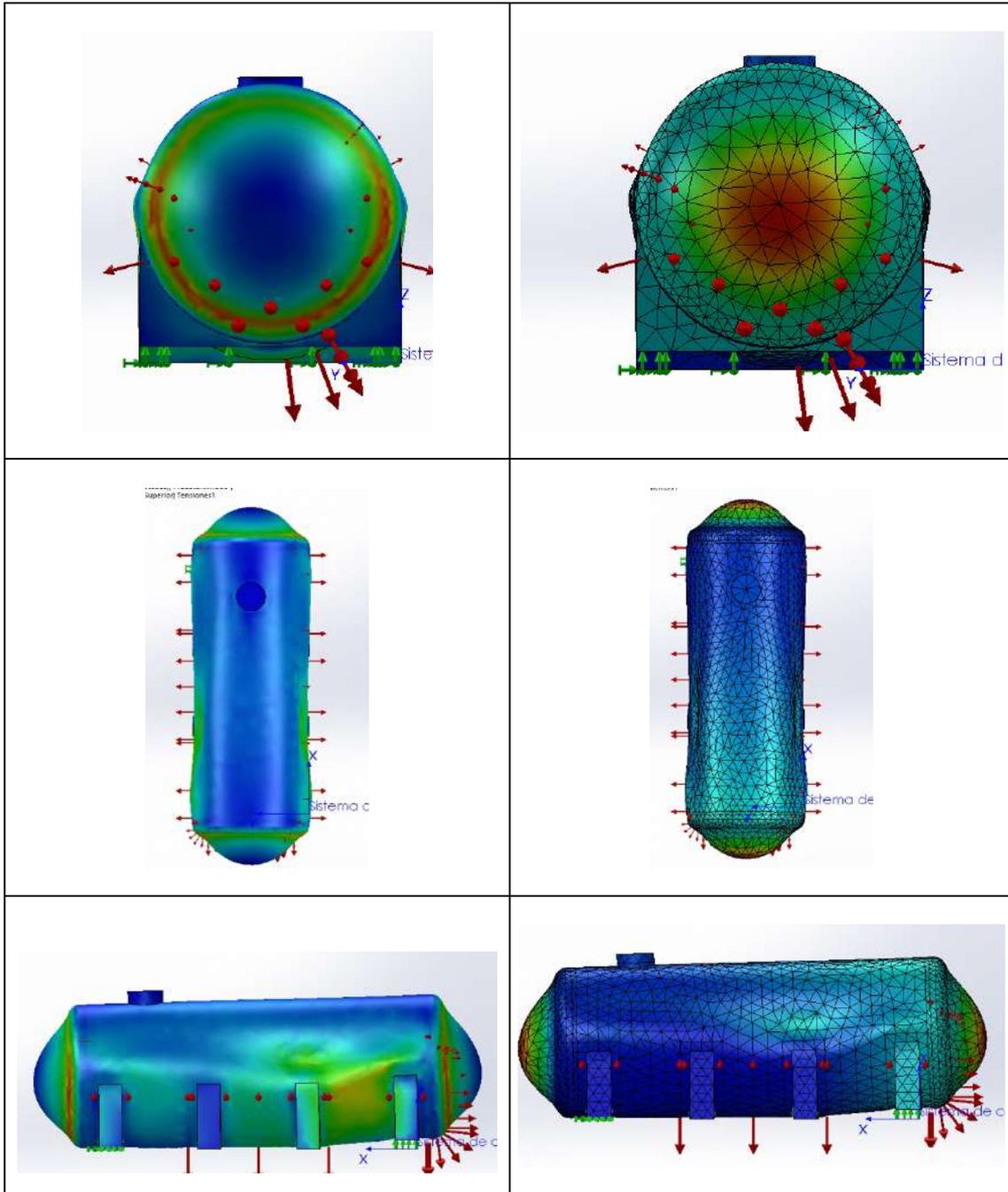


2. ANEXO

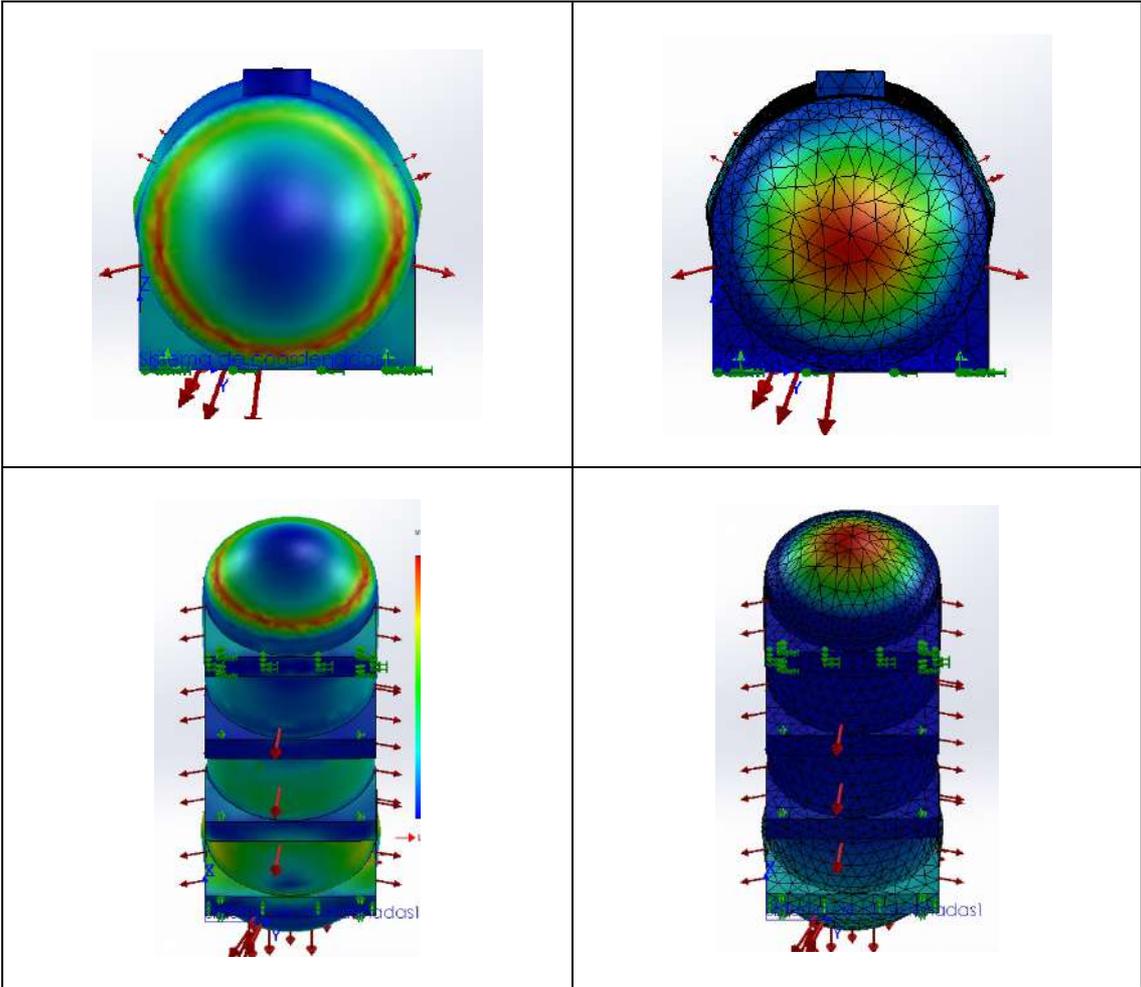


- Desplazamiento del soporte

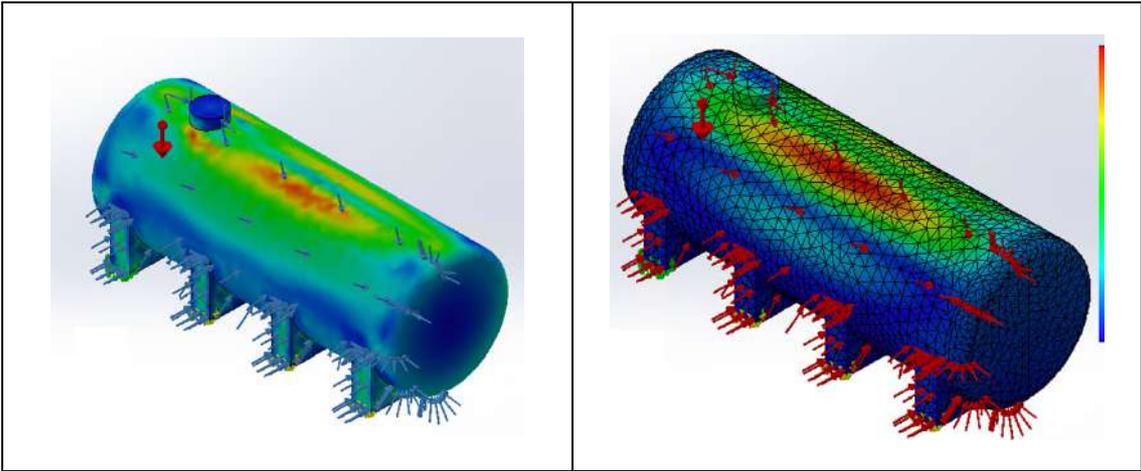


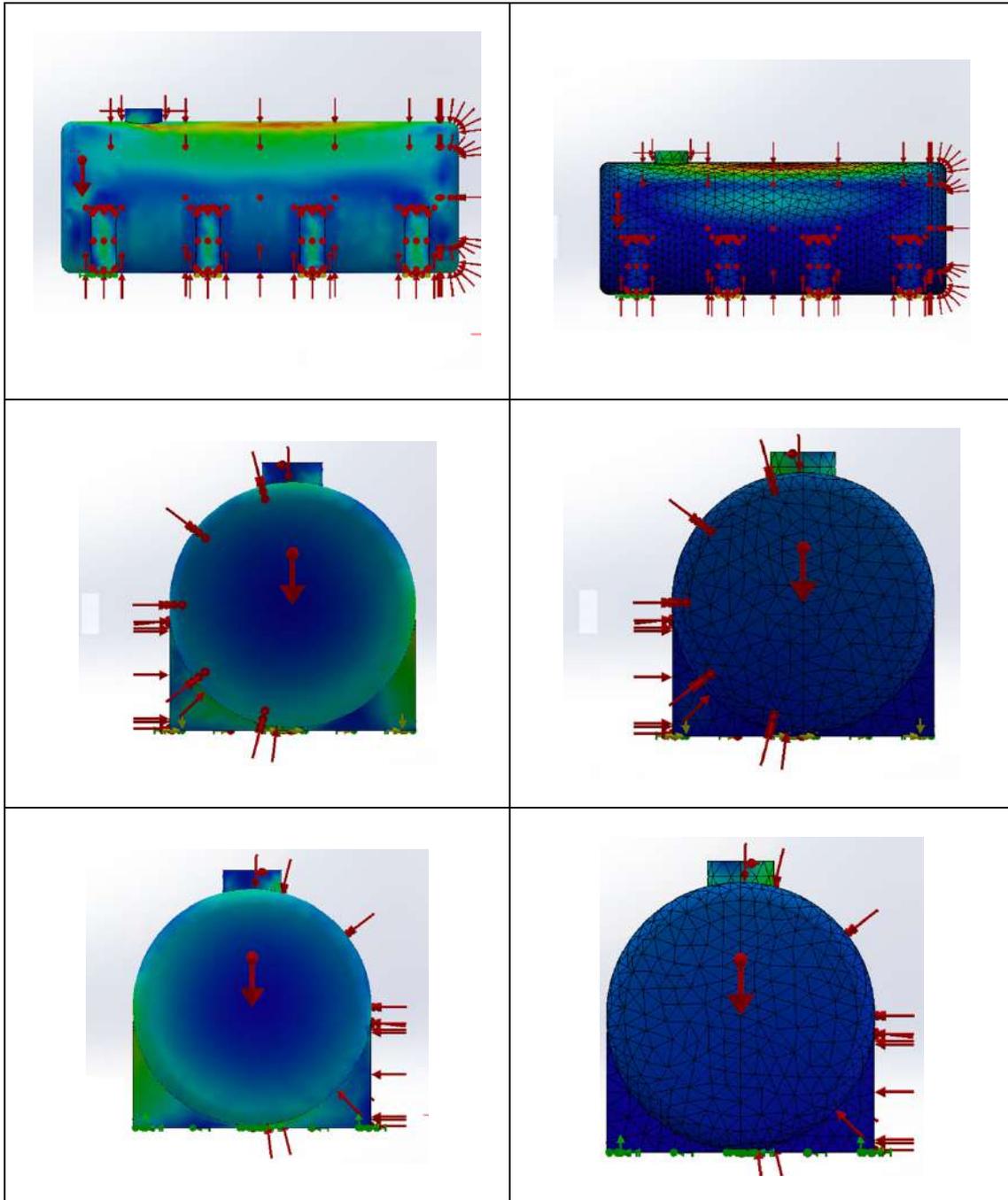


2. ANEXO

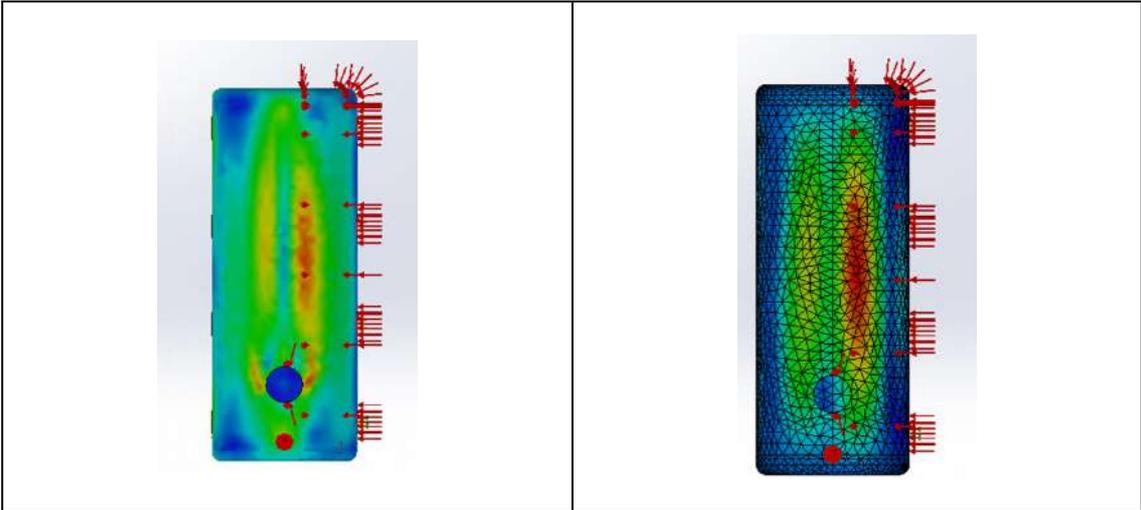


- **Carga de viento**
 - o **Análisis estático**

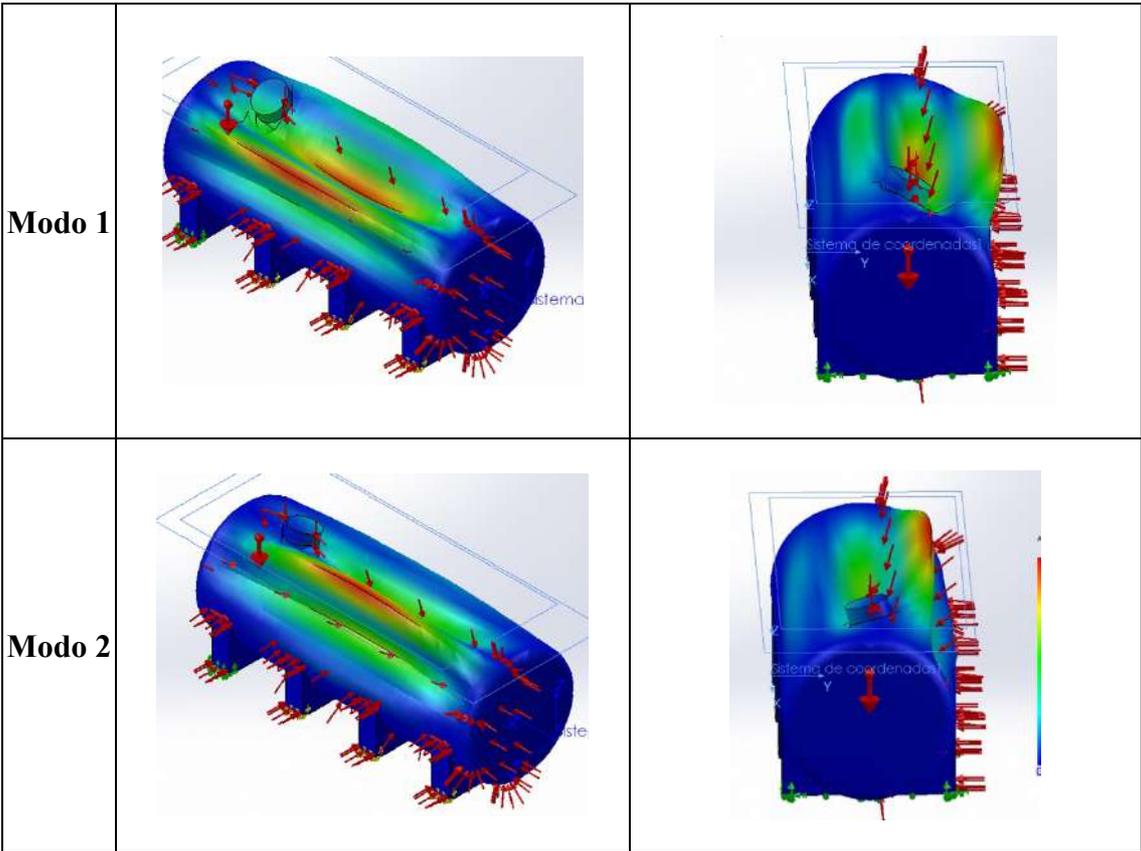


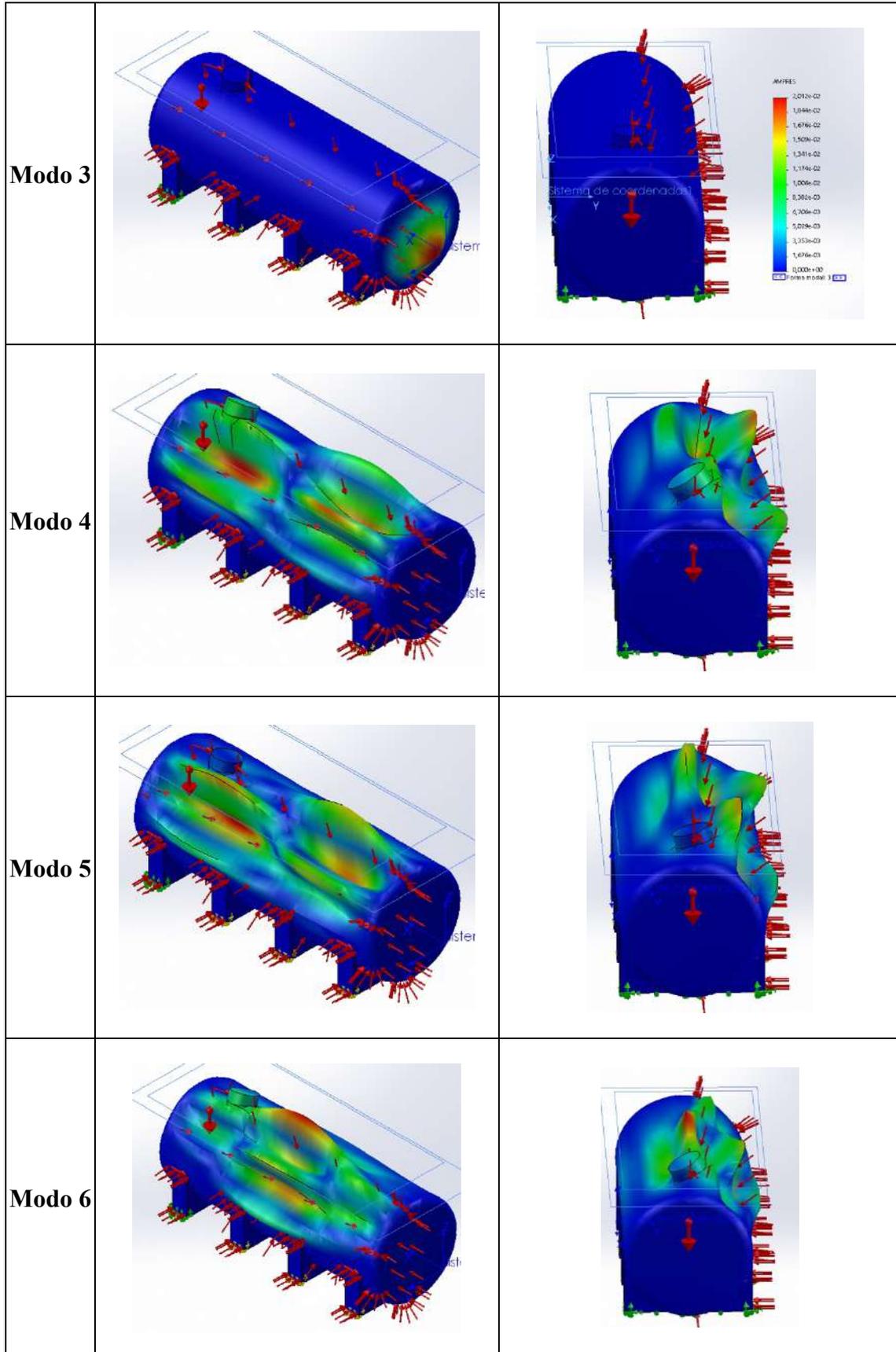


2. ANEXO



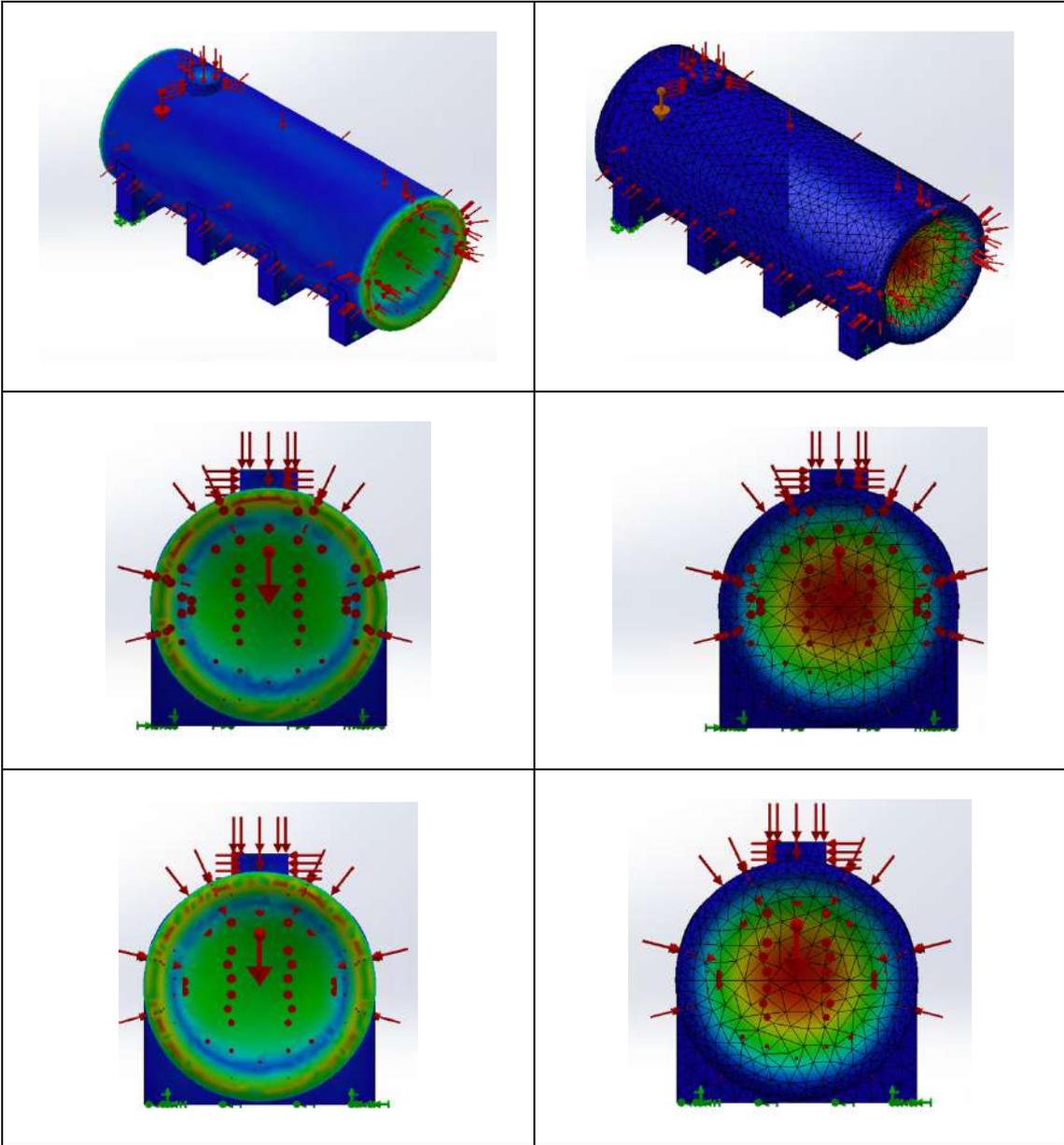
○ **Análisis pandeo**

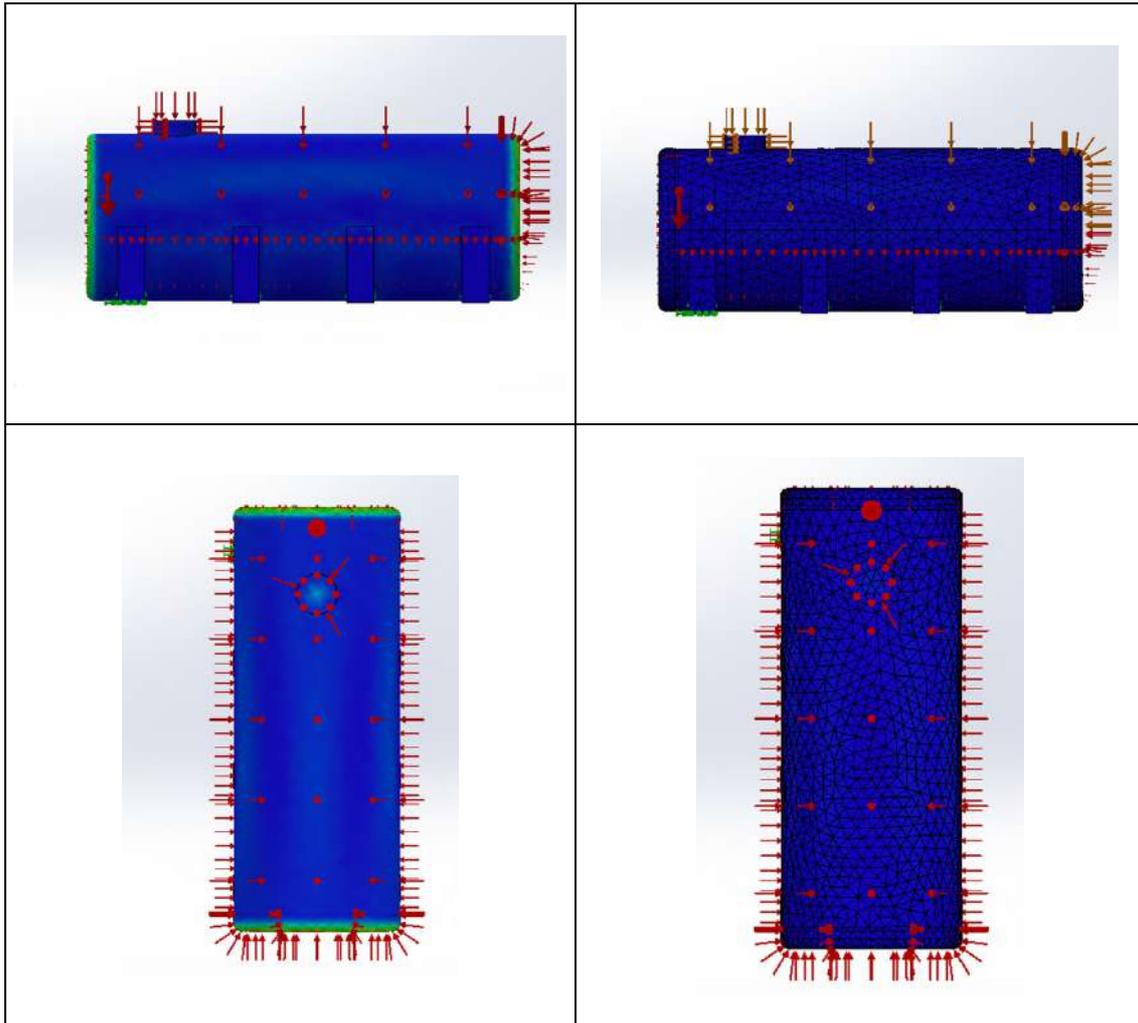




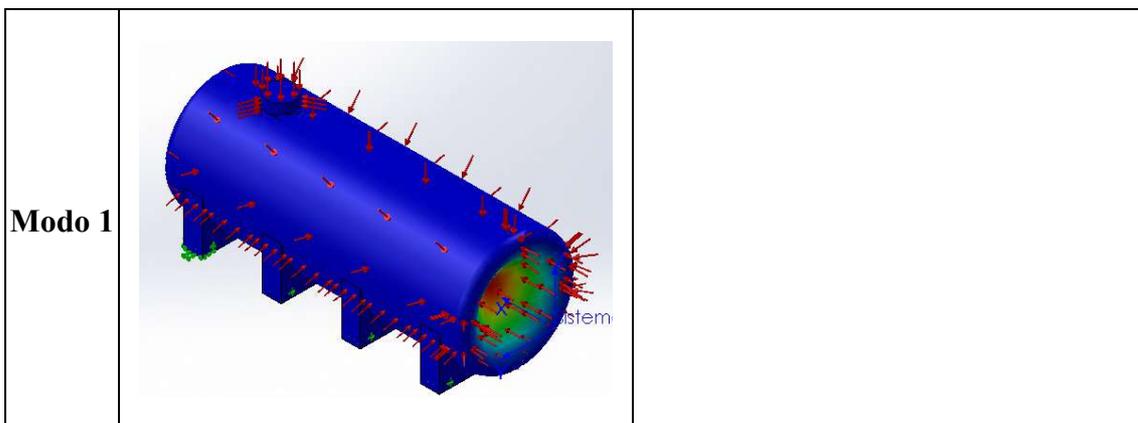
2. ANEXO

- **Carga de vacío**
 - o **Análisis estático**

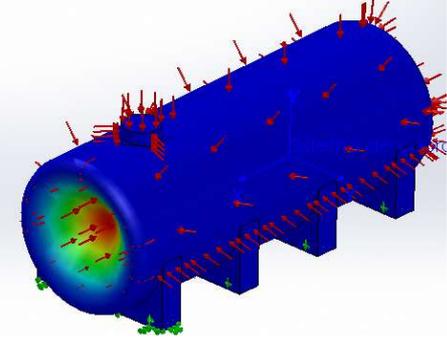
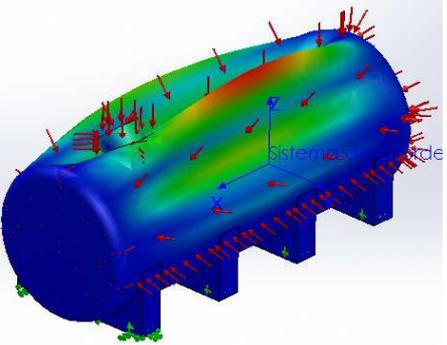
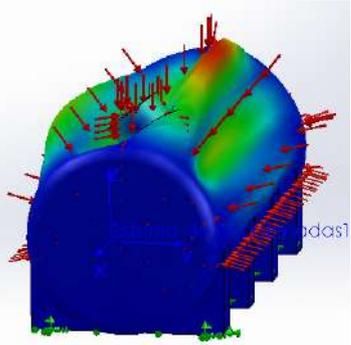
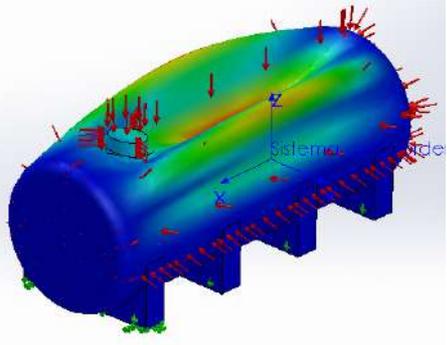
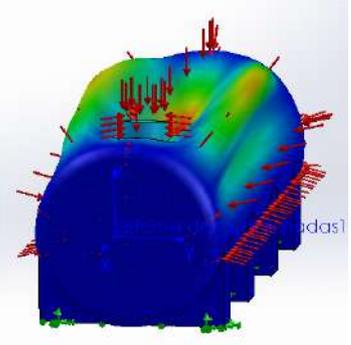
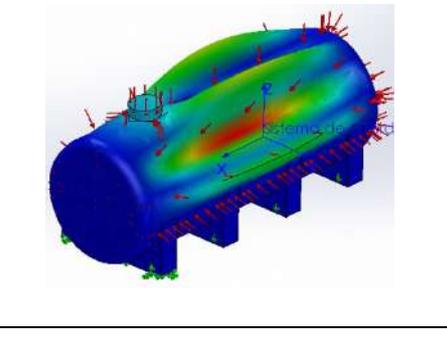
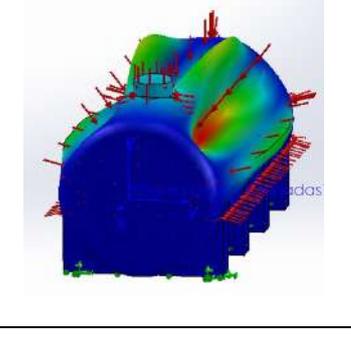


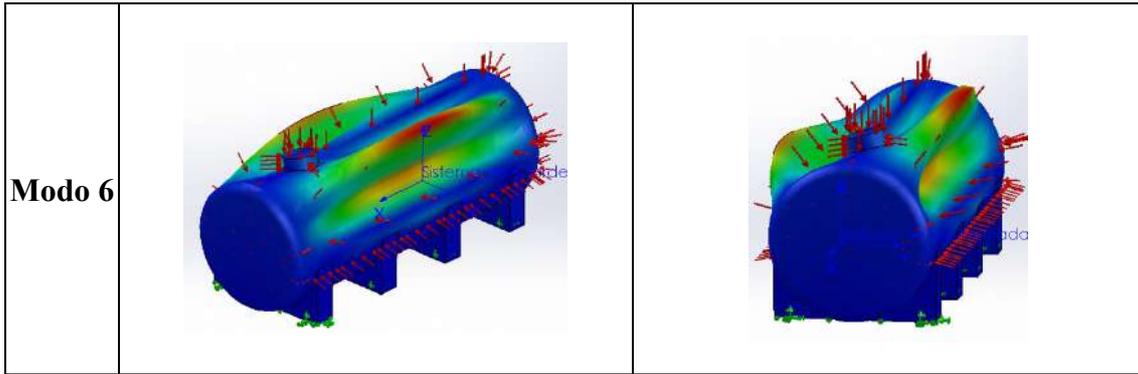


○ **Análisis pandeo**

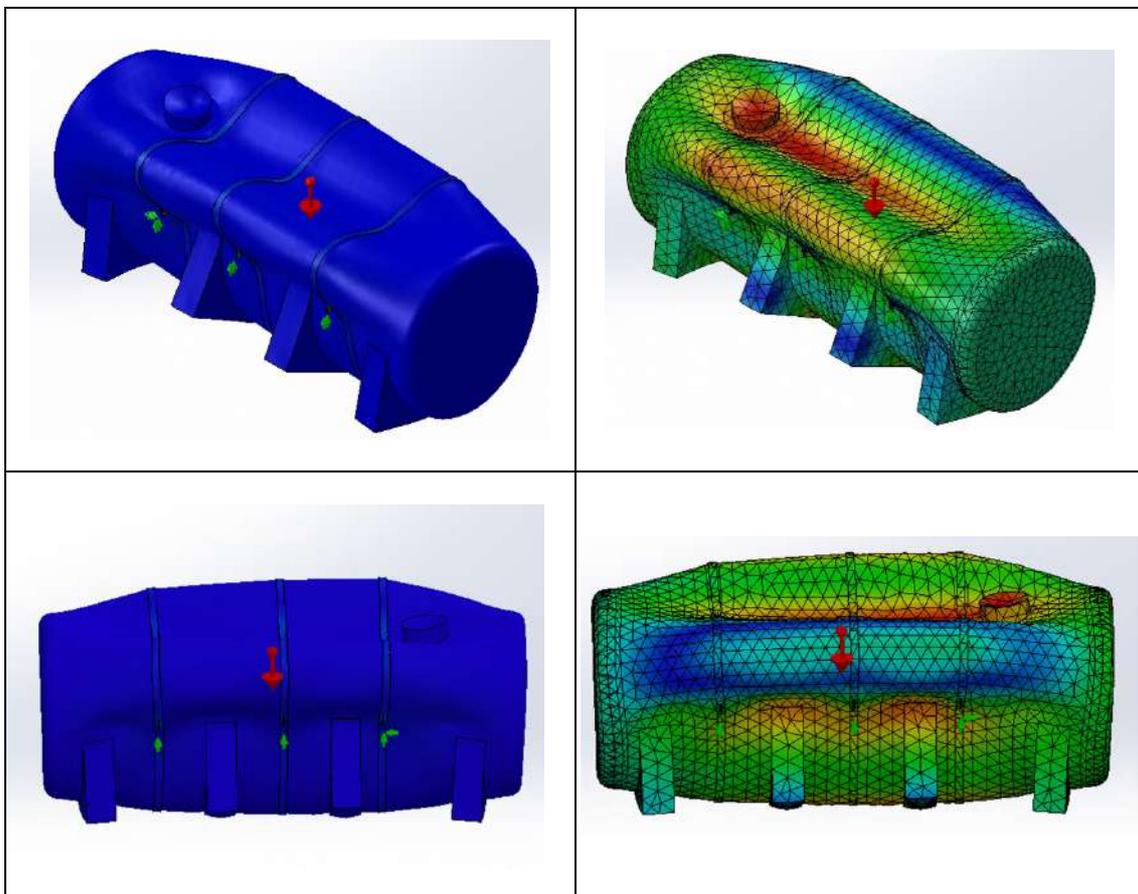


2. ANEXO

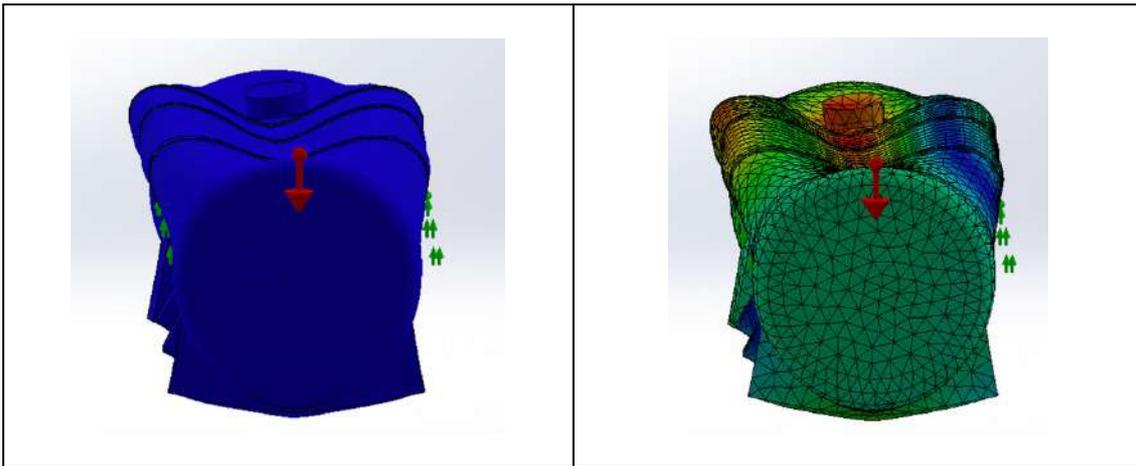
<p>Modo 2</p>		
<p>Modo 3</p>		
<p>Modo 4</p>		
<p>Modo 5</p>		



- **Carga de transporte**
 - o **Análisis estático**

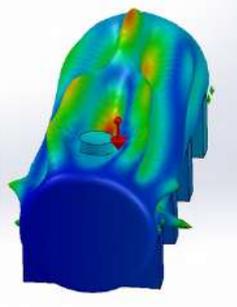
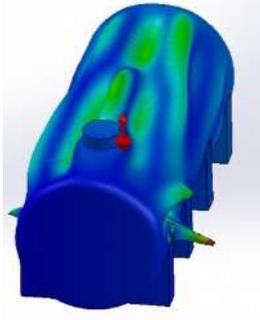


2. ANEXO



○ **Análisis pandeo**

<p>Modo 1</p>		<p>Modo 2</p>	
<p>Modo 3</p>		<p>Modo 4</p>	
<p>Modo 5</p>		<p>Modo 6</p>	

<p>Modo 7</p>		<p>Modo 8</p>	
----------------------	---	----------------------	---

E. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL DEPÓSITO

El método de fabricación utilizado es aquel en el que el poliéster se moldea a mano y con herramientas muy simples. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. En primer lugar, se realiza un molde de madera con las dimensiones deseadas. Este molde estará formado por aros y listones de madera.



Ilustración 4. Molde de madera del depósito

2. Posterior o simultáneamente, se fabrica una plancha fundiendo con paños de fibra MAT 450g. En este caso se realiza una plancha de 6500mmxx7850mm.



Ilustración 5. Plancha inicial de PRFV

3. Se embobina la plancha al molde de madera ya fabricado



Ilustración 6. Embobinado del depósito



Ilustración 7. Depósito embobinado

4. Se aplican el resto de las capas, una sobre otra, hasta llegar al espesor de diseño.



Ilustración 8. Fabricación cuerpo del cilindro

5. Se fabrican los cabezales toriesféricos fundiendo sobre un molde de 2500mm de diámetro, aplicando las capas de fibra y resina necesarias.
6. Se sueldan las tapas al depósito con el mismo material.



Ilustración 9. Soldadura de tapas al cuerpo del depósito

2. ANEXO

7. Simultáneamente se realizan los soportes, aplicando manualmente los paños de MAT junto con la resina de poliéster sobre un molde ya fabricado, teniendo en cuenta el diámetro del depósito. En este caso, se fabrican 8 soportes, 4 soportes por cada lado del depósito.



Ilustración 10. Fabricación de soporte del depósito

8. Se sueldan los soportes al depósito con soldadura del mismo material, se lija y se da un acabado final con Gel Coat.



Ilustración 11. Depósito cilíndrico horizontal con cuatro soporte

SILVIA ÁLVAREZ DÍAZ

DISEÑO Y ESTUDIO DE UN TANQUE DE AGUA HORIZONTAL FABRICADO EN PRFV

F. EVALUACIÓN ECONÓMICA

COSTE FABRICACIÓN DEPÓSITO

DÍA	OPERACIÓN	MATERIAL	PAÑOS	UNIDADES	COSTE	TOTAL
1 y 2	ESTRUCTURA MADERA	LISTÓN ABETO DEP 5X5		119,52m2	2,30 €	274,90 €
		MADERA TABLEX BLANCO		6,37m2	16,10 €	102,52 €
		LIJA DISCO VELCRO URAX P150		1,00ud	0,27 €	0,27 €
		T.BRICO.TORX 4*40 (DECENA)		180,00uds	0,02 €	3,96 €
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	7,5	1	7,50h	97,50 €		
2	cortar fibra y FUNDIR PLANCHA (2 PAÑOS DE MAT)	MAT 450 (46K) (PLAIN)		49,12m2	3,85 €	113,47 €
		RESINA CRYSTIC 446 A35/225		58,95m2	4,00 €	235,79 €
		PERÓXIDO MEKP 5LTR		1,18m2	9,00 €	10,61 €
		GELCOAT GRIS 1024(VG) 25K		5,89m2	7,70 €	45,39 €
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	3	2	6,00h	78,00 €		
3	EMBOBINAR					
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	1,25	2	2,50h	32,50 €		
3	LIJAR	LIJA DISCO VELCRO URAX P240		10,00kg	0,27 €	2,70 €
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	2	1	2,00h	26,00 €		
4	CORTAR FIBRA	MAT 450 (46K) (PLAIN)		196,48m2	3,85 €	453,87 €
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	0,5	1	0,50h	6,50 €		
4	FUNDIR MEDIO DEPÓSITO (4 MAT)	RESINA CRYSTIC 446 A35/225		235,78kg	4,00 €	943,10 €
		PERÓXIDO 25LTR LEYER		4,72kg	9,80 €	46,21 €
		GELCOAT GRIS 1024(VG) 25K		23,58kg	7,70 €	181,55 €
		HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE	
	2	3	6,00h	78,00 €		
5	CORTAR FIBRA	MAT 450 (46K) (PLAIN)		196,48m2	3,90 €	459,76 €
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	0,5	1	0,50h	6,50 €		
5	FUNDIR MEDIO DEPÓSITO (4 MAT)	RESINA CRYSTIC 446 A35/225		75,00kg	4,00 €	300,00 €
		PERÓXIDO 25LTR LEYER		1,50kg	9,80 €	14,70 €
		GELCOAT GRIS 1024(VG) 25K		7,50kg	7,70 €	57,75 €
		HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE	
	1,5	3	4,50h	58,50 €		
5	FUNDIR TAPA (8 MAT)	MAT 450 (46K) (PLAIN)		73,50m2	3,80 €	279,30 €
		RESINA CRYSTIC 446 A35/225		88,20kg	4,00 €	352,80 €
		PERÓXIDO 25LTR LEYER		1,76m2	9,80 €	17,29 €
		GELCOAT GRIS 1024(VG) 25K		8,82kg	7,70 €	67,91 €
		HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE	
	1,5	3	4,50h	58,50 €		
5	FUNDIR TAPA (8 MAT)	MAT 450 (46K) (PLAIN)		73,50m2	3,60 €	264,60 €
		RESINA CRYSTIC 446 A35/225		88,20kg	4,00 €	352,80 €
		PERÓXIDO 25LTR LEYER		1,76m2	9,80 €	17,29 €
		GELCOAT GRIS 1024(VG) 25K		8,82kg	7,70 €	67,91 €
		HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE	
	1,5	3	4,50h	58,50 €		
6	DESIMONTAR ESTRUCTURA MADERA					
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	6	1	6,00h	78,00 €		78,00 €
7	MONTAR TAPAS (soldadura 5 MAT)	MAT 450 (46K) (PLAIN)		31,50m2	3,85 €	72,77 €
		RESINA CRYSTIC 446 A35/225		40,00kg	4,00 €	160,00 €
		PERÓXIDO 25LTR LEYER		0,80m2	9,80 €	7,84 €
		HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE	
	4	1	4,00h	52,00 €		52,00 €
8	FUNDIR PASA HOMBRE + DESMOLDEO	MAT 450 (46K) (PLAIN)		3,00m2	3,85 €	6,93 €
		RESINA POLIÉSTER 446 HEGARDT 225		4,00kg	4,00 €	16,00 €
		PERÓXIDO 25LTR LEYER		0,12m2	9,80 €	1,18 €
		HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE	
	4	1	4,00h	52,00 €		
9	SOLDAR PASAHOMBRE	MAT 450 (46K) (PLAIN)		2,40m2	3,85 €	5,55 €
		RESINA CRYSTIC 446 A35/225		5,00kg	4,00 €	20,00 €
		PERÓXIDO 25LTR LEYER		0,10m2	9,80 €	0,98 €
	HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE		
	1,5	1	1,50h	19,50 €		
9	ACABADO (PINTURA)	IMPRIMACIÓN GRIS DE 25KGS TEKRON		24,00m2	6,00 €	144,00 €
		HORAS	Nº OPERARIOS	HORAS TOTALES	COSTE	
	1	1	1,00h	13,00 €		

Nº DE HORAS TRABAJADAS	55 h
Nº DE DIAS	9 h
COSTE MATERIALES	5.101,69 €
COSTE MANO DE OBRA	715,00 €
COSTE TOTAL	5.816,69 €

