

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES



Trabajo Fin de Grado

Especialidad Construcción

Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de un
fluido de alta temperatura

Autor: Davinia González Dorta

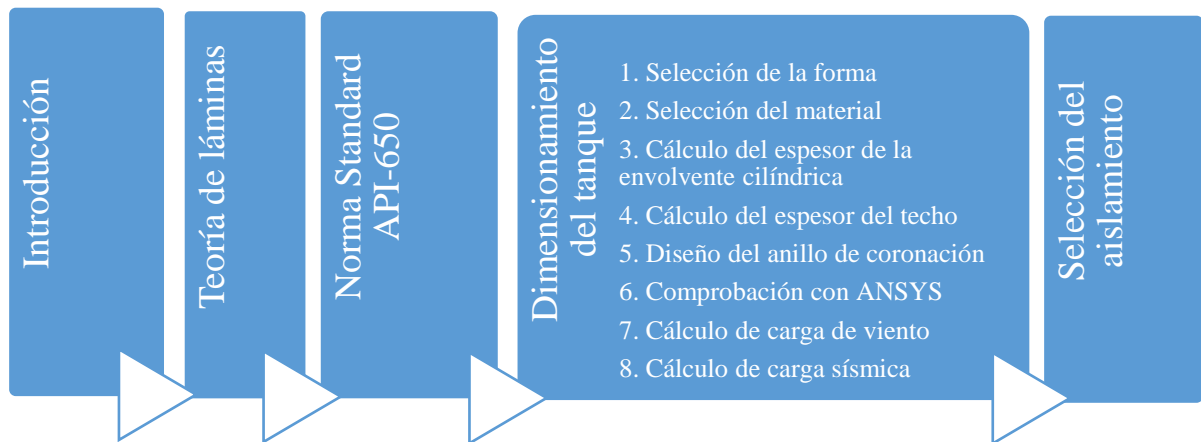
Tutor: Ricardo Perera Velamazán

Madrid, Julio 2018

A mi familia y amigos.

RESUMEN EJECUTIVO

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo el diseño de un depósito de almacenamiento a alta temperatura. Partiendo de los datos establecidos por el cliente, se estudiará si el depósito es capaz de soportar las tensiones provocadas por las cargas interna y externa de diseño, presión hidrostática, carga de viento y carga de sismo sin sufrir deformaciones permanentes. Para realizar los cálculos se sigue la norma Standard API-650 (American Petroleum Institute).



En la introducción de este proyecto, se expondrá una breve explicación sobre los distintos tipos de tanques de almacenamiento y los posibles fallos estructurales que se pueden generar debido a un mal diseño de éstos. Además, se hablará resumidamente de las centrales termosolares, ya que el fluido contenido en el interior de este depósito son sales fundidas.

A continuación, se explicará la teoría del comportamiento de láminas estructurales. Para ello, se expondrá la diferencia entre lámina-placa y lámina-membrana y se demostrará la teoría membranal y la teoría de flexión, que son las que rigen el comportamiento de una lámina.

En el cuarto capítulo, se lleva a cabo el diseño del tanque. Para ello, se estudian las distintas partes que componen un tanque y se elige el tipo adecuado de techo, cuerpo y base según las características requeridas para el problema. Asimismo, se estudian los distintos tipos de aceros inoxidables y se elige el más conveniente para el tanque en cuestión.

El siguiente paso del diseño es el cálculo del espesor de la envolvente cilíndrica. Éste se realiza siguiendo el método de 1 pie que propone la norma Standard API-650, donde se calculan los espesores de las virolas del tanque a presión hidrostática y con sus condiciones de diseño y se toma el mayor de ellos.

Una vez calculados los espesores del cuerpo, se hallará el del techo. Se suponen combinaciones de carga propuestas por la norma como carga muerta del techo, presión externa y carga de nieve y se calculará este espesor con la más restrictiva de ellas.

A continuación, se realizará el diseño del anillo de coronación. Éste es uno de los elementos más relevantes en el depósito, ya que sirve de unión entre cuerpo y el techo, soportando el peso

de este último y las cargas exteriores a la que esté sometido. Además, ejerce de elemento rigidizador para evitar la deformación en esta zona.

Para realizar algunas de las comprobaciones de cargas mencionadas anteriormente, se utiliza la herramienta de software ANSYS. Se busca un equilibrio entre detalle de resultados, capacidad del programa y dificultad del problema para realizar una simulación adecuada comprobando la respuesta a las cargas de diseño interna y externa y a la presión hidrostática. Se exponen la deformada y sus desplazamientos en el plano horizontal así como la tensión equivalente de Von Mises para comprobar si es coherente con el resultado y si cumple con el límite elástico del acero elegido.

El siguiente cálculo es la comprobación debido a la carga de viento, donde se analiza si es necesaria una viga de viento intermedia o si es preciso anclar el depósito. Para ello, se calculan los momentos de vuelco sobre la unión de la envolvente debido a las cargas que intervienen en el depósito.

Para acabar con el apartado de dimensionamiento del depósito, se estudia el comportamiento de éste debido a la carga sísmica. Se calcula la respuesta de las aceleraciones espectrales particular para hallar la fuerza de diseño sísmica lateral equivalente, que dará lugar al momento de vuelco en la base. De forma análoga, se realiza el cálculo para hallar la fuerza de diseño sísmica vertical debido al movimiento del fluido.

Para terminar, se considera una cuestión relevante la selección de un aislamiento adecuado ya que ayuda a reducir las pérdidas de calor del depósito. Se elige de entre los distintos tipos de materiales aislantes el más adecuado para esta aplicación y se calcula su espesor mínimo en el techo, cuerpo y base.

Como conclusión, se manifiesta que intervienen diferentes factores relevantes para el correcto diseño de un depósito. Se expone brevemente la importancia de la selección del material, la forma, espesores de la base, cuerpo y techo, el anillo de coronación, el anclaje y el aislamiento.

Adicionalmente, se incluye un apartado de sostenibilidad y responsabilidad social que explica la importancia de éstos en la toma de decisiones del diseño de depósitos.

Finalmente, se expone la planificación temporal y presupuestos del proyecto, y se realiza una recopilación de los resultados hallados, así como sus definiciones.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	OBJETIVO DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA.....	1
1.2	DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO	1
1.3	FALLOS ESTRUCTURALES EN DEPÓSITOS.....	4
1.4	DEPÓSITOS DE TERMOFLUIDOS.....	7
2	TEORÍA DE LÁMINAS	9
2.1	TEORÍA MEMBRANAL	9
2.2	TEORÍA DE FLEXIÓN	11
3	NORMATIVA PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO	14
3.1	NORMA STANDARD API-650.....	14
3.2	COMPARACIÓN CON LA NORMA STANDARD API-620	15
4	DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE.....	16
4.1	DATOS DE PARTIDA	16
4.2	SELECCIÓN DEL DISEÑO DEL TANQUE	16
4.2.1	MATERIAL DEL DEPÓSITO.....	16
4.2.2	FORMA DEL DEPÓSITO	17
4.3	SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	19
4.4	CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA ENVOLVENTE CILÍNDRICA.....	22
4.4.1	MÉTODO DE 1 PIE.....	22
4.5	CÁLCULO DEL ESPESOR DEL TECHO.....	28
4.6	DISEÑO DEL ANILLO DE CORONACIÓN	32
4.7	COMPROBACIONES DE CARGA CON ANSYS	38
4.7.1	DESCRIPCIÓN DE ANSYS	38
4.7.2	OBJETIVOS.....	40
4.7.3	METODOLOGÍA.....	41
4.7.4	COMPROBACIÓN A PRESIÓN EXTERNA DE DISEÑO	43
4.7.5	COMPROBACIÓN A PRESIÓN INTERNA DE DISEÑO.....	46
4.7.6	COMPROBACIÓN A PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	49

4.8	COMPROBACIÓN PARA CARGA DE VIENTO	53
4.8.1	COMPROBACIÓN NECESIDAD DE VIGA DE VIENTO INTERMEDIA	53
4.8.2	COMPROBACIÓN DEL ANCLAJE DEL DEPÓSITO.....	56
4.9	COMPROBACIÓN PARA CARGA DE SISMO	65
4.9.1	MOVIMIENTO DE LAS ZONAS DEL TERRENO.....	65
4.9.2	FACTORES DE DISEÑO	72
4.9.3	DISEÑO	76
5	AISLAMIENTO DEL DEPÓSITO.....	93
6	CONCLUSIONES	97
7	SOSTENIBILIDAD Y RESPONSABILIDAD SOCIAL	98
8	BIBLIOGRAFÍA.....	99
9	PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO	100
9.1	PLANIFICACIÓN TEMPORAL.....	100
9.2	PRESUPUESTO	101
10	GLOSARIO, UNIDADES Y RESULTADOS.....	103

1 INTRODUCCIÓN

El siguiente documento, propuesto por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y dirigido por el profesor Ricardo Perera Velamazán, se llevará a cabo el estudio del diseño de un depósito de almacenamiento de un fluido a alta temperatura. Para el desarrollo de los cálculos, se seguirá la norma Standard API-650 (American Petroleum Insititute) y a continuación se hará una comprobación de éstos con el software de simulación de análisis de elementos finitos ANSYS. Para ello, se realizarán comprobaciones de carga hidrostática, presiones y externa de diseño, carga de viento y carga sísmica. Finalmente, se seleccionará un aislamiento adecuado para el depósito.

1.1 OBJETIVO DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA

El motivo principal por el que se plantea este Trabajo de Fin de Grado es demostrar la importancia que supone el cálculo estructural en el diseño de depósitos en general, dadas las consecuencias que podría acarrear un estudio incompleto o erróneo para la seguridad.

Para llevar a cabo este análisis, se han tomado los conocimientos adquiridos en el grado sobre estructuras superficiales, en concreto, las láminas. Asimismo, con ayuda de la norma Standard API-650 se han seguido las instrucciones para el dimensionamiento de los elementos fundamentales del depósito y su respuesta a determinadas cargas.

En primer lugar, se ha realizado un planteamiento de distintas formas y geometrías del tanque, así como de los materiales a usar y se han seleccionado los más adecuados.

Se ha continuado con el cálculo de los espesores del cuerpo, techo y base y, como elemento esencial, el anillo de coronación.

Seguidamente, se han efectuado los cálculos de las cargas que puedan afectar al depósito: cargas de diseño de presión interna y externa, presión hidrostática, viento y terremoto.

Para simular el depósito, se ha empleado el software de elementos finitos ANSYS. Se ha calculado la respuesta del tanque a las cargas de diseño de presión interna y externa que el cliente propone, y a presión hidrostática.

Por último, se ha llevado a cabo una selección de aislamiento de entre distintas alternativas, ya que se considera un componente imprescindible en un tanque que contiene un fluido de alta temperatura.

1.2 DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO

Los tanques de almacenamiento son estructuras que contienen un producto sólido, líquido o gas a una presión y temperaturas determinadas. Su uso más común es en la industria de gases y petroquímicas.

Existen numerosos diseños de depósitos dependiendo de varios factores. Algunos son el tipo y volumen de producto a almacenar, su temperatura, situación del tanque, suelo o material, pero todos tienen en común que constan de un fondo, un cuerpo y posibilidad de tener techo o no.

Existen tanques horizontales o verticales; de cuerpo cilíndrico o esférico; de fondo plano, cónico, Koppler o Korboggen; y con techo esférico, cónico o sin techo. En las siguientes imágenes se pueden ver algunos de estos ejemplos



Figura 1: Depósito cilíndrico vertical, fondo plano y techo cilíndrico



Figura 2: Depósito cilíndrico vertical, fondo cónico y techo plano



Figura 3: Depósito cilíndrico horizontal, fondo



Figura 4: Depósito esférico plano y techo cilíndrico

La norma a seguir comúnmente para proporcionar un diseño adecuado es la Standard API (American Petroleum Institute), que será explicada posteriormente. Los depósitos han de

cumplir además de su función de almacenaje de un producto, garantizar la seguridad estructural, seguridad ante cualquier peligro de fuga o contaminación ambiental, mantenimiento de temperatura y presión que se requiera, entre otras.

Los elementos principales que conforman un depósito son los siguientes:

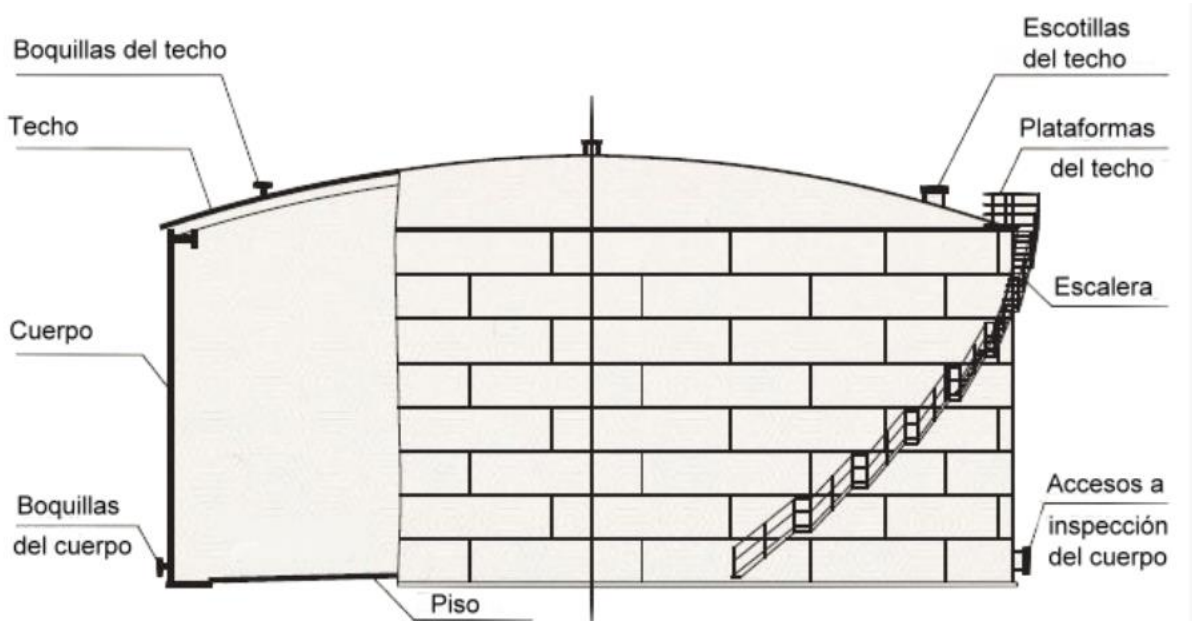


Figura 5: Partes de un depósito

El cuerpo está compuesto por una serie de virolas, que son secciones de la pared de distinto espesor en función de la altura. La virola más cercana a la base será la de mayor espesor ya que tendrá que soportar más carga. La altura de éstas suele estar comprendida entre 1 y 2 m dependiendo del diámetro del tanque.

Uno de los accesorios imprescindibles en tanques son los venteos, especialmente para almacenamientos de productos inflamables. Sirven para reducir la evaporación de los productos de un tanque cerrado permitiendo la entrada y salida de aire.

Las orejas de izaje sirven de apoyo en la base del tanque para que pueda ser elevado si fuese el caso.

Las bocas de hombre permiten el acceso al personal de trabajo en el tanque para cualquier operación en el interior. Pueden estar colocadas en el cuerpo y en el techo. El número de boquillas depende del diámetro del tanque.

Además, es obligatorio al menos, dos orificios de entrada y salida de producto, respectivamente.

Un último accesorio importante en tanques son los niveles, que son los instrumentos encargados de medir la altura de producto contenido en el tanque.

Además de estos, existen diferentes elementos que son específicos para cada tanque. Para el caso en cuestión, se dispondrán entre otros, de calentadores para mantener una temperatura elevada dentro del tanque; instrumentación específica para medir temperatura y presión, ya que son dos variables relevantes; y un anillo de distribución en el fondo para homogeneizar la temperatura del producto en todo el tanque.

1.3 FALLOS ESTRUCTURALES EN DEPÓSITOS

La importancia de un correcto estudio del diseño de depósitos de almacenamiento reduce la posibilidad de fallo de estas estructuras.

Los principales factores que causan daños en tanques son: corrosión en depósitos de acero, deterioro de las paredes en tanques de hormigón, variaciones de carga durante el llenado y la descarga, explosión del producto contenido, colapso interno estructural, formación de grietas por limitadas inspecciones del material, fallos en uniones mecánicas y soldaduras, elevadas presiones de cimentación o condiciones del suelo no uniformes.

A continuación, se muestran imágenes sobre algunos fallos graves en depósitos y se explica la razón principal y cómo se podría haber evitado.



Figura 6: Fallo por falta de soldadura

Fallo: plegado del cuerpo debido a vientos débiles

Razón: falta de soldadura en la base

Prevención: correcto diseño de la junta e inspecciones periódicas



Figura 7: Fallo por dimensionamiento incorrecto

Fallo: pandeo de depósito y rotura con expulsión del producto

Razón: dimensionamiento de cargas incorrecto

Prevención: realizar un correcto cálculo del diseño



Figura 8: Fallo por pequeños movimientos de tierra

Fallo: grietas con filtrado de líquido

Razón: pequeños movimientos de tierra

Prevención: revisar las grietas periódicamente y sellarlas y forrar el tanque interiormente



Figura 9: Fallo por corrosión

Fallo: evacuación del producto

Razón: corrosión

Prevención: eliminación del área corroída y elegir un material adecuado para el producto contenido.



Figura 10: Fallo por terremoto

Fallo: elevamiento de la base

Razón: terremoto

Prevención: realizar un correcto cálculo del diseño

Con las imágenes anteriores, se puede tomar una idea general de las posibilidades de fallo que pueden ocurrir en un depósito. En algunos casos, son reversibles si se llevan a cabo inspecciones periódicas. En otros, el fallo puede ser tan grave como explosión de productos tóxicos o contaminantes. Por esto, la trascendencia de estudiar al menos uno de los factores más relevantes, como es el diseño del tanque a comprobación de cargas.

1.4 DEPÓSITOS DE TERMOFLUIDOS

El funcionamiento de una central termosolar es muy similar al de una central termoeléctrica. La principal diferencia es que en las centrales termosolares, el calor es obtenido a partir del sol, y en las termoeléctricas a partir de la combustión de un gas, carbón o fuelóleo.

Los fluidos de transmisión térmica (HTF) usados en las centrales termosolares son los responsables de transportar el calor obtenido de la fuente de energía solar desde la central al bloque de potencia, donde se transforma en energía eléctrica.

Los HTF más utilizados en este tipo de industria son agua, sales fundidas y aceite pesado. Para el caso que se propone, el depósito contiene aproximadamente un 60% de sales de nitrato de sodio (NaNO_3) y un 40% de nitrato de potasio (KNO_3). Estas sales tienen una capacidad calorífica y una fluidez similar a la del agua, evadiendo las principales desventajas de ésta, tales como el aumento considerable de su presión de vapor con la temperatura y su poder de oxidación. Además, una de las ventajas de las sales fundidas es que al volver a su estado sólido, éstas se contraen, al contrario que el agua, lo que se considera un aspecto positivo para la respuesta estructural del depósito.

El esquema general de la instalación solar a tratar, comienza con la absorción de la luz solar a través del receptor. Para ello, se sitúan en el campo un conjunto de espejos direccionales llamados heliostatos, que reflejan los rayos hacia el receptor. Éste se encuentra ubicado en una torre central de gran altura para reducir la posibilidad de sombras. Además, es el encargado de transformar la energía solar en energía térmica a través de las sales, que posteriormente serán almacenadas en el depósito a estudiar. Las sales fundidas que salen del depósito se transportan a un generador de vapor a través de unas tuberías, donde evaporan el agua que provoca el movimiento de la turbina a través de energía mecánica rotatoria, produciendo finalmente la electricidad a través del generador.

Los tanques de almacenamiento de sales fundidas son una medida que se ha implementado en los últimos años ya que tienen las ventajas de reducir la variación de los flujos de potencia en la red y su ajuste a la demanda. Son los encargados de almacenar la energía en exceso cuando no sea posible la captación solar y por tanto, serán objeto de estudio, ya que soportarán altas temperaturas en un periodo de tiempo corto, medio o largo.

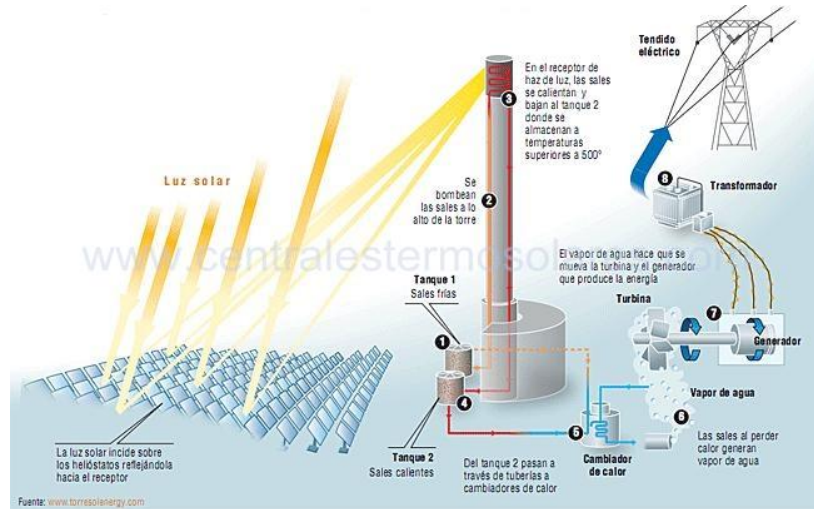


Figura 11: Esquema del funcionamiento de una planta solar

2 TEORÍA DE LÁMINAS

Una estructura laminar consiste en un sólido deformable bidimensional o superficial en el que una de sus dimensiones es mucho menor que las otras dos.

Por un lado, la principal diferencia entre una placa y una lámina es que la superficie media de ésta no es un plano y presenta una cierta curvatura.

Por otro lado, las láminas se distinguen de las membranas en que éstas, al tener menor espesor que las placas, no son capaces de resistir cargas de compresión adaptando su forma ante cargas transversales. Solo poseen esfuerzos en el plano tangente.

Las láminas son elementos superficiales que disponen de un radio de curvatura como mínimo diez veces mayor que su espesor. Por tanto, las láminas delgadas comprenden en teoría valores de $\frac{\text{espesor}}{\text{radio curvatura}} \simeq \frac{1}{20}$ aunque es posible encontrar en la práctica valores de $\frac{\text{espesor}}{\text{radio curvatura}} < \frac{1}{1000}$ y no se consideran membranas.

En una lámina existen dos curvaturas principales: la que soporta la máxima cantidad de esfuerzos, curvatura máxima, y la curvatura mínima. Además, para poder soportar esfuerzos compresivos, las caras de la láminas no pueden ser paralelas (alabeo).

En general, las láminas poseen esfuerzos que se derivan de la curvatura y se distribuyen en la superficie de ésta. Estos esfuerzos son tangenciales, cortantes, momentos flectores y torsores, y esfuerzos axiales.

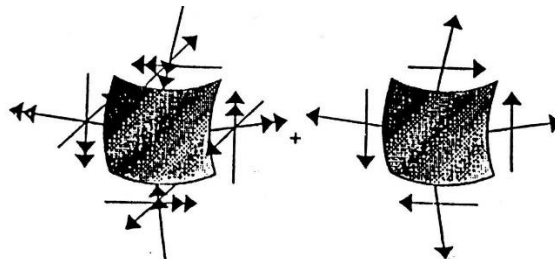


Figura 12: Esfuerzos en láminas

Para realizar el estudio de estos esfuerzos, las láminas se pueden equiparar a membranas, siempre que además se analicen sus acciones en el contorno por separado. Para ello, se usa la *teoría membranar* (problema isostático) junto con la *teoría de flexión* (problema hiperestático).

2.1 TEORÍA MEMBRANAL

Para explicar la teoría membranar, se toma un fragmento de membrana con 2 meridianos contiguos y 2 paralelos contiguos de distancias infinitesimales:

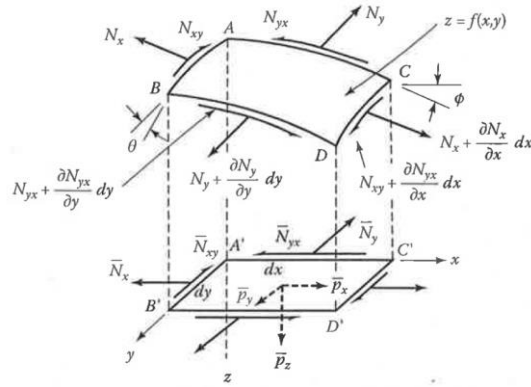


Figura 13: Descomposición de esfuerzos membranales

La superficie de una membrana ABCD definida como $z=f(x,y)$ posee curvaturas de inclinación que se miden a partir de los ángulos ϕ y θ . Éstos servirán de ayuda para simplificar el problema proyectando el elemento diferencial en un plano OXY.

Al aplicarle una carga externa P con componentes p_x, p_y y p_z , la lámina estará sometida a un estado membranar de tensión bajo las fuerzas N_x, N_y y $N_{xy}=N_{yx}$.

Proyectando estas fuerzas en el plano, resultan los esfuerzos equivalentes siguientes:

$$N_x = \overline{N_x} \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \quad N_y = \overline{N_y} \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \quad N_{xy} = \overline{N_{xy}}$$

Siendo: $\tan \phi = \frac{\partial z}{\partial x}$,

$$\tan \theta = \frac{\partial z}{\partial y}$$

Como se trata de un problema isostático, realizando el equilibrio de fuerzas en dirección x, y, z se obtendrán las ecuaciones de equilibrio de una membrana:

$$\Sigma F_x: \frac{\partial \overline{N_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{N_{xy}}}{\partial x} + \overline{p_x} = 0$$

$$\Sigma F_y: \frac{\partial \overline{N_{xy}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{N_y}}{\partial x} + \overline{p_y} = 0$$

$$\Sigma F_z: \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{N_x} \frac{\partial z}{\partial x} + \overline{N_{xy}} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{N_y} \frac{\partial z}{\partial y} + \overline{N_{xy}} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \overline{p_z} = 0$$

Para el equilibrio en dirección z, se han proyectado las componentes verticales de los esfuerzos.

Simplificando resulta:

$$\bar{N}_x \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2\bar{N}_{xy} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \bar{N}_y \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\bar{p}_z + \bar{p}_x \frac{\partial z}{\partial x} + \bar{p}_y \frac{\partial z}{\partial y}$$

2.2 TEORÍA DE FLEXIÓN

Las láminas no solo trabajan con esfuerzos membranales, también desarrollan flexión en puntos singulares como empotramientos, cambios de geometría o cargas puntuales. Este fenómeno se estudia a través de la teoría de flexión (hiperestática), donde se evaluará la compatibilidad y el equilibrio del sistema.

En la siguiente figura se representan los esfuerzos membranales resultantes en una lámina:

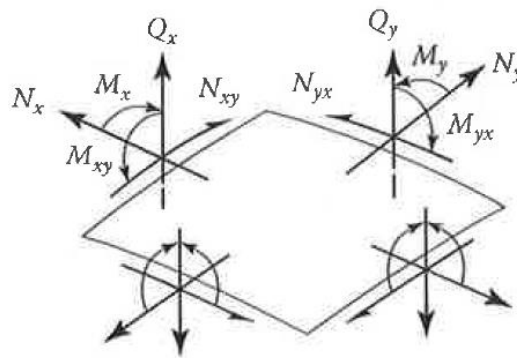


Figura 14: Esfuerzos membranales de una lámina

Para hallarlas, se toma un trozo de lámina de espesor t , cuya línea media se sitúa a una distancia r_x o r_y de uno de los centros de curvatura de ésta. Si se toma un espesor de lámina z , servirá para explicar el procedimiento para hallar los esfuerzos membranales buscados.

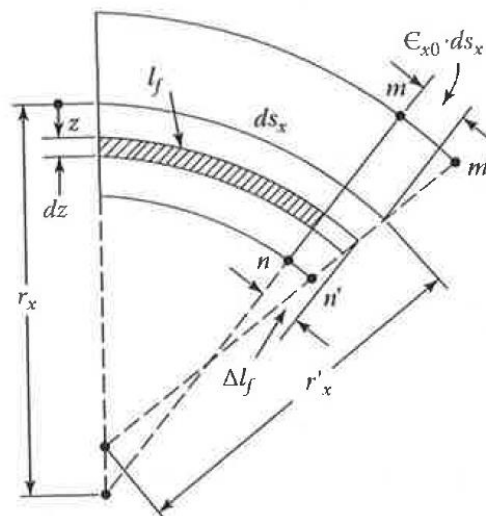


Figura 15: Sección de una lámina según el plano xz

La longitud de arco de un elemento en el plano xz localizado a distancia z de la superficie media se calcula:

$$\frac{ds_x(r_x - z)}{r_x} = \left(1 - \frac{z}{r_x}\right) ds_x$$

Las tensiones que actúan en las caras planas del elemento son σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{xz} , y τ_{yz} . Por tanto, se calcula N_y como la fuerza resultante normal a la cara del plano xz por unidad de longitud como:

$$N_y ds_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{r_x}\right) ds_x dz \quad \rightarrow \quad N_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{r_x}\right) dz = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y (1 - z\kappa_x) dz$$

Análogamente para hallar el resto de esfuerzos resultan:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ N_{yx} \\ Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{pmatrix} \sigma_x(1 - z\kappa_y) \\ \sigma_y(1 - z\kappa_x) \\ \tau_{xy}(1 - z\kappa_y) \\ \tau_{yx}(1 - z\kappa_x) \\ \tau_{xz}(1 - z\kappa_y) \\ \tau_{yz}(1 - z\kappa_x) \end{pmatrix} dz$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ M_{yx} \end{pmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{pmatrix} \sigma_x(1 - z\kappa_y) \\ \sigma_y(1 - z\kappa_x) \\ \tau_{xy}(1 - z\kappa_y) \\ \tau_{yx}(1 - z\kappa_x) \end{pmatrix} z dz$$

A pesar de que $r_x \neq r_y$ ya que tienen curvaturas distintas, y por tanto N_{xy} no tendría por qué ser igual que N_{yx} , el cociente $\frac{z}{r_y}$ y $\frac{z}{r_x}$ es aproximadamente 0 ya que $t \ll r_x$ y $t \ll r_y$, resultando que $N_{xy} = N_{yx}$:

$$N_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy}(1 - z\kappa_y) dz = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{yx}(1 - z\kappa_x) dz = N_{yx}$$

Esto mismo ocurre con M_{xy} y M_{yx} . Por tanto, $M_{xy} = M_{yx}$.

El resto de esfuerzos membranales se resuelven con ayuda de la Ley de Hooke:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu\epsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu\epsilon_x)$$

$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} G$$

La deformación longitudinal ε_x se halla por geometría considerando que $t \ll r_x$ según la Figura 15 como:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_f}{l_f} = \frac{ds_x \left(1 - \frac{z}{r_x'}\right)}{ds_x(1 + \varepsilon_{x0}) \left(1 - \frac{z}{r_x'}\right) - l_f} = \varepsilon_{x0} - z \left(\frac{1}{r_x'} - \frac{1}{r_x}\right) = \varepsilon_{x0} - z\chi_x$$

siendo r_x el radio de curvatura después de la deformación y χ_x el cambio de curvatura de la superficie media.

De la misma manera se halla ε_y :

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} - z\chi_y$$

La deformación angular γ_{xy} se halla de manera análoga:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy0} - 2z\chi_{xy}$$

siendo χ_{xy} el giro de la superficie media.

Sustituyendo en la ley de Hooke resultan las siguientes tensiones:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{x0} + \nu\varepsilon_{y0} - z(\chi_x + \nu\chi_y))$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{y0} + \nu\varepsilon_{x0} - z(\chi_y + \nu\chi_x))$$

$$\tau_{xy} = (\gamma_{xy0} - 2z\chi_{xy})G$$

Y resolviendo las integrales anteriores resulta:

$$N_x = \frac{Et}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{x0} + \nu\varepsilon_{y0})$$

$$N_y = \frac{Et}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{y0} + \nu\varepsilon_{x0})$$

$$N_{xy} = N_{yx} = \frac{\gamma_{xy0}Et}{2(1 + \nu)}$$

$$M_{xy} = M_{yx} = -D(1 - \nu)\chi_{xy}$$

$$M_x = -D(\chi_x + \nu\chi_y)$$

$$M_y = -D(\chi_y + \nu\chi_x)$$

donde $D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)}$ define la rigidez a flexión de la membrana.

3 NORMATIVA PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Dada la necesidad que se ha manifestado en la industria del petróleo de reunir en un único documento los criterios de diseño fabricación, montaje, inspección y reparación de tanques, el Instituto Americano del Petróleo (API) ha hecho una recopilación de toda la información de la experiencia de compradores y fabricantes. Como consecuencia, se elaboró una estandarización que permitiese cumplir con normativa de seguridad, además de otras como aspectos ambientales o de higiene.

Así fue cómo el Instituto Americano del Petróleo creó los códigos API-620, API-650 y API-653 en relación a los tanques.

3.1 NORMA STANDARD API-650

El cálculo de las características de diseño del tanque en cuestión se ha realizado tomando como referencia la norma Standard API-650.

Como se ha explicado con antelación, la Standard API-650 ha sido planteada como una suma de los conocimientos tanto de compradores como de fabricantes para facilitar la construcción de depósitos que no son muy específicos, y que cumpla con una seguridad adecuada para su uso posterior. Por tanto, no trata de aplicar cálculos específicos de cada elemento del tanque.

Esta norma establece los requisitos necesarios para diseñar tanques de almacenamiento de fluidos (no necesariamente petróleo o derivados) cilíndricos, de fondo uniforme, de cualquier tamaño, con presiones internas cercanas a la atmosférica, con una temperatura máxima de diseño de 93°C generalmente (ampliable según anexos) y que no tengan un uso de servicios de refrigeración.

Esta normativa se estructura de la manera siguiente:

1. Alcance
2. Referencias
3. Definiciones
4. Materiales
5. Diseño
6. Fabricación
7. Erección
8. Métodos de inspección de juntas
9. Procedimientos de soldadura y cualificaciones del soldador
10. Calificación
11. Apéndices

3.2 COMPARACIÓN CON LA NORMA STANDARD API-620

Además de la norma Standard API-650, cabe mencionar que la norma API-620 es otra de las más utilizadas para el diseño de depósitos de almacenamiento.

La principal diferencia entre la API-650 y la API-620 es que esta última se encarga de regular la fabricación de tanques de almacenamiento que contienen un producto a baja presión. Además, los tanques que siguen esta norma pueden almacenar productos a temperaturas inferiores que los que permite API-650.

A continuación, se expondrá una tabla con las características más relevantes del diseño donde se podrán observar las principales diferencias entre la norma API-620 y la que se ha tomado como referencia en este proyecto.

		Unidades	API-650	API-620
Temperatura máxima		°C	93.3 ⁽¹⁾	93.3
Temperatura mínima		°C	-28.8	Desde 45 hasta 167
Presión interna		Kg/cm ²	Atmosférica	1
Espesor máximo cuerpo		cm	44.4	-
Espesor mínimo cuerpo	Si D < 15.2 m	mm	4.76	4.76
	15.2 m < D > 36.5 m		6.35	6.35
	36.5 m < D > 60.9 m		7.93	7.93
	D > 60.9 m		9.52	9.52
Espesor máximo techo		mm	6.35+C.A. ⁽²⁾	-
Espesor mínimo techo		mm	4.76	-
Ángulo mínimo de coronamiento	D < 10.6 m.		50.8 mm x 50.8 mm x 4.76 mm	50.8 mm x 50.8 mm x 4.76 mm
	10.6 m < D > 18.2 m		50.8 mm x 50.8 mm x 6.35 mm	50.8 mm x 50.8 mm x 6.35 mm
	D > 18.2 m		76.2 mm x 76.2 mm x 9.52 mm	76.2 mm x 76.2 mm x 9.52 mm

Tabla 1: Comparación características principales API-650 y API-620

(1) La temperatura puede llegar a temperaturas más elevadas si se cumplen una serie especificaciones.

(2) C.A.: corrosión permisible

4 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE

4.1 DATOS DE PARTIDA

Para poder comenzar con el cálculo descrito anteriormente, se partirá de la información que el cliente establece. Se trata de almacenar un fluido en un depósito para una estación termosolar, situada en Texas (EEUU). Esta sustancia es no volátil y puede alcanzar los 600°C. Conjuntamente, el cliente ha expuesto los datos que exige para el dimensionamiento del depósito:

- Diámetro interno del tanque: **45 m**
- Altura de la envolvente: **12.5 m**
- Altura del tanque: **17.6 m**
- Altura del producto contenido: **17 m**
- Densidad del producto: **1800 kg/m³**
- Número de virolas: **6**
- Presión de diseño interna: **3 kPa**
- Presión de diseño externa: **0.5 kPa**
- Velocidad del viento de diseño: **145 km/h**
- Categoría de terremoto: **D**

4.2 SELECCIÓN DEL DISEÑO DEL TANQUE

Para comenzar con el diseño del depósito y dados los datos que el cliente establece, se considera que dos de las características que se han de diseñar previamente a cualquier cálculo en concreto, son el material y la forma.

4.2.1 MATERIAL DEL DEPÓSITO

Se ha de identificar un material cuya tensión admisible (σ_{adm}) sea suficiente para cumplir con el rendimiento del depósito, como es el caso del acero. La elección de acero inoxidable es apropiada dadas las facilidades que proporciona su característica de resistencia a la corrosión, que reduce los costos de mantenimiento, así como aumenta su durabilidad. A continuación se muestran las ventajas y desventajas de este material para su utilización en depósitos:

- Ventajas del acero:
 - *Resistencia elevada:* los aceros, en general, tienen una alta resistencia a la tracción.
 - *Homogeneidad:* reduce el riesgo de corrosión mejorando su calidad y fiabilidad.
 - *Elasticidad:* se acerca a un comportamiento lineal elástico hasta ciertos esfuerzos límites.
 - *Tenacidad:* absorbe grandes cantidades de energía cuando se deforma.
 - *Ductilidad:* se producen deformaciones previas a la rotura.

- *Facilidad de unión con otros miembros*: fácil de soldar, unir a través de tornillos o remaches.
- *Disponibilidad de secciones y tamaños*: su uso se encuentra muy extendido en el mercado y debido a la importante estandarización, hay total accesibilidad a diferentes geometrías.
- *Se pueden prefabricar estructuras*: facilita el montaje en obra prefabricándolo en taller.
- *Reciclable*: es totalmente reciclable y degradable.

- o Desventajas del acero:
 - *Corrosión*: en general, los aceros poseen una baja resistencia a la corrosión, pero al tratarse de un acero inoxidable se puede disminuir este problema dado que contiene como mínimo un 10.5% de Cr que protege de la humedad.
 - *Fatiga*: al someter al acero a un gran número repetitivo de cargas con una cierta frecuencia puede provocar que falle a lo largo del tiempo.
 - *Pandeo*: los aceros tienen menor $\sigma_{c,adm}$, lo que provocaría que las estructuras pandearan con más facilidad.
 - *Resistencia al fuego*: en aceros no existe una alta resistencia al fuego pero, en comparación con otros metales, el acero inoxidable presenta la mayor resistencia al fuego en aplicaciones estructurales gracias a una temperatura de fluencia elevada (superior a 800° C).

4.2.2 FORMA DEL DEPÓSITO

4.2.2.1 ENVOLVENTE

Para justificar la forma que tendrá el depósito según las características proporcionadas por el comprador, se considerará un tanque cilíndrico. Esto es así, ya que al ser distintas la curvatura máxima y mínima, existirá alabeo que ayudará a soportar esfuerzos compresivos en láminas. Cuando se produce este fenómeno, aparecen esfuerzos tangenciales en la superficie que ayudan en su mecanismo resistente. Si se plantease una esfera como depósito, la cual tiene igual radio de curvatura del meridiano y del paralelo, no existiría este fenómeno.

La siguiente decisión que hay que estudiar es si considerar un depósito cilíndrico horizontal o vertical. En este caso, se quiere almacenar gran cantidad de un fluido a presión atmosférica, por lo que se tomará el depósito cilíndrico vertical. Además, es aconsejable usarlos para tanques que contienen fluidos a presión atmosférica o similar.

La norma API reúne las características de estos dos tipos de depósitos cilíndricos que se exponen en la siguiente tabla:

	CARACTERÍSTICAS
DEPÓSITO CILÍNDRICO HORIZONTAL	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños volúmenes por problemas de cortadura y flexión
DEPÓSITO CILÍNDRICO VERTICAL	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes volúmenes • Bajo coste • Sólo presión atmosférica o muy bajas

Tabla 2: Características de los depósitos cilíndricos verticales y horizontales

Asimismo, se tratará de un tanque de simple pared ya que se va a almacenar un producto por encima de 0°C. El tanque constará de un aislamiento térmico que habrá que diseñar en último lugar debido a que se requiere mantener un fluido a temperatura muy elevada.

4.2.2.2 FONDO

Para la selección del diseño del fondo del depósito se deberían de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cimientos
- Método de desalojo del producto
- Grado de sedimentación de sólidos en suspensión
- Corrosión del fondo
- Tamaño del tanque

Como este proyecto se centra fundamentalmente en la envolvente del tanque, se justificará la selección del fondo de una forma general.

La finalidad del fondo es que el producto no se filtre por la base, además de soportar la compresión y flexión que induce el cuerpo del depósito sobre la periferia de la base. Como el producto a almacenar es un fluido, se descarta la opción de base en forma cónica, que serviría para evacuar sedimentos y no es la cuestión más relevante. Fondos esféricos facilitarían el vaciado del producto o de sedimentos al igual que la forma cónica. Prescindiendo de la funcionalidad del depósito y estudiando la base estructuralmente, al considerar una base esférica o cónica, si la presión del fluido P_z es mayor que el esfuerzo membranal n_m , se producirá una tracción, es decir, una expansión de un diferencial de lámina en el sentido paralelo. Si predominase n_m , habría contracción en el sentido paralelo que provocaría pandeo en la lámina y como resultado una abolladura. Por tanto se tendrá en cuenta un fondo con placa circular que soportará la carga del fluido.

4.2.2.3 TECHO

Por último, al tratarse de un producto no volátil, se considerará un techo fijo con forma esférica. Para seleccionar el tipo de techo se han estudiado las siguientes características funcionales que la API-650 señala:

	CARACTERÍSTICAS
SIN TECHO	<ul style="list-style-type: none"> • Productos que no soliciten requerimientos de contaminación del ambiente o evaporación.
TECHO FIJO	<ul style="list-style-type: none"> • Unido permanentemente al cuerpo del depósito. • Productos no volátiles.
TECHO VOLÁTIL	<ul style="list-style-type: none"> • Productos con altos contenidos volátiles. • Reduce la cámara de aire entre la superficie libre del fluido y el techo. • Reducen los riesgos de almacenar productos inflamables.

Tabla 3: Características de los distintos tipos de techo

Analizando las características que se muestran anteriormente y dado el problema a estudiar, el techo fijo será el más conveniente para este caso. Su diseño generalmente lo decide el cliente en función de las dimensiones del tanque y del producto a almacenar, pero haciendo un análisis estructural para este caso en concreto se puede concluir que un techo en forma esférica sería el más adecuado. Esto sería no solo por el aprovechamiento de un mayor volumen de fluido almacenado, sino por la resistencia a las posibles cargas exteriores.

Si se contemplara un techo de placa circular, al soportar una carga de nieve ésta tendría un mayor desplazamiento vertical debido a la flexión, además de permitir menor cantidad de volumen de producto almacenado. Si tuviese forma cónica cerrada con una placa de menor diámetro, se reduciría el problema de la flexión.

Sin embargo, al considerar un techo semiesférico, al solo existir tensiones membranales, la carga se reparte de una manera más uniforme con esfuerzos de laja y placa.

4.3 SELECCIÓN DEL MATERIAL

A continuación, se ha de seleccionar un tipo de acero inoxidable, dadas las ventajas para esta aplicación explicadas en el apartado anterior. Se van a analizar varios aceros para tanques a altas temperaturas y finalmente se decidirá hacer una comparación para la selección definitiva.

Los aceros inoxidable son aleaciones de Fe-Cr con al menos un 12%Cr. El Cr se caracteriza por dar la propiedad de resistencia a la corrosión al crearse una película de óxido de cromo en su superficie que protege de la atmósfera. Además, estos aceros contienen Ni, que mejora sus propiedades mecánicas. Resumiendo, los tipos de aceros inoxidable según su microestructura determinará la decisión para este problema:

- *Aceros inoxidable martensíticos*: estructura austenítica a alta temperatura que, tras templearlos, se transforman en martensita. A pesar de tener una elevada dureza y una buena resistencia al desgaste, este tipo de aceros se desaconseja para aplicaciones que requieran buena resistencia a la corrosión, ya que contienen menos contenido en Cr. Pueden contener entre 11.5-18% Cr pero disminuye bastante al formar carburos de cromo debido a que éste estabiliza la ferrita a altas temperaturas y por tanto limitará la transformación martensítica.
- *Aceros inoxidable ferríticos*: estructura ferrítica con bajos contenidos en Ni (<2%). Independientemente de su bajo coste debido al poco contenido en Ni, a las mejores propiedades de corrosión, su buena ductilidad y oxidación a altas temperaturas que proporciona respecto a los martensíticos, estos aceros son problemáticos a la hora de diseñar grandes espesores y de soldar.
- *Aceros inoxidable austeníticos*: estructura austenítica granular fundamentalmente. Contienen mayores cantidades de Ni, que permite estabilizar la austenita evitando que el Cr produzca una estructura ferrítica. Estos aceros tienen una alta resistencia a la corrosión, así como son fácilmente soldables, pese a que son menos económicos que los ferríticos.

Esta breve introducción sobre los distintos tipos de aceros inoxidable permite concluir que los aceros inoxidable austeníticos son los más adecuados para el problema que se propone.

A continuación, se compararán diferentes tipos de aceros inoxidable austeníticos de interés para tomar una decisión final del material del depósito.

- **AISI 304**: Es el más significativo de los aceros inoxidable austeníticos. Posee buena resistencia a la corrosión y contiene principalmente 18%Cr, 8%Ni y $\leq 0.02\%C$. Puede llegar a darse la corrosión por picado¹ en este tipo de aceros.
- **AISI 321**: acero con propiedades similares al anterior pero con una adición de Ti que reduce la precipitación de carburos durante la soldadura. Se usa para aplicaciones a temperaturas entre 427°C y 816°C intermitentemente o de forma continua.

- **AISI 347H:** acero con alto contenido en Cr y que además contiene Nb, el cual evita la sensibilización². Al igual que el acero 321, éste puede trabajar a temperaturas continuas o intermitentes entre 427°C y 816°C.
- **AISI 316:** como mejora al acero 304, éstos poseen cierta cantidad de Mo (2%) que forma una capa más resistente evitando la corrosión por picado.
- **AISI 317:** acero inoxidable más resistente debido a la adición de S (0.001%), que provoca la reducción de la fragilidad en caliente.
- **AISI 304L, 316L y 317L:** tipos de aceros inoxidables con elementos que eliminan la corrosión intergranular, ya que produce una estabilización que elimina la precipitación de carburos durante la soldadura (evita la sensibilización). Son aconsejables para aceros que trabajan a temperaturas entre 450°C y 850°C.
- **AISI 321 y el 347:** son aceros inoxidables estabilizadores ya que también evitan el problema de sensibilización. Esto es debido a la adición de Ti o Ni, que poseen una mayor afinidad por el C que por el Cr, evitando la precipitación de carburos de Cr, permaneciendo éste como solución sólida.
- **AISI 316 Ti:** tipo de aceros que mejoran el problema de sensibilización que posee el 316 debido a la adición de Ti. Son aconsejables para temperaturas de trabajo entre 400°C y 900°C.
- **AISI 904 L:** estos aceros poseen una mayor cantidad de elementos de aleación que mejoran la resistencia al picado así como la resistencia a la corrosión en medios ácidos.
- **AISI 304H y 316H:** aceros que poseen mejores propiedades de resistencia mecánica prescindiendo de la importancia de la corrosión intergranular. Esto es debido a que poseen mayores cantidades de C (0.04-01%)

Una vez descritos los aceros inoxidables austeníticos más representativos, se descartan los aceros menos apropiados para esta aplicación y se comparan dos posibilidades: **AISI 347H** y **AISI 317L**.

Ambos poseen las características más adecuadas para su uso así que se seleccionará aquel que sea más acorde a las aplicaciones habituales.

Los aceros AISI 347H se usan para procesos químicos a altas temperaturas, tubos de intercambio, refinerías y para altas presiones y temperaturas de servicio.

Los aceros AISI 317L tienen aplicaciones de equipos para procesamientos químicos y petroquímicos, plantas de celulosa y papel y equipos para procesamiento de alimentos entre otras.

Por tanto, debido a la afinidad de aplicaciones con el acero AISI 347H, se seleccionará éste.

Su composición y características más relevantes son las siguientes:

ELEMENTO	COMPOSICIÓN (%)
C	0.04-0.08
Mn	2
Si	0.75
Cr	17-19
Ni	9-13
Mo	3-4
P	0.045
S	0.03
Ni	9-13
Nb	$8*(C+N)-1$

Tabla 4: Composición del acero AISI 347 H

Densidad	g/cm³
20°C	7.96
Resistividad Eléctrica	nW m
A 20°C	730
Conductividad Térmica	W/mK
A 0-100°C	16.1
Calor específico	J/kgK
0-100°C	500
Módulo de Elasticidad	GPa
E	193
Resistencia a tracción	MPa
	645
Límite elástico	MPa
0.2%	345

Tabla 5: Características del acero AISI 347 H

4.4 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA ENVOLVENTE CILÍNDRICA

4.4.1 MÉTODO DE 1 PIE

Para calcular el espesor requerido del depósito a analizar se aplicará el método de un pie según el apartado 5.6.3 de la Standard API-650. Éste considera una sección transversal del tanque situada a 304.8 mm (1 pie) por debajo de la base de cada virola, y se realiza un estudio del espesor a presión hidrostática y otro con sus propiedades de diseño.

La condición que caracteriza este método es que el diámetro del tanque (D) sea igual o menor de 60.96 m, es decir, 200 pies. Considerando que el dato de partida del diámetro interno del depósito es de 45 m, es posible aplicar el método de 1 pie.

Dadas las condiciones de partida expuestas en la introducción, se tendrán en cuenta para el cálculo del espesor de las 6 virolas.

A continuación, se señalan las fórmulas a aplicar, de las cuales se elegirá el mayor resultado de los dos espesores, por ser el más crítico.

- Espesor por prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{4.9 * D * (H - 0.3)}{St * E}$$

- Espesor por condiciones de diseño: :

$$t_d = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{sd * E} + CA$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
t_t y t_d	mm	Espesor de la envolvente	El mayor entre: $t_t = \frac{4.9 * D * (H - 0.3)}{St * E}$ $t_d = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{sd * E} + CA$	$t_1 = 41.64 \text{ mm}$ $t_2 = 34.60 \text{ mm}$ $t_3 = 27.58 \text{ mm}$ $t_4 = 20.55 \text{ mm}$ $t_5 = 13.52 \text{ mm}$ $t_6 = 7.93 \text{ mm}$
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	D=45 m
H_v	m	Altura de diseño del nivel del líquido	$H_v = H_1 - 2.09$	$H_1 = 12.5 \text{ m}$ $H_2 = 10.41 \text{ m}$ $H_3 = 8.32 \text{ m}$ $H_4 = 6.23 \text{ m}$ $H_5 = 4.14 \text{ m}$ $H_6 = 2.05 \text{ m}$
G	-	Densidad relativa del líquido a almacenar o del agua para cálculo por prueba hidrostática	$G = \frac{\text{Densidad del líquido}}{\text{Densidad del agua a } 4^\circ\text{C}}$	G=1.8

CA	mm	Corrosión permisible	Dato de partida	CA=0.6 mm
S _d	MPa	Esfuerzo permisible por condiciones de diseño	Figura 16	S_d=118 MPa
S _t	MPa	Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática	Figura 17	S_t=155 MPa

Tabla 6: Cálculos del espesor de la envolvente

¹ El diámetro nominal del tanque se mide en la fibra media del cuerpo.

² Altura desde la parte de baja del anillo considerado al perfil de coronamiento, o cualquier nivel indicado por el usuario, restringido por techos flotantes o cálculos por sismo.

Para hallar el valor de la densidad relativa del fluido (G) se resuelve la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\text{Densidad del líquido}}{\text{Densidad del agua a } 4^{\circ}\text{C}} = \frac{1800 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = \mathbf{1.8}$$

El esfuerzo permisible por condición de diseño (S_d) y el esfuerzo permisible por prueba hidrostática (S_t) se obtienen a partir de las figuras 14 y 15 que proporciona la norma Standard API-650 respectivamente.

Dado que el acero que se ha elegido para el diseño del tanque (AISI 347H), no está especificado en las tablas, se tomará como referencia el acero AISI-317L, ya que posee características similares y era la segunda opción a tomar para el diseño.

Por tanto, para el acero 317L S_d tendrá a 260°C los valores de 123 MPa, pero al no haber datos a 600°C, extrapolando se reduce a 118 MPa:

Type	Min. Yield MPa	Min. Tensile MPa	Allowable Stress (S _d) (in MPa) for Maximum Design Temperature Not Exceeding					S _y Ambient
			40°C	90°C	150°C	200°C	260°C	
201-1	260	515	155	136	125	121	--	234
201LN	310	655	197	172	153	145	143	279
304	205	515	155	155	140	128	121	186
304L	170	485	145	132	119	109	101	155
316	205	515	155	155	145	133	123	186
316L	170	485	145	131	117	107	99	155
317	205	515	155	155	145	133	123	186
317L	205	515	155	155	145	133	123	186

Figura 16: Tabla de esfuerzos permisibles por condiciones de diseño según la API-650

$$S_d=118 \text{ MPa}$$

Para hallar el esfuerzo permisible del ensayo bajo presión hidrostática (S_t), se realiza a una temperatura de operación normal (entre 20-40°C):

Table S-3a—(SI) Allowable Stresses for Plate Ring Flanges

Type	Allowable Stress (S_t) (in MPa) for Maximum Design Temperature Not Exceeding				
	40°C	90°C	150°C	200°C	260°C
201-1	155	133	115	104	--
201LN	197	167	151	143	138
304	140	115	103	95	89
304L	117	99	88	81	75
316	140	119	107	99	92
316L	117	97	87	79	73
317	140	119	108	99	92
317L	140	119	108	99	92

Notes:

Figura 17: Tabla de esfuerzos permisibles por prueba hidrostática según la API-650

A 40°C para el AISI 317L, $S_t=140$ MPa y extrapolando resultará que para el AISI 347H:

$$S_t=155 \text{ MPa}$$

Una vez hallados los datos necesarios para el cálculo del espesor, se aplica el Método de un pie explicado anteriormente.

En primer lugar, se especificará el espesor mínimo necesario en función del diámetro nominal del tanque a través de la siguiente tabla:

Diámetro nominal en metros	Espesor mínimo en milímetros
< 15.24	4.76
15.24 < 36.576	6.35
36.576 < 60.96	7.93
> 60.96	9.52

Figura 18: Espesor mínimo de virola según la API-650

Como en este caso el $D=45$ m, el espesor mínimo en milímetros es de 7.93.

A continuación, ya se puede aplicar el método de un pie para hallar el valor exacto para las 6 virolas. Suponiendo que el ancho de virola es equivalente para todas, se calcula como

$\frac{\text{altura del cilindro}}{n^{\circ} \text{ de virolas}} = \frac{12.5}{6} = 2.09$ m. Esto es así ya que es necesario optimizar el espesor de cada virola al variar la presión a soportar del tanque con la altura.

Como se ha explicado al inicio del apartado, se calculará el espesor de la primera virola para el caso de prueba hidrostática y para condiciones de diseño. El que resulte mayor, será el espesor escogido.

Cálculo para el primer anillo

- Espesor por prueba hidrostática:

$$t_{t1} = \frac{4.9 * D * (H - 0.3)}{St}$$

$$t_{t1} = \frac{4.9 * 45 * (12.5 - 0.3)}{155} = \mathbf{17.79 \text{ mm}}$$

- Espesor por condiciones de diseño:

$$t_{d1} = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{sd} + CA$$

$$t_{d1} = \frac{4.9 * 45 * (12.5 - 0.3) * 1.8}{118} + 0.6 = \mathbf{41.64 \text{ mm}}$$

Se escoge el mayor valor de entre los dos, por ser el más restrictivo y será válido para las dos condiciones de carga (siempre que cumpla que $t > 7.93$ mm). En este caso, el espesor del primer anillo (el situado más cercano a la base) del depósito sería el del espesor por condiciones de diseño: $t_1 = \mathbf{41.64 \text{ mm}}$.

Cálculo para el segundo anillo

La altura del siguiente anillo será de $12.5 - 2.09 = 10.41$ m. El resto de datos se conserva.

- Espesor por condiciones de diseño:

$$t_{d2} = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{sd} + CA$$

$$t_{d2} = \frac{4.9 * 45 * (10.41 - 0.3) * 1.8}{118} + 0.6 = \mathbf{34.6 \text{ mm}}$$

De aquí en adelante el valor más restrictivo seguirá siendo el calculado por condiciones de diseño (siempre que cumpla que $t > 7.93$ mm). Por tanto, se descarta el cálculo del espesor por prueba hiperestática y para este caso, el espesor del segundo anillo del depósito sería $t_2=34.60$ mm.

Cálculo para el tercer anillo

La altura del siguiente anillo será de $10.41-2.09=8.32$ m. El resto de datos se conserva.

- Espesor por condiciones de diseño:

$$t_{d3} = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{S_d} + CA$$
$$t_{d3} = \frac{4.9 * 45 * (8.32 - 0.3) * 1.8}{118} + 0.6 = 27.58 \text{ mm}$$

El espesor del tercer anillo por condiciones de diseño será de $t_3=27.58$ mm

Cálculo para el cuarto anillo

La altura del siguiente anillo será de $8.32-2.09= 6.23$ m. El resto de datos se conserva.

- Espesor por condiciones de diseño:

$$t_{d4} = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{S_d} + CA$$
$$t_{d4} = \frac{4.9 * 45 * (6.23 - 0.3) * 1.8}{118} + 0.6 = 20.55 \text{ mm}$$

El espesor del cuarto anillo por condiciones de diseño será de $t_4=20.55$ mm

Cálculo para el quinto anillo

La altura del siguiente anillo será de $6.23-2.09= 4.14$ m. El resto de datos se conserva.

- Espesor por condiciones de diseño:

$$t_{d5} = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{S_d} + CA$$

$$t_{d5} = \frac{4.9 \cdot 45 \cdot (4.14 - 0.3) \cdot 1.8}{118} + 0.6 = \mathbf{13.52 \text{ mm}}$$

El espesor del quinto anillo por condiciones de diseño será de $t_5 = \mathbf{13.52 \text{ mm}}$

Cálculo para el sexto anillo

La altura del siguiente anillo será de $4.14 - 2.09 = 2.05 \text{ m}$. El resto de datos se conserva.

➤ Espesor por condiciones de diseño:

$$t_{d6} = \frac{4.9 \cdot D \cdot (H - 0.3) \cdot G}{S_d} + CA$$

$$t_{d6} = \frac{4.9 \cdot 45 \cdot (2.05 - 0.3) \cdot 1.8}{118} + 0.6 = \mathbf{6.48 \text{ mm}}$$

El espesor del sexto anillo por condiciones de diseño sería de $t_6 = 6.48 \text{ mm}$ pero como tiene que cumplir que $t > 7.93 \text{ mm}$, $t_6 = \mathbf{7.93 \text{ mm}}$.

4.5 CÁLCULO DEL ESPESOR DEL TECHO

Como el techo que se ha seleccionado es de tipo domo por ser un casquete esférico, éste tendrá, según la norma Standard API-650, un radio mínimo de $r_r = 0.8 \cdot D = 0.8 \cdot 45 = 36 \text{ m}$ y un radio máximo de $r_r = 1.2 \cdot D = 54 \text{ m}$ (al no haber especificado otro el cliente). Se supondrá un valor de $r_r = 1.2 \cdot D = 54 \text{ m}$ porque al ser menos achatado, va a suponer menos problemas de acumulación de cualquier carga que soporte.

El espesor mínimo de techo será el mayor de estos 3:

$$1) \frac{rr}{2.4} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA$$

$$2) \frac{rr}{2.7} \sqrt{\frac{U}{2.2}} + CA$$

$$3) 5 \text{ mm}$$

Además, según la norma, el espesor máximo ha de ser de 13 mm excluyendo la tolerancia de corrosión.

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
t_{domo}	mm	Espesor de techo	1) $\frac{rr}{2.4} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA$ 2) $\frac{rr}{2.7} \sqrt{\frac{U}{2.2}} + CA$ 3) 5 mm Siendo $t_{\text{domo}} < 13$ mm	$t_{\text{domo}}=13$ mm
r_r	m	Radio del techo	Según apartado 5.10.6.1 API-650	$r_r=54$ m
T	kPa	El mayor de las combinaciones de las cargas de gravedad con carga de nieve equilibrada S_b	$T = \text{máx.}(p_{h3}, p_{h6})$	T=1.594 kPa
U	kPa	El mayor de las combinaciones de las cargas de gravedad sin carga de nieve equilibrada S_u	$U = \text{máx.}(p_{h2}, p_{h5})$	U=1.634 kPa

Tabla 7: Cálculos del espesor del domo

Para hallar el resultado de las fórmulas anteriores, será necesario calcular los valores de las combinaciones de las cargas siguientes (p_{h1} , p_{h2} , p_{h3} , p_{h4} , p_{h5} y p_{h6}):

$$p_{h1} = D_L + L_r + 0.4Pe$$

$$p_{h2} = D_L + S_u + 0.4 Pe$$

$$p_{h3} = D_L + S_b + 0.4 Pe$$

$$p_{h4} = D_L + Pe + 0.4 L_r$$

$$p_{h5} = D_L + Pe + 0.4 S_u$$

$$p_{h6} = D_L + Pe + 0.4 S_b$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
p_{hi}	kPa	Combinaciones de carga para el cálculo del espesor de domo	$p_{h1} = D_L + L_r + 0.4Pe$ $p_{h2} = D_L + S_u + 0.4 Pe$ $p_{h3} = D_L + S_b + 0.4 Pe$	$p_{h1}=2.214$ kPa $p_{h2}=1.514$ kPa $p_{h3}=1.414$ kPa

			$p_{h4}=D_L+ P_e + 0.4 L_r$ $p_{h5}=D_L+ P_e + 0.4 S_u$ $p_{h6}=D_L+ P_e + 0.4 S_b$	<p>$p_{h4}=1.914$ kPa</p> <p>$p_{h5}=1.634$ kPa</p> <p>$p_{h6}=1.594$ kPa</p>
D_L	kPa	Carga muerta del domo	$D_L= \rho *e_{domo} *g$	$D_L=1.014$ kPa
L_r	kPa	La fuerza ejercida por cuerpos externos, tales como: nieve, lluvia, viento, personas y/o objetos en tránsito, etc	Código ASCE 7	$L_r=1$ kPa
P_e	kPa	Presión externa específica	Dato de partida	$P_e=0.5$ kPa
S_u	kPa	Carga de nieve sin equilibrar	$S_u=1.5*S_b=1.5*0.2=0.3$ kPa	$S_u=0.3$ kPa
g	m/s ²	Constante de gravedad	Dato de partida	$g=9.8$ m/s²
ρ_{acero}	kg/m ³	Densidad del acero	Dato de partida	$\rho_{acero}=7960$ kg/m³
S_b	kPa	Carga de nieve equilibrada	$S_b=0.84*S_g$	$S_b=0.2$ kPa
S_g	kPa	Carga de nieve de suelo	Código ASCE 7	$S_g=0.239$ kPa

Tabla 8: Cálculos de las combinaciones de carga para el cálculo del espesor de domo

La carga muerta del domo (D_L) es la fuerza debida al peso propio del domo y se calcula de la siguiente manera, suponiendo que el espesor del domo es el máximo $e_{domo}=13$ mm:

$$D_L= \rho_{acero} *e_{domo} *g=7960 \frac{kg}{m^3} *0.013 \text{ m} *9.8 \frac{m}{s^2}=11014.1 \text{ N/m}^2= \mathbf{1.014 \text{ kPa}}$$

La fuerza ejercida por cuerpos externos (L_r) se podría determinar de acuerdo con ASCE 7 (Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures) siempre que no sea <0.72 KPa. Se tomará el valor de $L_r=1$ kPa

Se supone que las cargas de nieve que actúan sobre el domo se ejecutan sobre la proyección horizontal de éste. Según el apartado 5.2.1.h de la Standard API -650, las cargas de nieve se calculan de la siguiente manera (θ es el ángulo del domo):

$$S_b=0.84*S_g$$

$$S_u=S_b \text{ si } \theta \leq 10^\circ$$

$$S_u=1.5*S_b \text{ si } \theta > 10^\circ$$

En el código ASCE-7, se puede hallar S_g situando la latitud y longitud de la localización del tanque y su altitud. Para este caso, el depósito se situará a las afueras de Las Vegas, en un terreno poco urbano y sin obturaciones a una altitud entre 941 m-1372m (htt5).

Query Date : December 27, 2017
 Address :
 12501 Apex Great Basin Way, North Las Vegas, NV 89105,
 EE. UU.
 Latitude : 36.3812018
 Longitude : -114.8973457
 Elevation : 2190.4 Feet

Elevation Limitation: ASCE 7* Ground Snow Load
 Elevation \leq 3,000 feet: Ground Snow Load is 0 psf
 Elevation $>$ 3,000 and \leq 4,500 feet: Ground Snow Load is 5 psf
 Elevation $>$ 4,500 and \leq 5,400 feet: Ground Snow Load is 10 psf

All loading data is in pounds per square foot.

For a site-specific case study area, a case study is required to establish ground snow loads.

*Based on Figure 7-1 Ground Snow Loads printed in ASCE 7-95 through ASCE 7-10.

Users should consult with local building officials to determine if there are community-specific snow load requirements that govern.

Red shaded area is the load specific boundaries.
 Any darker red area is the overlapping load specific boundary.

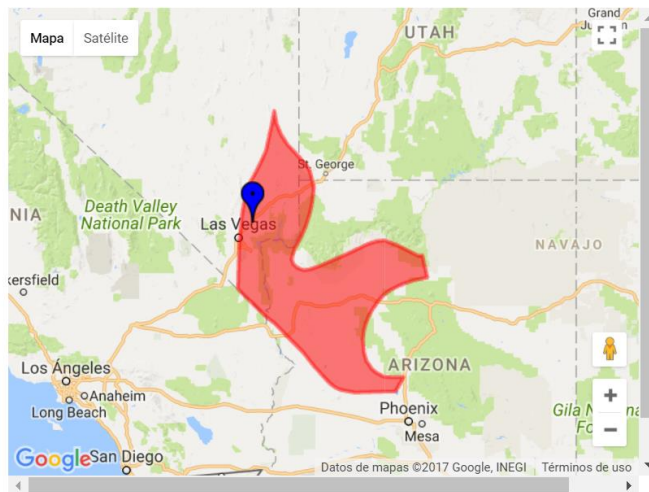


Figura 19: Determinación de la carga de nieve en la localización del tanque según el ASCE 7

Dados estos datos,

$$S_g = 0.239 \text{ kPa}$$

Pudiéndose ya calcular los valores de carga de nieve equilibrada y desequilibrada:

$$S_b = 0.84 * S_g = 0.84 * 0.239 = \mathbf{0.2 \text{ kPa}}$$

$$S_u = 1.5 * S_b = 1.5 * 0.2 = \mathbf{0.3 \text{ kPa}}$$

Por tanto, ya se pueden hallar los valores de p_{h1} , p_{h2} , p_{h3} , p_{h4} , p_{h5} y p_{h6} :

- 1) $p_{h1} = D_L + L_r + 0.4 P_e = 1.014 \text{ kPa} + 1 \text{ kPa} + 0.4 * 0.5 \text{ kPa} = 2.214 \text{ kPa}$
- 2) $p_{h2} = D_L + S_u + 0.4 P_e = 1.014 \text{ kPa} + 0.3 \text{ kPa} + 0.4 * 0.5 \text{ kPa} = \mathbf{1.514 \text{ kPa}}$
- 3) $p_{h3} = D_L + S_b + 0.4 P_e = 1.014 \text{ kPa} + 0.2 \text{ kPa} + 0.4 * 0.5 \text{ kPa} = \mathbf{1.414 \text{ kPa}}$
- 4) $p_{h4} = D_L + P_e + 0.4 L_r = 1.014 \text{ kPa} + 0.5 \text{ kPa} + 0.4 * 1 \text{ kPa} = 1.914 \text{ kPa}$
- 5) $p_{h5} = D_L + P_e + 0.4 S_u = 1.014 \text{ kPa} + 0.5 \text{ kPa} + 0.4 * 0.3 \text{ kPa} = \mathbf{1.634 \text{ kPa}}$
- 6) $p_{h6} = D_L + P_e + 0.4 S_b = 1.014 \text{ kPa} + 0.5 \text{ kPa} + 0.4 * 0.2 \text{ kPa} = \mathbf{1.594 \text{ kPa}}$

Obteniéndose T y U de la siguiente manera:

$$T = \max(p_{h3}, p_{h6}) = \max(1.414, 1.594) = \mathbf{1.594 \text{ kPa}}$$

$$U = \max(p_{h2}, p_{h5}) = \max(1.514, 1.634) = \mathbf{1.634 \text{ kPa}}$$

Con estos valores se puede calcular el espesor mínimo de techo entre estos 3:

$$1) \frac{rr}{2.4} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA = \frac{54}{2.4} \sqrt{\frac{1.594}{2.2}} + 0.6 = 19.75 \text{ mm}$$

$$2) \frac{rr}{2.7} \sqrt{\frac{U}{2.2}} + CA = \frac{54}{2.7} \sqrt{\frac{1.634}{2.2}} + 0.6 = 17.84 \text{ mm}$$

$$3) 5 \text{ mm}$$

Se escogería el valor de 19.75 mm pero como el máximo valor de espesor tiene que ser de 13 mm, $t_{\text{domo}} = \mathbf{13 \text{ mm}}$.

4.6 DISEÑO DEL ANILLO DE CORONACIÓN

El diseño del anillo de coronación entre la envolvente cilíndrica y el techo del tanque es significativo porque, además de soportar el peso del techo y las cargas exteriores a las que esté sometido, rigidiza al cuerpo evitando una posible deformación en la parte superior del éste. En el caso contrario, cuando la presión interior deforme el casquete hacia el exterior, el anillo reduce la deformación comprimiéndose. Además de esto, el anillo de coronación sella el cuerpo y el techo.

El siguiente paso, es la determinación del área de participación de compresión de la unión cilindro-domo. Para ello, se llevará a cabo la elección del tipo de configuración del anillo y posteriormente, se calculará el área mínima de participación de la junta entre el techo y el cuerpo bajo distintas presiones.

Según la Figura 17 del Apéndice F de la API-650, se ha de elegir una configuración de anillo de los siguientes propuestos para este caso.

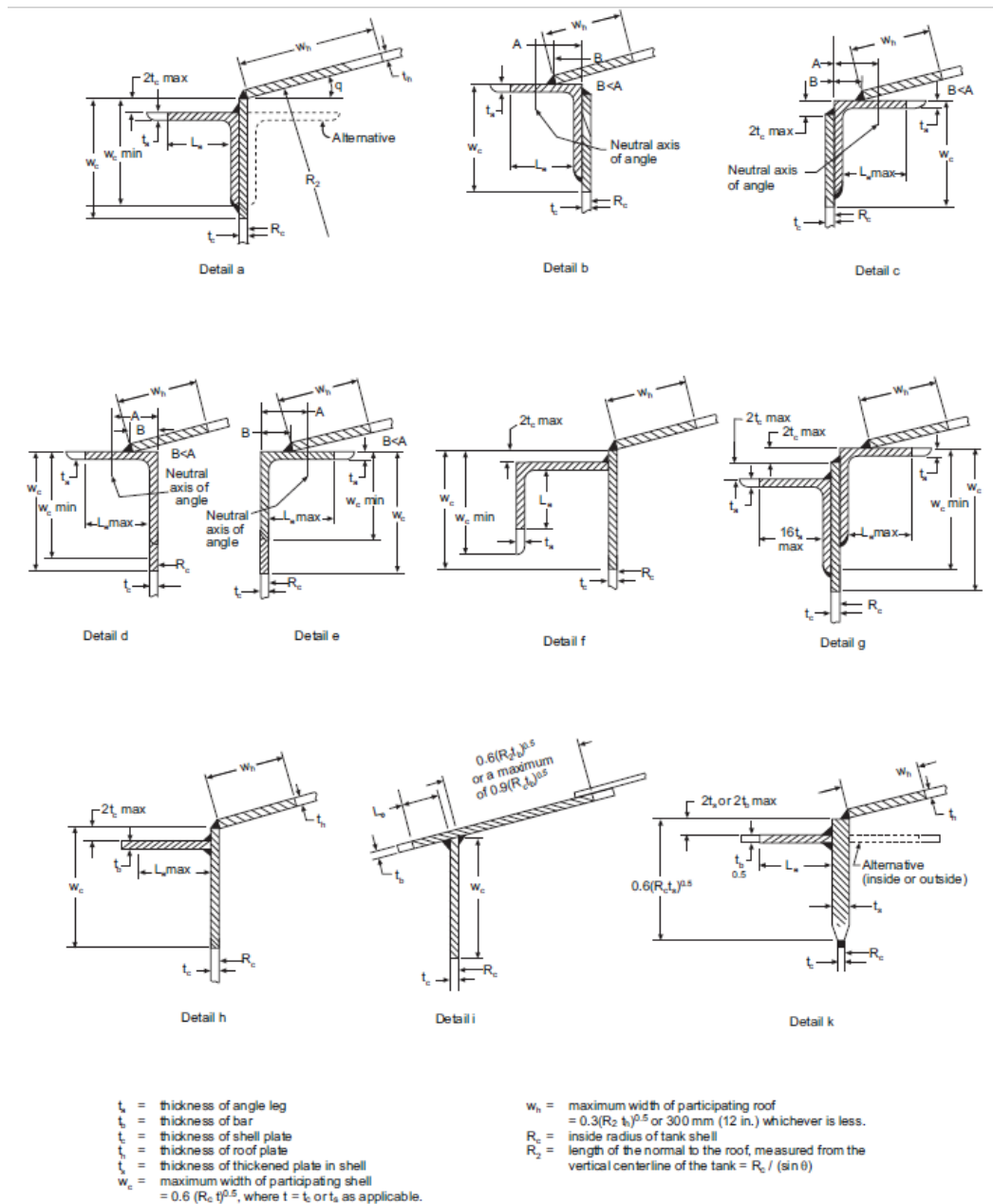
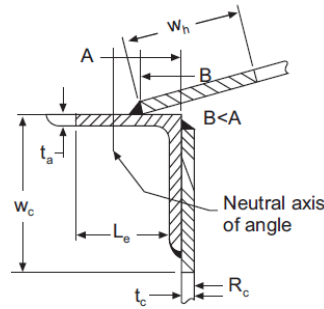


Figura 20: Distintas combinaciones del anillo de coronación según la API-650

De entre todas las disposiciones anteriores, se elegirá el detalle B de la figura 18 por las razones que se exponen a continuación.



Detail b

Figura 21: Combinación del anillo de coronación elegida para el problema

Como se ha indicado anteriormente, interesa que el techo sea lo menos achatado posible para que haya una mayor pendiente y evitar el asiento de la carga de nieve o cualquier carga exterior que se posase sobre el domo. Para ello, como el radio del domo ($r_r=54$ m) es mucho mayor que el radio de cilindro ($r=22.5$ m), el domo rebasará por el exterior en la unión domo-cilindro. Para que su unión sea cerrada y correcta se colocará el anillo exteriormente.

Además de esto, hay que tener en cuenta la siguiente consideración:

Tank Diameter (D)	Minimum Top Angle Size ^a (mm)	Minimum Top Angle Size ^a (in.)
$D \leq 11$ m, ($D \leq 35$ ft)	50 × 50 × 5	$2 \times 2 \times 3/16$
11 m < $D \leq 18$ m, (35 ft < $D \leq 60$ ft)	50 × 50 × 6	$2 \times 2 \times 1/4$
$D > 18$ m, ($D > 60$ ft)	75 × 75 × 10	$3 \times 3 \times 3/8$

^aApproximate equivalent sizes may be used to accommodate local availability of materials.

Figura 22: Dimensiones del anillo de coronación según la norma API-650

Como en este caso el $D=45$ m, el tamaño mínimo del ángulo superior ha de ser de 75x75x10 mm. A continuación, se muestra una imagen de los datos resultantes del depósito:

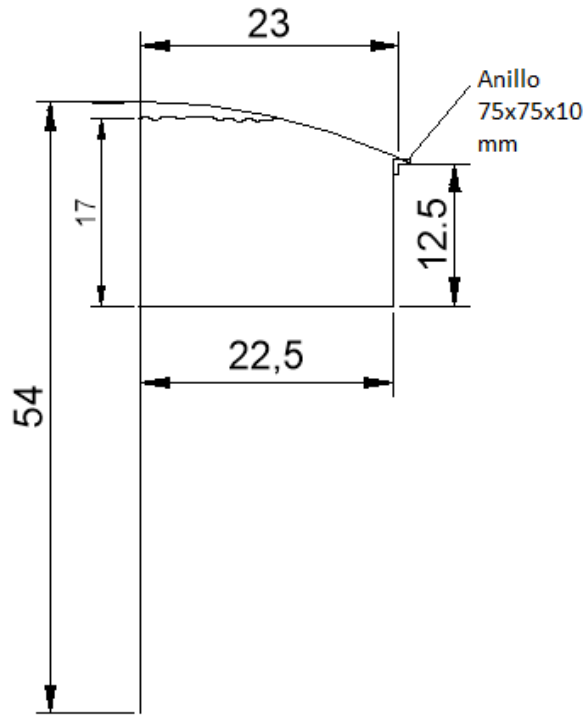


Figura 23: Dimensiones de una sección del tanque

Seguidamente, se calcula el área de participación en la junta del techo y el cuerpo bajo presión externa (A_{min}) a través de la siguiente fórmula del apartado 5.10.6.2 de la Standard API-650:

$$A_{min} = \frac{P_h * D^2}{8 * F_a * \tan\theta}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
A_{min}	m^2	Área de participación en la junta entre el techo y el cuerpo bajo presión externa	$A_{min} = \frac{P_h * D^2}{8 * F_a * \tan\theta}$	$A_{min}=0.010 m^2$
P_h	kPa	Mayor de las combinaciones de carga entre p_{h1} , p_{h2} , p_{h3} , p_{h4} , p_{h5} y p_{h6}	$P_h = \max(p_{h1}, p_{h2}, p_{h3}, p_{h4}, p_{h5} \text{ y } p_{h6})$	$P_h=2.214 \text{ kPa}$
D	m	Diámetro nominal del cilindro	Dato de partida	$D=45 \text{ m}$

F_a	MPa	Tensión de tracción mínima permisible	$F_a=S_d$ ya que es el esfuerzo permisible por condiciones de diseño	$F_a=118$ MPa
θ	°	Ángulo del cono a la horizontal	Por geometría	$\theta=25.2$ °

Tabla 9: Cálculos del área de participación en la junta entre el techo y el cuerpo bajo presión externa

El ángulo del cono a la horizontal (θ) se calcula según la geometría del depósito. En la figura siguiente, se puede observar las consideraciones tomadas para hallar el ángulo del cono a la horizontal:

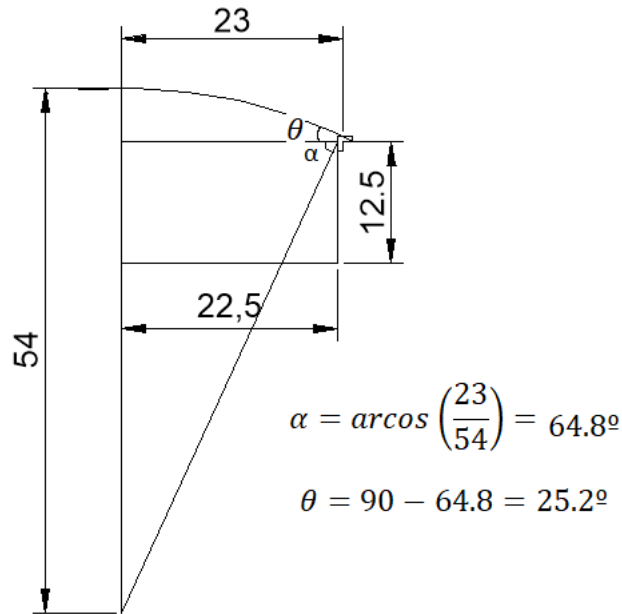


Figura 24: Cálculo del ángulo θ

Por tanto, como F_a es el esfuerzo permisible por condiciones de diseño, ya se puede calcular A_{min} :

$$A_{min} = \frac{ph * D^2}{8 * F_a * \tan\theta} = \frac{0.00229 \text{ MPa} * 45^2 \text{ m}^2}{8 * 118 \text{ MPa} * \tan(25.2)} = \mathbf{0.010 \text{ m}^2}$$

Una vez calculada el área de participación de la junta del techo y el cuerpo bajo presión externa, se halla la misma pero bajo presión interna y se elegirá la más restrictiva.

$$A = \frac{200 * D^2 * (P_i - 0.08 * t_h)}{F_y * \tan\theta}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
A	mm ²	Área de compresión total requerida en la unión techo y cuerpo bajo presión interna	$A = \frac{200 * D^2 * (P_i - 0.08 * t_h)}{F_y * \tan\theta}$	A=0.016mm²
D	m	Diámetro nominal del cilindro	Dato de partida	D=45 m
P _i	kPa	Presión interna de diseño	Dato de partida	P_i= 3 kPa
t _h	mm	Espesor nominal del techo	4) $\frac{rr}{2.4} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA$ 5) $\frac{rr}{2.7} \sqrt{\frac{U}{2.2}} + CA$ 6) 5 mm Siendo t _{domo} < 13 mm	t_h=13 mm
∅	°	Ángulo del cono a la horizontal	Por geometría	∅=25.2°
F _y	MPa	Límite de elasticidad mínimo especificado	Figura 22	F_y=105 MPa

Tabla 10: Cálculos del área de compresión total requerida en la unión techo y cuerpo bajo presión interna

Para calcular el límite de elasticidad mínimo especificado (F_y), al no existir valor para el acero 347H en la Standard API-650, se seleccionará el del acero 317 L, ya que tienen características similares y se extrapola a una temperatura máxima de 600°C.

Type	Yield Strength (in MPa) for Maximum Design Temperature Not Exceeding				
	40°C	90°C	150°C	200°C	260°C
201-1	260	199	172	157	--
201LN	310	250	227	214	207
304	205	170	155	143	134
304L	170	148	132	121	113
316	205	178	161	148	137
316L	170	145	130	119	110
317	205	179	161	148	138
317L	205	179	161	148	138

Notes:

1. Interpolate between temperatures.
2. Reference: Table Y-1 of ASME Section II, Part D.

Figura 25: Límite de elasticidad mínimo especificado según la API-650

$$F_y = 105 \text{ MPa}$$

Por tanto, se resuelve:

$$A = \frac{200 \cdot D^2 \cdot (P_i - 0.08 \cdot t \cdot h)}{F_y \cdot \tan \theta} = \frac{200 \cdot 45^2 \cdot (3 - 0.08 \cdot 13)}{105 \cdot \tan(25.2)} = 16065.57 \text{ mm}^2 = \mathbf{0.016 \text{ m}^2}$$

Finalmente, se toma el mayor de estos valores de sección por ser el más crítico $\max(0.0104, 0.016)$: $A_{\min} = \mathbf{0.016 \text{ m}^2}$

4.7 COMPROBACIONES DE CARGA CON ANSYS

4.7.1 DESCRIPCIÓN DE ANSYS

ANSYS (Swanson Analysis Systems, Inc.) es un software de simulación fundado en 1970 con el objetivo de ayudar en los procesos de ingeniería a predecir el comportamiento de los productos en un entorno real.

El programa incluye paquetes en distintas áreas (fluidos dinámicos, mecánica estructural, electromagnetismo y sistemas y multifísica).

Para el objetivo de este proyecto, se hará uso del entorno de mecánica estructural de ANSYS, basada en la teoría de elementos finitos, la cual agiliza y optimiza los procesos de cálculos de seguridad y funcionalidad de cualquier estructura.

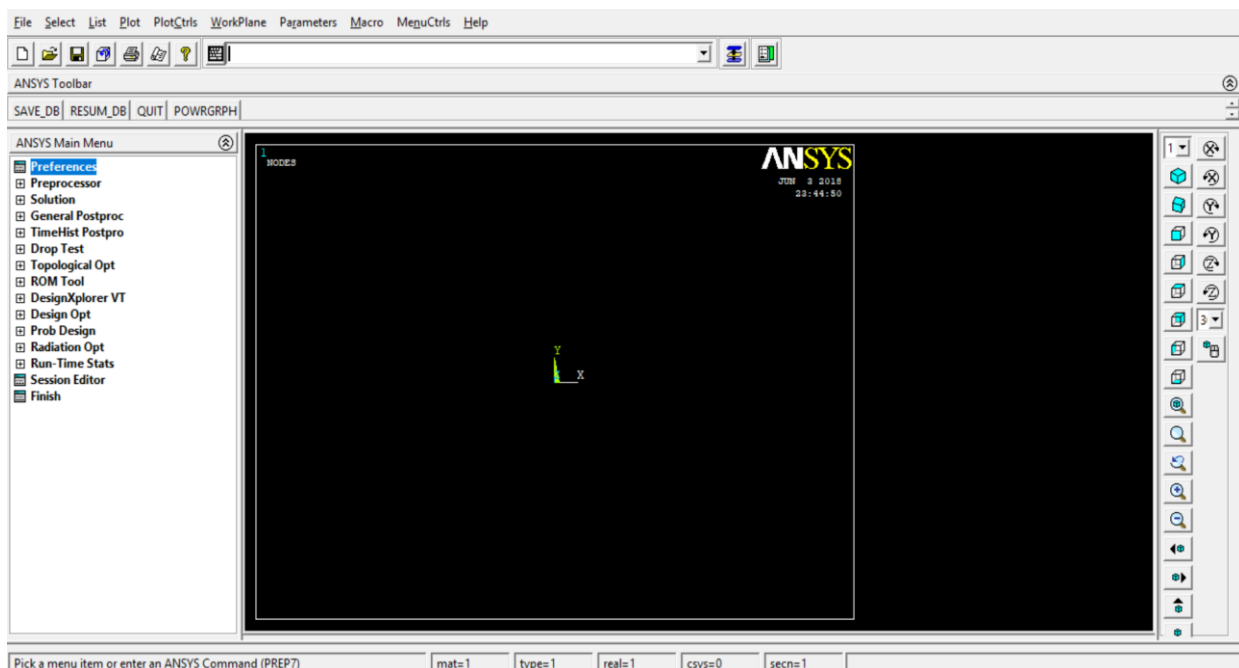
Se divide en tres módulos (pre-procesador, procesador y post-procesador), que se explican brevemente a continuación:

1. **Pre-procesador:** diseño del modelo.

1.1 *Tipo de elementos:* se eligen los tipos de elementos con los que se va a trabajar (vigas, sólidos, membranas...) Existen decenas de tipos que se adaptan a cada elemento en particular según están definidos en la biblioteca de ANSYS.

- 1.2 *Constantes*: en función del tipo de elemento tomado se necesitarán unos datos u otros. Para este caso en concreto, eligiendo una lámina se necesitará introducir su espesor.
 - 1.3 *Propiedades del material*: en este apartado se definen los distintos materiales que se desean modelar y por tanto, se introducirá datos como son: viscosidad del fluido, coeficiente de Poisson, módulo de Young, en función del cálculo a realizar.
 - 1.4 *Modelado*: posee las herramientas necesarias para el modelado del producto que se desee. Pueden ser puntos, líneas, áreas, volúmenes,...
 - 1.5 *Mallado*: es una de las etapas de pre-procesador más importantes. El mallado define la precisión con la que se van realizar los cálculos. ANSYS tiene la posibilidad de realizar un mallado automático o diseñarlo el usuario según su criterio.
 - 1.6 *Cargas*: se definen las condiciones de contorno y las cargas externas aplicadas. El criterio de signos tomado se debe de comprobar ya que para cada tipo de elemento puede cambiar.
2. **Procesador**: obtención del resultado.
 3. **Post-procesador**: visualización de resultados a través de una interfaz gráfica. Este módulo permite representar distintos resultados como pueden ser: esfuerzos y momentos del producto, la animación de la deformada antes y después de la aplicación de la carga, visualización de distintos modos de pandeo,...

A continuación, se mostrará una captura de la interfaz del software ANSYS Ed. 9.0 versión Estudiante, cuyo inconveniente principal es la limitación de 1000 nodos.



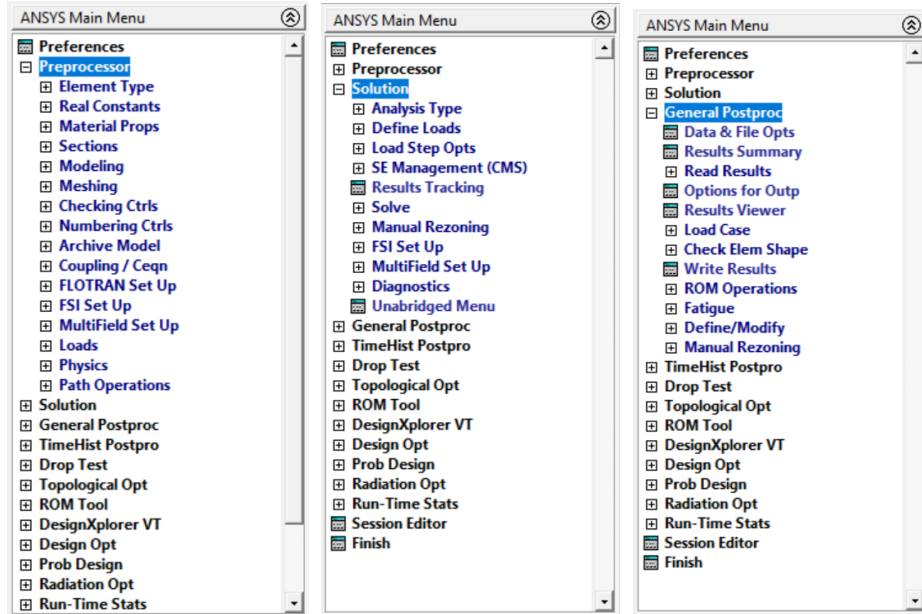


Figura 26: Interfaz de ANSYS

4.7.2 OBJETIVOS

Para la comprobación de las cargas en ANSYS, se plantea en primer lugar cuál será la complejidad del modelo. Para ello, se analizan tres aspectos:

- 1) El detalle de los resultados

Como en este proyecto se busca una comprobación de los resultados calculados previamente, se tomará un grado de detalle suficiente para que se demuestre que en los puntos críticos del tanque cumpla lo calculado.

- 2) Capacidad

Es lógico que a mayor grado de detalle, más capacidad y tiempo ocupará al programa para calcular. Como la versión educacional de ANSYS utilizada tiene una limitación en el número máximo de nodos y elementos a usar, no se podrán realizar cálculos muy complejos.

- 3) Dificultad

Se busca la menor dificultad posible en el modelo, por lo que se ha planteado la manera de reducir el tiempo de trabajo, como por ejemplo, aprovechando la simetría del tanque y representando solo sus elementos más relevantes.

4.7.3 METODOLOGÍA

En primer lugar, se había planteado resolver el problema con elementos planos axisimétricos representando la sección del tanque.

Con esto se buscaba un compromiso entre detalle de resultados, dificultad y capacidad del problema, pero no se pudo resolver de esta manera debido a la limitación de nodos impuesta por la licencia del programa.

Por tanto, la segunda opción fue sacrificar el nivel de detalle de los resultados para conseguir una mejor capacidad del programa disminuyendo la dificultad de su realización.

Para ello, se ha resuelto el problema utilizando elementos de lámina (SHELL 51). Éstos, son elementos con 4 grados de libertad por cada nodo: desplazamientos en x, y, z y rotación sobre el eje z . Se trata de un elemento en el que su espesor varía linealmente donde el nodo I define un espesor y el J el otro.

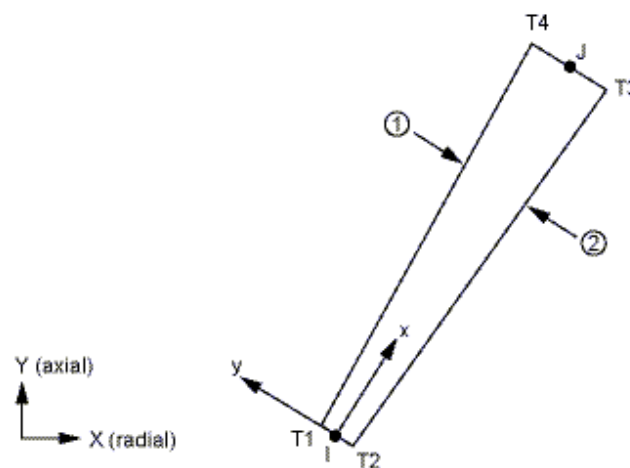


Figura 27: Elemento SHELL51

La elección de este tipo de elemento, supondrá que en la interfaz se trabaje con elementos línea, definiendo los espesores como constantes reales, renunciando a la posibilidad de poder comprobar en detalle la distribución de tensiones en la sección del depósito.

Una vez elegido el tipo del elemento, lo siguiente es definir las características del material. Al tratarse del acero AISI 347 H y considerarse un material isótropo, se introducirá lo siguiente:

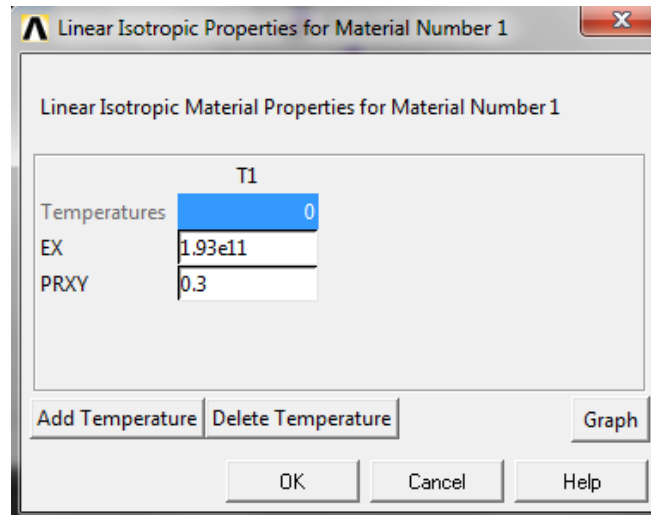


Figura 28: Propiedades isotópicas ANSYS

A continuación, se realiza el modelo teniendo en cuenta los elementos más relevantes: base, cuerpo, techo y anillo de coronación (que le dará rigidez a la junta techo-cuerpo y se acercará a la realidad la respuesta) y simplificándolo a la mitad debido a las simetría.

Las solicitaciones y restricciones es el último paso antes de analizar el resultado. Como condiciones de contorno se ha supuesto una restricción de desplazamientos en todas las direcciones en la base del depósito ($U_x=U_y=U_z=0$) y condiciones de simetría ($U_x=0$ y $\theta_z=0$) en los nodos del eje de simetría. Como solicitación se han tomado las cargas que el cliente había propuesto: carga de diseño interna de 3kPa, carga de diseño externa de 0.5 kPa y carga hidrostática.

Finalmente, se hará un análisis estático de resultados y en el post-proceso se comprobará lo siguiente:

- 1) Si la deformada se simula correctamente
- 2) Si la tensión equivalente (de Von Mises) se distribuye adecuadamente
- 3) Si la tensión equivalente (de Von Mises) es menor que la tensión del acero AISI 347 H (345 MPa)

Para poder representar en ANSYS la tensión equivalente, el software realiza por defecto un promedio de las componentes de las tensiones en los nodos. Al resolver el problema con líneas, éste no es capaz de representar la tensión en el sentido del espesor, por lo que hay que representar, al menos, dos casos por separado: STOP (tensión equivalente máxima en el nodo J) y SBOT (tensión equivalente mínima en el nodo J):

4.7.4 COMPROBACIÓN A PRESIÓN EXTERNA DE DISEÑO

Se impone una carga de presión interna de 3000 N/m^2 uniforme por todo el depósito definido como una presión.

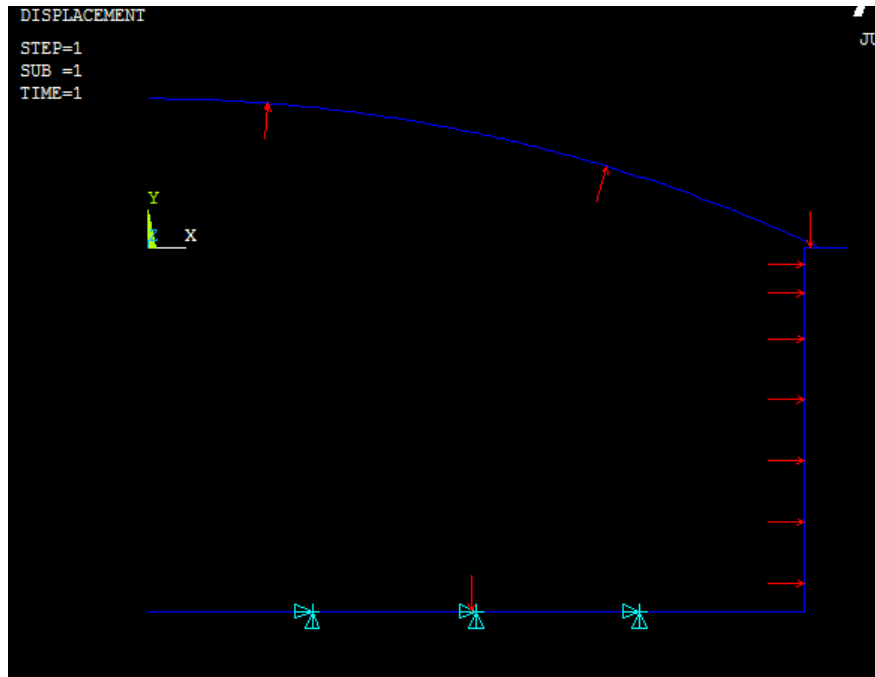


Figura 29: Carga aplicada en carga externa

DEFORMADA

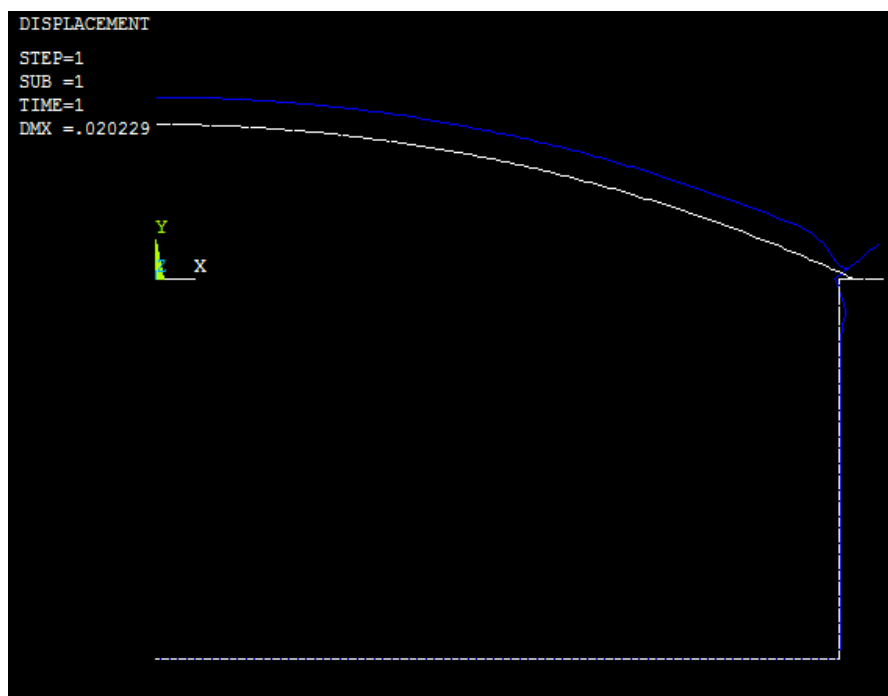


Figura 30: Deformada en carga externa

DESPLAZAMIENTO EN X

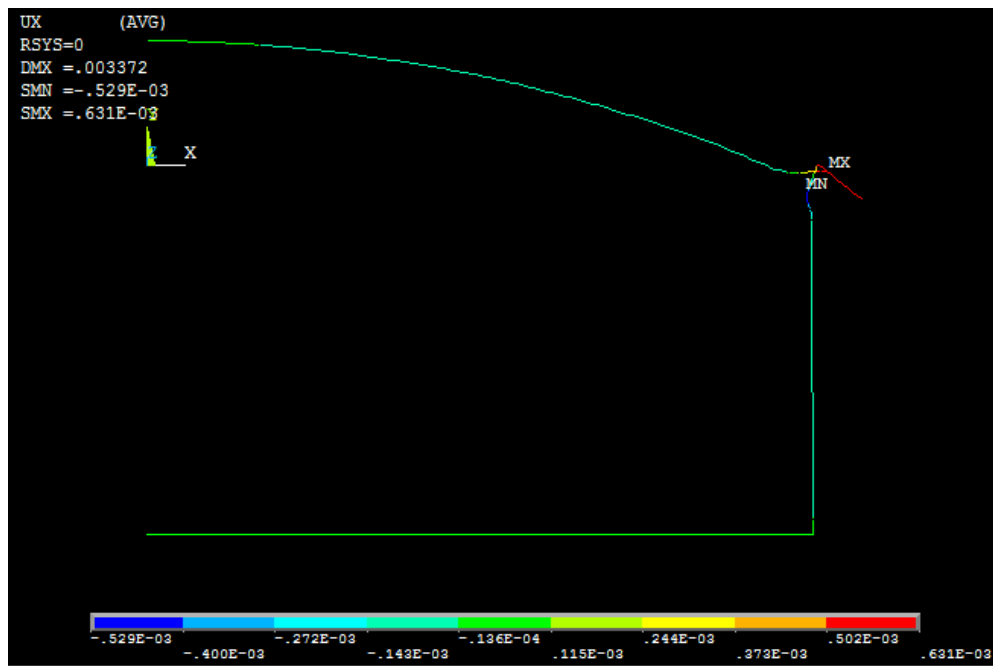


Figura 31: Desplazamiento en x en carga externa

DESPLAZAMIENTO EN Y

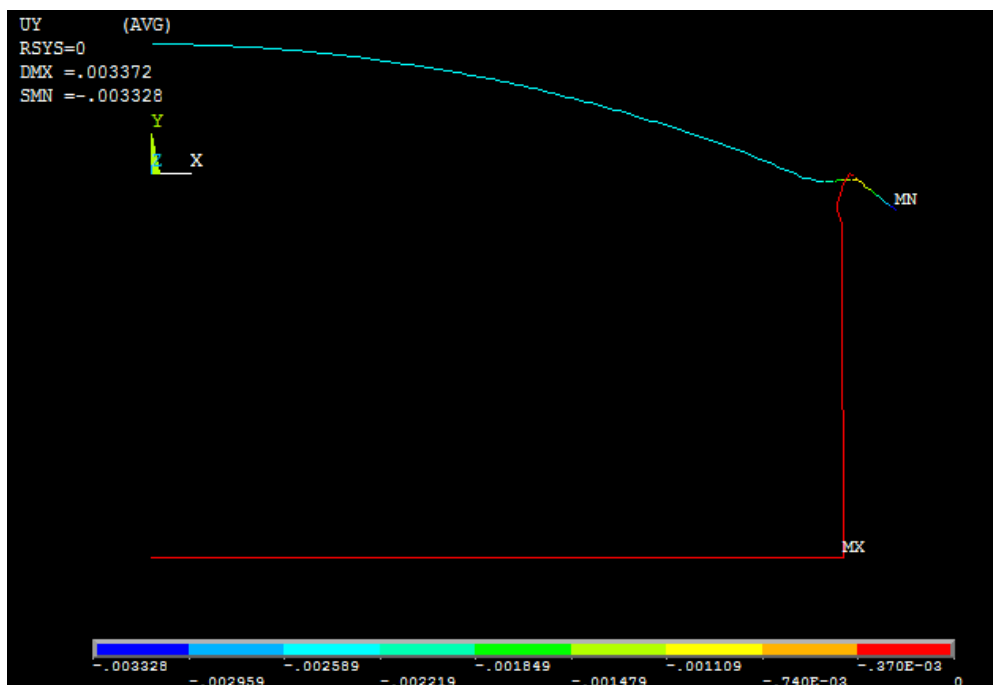


Figura 32: Desplazamiento en y en carga externa

Como se puede observar en las figuras anteriores, el desplazamiento en sentido X es máximo en el anillo de coronación y tanto el domo como el cuerpo tendrán desplazamientos del orden

de $-0.143e-03$ m hacia fuera. En sentido vertical, el domo es el que presenta los mayores desplazamientos hacia arriba empujado por la carga interna, mientras que en la placa y la envolvente son prácticamente nulos. Cabe recordar que estos resultados son representados para pequeñas deformaciones.

TENSIÓN EN LA SUPERFICIE ANTERIOR (STOP)

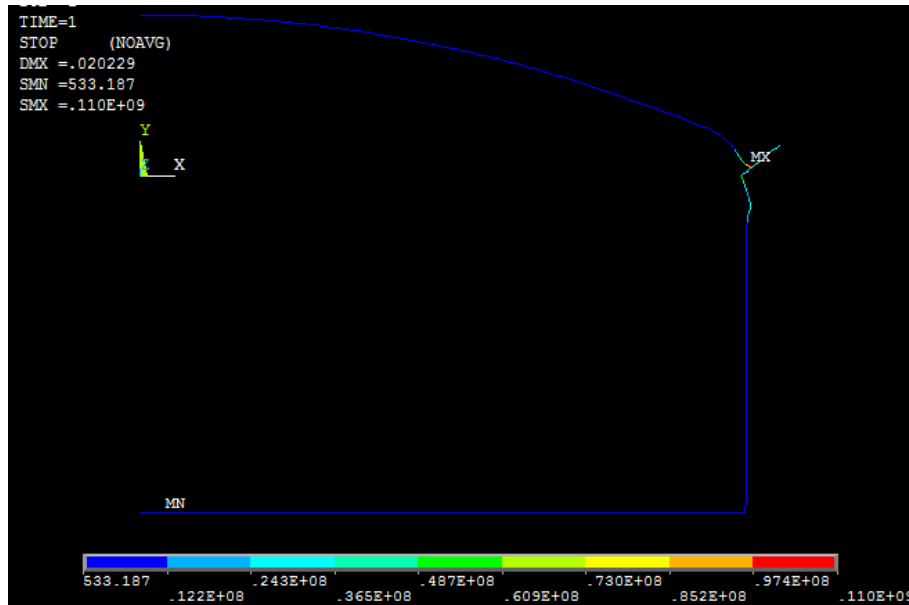


Figura 33: Tensión en la superficie anterior en carga externa

TENSIÓN EN LA SUPERFICIE POSTERIOR (SBOT)

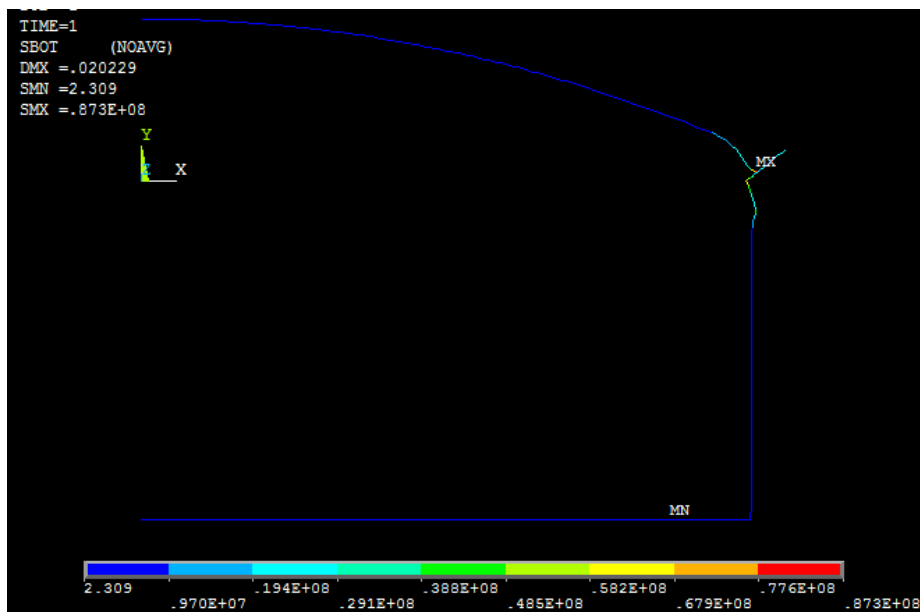


Figura 34: Tensión en la superficie posterior en carga externa

Para los dos casos la tensión máxima se sitúa en la unión domo-cilindro, que se considera elemento más débil para esta carga. Tiene valores de STOP y SBOT de $0.18255E+08$ MPa y $0.14546E+08$ MPa respectivamente.

Aunque en la simulación no se aprecie la diferencia de tonos de colores, en el domo se experimentan valores medios de $0.10920E+07$ MPa y $0.10321E+07$ MPa y en el cilindro $0.51518E+07$ MPa y $0.46933E+07$ MPa, los cuales siguen siendo valores elevados en comparación con la base donde se encuentran las mínimas tensiones.

Por último, se ha de señalar que para la comprobación del límite elástico de este acero en particular se cumple ya que el valor máximo de $0.18255E+08$ MPa $<$ $3.45E+08$

4.7.5 COMPROBACIÓN A PRESIÓN INTERNA DE DISEÑO

Se impone una carga de presión externa de 500 N/m² uniforme por todo el depósito definido como una presión.

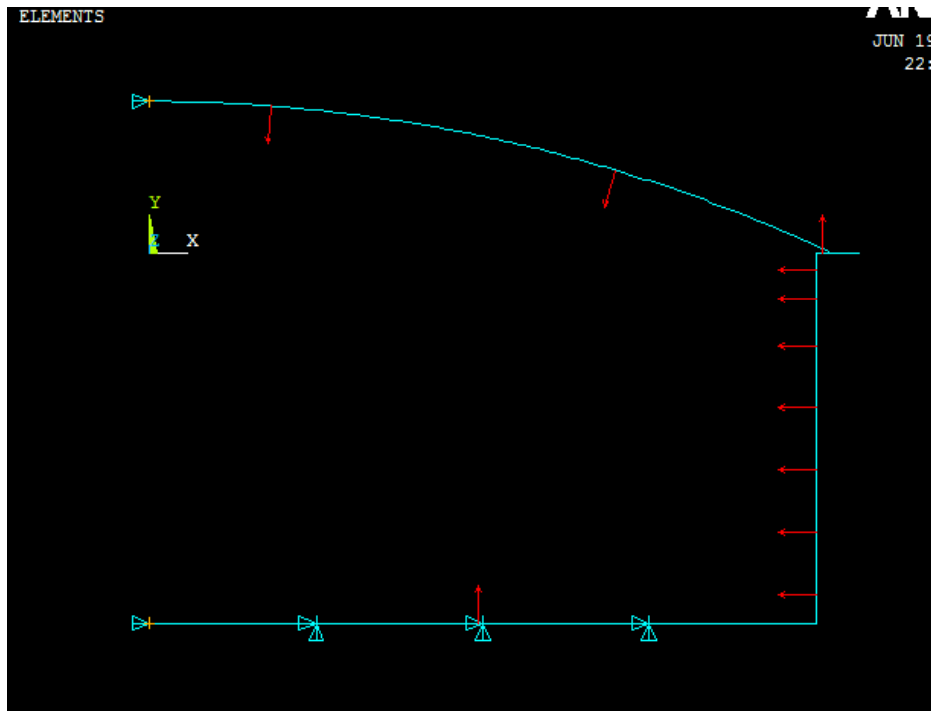


Figura 35: Carga aplicada en carga interna

DEFORMADA



Figura 36: Deformada en carga externa

DESPLAZAMIENTO EN X

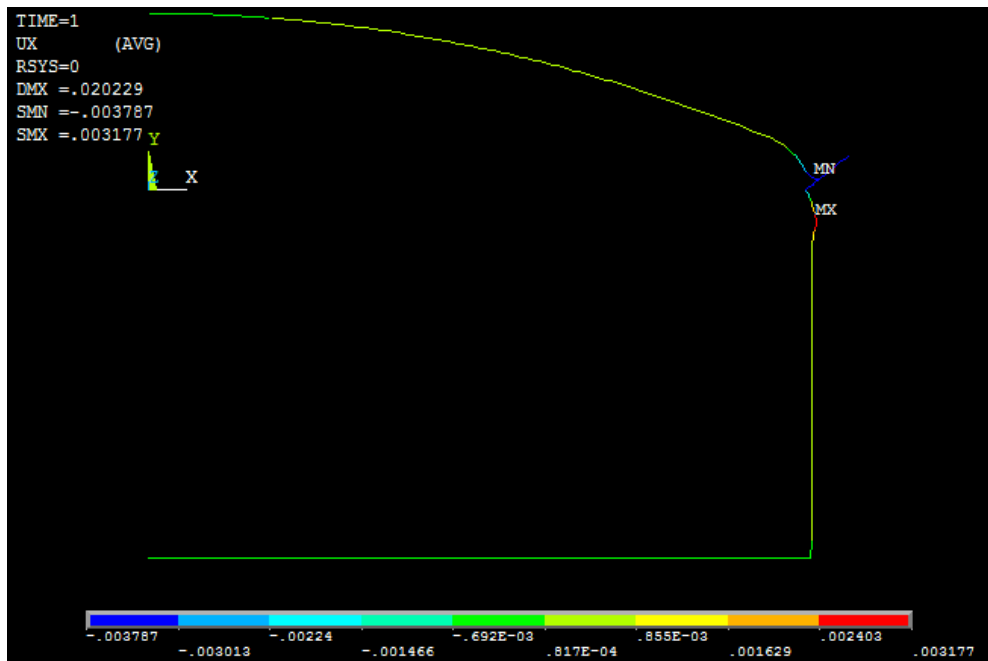


Figura 37: Desplazamiento en x en carga interna

DESPLAZAMIENTO EN Y

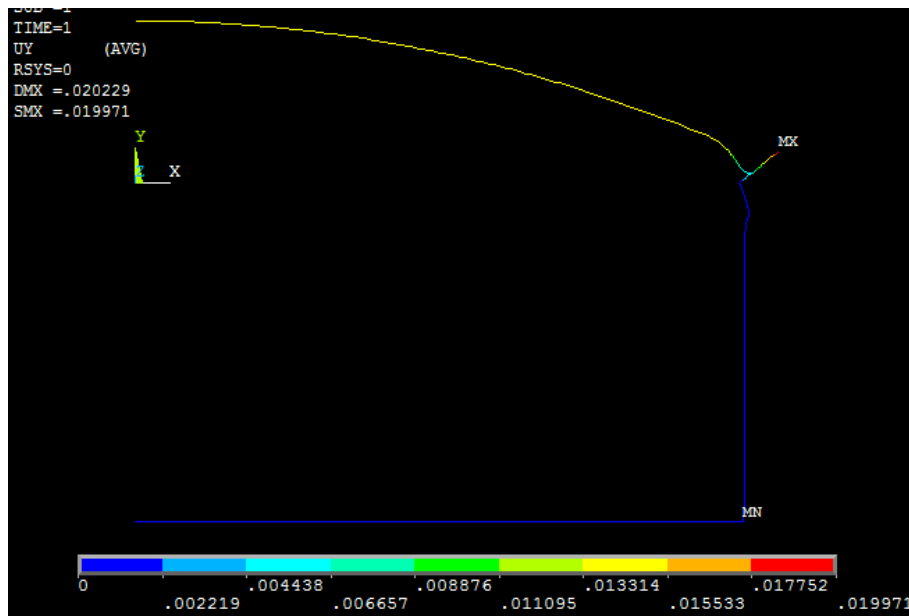


Figura 38: Desplazamiento en y en carga interna

Fijándonos en el caso anterior, éste es equivalente con signo contrario y con una aplicación de carga menor. Para este caso, el desplazamiento en sentido X e Y es máximo en el domo con unión al cilindro a través del anillo de coronación. El domo tendrá desplazamientos de 0.003787 m en X y 0.04438 en Y, mientras que el cilindro tendrá desplazamientos menores ya que es capaz de soportar más carga al tener un espesor de virola mayor que el del domo.

TENSIÓN EN LA SUPERFICIE ANTERIOR (STOP)

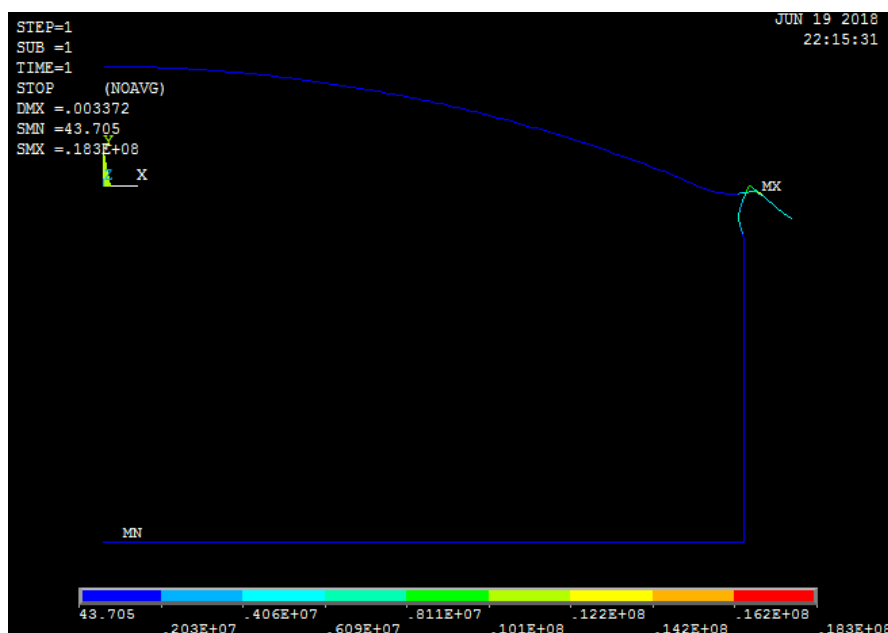


Figura 39: Tensión en la superficie anterior en carga interna

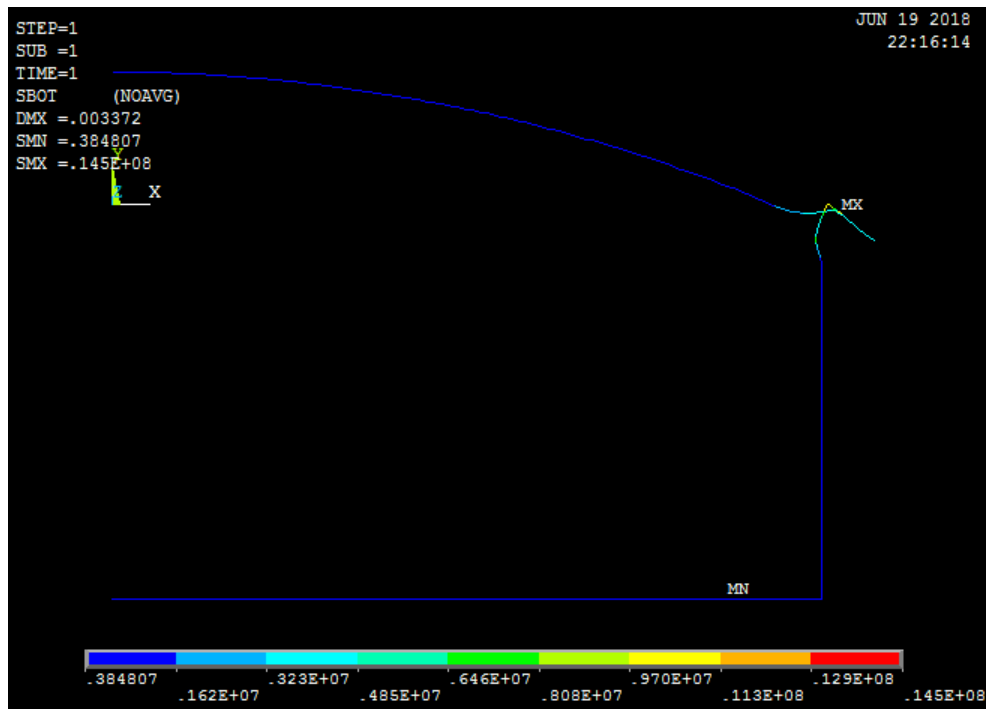
TENSIÓN EN LA SUPERFICIE POSTERIOR (SBOT)

Figura 40: Tensión en la superficie posterior en carga interna

El valor crítico de tensión de compresión será en el mismo elemento de la unión domo-cilindro con valores de STOP y SBOT $0.18255E+08$ MPa y $0.14546E+08$ MPa pero con valores inferiores que en la simulación de presión interna ya que la carga aplicada es bastante menor. Al igual que antes, las mínimas tensiones se encuentran en la placa.

4.7.6 COMPROBACIÓN A PRESIÓN HIDROSTÁTICA

El fluido contenido en el depósito son sales fundidas con una densidad de 1800 kg/m^3 . Dado que éste se reparte por todo el cilindro y parte del domo, se puede calcular como:

$$P_{\text{fluido}} = \rho * g * s = 1800 * 9.8 * s$$

siendo $s=0$ la superficie libre del fluido.

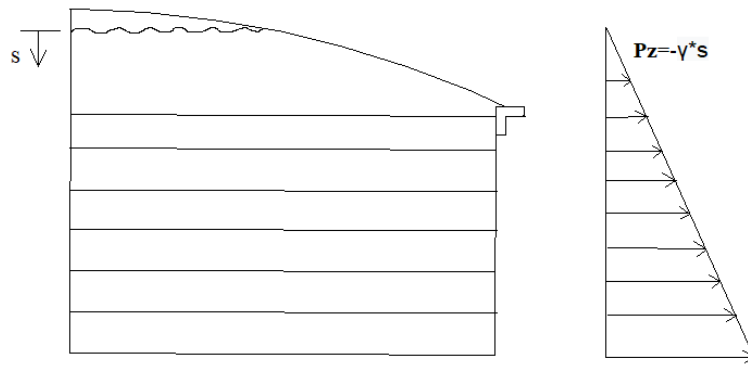


Figura 41: Carga hidrostática

De forma simplificada, las cargas triangulares se han introducido como fuerzas puntuales en los extremos y el centro de cada virola y en dos nodos del domo.

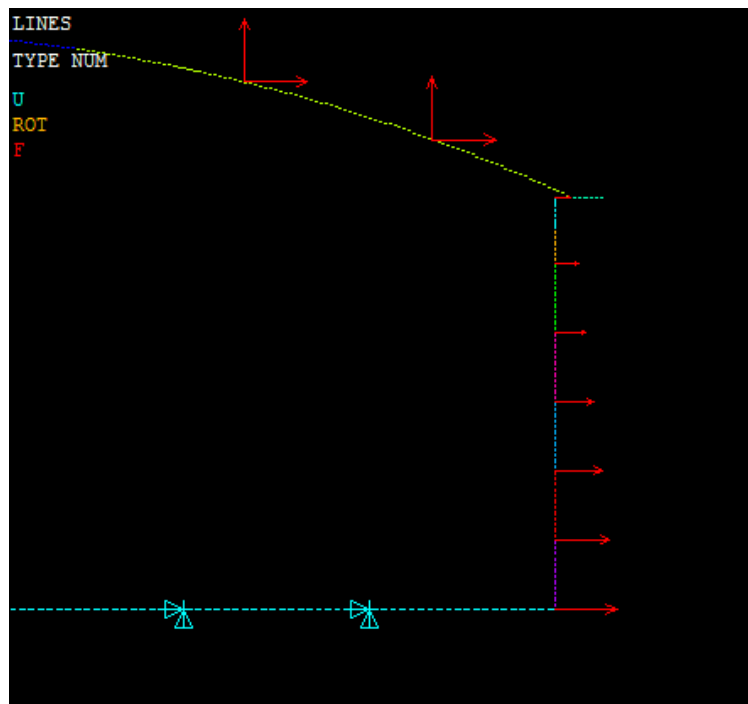


Figura 42: Carga aplicada en carga hidrostática

El resultado de la deformada se puede observar en la siguiente imagen.

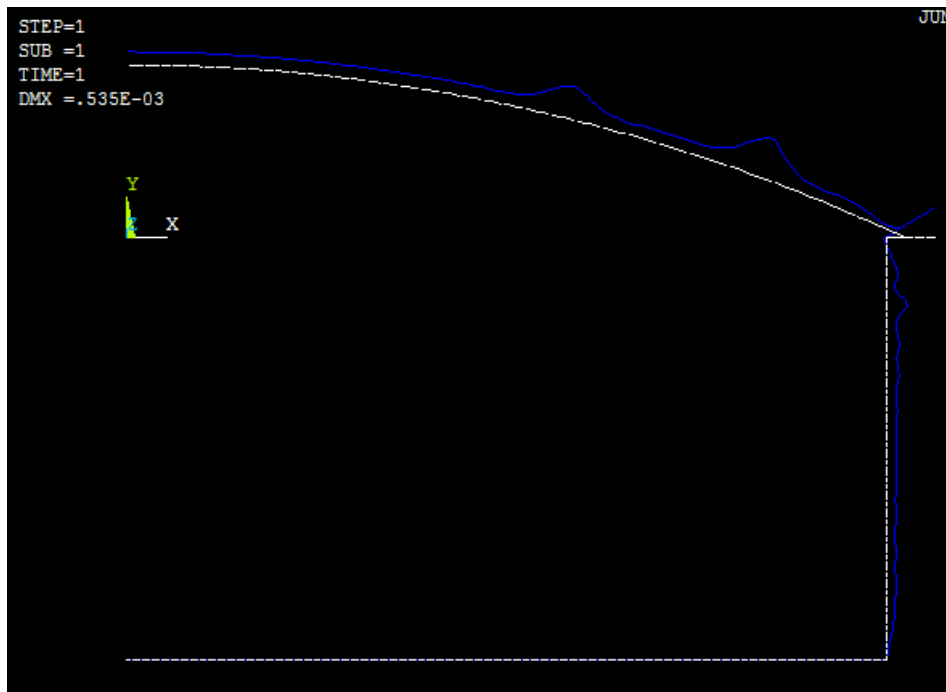


Figura 43: Deformada en carga externa

DESPLAZAMIENTO EN X

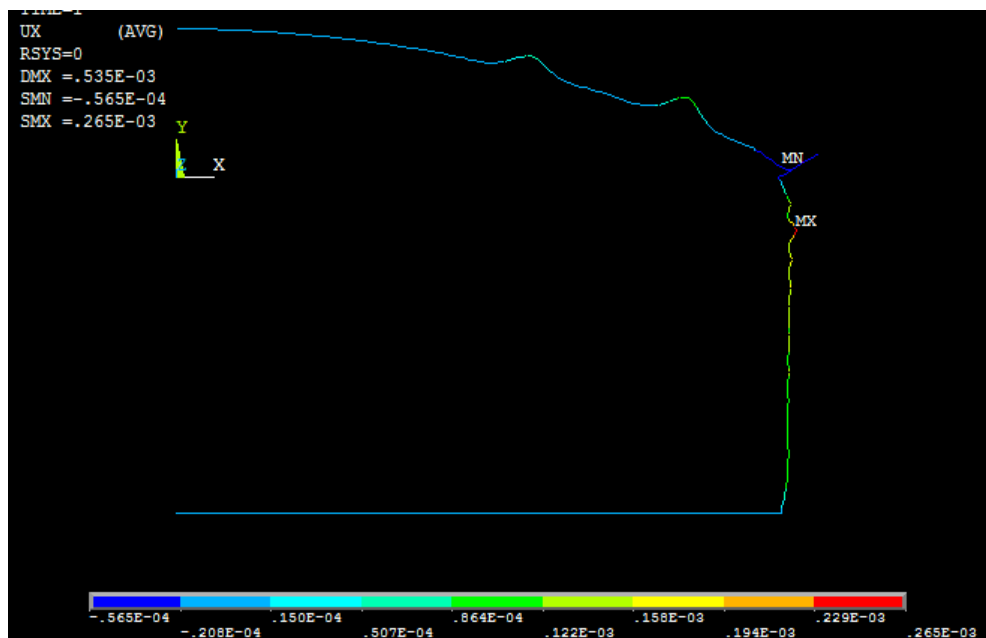


Figura 44: Desplazamiento en x en carga hidrostática

DESPLAZAMIENTO EN Y

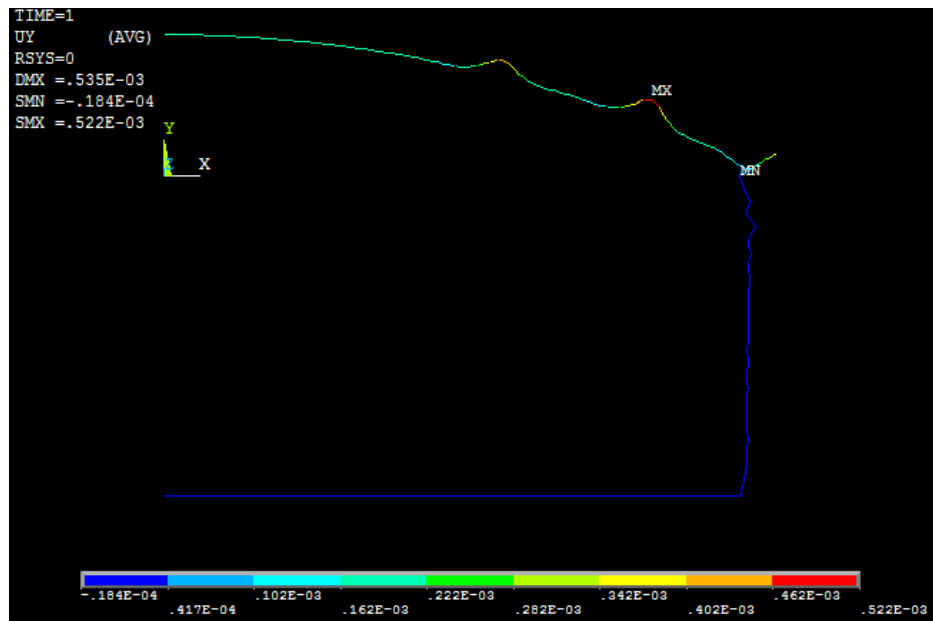


Figura 45: Desplazamiento en y en carga hidrostática

La deformada de la envolvente se comporta de forma congruente sabiendo que hay un salto más señalado a la altura de la primera virola que es debido al cambio de sección por el anillo de coronación que va adherido a la primera virola. Esto no se podía apreciar en las cargas anteriores porque eran más bajas.

TENSIÓN EN LA SUPERFICIE ANTERIOR (STOP)

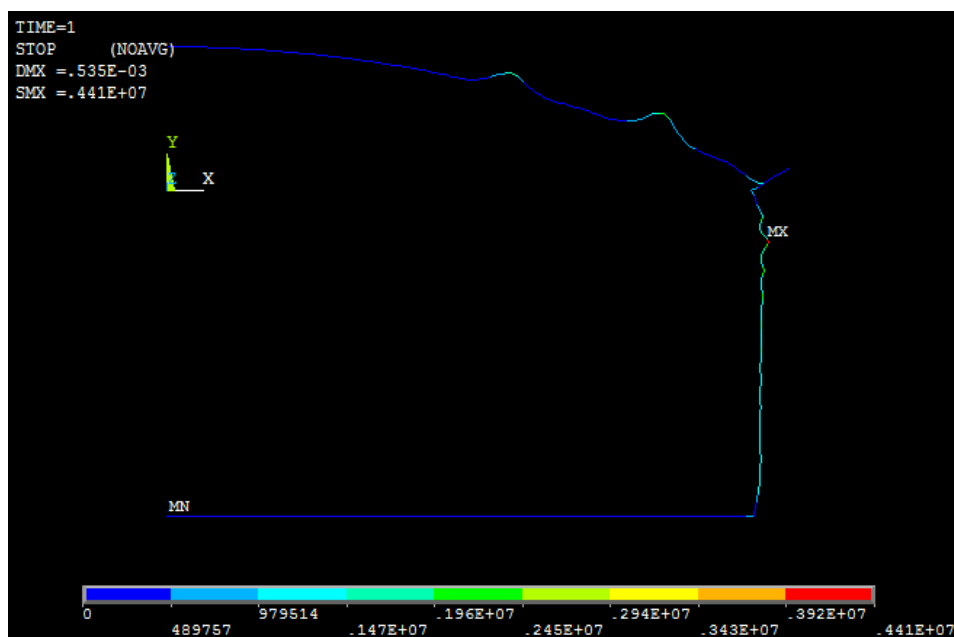


Figura 46: Tensión en la superficie anterior en carga hidrostática

TENSIÓN EN LA SUPERFICIE POSTERIOR (SBOT)

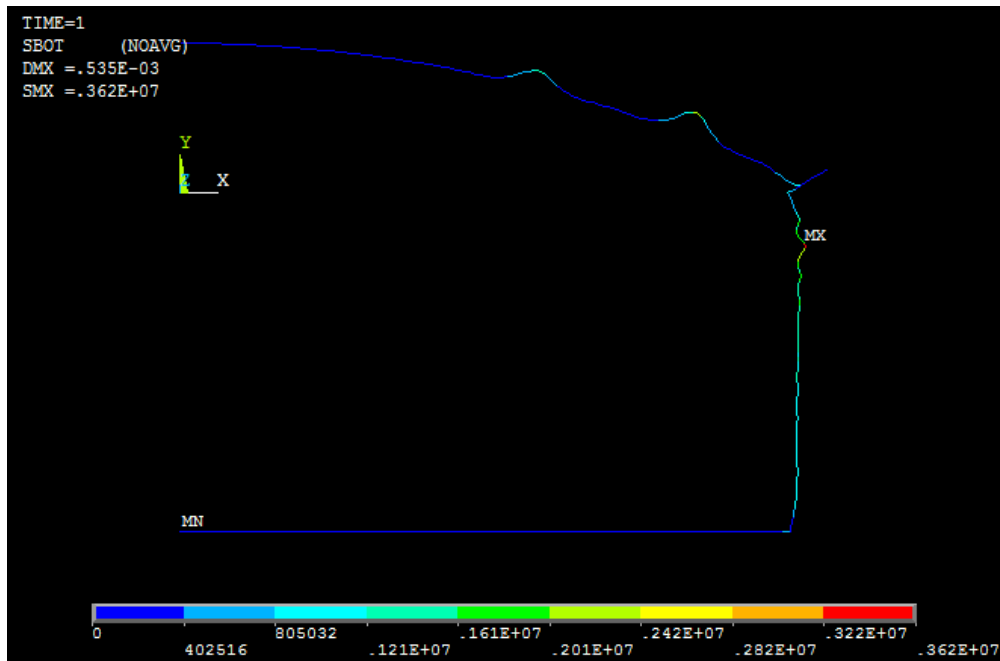


Figura 47: Tensión en la superficie posterior en carga hidrostática

En cuanto a las tensiones equivalentes, como es de suponer, el valor más crítico está en la unión domo-cilindro, con valores de STOP y SBOT de $0.44078E+07$ MPa y $0.36226E+07$ MPa respectivamente. Cabe señalar, que son valores un tanto mayores a las presiones de diseño externa e interna ya que las fuerzas aplicadas en las virolas y techo son mucho más elevadas. Además, se comprueba que es menor que el límite elástico del acero utilizado $0.44078E+07$ MPa $<$ $3.45E+08$ MPa.

4.8 COMPROBACIÓN PARA CARGA DE VIENTO

Para hacer la comprobación de carga de viento en el depósito en cuestión, se ha de verificar si existe la necesidad de una viga de viento intermedia y si hay que anclar el depósito.

4.8.1 COMPROBACIÓN NECESIDAD DE VIGA DE VIENTO INTERMEDIA

Las vigas de viento intermedias se utilizan para evitar el fallo a pandeo en el cuerpo del tanque debido a la carga de viento. Para el diseño de éstas, si fuesen necesarias, se han de calcular dos parámetros importantes: el tamaño de las vigas de viento intermedias y el espacio entre ellas, que se definen como el *módulo de sección mínima* (Z) y la *altura máxima de la pared del tanque no endurecida* (H_1) respectivamente.

Previamente, se realiza una comprobación para saber si es necesaria agregarla, a través de la siguiente condición: si $H_1 > H_{tr}$, entonces no hará falta.

Para ello, la altura máxima de la pared del tanque no endurecida (H_1) se calcula de la siguiente manera según el apartado 5.9.7 de la norma Standard API-650

$$H_1 = 9.47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} * \left(\frac{190}{v}\right)^2$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
H_1	m	Altura entre la viga de viento intermedia y el ángulo superior de la cubierta	$H_1 = 9.47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} * \left(\frac{190}{v}\right)^2$	$H_1=9.54$ m
t	mm	Espesor más delgado del cuerpo del tanque	$t=t_6$	$t=7.93$ mm
D	m	Diámetro nominal del cilindro	Dato de partida	$D=45$ m
v	Km/h	Velocidad del viento de diseño	Dato de partida	$v=145$ km/h

Tabla 11: Cálculos de la altura entre la viga de viento intermedia y el ángulo superior de la cubierta

Por tanto:

$$H_1 = 9.47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} * \left(\frac{190}{v}\right)^2 = 9.47 * 7.93 * \sqrt{\left(\frac{7.93}{45}\right)^3} * \left(\frac{190}{145}\right)^2 = \mathbf{9.54\ m}$$

Una vez hallada la altura máxima de la pared del tanque no endurecida (H_1), se calcula la altura de la pared transformada (H_{tr}), sustituyendo el ancho de cada virola por un ancho transpuesto en función del espesor del techo:

$$H_{tr} = \sum W_{tr}, i = W_{tr}, 1 + W_{tr}, 2 + W_{tr}, 3 + W_{tr}, 4 + W_{tr}, 5 + W_{tr}, 6$$

$$W_{tr} = W * \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
H_{tr}	m	Altura de la pared transformada	$H_{tr} = \sum W_{tr,i} = W_{tr,1} + W_{tr,2} + W_{tr,3} + W_{tr,4} + W_{tr,5} + W_{tr,6}$	$H_{tr}=3.01$ m
W_{tr}	mm	Ancho traspuesto de cada anillo	$W_{tr} = W * \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5}$	$W_{tr,1}=33.08$ mm $W_{tr,2}=52.56$ mm $W_{tr,3}=92.65$ mm $W_{tr,4}=193.33$ mm $W_{tr,5}=550.67$ mm $W_{tr,6}=2090$ mm
W	mm	Ancho real de cada anillo	$W = \frac{\text{altura del cilindro}}{n^{\circ} \text{ de virolas}}$	$W=2090$ mm
$t_{uniforme}$	mm	Espesor real del anillo más delgado	$t_{uniforme}=t_6$	$t_{uniforme}=7.93$ mm
t_{actual}	mm	Espesor real del anillo que se está calculando	$t_d = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{Sd * E} + CA$	$t_1=41.64$ mm $t_2=34.60$ mm $t_3=27.58$ mm $t_4=20.55$ mm $t_5=13.52$ mm $t_6=7.93$ mm

Tabla 12: Cálculos de la altura de la pared transformada

Como se había dividido el cuerpo en 6 virolas de 2.09 m equitativamente y cada una con distintos espesores calculados anteriormente. Se recalculan los anchos traspuestos (W_{tr}) como:

$$W_{tr,1} = 2090 * \sqrt{\left(\frac{7.93}{41.64}\right)^5} = 33.08 \text{ mm}$$

$$W_{tr,2} = 2090 * \sqrt{\left(\frac{7.93}{34.6}\right)^5} = 52.56 \text{ mm}$$

$$W_{tr,3} = 2090 * \sqrt{\left(\frac{7.93}{27.58}\right)^5} = 92.65 \text{ mm}$$

$$W_{tr,4} = 2090 * \sqrt{\left(\frac{7.93}{20.55}\right)^5} = 193.33 \text{ mm}$$

$$W_{tr,5} = 2090 * \sqrt{\left(\frac{7.93}{13.52}\right)^5} = 550.67 \text{ mm}$$

$$W_{tr,6} = 2090 * \sqrt{\left(\frac{7.93}{7.93}\right)^5} = 2090 \text{ mm}$$

Por tanto, la altura de pared transformada es:

$$H_{tr} = \sum W_{tr,i} = W_{tr,1} + W_{tr,2} + W_{tr,3} + W_{tr,4} + W_{tr,5} + W_{tr,6} = 33.08 + 52.56 + 92.65 + 193.33 + 550.67 + 2090 = 3012.3 \text{ mm} = \mathbf{3.01 \text{ m}}$$

Como $H_1 = 9.54 \text{ m} > H_{tr} = 3.01 \text{ m}$, **no** será necesario agregar una viga de viento intermedia. Por tanto, ya no es necesario calcular el módulo de sección mínimo de viga intermedia (Z).

4.8.2 COMPROBACIÓN DEL ANCLAJE DEL DEPÓSITO

Por otro lado, se ha de comprobar el momento de vuelco del tanque producido por el viento es mayor que el momento del propio tanque, para decidir si hay que anclarlo o no.

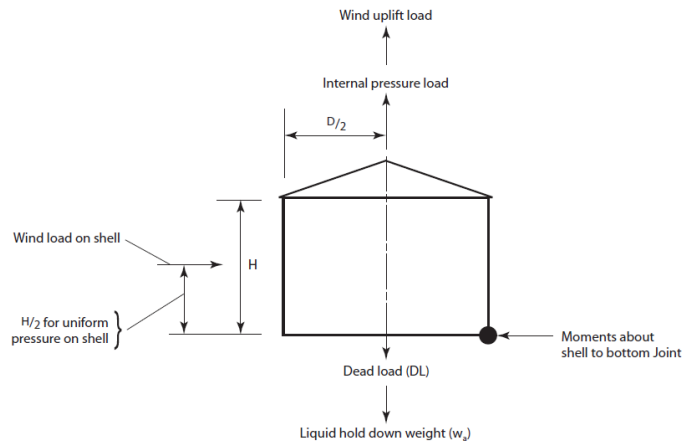


Figura 48: Comprobación del vuelco en tanques no anclados

Para que no haya anclaje, se ha de verificar los siguientes criterios según el apartado 5.11.2 de la Standard API-650:

- 1) $0.6M_w + M_{Pi} < M_{DL} / 1.5$
- 2) $M_w + 0.4M_{Pi} < (M_{DL} + M_F) / 2$

Que se definen los de la siguiente manera:

- Momento de vuelco sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión interna del diseño (M_{Pi}):

$$M_{Pi} = \frac{1}{2} * D * F$$

- Momento de vuelco sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión del viento horizontal y vertical (M_w):

$$M_w = Pws * D * H * \frac{H}{2} + Pws * D * \frac{H}{2} * \frac{H}{2} + Pwr * \pi * \frac{D^2}{4} * \frac{D}{2}$$

- Momento de vuelco sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del techo (M_{DL}):

$$M_{DL} = Pt * \frac{D}{2}$$

- Momento de vuelco sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del líquido (M_F):

$$M_F = F * \frac{D}{2}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
M_{Pi}	kN m	Momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión interna del diseño	$M_{Pi} = \frac{1}{2} * D * F$	$M_{Pi}=107354.1$ kN m
M_w	kN m	Momento de vuelco sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión del viento horizontal y vertical	$M_w = Pws * D * H * \frac{H}{2} + Pws * D * \frac{H}{2} * \frac{H}{2} + Pwr * \pi * \frac{D^2}{4} * \frac{D}{2}$	$M_w=32695.9$ kN m
M_{DL}	kN m	Momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del techo	$M_{DL} = Pt * \frac{D}{2}$	$M_{DL} = 114309$ kN m
M_F	kN m	Momento sobre la unión de la envolvente y el	$M_F = F * \frac{D}{2}$	$M_F =158579.1$ kN m

		fondo debido al peso del líquido		
D	m	Diámetro del tanque	Dato de partida	D=45 m
F _{b,diseño}	N	Fuerza debido a la presión interna de diseño	$F_{lev}=P_i \cdot A_{int}$	F_{b,diseño}=4771.29 kN
P _i	kPa	Presión interna de diseño	Dato de partida	P_i=3 kPa
P _{ws}	kPa	Presión sobre el depósito debido al viento	$P_{ws}=0.86 \cdot \left(\frac{v}{190}\right)^2$	P_{ws}=0.50 kPa
P _{wr}	KPa	Presión sobre el techo debido al viento	$P_{wr}=1.44 \cdot \left(\frac{v}{190}\right)^2$	P_{wr}=0.84 kPa
H	m	Altura total del tanque	Dato de partida	H=17.6 m
h	m	Altura del cuerpo del tanque	Dato de partida	h=12.5 m
H _{liq}	m	Altura de diseño del líquido	Dato de partida	H_{liq}=17 m
v	Km/h	Velocidad del viento	Dato de partida	v=145 km/h
P _T	kN	Peso del domo y de la carcasa	$P_T=P_{domo}+P_{cilindro}$	P_T=114309 kN
P _{domo}	kN	Peso del domo	$P_{domo}=M_{domo} \cdot g$	P_{domo}=1751.3 kN
P _{cilindro}	kN	Peso del cilindro	$P_{cilindro}=M_{cilindro} \cdot g$	P_{cilindro}=3329.1 kN
V _{domo}	m ³	Volumen del domo	Por geometría	V_{domo}=22.45 m³
V _{cilindro}	m ³	Volumen del cilindro	Por geometría	V_{cilindro}=42.68 m³
F _{liq}	kN	Fuerza del peso del líquido	$F_{liq}=\frac{D}{1000} \cdot \pi \cdot \frac{D}{1000} \cdot 59 \cdot t_b \cdot \sqrt{Fby} \cdot H \cdot \pi \cdot \frac{D}{1000}$	F_{liq}=7048 kN

t_b	mm	Espesor requerido de la placa inferior bajo la carcasa usado para resistir la carga de vuelco de viento	Según la Standard API-650	$t_b = 2 \text{ cm}$
F_{by}	MPa	Límite elástico mínimo especificado de la placa inferior bajo la carcasa	Dato del acero AISI 347H seleccionado.	$F_{by} = 105 \text{ MPa}$
t_u	mm	Media de los espesores de las virolas	$t_u = \frac{\sum ti}{6}$	$t_u = 24.3 \text{ mm}$

Tabla 13: Cálculos del momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión interna del diseño

Antes de calcular el momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión interna del diseño (M_{Pi}), hay que hallar la fuerza debido a la presión interna de diseño en la base ($F_{b,diseño}$):

$$F_{b,diseño} = P_i * A_{base} = P_i * \pi * \frac{D^2}{4} = 3 * \pi * \frac{45^2}{4} = 3 * 1590.43 = 4771.29 \text{ kN}$$

$$M_{Pi} = \frac{1}{2} * D * F_{b,diseño} = \frac{1}{2} * 45 * 4771.29 = 107354.11 \text{ kN m}$$

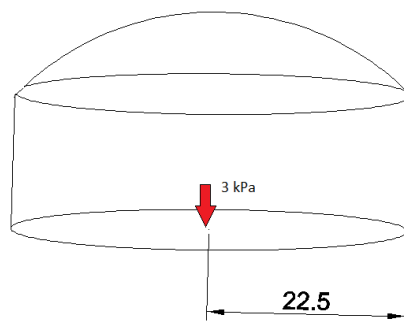


Figura 49: Momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido a la presión interna de diseño

Para calcular el momento de vuelco sobre la unión de la envolvente y la base debido a la presión del viento horizontal y vertical (M_w), previamente se hallan la presión sobre el depósito (P_{ws}) y la presión sobre el techo (P_{wr}):

$$P_{ws} = 0.86 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 = 0.86 * \left(\frac{145}{190}\right)^2 = 0.50 \text{ kPa}$$

$$P_{wr} = 1.44 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 = 1.44 * \left(\frac{145}{190}\right)^2 = 0.84 \text{ kPa}$$

Por tanto, ya se puede sustituir en:

$$M_w = P_{ws} * D * h * \frac{h}{2} + P_{ws} * D * \frac{h}{2} * \frac{h}{2} + P_{wr} * \pi * \frac{D^2}{4} * \frac{D}{2} = 0.50 * 45 * 12.5 * \frac{12.5}{2} + 0.50 * 45 * \frac{12.5}{2} * \frac{12.5}{2} + 0.84 * \pi * \frac{45^2}{4} * \frac{45}{2} = 1757.81 + 878.91 + 30059.15 = 32695.9 \text{ kN m}$$

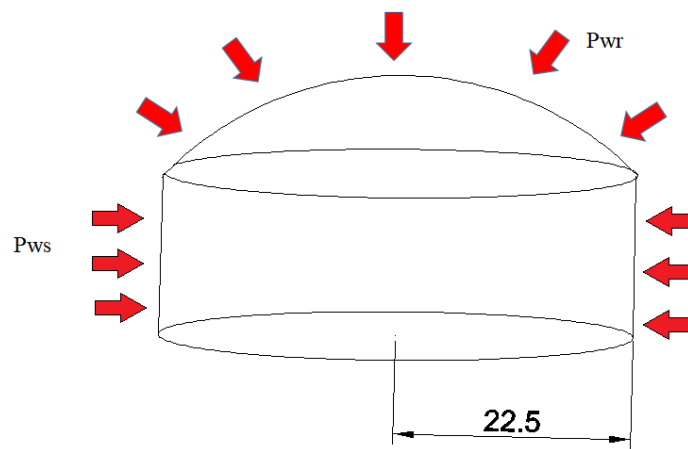


Figura 50: Momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido a la presión del viento

Es necesario calcular el peso del domo y la carcasa (P_T) para posteriormente hallar el momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido al peso de del techo (M_{DL}).

Para hallar el peso del domo (P_{domo}) se calcula el volumen del domo (V_{domo}) en coordenadas esféricas:

$$P_{domo} = M_{domo} * g = \rho * V_{domo} * g$$

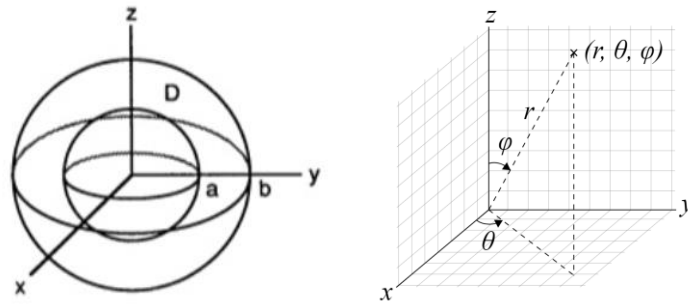


Figura 51: Coordenadas esféricas

$$V_{\text{domo}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{0.44} \int_{53.994}^{54.007} r^2 \text{sen}(\varphi) d\theta d\varphi dr = 2\pi * \frac{54.007^3 - 53.994^3}{3} * [-\cos(0.44) + \cos(0)] = 22.45 \text{ m}^3$$

Entonces, el peso del domo (P_{domo}) se halla como:

$$P_{\text{domo}} = M_{\text{domo}} * g = \rho * V_{\text{domo}} * g = 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 22.45 \text{ m}^3 * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1751279.6 \text{ N} = 1751.3 \text{ kN}$$

Por otro lado, el peso del cilindro se calcula directamente como:

$$P_{\text{cilindro}} = M_{\text{cilindro}} * g = \rho * V_{\text{cilindro}} * g$$

Siendo el volumen del cilindro (V_{cilindro}) suponiendo que el espesor del cilindro es la media de los espesores de las virolas, valor constante,

$$t_u = \frac{\sum t_i}{6} = \frac{41.64 + 34.60 + 27.58 + 20.55 + 13.52 + 7.93}{6} = \frac{145.82}{6} = 24.3 \text{ mm}$$

Conocido el diámetro nominal $D=45 \text{ m}$, se halla $R_{\text{ext}} = \frac{45}{2} + \frac{0.0243}{2} = 22.512 \text{ m}$ y $R_{\text{ext}} = \frac{45}{2} - \frac{0.0243}{2} = 22.488 \text{ m}$, el peso del cilindro se calcula como:

$$V_{\text{cilindro}} = \pi * h * (R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2) = \pi * 12.5 * (22.512^2 - 22.488^2) = 42.68 \text{ m}^3$$

$$P_{\text{cilindro}} = \rho * V_{\text{cilindro}} * g = 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 42.68 \text{ m}^3 * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3329125.2 \text{ N} = 3329.1 \text{ kN}$$

Finalmente, el peso total del domo y cilindro será:

$$P_{\text{T}} = P_{\text{domo}} + P_{\text{cilindro}} = 1751.3 + 3329.1 = 5080.4 \text{ kN}$$

Por tanto, ya se puede calcular el valor del momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido al peso de la cubierta y techo (M_{DL}):

$$M_{DL} = Pt * \frac{D}{2} = 5080.4 * \frac{45}{2} = 114309 \text{ kN m}$$

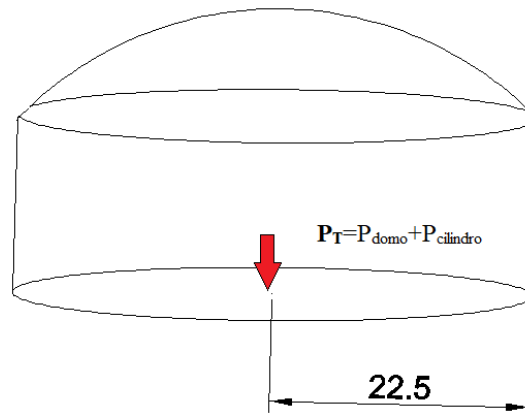


Figura 52: Momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido al peso del líquido

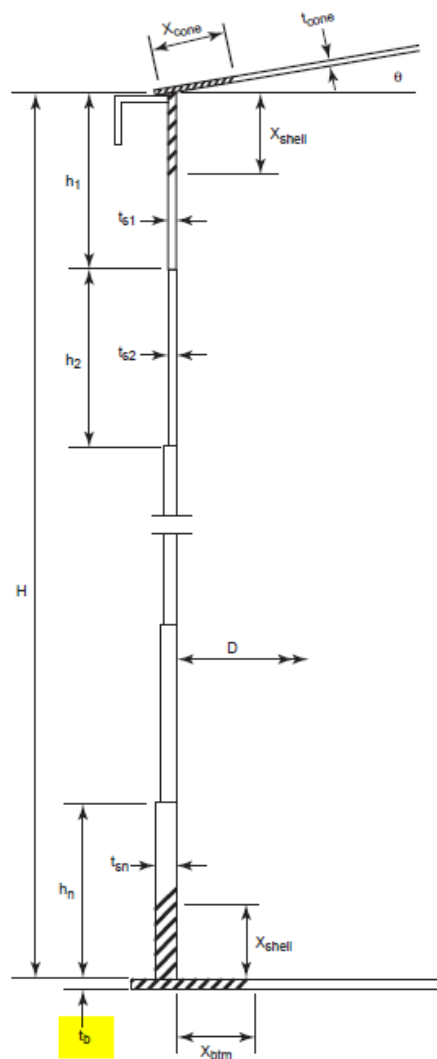
Finalmente, el momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido al peso del líquido (M_F) se obtiene calculando previamente la fuerza del peso del líquido (F_{liq}):

$$F_{liq} = w_L * \pi * \frac{D}{1000} = (59 * t_b * \sqrt{F_{by} * H}) * \pi * \frac{D}{1000}$$

El espesor requerido de la placa inferior bajo la carcasa (t_b) usado para resistir la carga de vuelco de viento que se observa en la siguiente tabla, tiene que cumplir que según la Figura 27 del apartado 5.1.3 de la norma Standard API-650, si el espesor del primer anillo $t_6 = 7.93 \text{ mm} < 19$ y el límite elástico del acero AISI 347H: $F_b = 105 \text{ MPa} \leq 190$, entonces $t_b > 6 \text{ mm}$ excluyendo la corrosión. Además, ha de ser menor que el mayor de los espesores del cuerpo porque solo se usa para hermetizar el producto a almacenar ya que la carga la soporta el terreno, al estar auto-anclado en el suelo. El mayor de los espesores de las virolas es $e_1 = 41.64 \text{ mm} \approx 4.2 \text{ cm}$. Asimismo, el espesor de la placa es función de la rigidez del terreno pero, a falta de esa información, se supondrá para la placa un espesor de $t_b = 2 \text{ cm}$.

Plate Thickness ^a of First Shell Course (mm)	Stress ^b in First Shell Course (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t \leq 45$	9	13	16	19

Figura 53: Espesor mínimo de la placa base según la norma API-650



Note: See Appendix F, Figure F-2 for alternative configurations and associated limitations on structural section used for top stiffener.

Figura 54: Espesor de la placa base (t_b)

Por tanto, siendo el límite elástico de la base (F_{by}) igual que en el resto del tanque $F_{by}=105$ MPa:

$$F_{liq} = w_L * \pi * \frac{D}{1000} = (59 * t_b * \sqrt{F_{by} * H_{liq}}) * \pi * \frac{D}{1000} = (59 * 20 * \sqrt{105 * 17}) * \pi * \frac{45}{1000} = 7048 \text{ kN}$$

Y resulta que el momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del líquido (M_F) es:

$$M_F = F_{liq} * \frac{D}{2} = 7048 * \frac{45}{2} = 158579.1 \text{ KN m}$$

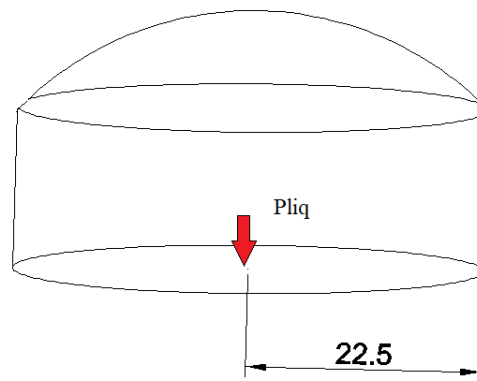


Figura 55: Momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del líquido

Una vez hallados los momentos anteriores, ya se pueden realizar las comprobaciones del anclaje del depósito:

$$1) 0.6M_w + M_{Pi} < \frac{MDL}{1.5};$$

$$0.6 * 32695.9 + 107354.1 < \frac{114309}{1.5};$$

$$126971.64 < 76206 \quad \text{No cumple}$$

$$2) M_w + 0.4M_{Pi} < \frac{MDL + M_F}{2};$$

$$32695.9 + 0.4 * 107354.1 < \frac{74981.3 + 158579.1}{2};$$

$$75637.54 < 116780.2; \quad \text{Sí cumple}$$

Por tanto, como una de las comprobaciones no cumple, se concluye que **sí** será necesario anclar el depósito.

4.9 COMPROBACIÓN PARA CARGA DE SISMO

El objetivo de estudiar la carga sísmica para el diseño del tanque es su prolongación de vida y protección al colapso.

Partiendo de que la categoría del terremoto al que puede estar expuesto es la D. Esta categoría se basa en una clasificación de estructuras en función de su uso y el nivel de movimiento sísmico del suelo. La categoría D tiene una alta vulnerabilidad sísmica.

Los tanques se clasifican en los 3 Grupos de Uso Sísmico (SUG) siguientes:

- SUG III: son aquellos tanques en los que es necesaria una rápida recuperación tras el terremoto; tanques que contienen grandes cantidades de sustancias peligrosas de las que no se tienen un control adecuado en su exposición pública.
- SUG II: son aquellos tanques que pueden contener una sustancia peligrosa a la exposición pública y que deberían de seguir su correcto funcionamiento para el confort de los habitantes después de un seísmo.
- SUG I: tanques que no han sido nombrados en los SUG II y III.

Se ha considerado el grupo de uso sísmico SUG II.

4.9.1 MOVIMIENTO DE LAS ZONAS DEL TERRENO

Para obtener las aceleraciones laterales espectrales necesarias para el diseño del tanque frente a una carga sísmica, se usará uno de los métodos siguientes que propone la norma Standard API-650:

- Método mapeo del ASCE 7.
- Método de diseño para una respuesta espectral de un sitio específico.
- Método de sitios que no están definidos por el ASCE 7.

4.9.1.1 MÉTODO MAPEO DEL ASCE 7

Como el tanque estará situado en una de las regiones de EEUU en el que el ASCE 7 es un requisito reglamentario, se utilizará este método.

Para ello, se calcularán S_s y S_1 que son parámetros de aceleraciones de respuesta espectral mapeadas, máximas, con un 5% de amortiguamiento en un periodo de 1s, y en un periodo corto respectivamente. Los valores que se toman usando el *Método de mapeo ASCE 7* son de $S_s=0.599\approx 0.6$ y $S_1=0.198\approx 0.2$. El ASCE 7 consta de una página web del USGS ([htt7](#)) que calcula estos parámetros en función del tipo de suelo y su localización.



Basic Parameters

Name	Value	Description
S_S	0.599	MCE_R ground motion (period=0.2s)
S_1	0.198	MCE_R ground motion (period=1.0s)
S_{MS}	0.479	Site-modified spectral acceleration value
S_{M1}	0.158	Site-modified spectral acceleration value
S_{DS}	0.32	Numeric seismic design value at 0.2s SA
S_{D1}	0.106	Numeric seismic design value at 1.0s SA

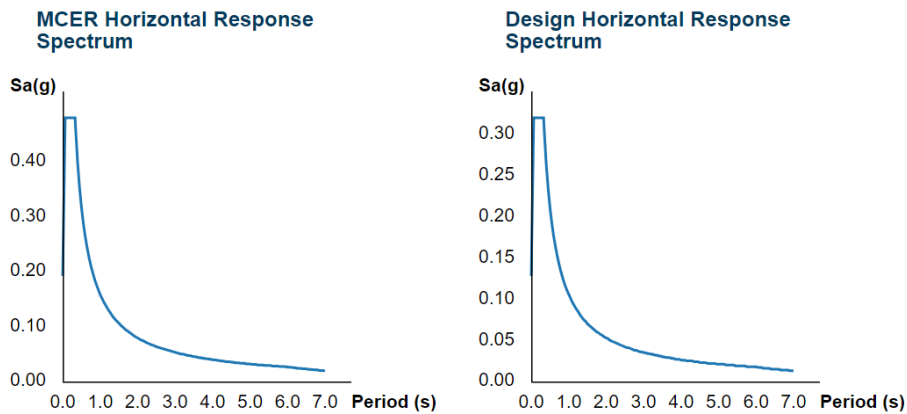


Figura 56: Cálculo de los parámetros de aceleración de respuesta espectral según ASCE 7

4.9.1.2 MODIFICACIONES PARA LAS CONDICIONES DEL SITIO DEL SUELO

Para definir los parámetros de aceleración y cargas hay que concretar en primer lugar la clase de sitio. Se pueden clasificar según se expone en la siguiente tabla:

<u>Clase de Sitio</u>	
A	Muy baja vulnerabilidad sísmica
B	Baja a moderada vulnerabilidad sísmica
C	Moderada vulnerabilidad sísmica
D	Alta vulnerabilidad sísmica
E	Muy alta vulnerabilidad sísmica

Tabla 14: Tipos de clase de sitio

Como no se conocen con suficiente detalle las propiedades del suelo, la norma API supone que la clase del sitio será D para estos casos.

Además, será necesario calcular los coeficientes del sitio basado en la aceleración en $T=0.2$ s y en la velocidad en $T=1$ s (F_a y F_v respectivamente) para modificar las aceleraciones de respuesta espectral máximas consideradas.

Por tanto, a través de las siguientes tablas se calcularán F_a y F_v :

Site Class	Mapped Maximum Considered Earthquake Spectral Response Accelerations at Short Periods				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	a	a	a	a	a

^aSite-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

Figura 57: Tabla para calcular el coeficiente del sitio basado en la aceleración en $T=0.2$ s según la API-650

F_a = coeficiente del sitio basado en la aceleración en $T=0.2$ s. $F_a= 1.32$

Mapped Maximum Considered Earthquake Spectral Response Accelerations at 1 Sec Periods					
Site Class	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	a	a	a	a	a

^aSite-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

Figura 58: Tabla para calcular el coeficiente del sitio basado en la aceleración en T=1 s según la API-650

F_v = coeficiente del sitio basado en la velocidad en T=0.1 s. $F_v=2.0$

4.9.1.3 PERIODO ESTRUCTURAL DE VIBRACIÓN

Para determinar si una carga causa efectos dinámicos o estáticos, se calcula el periodo natural de la estructura. Éste es el tiempo que tarda la estructura en recorrer un ciclo de vibración libre, es decir la vibración que ocurre después de que finalice la carga externa y se mantiene constante.

Para estudiar el movimiento sísmico en un tanque se simulará el siguiente modelo:

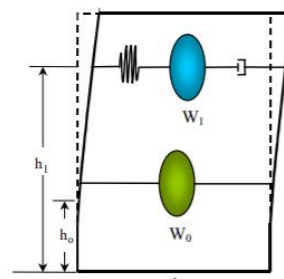


Figura 59: Modelo de simulación sísmica

En él se observa una masa impulsiva que acompaña al movimiento de las paredes del tanque rígidamente (W_0), que simula el comportamiento de fluido que se mueve solidariamente con el depósito (impulsiva); y una masa convectiva (W_1), en el que el fluido que está situado cerca de la superficie libre experimenta oscilaciones.

- Periodo natural impulsivo:

Se trata del tiempo que tarda la estructura en dar un ciclo de vibración libre en el movimiento impulsivo. La norma Standard API-650 considera que los métodos de diseño son independientes del periodo impulsivo del tanque (T_i). Por tanto, para su cálculo se desarrolla la siguiente ecuación del apartado E.4.5.1 (Malhotra, Wenk, & and Wieland, 2000):

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{C_i * H_{liq} \sqrt{\rho}}{\sqrt{\frac{t_u}{D}} \sqrt{E}}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
T_i	s	Periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento impulsivo	$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{C_i * H \sqrt{\rho}}{\sqrt{\frac{t_u}{D}} \sqrt{E}}$	$T_i=0.347$ s
t_u	mm	Espesor equivalente uniforme de la carcasa del tanque	$\sum \frac{t_i}{6}$	$t_u=24.3$ mm
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	D=45 m
H_{liq}	m	Nivel máximo de diseño del producto	Dato de partida	$H_{liq}=17$ m
ρ_{liq}	kg/m ³	Densidad del fluido	Dato de partida	$\rho_{liq}=1800$ kg/m³
E	GPa	Módulo de elasticidad del material del tanque	Dato tomado del acero AISI 347H	E=196 GPa
C_i	-	Coficiente para determinar el periodo impulsivo del tanque	Figura 60	$C_i= 7.00$

Tabla 15: Cálculos del periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento impulsivo

El espesor equivalente uniforme de la carcasa del tanque (t_u) se había calculado en el apartado anterior teniendo en cuenta que la altura de cada virola se había tomado como constante ($H_v=2.09$ m). Por tanto,

$$t_u = \frac{\sum t_i}{6} = \frac{41.64+34.60+27.58+20.55+13.52+7.93}{6} = \frac{145.82}{6} = \mathbf{24.3 \text{ mm}}$$

Para calcular el coeficiente C_i que determina el periodo impulsivo del tanque, la norma Standard API-650 expone que:

$$\text{Como } \frac{H}{D} = \frac{17}{45} = 0.38$$

A partir del siguiente gráfico: $C_i = 7.00$

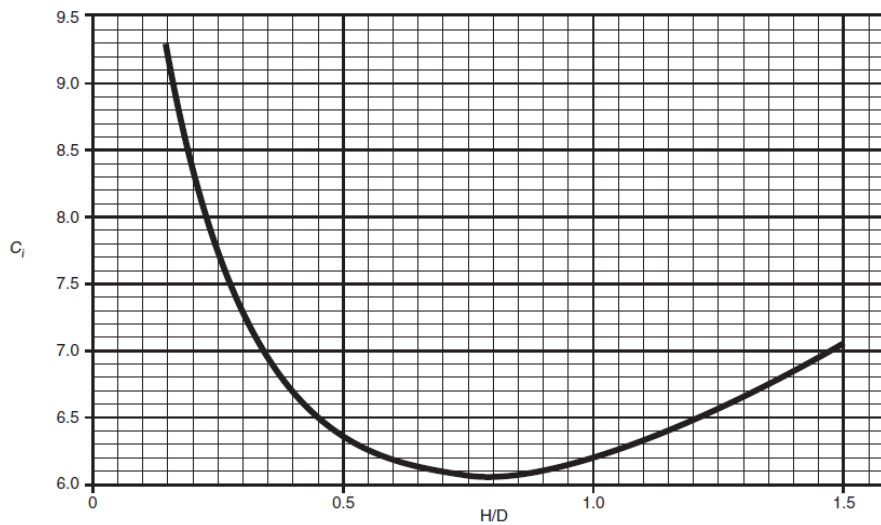


Figura 60: Gráfico para determinar el periodo impulsivo del tanque

Por tanto, sustituyendo en la fórmula se puede calcular el periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento impulsivo:

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{C_i * H}{\sqrt{tu}} \frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{7 * 17}{\sqrt{24.3}} \frac{\sqrt{1800}}{\sqrt{196000}} = \mathbf{0.347 \text{ s}}$$

-Periodo convectivo (movimiento del fluido en el interior):

Es el tiempo que tarda la estructura en dar un ciclo de vibración libre en el movimiento de oleaje del fluido.

El primer periodo natural del modo de comportamiento convectivo de líquido se calcula a partir de la fórmula del apartado E.4.5.2 de la norma Standard API-650:

$$T_c = 1.8 K_s \sqrt{D}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
T_c	s	Periodo natural estructural de vibración para un modo de	$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt{D}$	$T_c = 7.17 \text{ s}$

		comportamiento convectivo		
K_s	-	Coefficiente del periodo de desbordamiento	$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * H}{D}\right)}}$	$K_s=0.594$
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	D=45 m
H_{liq}	m	Nivel máximo de diseño del producto	Dato de partida	$H_{liq}=17$ m

Tabla 16: Cálculos del periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento convectivo

Para hallar el periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento convectivo (T_c), previamente se ha de calcular el coeficiente del periodo de desbordamiento (K_s), que se halla de la siguiente fórmula o a través del gráfico de la figura que se muestra a continuación.

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * H_{liq}}{D}\right)}} = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * 17}{45}\right)}} = \mathbf{0.594}$$

Se puede comprobar esta fórmula, ya que se ha obtenido del siguiente gráfico el mismo resultado siendo $D/H=45/17=2.64$:

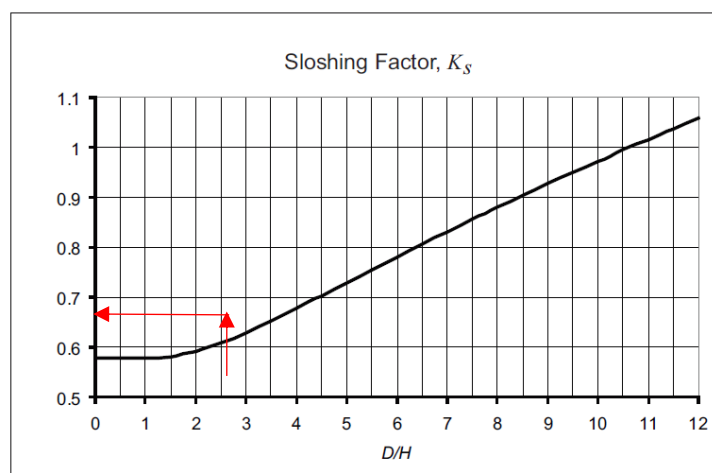


Figura 61: Gráfico para hallar el coeficiente del periodo de desbordamiento

Por tanto, sustituyendo se halla:

$$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt{D} = 1.8 * 0.594 * \sqrt{45} = 7.17 \text{ s}$$

4.9.1.4 DISEÑO ESPECTRAL DE LA RESPUESTA DE LAS ACELERACIONES

Para calcular los coeficientes de diseño de la aceleración espectral (A_i y A_c) hay que calcular previamente los factores de diseño siguientes.

4.9.2 FACTORES DE DISEÑO

4.9.2.1 FACTOR DE MODIFICACIÓN DE RESPUESTA

Las fuerzas sísmicas de diseño se hallan reduciéndolas a partir de los siguientes factores en función de varios parámetros, como son la ductilidad o la capacidad de absorción de energía de la estructura.

Debido a que el tanque está mecánicamente anclado, calculado en el apartado anterior, se obtienen el factor de reducción de fuerza para el modo impulsivo utilizando métodos de diseño de tensión permisible (R_{wi}) y el factor de reducción de fuerza para el modo convectivo utilizando métodos de diseño de tensión permisible (R_w) de la siguiente tabla:

Anchorage system	R_{wi} (impulsive)	R_w (convective)
Self-anchored	3.5	2
Mechanically-anchored	4	2

Figura 62: Tabla para determinar los factores de modificación de respuesta según la API-650

Se supone que está auto-anclado, por tanto: $R_{wi}=4$ y $R_w=2$

4.9.2.2 FACTOR DE IMPORTANCIA

Es el factor de importancia dado por el grupo de uso sísmico. Este coeficiente es usado para definir los parámetros de aceleración de diseño e influye indirectamente en el nivel de rendimiento esperado de tanque y depende de la utilidad del tanque.

Seismic Use Group	<i>I</i>
I	1.0
II	1.25
III	1.5

Figura 63: Tabla para determinar el factor de importancia según la API-650

Como el uso de grupo es II, según se explicó en la introducción de este apartado: **I=1.25**

Por tanto, ya se pueden calcular los coeficientes de aceleraciones espectrales (A_i y A_c) de este apartado:

Parámetro de aceleración espectral impulsiva (A_i)

A_i se deduce del cálculo del periodo impulsivo del fluido con un 5% del amortiguamiento del espectro, o asumiendo un periodo impulsivo de 0,2 segundos.

$$A_i = S_{ds} * \frac{I}{R_{wi}}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
A_i	%	Parámetro de aceleración espectral impulsiva	$A_i = S_{ds} * \frac{I}{R_{wi}}$	$A_i=0.1\%$
S_{DS}	%	Parámetro de aceleraciones de respuesta espectral al 5% de amortiguamiento de diseño en periodos cortos ($T=0.2$ s) basado en los métodos ASCE 7	Según ASCE 7	$S_{DS}=0.320\%$
R_{wi}	-	Factor de reducción de fuerza para el modo impulsivo utilizando métodos de diseño de tensión permisible	Figura 62	$R_{wi}=4$

Tabla 17: Cálculos del parámetro de aceleración espectral impulsiva

Sustituyendo los datos de la tabla anterior, se puede calcular el parámetro de aceleración espectral impulsiva (A_i) directamente como:

$$A_i = S_d s * \frac{I}{R_{wi}} = 0.32 * \frac{1.25}{4} = \mathbf{0.1 \%}$$

Parámetro de aceleración espectral convectiva (A_c)

A_c se basa en el cálculo del periodo convectivo con un 0,5% del amortiguamiento espectral. Para calcular A_c , previamente se define T_L como *el periodo de transición dependiente de la región para largos periodos de movimientos de tierra*. Se obtiene de la siguiente imagen del ASCE 7. $T_L=6$ s.



FIGURE 22-12 Mapped Long-Period Transition Period, T_L (s), for the Conterminous United States.

Figura 64: Determinación del periodo de transición dependiendo de la región para largos periodos de movimiento de tierra

Como $T_c=7.17 > T_L=6$, se puede hallar A_c como:

$$A_c = K * S_{d1} * \left(\frac{T_L}{T_c^2}\right) * \left(\frac{I}{R_{wc}}\right)$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
A_c	%	Parámetro de aceleración espectral convectiva	$A_c = K * S_{d1} * \left(\frac{T_L}{T_c^2}\right) * \left(\frac{I}{R_{wc}}\right)$	$A_c=0.012\%$
K	-	Coefficiente para ajustar la aceleración espectral desde el 5% hasta el 0.5% de amortiguamiento	Según Standard API-650	$K=1.5$
S_{D1}	%	Parámetro de aceleraciones de respuesta espectral al 5% de amortiguamiento de diseño en periodos cortos ($T=1$ s) basado en los métodos ASCE 7	Según ASCE 7	$S_{D1}=0.106\%$
T_L	s	Periodo de transición dependiente de la región para largos periodos de movimientos de tierra	Según ASCE 7	$T_L=6$ s
T_c	s	El primer periodo de onda de comportamiento convectivo	$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt{D}$	$T_c=7.17$ s
I	-	Coefficiente de factor de importancia dado por un grupo de uso sísmico	Figura 63	$I=1.25$
R_{wc}	-	Factor de reducción de fuerza para el modo convectivo usando métodos de diseño de tensión permisibles	Figura 62	$R_{wc}=2$

Tabla 18: Cálculos del parámetro de aceleración espectral convectiva

El coeficiente para ajustar la aceleración espectral desde el 5% hasta el 0.5% de amortiguación (K) es 1.5 si no se especifica lo contrario según la norma Estándar API-650.

Previamente, es necesario hallar T_s que es un parámetro que se define como:

$$T_s = \frac{Fv * S1}{Fa * Ss} = \frac{2 * 0.2}{1.32 * 0.6} = 0.51$$

Por tanto,

$$A_c = K * Sd1 * \left(\frac{TL}{Tc^2}\right) * \left(\frac{I}{Rwc}\right) = 1.5 * 0.106 * \left(\frac{6}{7.17^2}\right) * \left(\frac{1.25}{2}\right) = 0.012\%$$

Como resultado, se obtiene el siguiente espectro de respuestas particular para el problema estudiado:

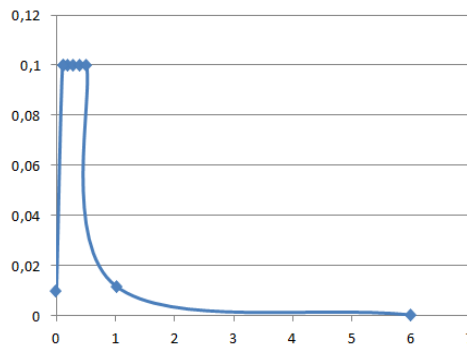


Figura 65: Espectro de aceleraciones particular

4.9.3 DISEÑO

4.9.3.1 DISEÑO DE CARGAS

Para diseñar las fuerzas del tanque, se ha de determinar la fuerza de diseño sísmica lateral equivalente para cada caso a partir de la siguiente fórmula general:

$$F = A * W_{eff}$$

Siendo,

F= fuerza de diseño sísmica lateral equivalente (N)

A= parámetro de aceleración espectral (%)

W_{eff} = peso efectivo (N)

A continuación, se calculará la cizalladura en la base (V) siguiendo la fórmula general anterior:

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
V	kN	Cizalladura sísmica en la base	$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2}$	V=19203.6 kN
V _i	kN	Cizalladura de diseño en la base debido a la componente impulsiva del peso efectivo del tanque y su contenido	$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i)$	V_i=18978 kN
V _c	kN	Cizalladura de diseño en la base debido a la componente convectiva del peso efectivo del oleaje	$V_c = A_c * W_c$	V_c=2934.9 kN

Tabla 19: Cálculos de la cizalladura sísmica en la base

Para calcular la cizalladura de diseño en la base debido a la componente impulsiva del peso efectivo del tanque y su contenido (V_i) se toma la fórmula del apartado E.6.1 de la norma Standard API-650:

$$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i)$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
V _i	kN	Cizalladura de diseño en la base debido a la componente impulsiva del peso efectivo del tanque y su contenido	$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i)$	V_i=18978 kN
V _c	kN	Cizalladura de diseño en la base debido a la componente convectiva del peso efectivo de oleaje	$V_c = A_c * W_c$	V_c=2934.9 kN

W_s	kN	Peso total de las paredes del tanque y sus accesorios	$W_s = M_{\text{cuerpo}} * g$	$W_s = 3828.5$ kN
W_r	kN	Peso total del techo del tanque fijo, incluyendo bastidores, nudillos, cualquier accesorio permanente y 10% de la carga de nieve de diseño del techo (N)	$W_r = M_{\text{domo}} * g$	$W_r = 2014$ kN
W_f	kN	Peso del fondo del tanque	$W_f = \pi * R^2 * e * \rho * g$	$W_f = 2481.3$ kN
W_p	kN	Peso total del contenido del tanque basado en la gravedad específica del diseño del producto	$W_p = \rho_L * g * (\text{Vol}_{\text{fluido en el cuerpo}} + \text{Vol}_{\text{fluido en el domo}})$	$W_p = 424610.1$ kN
$\text{Vol}_{f, \text{cilindro}}$	m^3	Volumen de fluido en el cilindro	$\text{Vol}_{\text{fluido en el cilindro}} = \pi * R_{\text{ext, cil}}^2 * h$	$\text{Vol}_{f, \text{cilindro}} = 19859.2$ m^3
$\text{Vol}_{f, \text{domo}}$	m^3	Volumen de fluido en el domo	$\text{Vol}_{\text{fluido en el domo}} = \frac{\pi}{3} [h1 * (3 * R_{\text{domo}} - h1) - h2 * (3 * R_{\text{domo}} - h2)]$	$\text{Vol}_{f, \text{domo}} = 4211.7$ m^3
W_i	kN	Parte impulsiva efectiva del peso del líquido adherido a las paredes del tanque	$W_i = \frac{\tanh(0.866 * \frac{D}{H})}{0.866 * \frac{D}{H}} * Wp$	$W_i = 181456$ kN
W_c	kN	Porción efectiva de convectiva del peso del líquido	$W_c = 0.230 * \frac{D}{H} * \tanh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right) * Wp$	$W_c = 244575.1$ kN
A_i	%	Parámetro de aceleración espectral impulsiva	$A_i = Sds * \frac{I}{Rwi}$	$A_i = 0.1$ %
A_c	%	Parámetro de aceleración espectral convectiva (%)	$A_c = K * Sd1 * \left(\frac{TL}{Tc^2}\right) * \left(\frac{I}{Rwc}\right)$	$A_c = 0.012$ %
P_{domo}	kN	Peso del domo	$P_{\text{domo}} = M_{\text{domo}} * g$	$P_{\text{domo}} = 1751.3$ kN
P_{cilindro}	kN	Peso del cilindro	$P_{\text{cilindro}} = M_{\text{cilindro}} * g$	$P_{\text{cilindro}} = 3329.1$ kN

ρ_{liq}	kg/m ³	Densidad del fluido	Dato de partida	$\rho_{liq}=1800 \text{ kg/m}^3$
ρ_{acero}	kg/m ³	Densidad del acero	Dato de partida	$\rho_{acero}=7960 \text{ kg/m}^3$
g	m/s ²	Constante de gravedad	Dato de partida	$g=9.8 \text{ m/s}^2$
t_b	mm	Espesor requerido de la placa inferior bajo la carcasa usado para resistir la carga de vuelco de viento	Según la Standard API-650	$t_b= 2 \text{ cm}$

Tabla 20: Cálculos de la cizalladura de diseño en la base debido a la componente impulsiva del peso efectivo del tanque y su contenido y cizalladura de diseño en la base debido a la componente convectiva del peso efectivo de oleaje

En primer lugar, se calcula el peso total de las paredes del tanque y sus accesorios (W_s) con el dato de P_{cil} hallado en el apartado 4.7. Se ha supuesto que los accesorios comprenden un 15% de la carga total:

$$W_s = P_{cil} * 1.15 = 3329.1 * 1.15 = \mathbf{3828.5 \text{ kN}}$$

A continuación, el peso total del techo del tanque fijo, incluyendo bastidores, nudillos, cualquier accesorio permanente y 10% de la carga de nieve de diseño del techo (W_r) se calcula de la misma manera:

$$W_r = P_{domo} * 1.15 = 1751.3 * 1.15 = \mathbf{2014 \text{ kN}}$$

Para calcular el peso del fondo del tanque (W_f) y como se había supuesto que el espesor de la placa base $t_b=2 \text{ cm}$:

$$W_f = \pi * R^2 * t_b * \rho_{acero} * g = \pi * 22.5^2 * 0.02 * 7960 * 9.8 = 2481327.3 \text{ N} = \mathbf{2481.3 \text{ kN}}$$

Para calcular la parte impulsiva efectiva del peso del líquido adherido a las paredes del tanque (W_i), hay que hallar antes el peso total del contenido del tanque basado en la gravedad específica del diseño del producto (W_p):

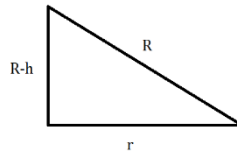
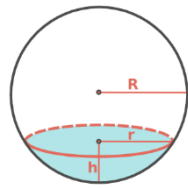
$$W_p = \rho_L * g * (\text{Vol}_{\text{fluido en el cuerpo}} + \text{Vol}_{\text{fluido en el domo}})$$

Siendo,

$$\text{Vol}_{\text{fluido en el cilindro}} = \pi * R_{\text{ext, cil}}^2 * h = \pi * 22.488^2 * 12.5 = \mathbf{19859.2 \text{ m}^3}$$

$$\text{Vol}_{\text{fluido en el domo}} = \frac{\pi}{3} [h_1 * (3 * R_{\text{domo}} - h_1) - h_2 * (3 * R_{\text{domo}} - h_2)] = \mathbf{4211.7 \text{ m}^3}$$

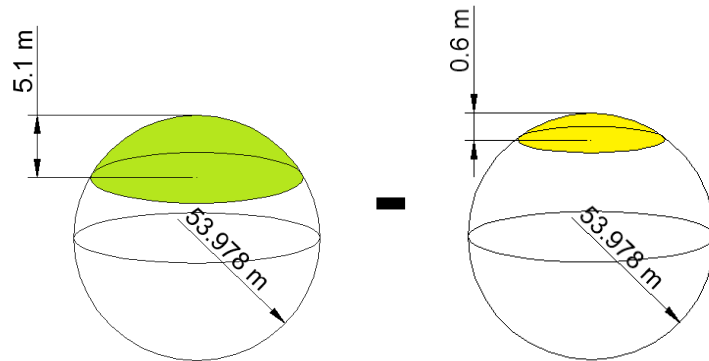
El volumen de un casquete esférico se halla integrando de la siguiente manera:



$$R^2 = r^2 + (R - h)^2 \rightarrow r = \sqrt{R^2 - (R - h)^2}$$

$$\text{Vol}_{\text{casquete esférico}} = \int_0^h \pi * r^2 dh = \int_0^h \pi * (\sqrt{R^2 - (R - h)^2})^2 dh = \pi * h^2 * \left(R - \frac{h}{3}\right) = \frac{1}{3} * \pi * h^2 * (3R - h)$$

Por tanto, el volumen de fluido en el casquete esférico se calculará como la diferencia de un casquete de $R=53.987 \text{ m}$ y $h_1=5.1 \text{ m}$ y otro de $R=53.987 \text{ m}$ y $h_2=0.6 \text{ m}$.



$$\text{Vol}_{\text{fluido en el domo}} = \frac{1}{3} * \pi * [h_1^2 * (3R - h_1) - h_2^2 * (3R - h_2)] = \frac{1}{3} * \pi * [5.1^2 * (3 * 53.987 - 5.1) - 0.6^2 * (3 * 53.987 - 0.6)] = \mathbf{4211.7 \text{ m}^3}$$

Por tanto,

$$W_p = \rho_L * g * (Vol_{\text{fluido en el cuerpo}} + Vol_{\text{fluido en el domo}}) = 1800 * 9.8 * (19859.2 + 4211.7) = \mathbf{424610.1 \text{ kN}}$$

Seguindo la norma API-650 en el apartado E.6.1.1 expone que la parte impulsiva efectiva del peso del líquido adherido a las paredes del tanque (W_i) se calcula a partir de la siguiente fórmula ya que:

$$\text{Como } \frac{D}{H} = \frac{45}{17} = 2.65 \geq 1.333:$$

$$W_i = \frac{\tanh(0.866 * \frac{D}{H})}{0.866 * \frac{D}{H}} * W_p = \frac{\tanh(0.866 * \frac{45}{17})}{0.866 * \frac{45}{17}} * 424610.1 = \mathbf{181456 \text{ kN}}$$

Finalmente, ya se puede sustituir en V_i :

$$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_t + W_i) = 0.165 * (3828.5 + 2014 + 2481.3 + 181456) = 0.1 * 189779.8 = \mathbf{18978 \text{ kN}}$$

Lo siguiente es hallar la cizalladura de diseño en la base debido a la componente convectiva del peso efectivo de oleaje (V_c) a través de la fórmula del apartado E.6.1 de la norma Standard API-650. Previamente, hay que calcular la porción efectiva de convectiva del peso del líquido (W_c) según el apartado E.6.1.1 de la norma Standard API-650:

$$W_c = 0.230 * \frac{D}{H} * \tanh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right) * W_p = 0.230 * \frac{45}{17} * \tanh\left(\frac{3.67 * 17}{45}\right) * 424610.1 = 0.576 * 424610.1 = \mathbf{244575.1 \text{ kN}}$$

Ya es posible hallar V_c :

$$V_c = A_c * W_c = 0.012 * 244575.1 = \mathbf{2934.9 \text{ kN}}$$

Por tanto,

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} = \sqrt{31313.7^2 + 7826.4^2} = \mathbf{19203.6 \text{ kN}}$$

4.9.3.1.1 CENTRO DE ACCIÓN PARA FUERZAS LATERALES EFECTIVAS

Una vez halladas las fuerzas de movimiento lateral de las masas debidas al sismo, se ha de calcular el momento que causa la inestabilidad del tanque. Se multiplicarán estas fuerzas por el brazo de palanca para evitar que el tanque se deforme debido a la compresión longitudinal que el momento de vuelco provoca sobre el tanque. Para ello, se asumirá que el centro de acción de las fuerzas laterales impulsivas debido a las paredes, el techo y el fondo será el centro de gravedad de estos.

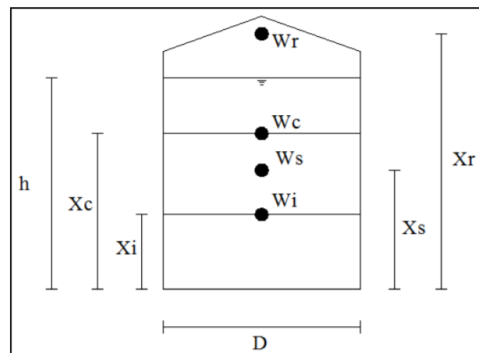


Figura 66: Definición de las cargas que provocan el vuelco y sus centros de gravedad

4.9.3.1.2 CENTRO DE ACCIÓN PARA EL MOMENTO DE VUELCO DEL ANILLO DE LA BASE Y MOMENTO DEL ANILLO DE LA BASE

M_{rw} es el momento del anillo de resistencia de la base (N*m). Es una parte del momento total de vuelco que actúa en la base de la envolvente del tanque. Sirve para calcular cargas en el cimiento del anillo de la base, las fuerzas de anclaje del tanque y para comprobar la compresión longitudinal de la membrana del cuerpo.

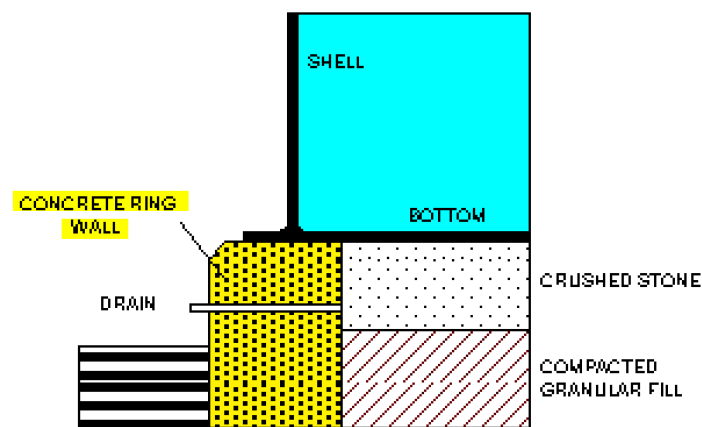


Figura 67: Situación del anillo de hormigón situado en la base

Se calcula a partir de la siguiente fórmula, que equivale al momento de diseño sísmico equivalente lateral:

$$M_{rw} = \sqrt{M_i^2 + M_c^2}$$

Siendo,

$$M_i = A_i \cdot (W_i \cdot X_i) + A_i \cdot (W_s \cdot X_s) + A_i \cdot (W_f \cdot X_f) + A_i \cdot (W_r \cdot X_r), \text{ ya que } X_f = 0$$

$$M_c = A_c * (W_c * X_c)$$

Por tanto,

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i * (W_i * X_i + W_s * X_s + W_r * X_r)]^2 + [A_c * (W_c * X_c)]^2}$$

Siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
M_{rw}	N m	Momento del anillo de resistencia de la base	$M_{rw} = \sqrt{M_i^2 + M_c^2}$	$M_{rw} = 124500.9$ kN m
A_i	%	Parámetro de aceleración espectral impulsiva	$A_i = Sds * \frac{I}{Rwi}$	$A_i = 0.1$ %
W_i	N	Parte impulsiva efectiva del peso del líquido adherido a las paredes del tanque	$W_i = \frac{\tanh(0.866 * \frac{D}{H})}{0.866 * \frac{D}{H}} * Wp$	$W_i = 181456$ kN
X_i	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de acción de fuerzas sísmicas laterales aplicadas a W_i	Como $\frac{D}{H} = \frac{45}{17} = 2.65 \geq 1.333$: $X_i = 0.375 * H$	$X_i = 6.38$ m
W_s	N	Peso total de las paredes del tanque y sus accesorios	$W_s = M_{cuerpo} * g$	$W_s = 3828.5$ kN
X_s	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del cilindro	$X_s = \frac{H_{cil}}{2}$	$X_s = 6.25$ m
W_r	N	Peso total del techo del tanque fijo, incluyendo bastidores, nudillos, cualquier accesorio permanente y 10% de la carga de nieve de diseño del techo (N)	$W_r = M_{domo} * g$	$W_r = 2014$ kN
X_r	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del domo y sus accesorios	$X_r = ZC.M - (Rdomo - H)$	$X_r = 14.6$ m

A_c	%	Parámetro de aceleración espectral convectiva (%)	$A_c = K * Sd1 * \left(\frac{TL}{Tc^2}\right) * \left(\frac{I}{Rwc}\right)$	$A_c = 0.012 \%$
W_c	kN	Porción efectiva de convectiva del peso del líquido	$W_c = 0.230 * \frac{D}{H} * \tanh\left(\frac{3.67*H}{D}\right) * Wp$	$W_c = 244575.1 \text{ kN}$
X_c	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de acción de fuerzas sísmicas laterales aplicadas a W_c	$X_c = \left(1 - \left(\frac{\cosh\left(\frac{3.67*H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67*H}{D} * \sinh\left(\frac{3.67*H}{D}\right)}\right)\right) * H$	$X_c = 9.64 \text{ m}$

Tabla 21: Cálculos del momento del anillo de resistencia de la base

Para calcular la altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del cilindro (X_s), se considera la mitad de la altura del cilindro:

$$X_s = \frac{12.5}{2} = 6.25 \text{ m}$$

La altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del domo y sus accesorios (X_r) se halla:

$$Z_{C.M.} = \frac{\int z dV}{\int dV} = \frac{\pi[R^2 h^2 - Rh^3 + h^4]}{\frac{\pi}{3}[3R-h]} = \frac{3[53.987^2 - 53.987*5.1 + 5.1^2]}{3*53.987 - 5.1} = 51 \text{ m}$$

Como se trata de la altura desde el fondo del tanque:

$$X_r = Z_{C.M.} - (R_{\text{domo}} - H) = 51 - (54 - 17.6) = 14.6 \text{ m}$$

El apartado E.6.1.2.1 de la norma Standard API-650 propone la siguiente fórmula para hallar la altura desde el fondo del tanque hasta el centro de acción de fuerzas sísmicas laterales aplicadas a W_i (X_i)

$$\text{Como } \frac{D}{H} = \frac{45}{17} = 2.65 \geq 1.333:$$

$$X_i = 0.375 * H = 0.375 * 17 = 6.38 \text{ m}$$

Finalmente, la altura desde el fondo del tanque hasta el centro de acción de fuerzas sísmicas laterales aplicadas a W_c (X_c) se calcula a través de la fórmula del apartado E.6.1.2.1 de la norma Standard API-650:

$$X_c = \left(1 - \left(\frac{\cosh\left(\frac{3.67*H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67*H}{D} * \operatorname{senh}\left(\frac{3.67*H}{D}\right)} \right) \right) * H = \left(1 - \left(\frac{\cosh\left(\frac{3.67*17}{45}\right) - 1}{\frac{3.67*17}{45} * \operatorname{senh}\left(\frac{3.67*17}{45}\right)} \right) \right) * 17 =$$

$$\left(1 - \left(\frac{1.25}{2.6} \right) \right) * 17 = \mathbf{9.64 \text{ m}}$$

Por tanto, ya se pueden hallar los momentos de vuelco en el anillo de la base (M_{rw}):

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i * (W_i * X_i + W_s * X_s + W_r * X_r)]^2 + [A_c * (W_c * X_c)]^2} =$$

$$\sqrt{[0.1 * (181456 * 6.38 + 3828.5 * 6.25 + 2014 * 14.6)]^2 + [0.012 * (244575.1 * 9.64)]^2} =$$

$$\mathbf{124500.9 \text{ kNm}}$$

4.9.3.1.3 EFECTOS SÍSMICOS VERTICALES

Se ha de considerar la componente sísmica vertical ya que los efectos de aceleración actúan arriba y abajo en combinación con los horizontales. Los efectos de aceleración verticales no necesitan combinarse simultáneamente para determinar fuerzas, cargas y resistencias al vuelco en el tanque.

Se calcula de forma general de la siguiente manera:

$$F_v = \pm A_v * W_{\text{eff}}$$

Siendo,

F_v= fuerza sísmica vertical total (N).

A_v= coeficiente de aceleración vertical (%). **A_v**=0.14* S_{D1}=0.14*0.106=**0.015%**

W_{eff}= peso efectivo (N).

Se aplicarán estos efectos verticales para los siguientes casos según se especifique:

- Tensiones de tracción en las virolas de la envolvente (**N_i**, **N_c**, **N_h**)
- Tensión de compresión de envolvente—membrana (**σ_c**)
- Diseño del anclaje (**w_a**)
- Deslizamiento (**V_s**)

4.9.3.1.4 FUERZAS EN LAS VIROLAS DEBIDO AL MOVIMIENTO DINÁMICO DEL FLUIDO

Se calculan las fuerzas membranales que provoca el fluido sobre las paredes del tanque de la siguiente manera, que equivalen a una combinación de efectos verticales de aceleración para las tensiones hidrodinámicas.

- Fuerzas membranales impulsivas en las virolas del tanque:

Como $D/H=2.65 < 1.333$ y $Y < 0.75D$

$$N_i = 5.22 * A_i * G * D^2 * \left[\frac{Y}{0.75 * D} - 0.5 * \left(\frac{Y}{0.75 * D} \right)^2 \right]$$

Siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
N_i	N/mm	Fuerza membranal convectiva en las virolas del tanque	$N_i = 5.22 * A_i * G * D^2 * \left[\frac{Y}{0.75 * D} - 0.5 * \left(\frac{Y}{0.75 * D} \right)^2 \right]$	$N_i=717.7$ N/mm
A_i	%	Parámetro de aceleración espectral impulsiva	$A_i = Sds * \frac{I}{Rwi}$	$A_i=0.1\%$
G	-	Gravedad específica	$G = \frac{\rho_{fluido}}{\rho_{agua}}$	$G=1.8$
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	$D=45$ m
H_{liq}	m	Nivel máximo de diseño del producto	Dato de partida	$H=17$ m
Y	m	Distancia desde la superficie libre del líquido al punto a analizar	Por geometría	$Y=16.996$ m
N_c	N/mm	Fuerzas membranales convecticas en las virolas del tanque	$N_c = \frac{1.85 * A_c * G * D^2 * \cosh[3.68(H-Y)/D]}{\cosh(3.68 * H/D)}$	$N_c=38$ N/mm
A_c	%	Parámetro de aceleración	$A_c = K * Sd1 * \left(\frac{TL}{Tc^2} \right) * \left(\frac{I}{Rwc} \right)$	$A_c=0.012$ %

		espectral convectiva (%)		
N_h	N/mm	Fuerza membranal debido a la presión hidrostática	Por Teoría Membranal	$N_h=13494$ N/mm
σ_T	N/mm	Presión combinada de los efectos verticales	$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + (A_v \cdot N_h)^2}}{t}$	$\sigma_{T1}=342$ MPa $\sigma_{T1}=306.13$ MPa
A_v	%	Coefficiente de aceleración vertical	$A_v=0.14 \cdot S_{D1}$	$A_v=0.015\%$

Tabla 22: Cálculos de la fuerza membranal convectiva en las virolas del tanque

Para hallar la gravedad específica del fluido se divide la densidad del fluido por la del agua:

$$G = \frac{\rho_{\text{fluido}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{1800 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 1.8$$

A continuación, se halla la distancia desde la superficie libre del líquido al punto a analizar (Y). Según el apartado E.6.1.4 de la norma Standard API-650, se tomará el eje positivo hacia abajo desde la superficie libre. Para el caso que interesa, se hallará Y en el punto más desfavorable, la última virola. Por tanto:

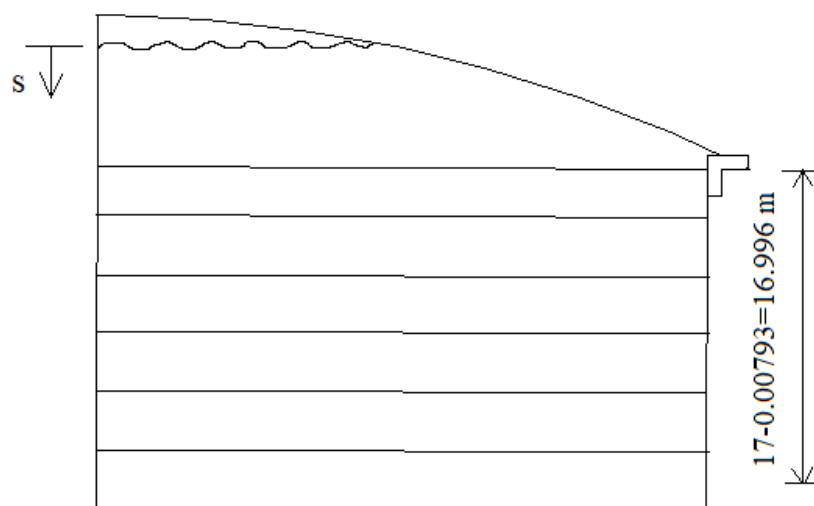


Figura 68: Situación del punto a analizar para el cálculo de las fuerzas membranales

$$Y = 17 \text{ m} - \frac{7.93e-3}{2} = \mathbf{16.996 \text{ m}}$$

Por tanto, ya se puede sustituir en la fórmula:

$$N_i = 5.22 * A_i * G * D^2 * \left[\frac{Y}{0.75 * D} - 0.5 * \left(\frac{Y}{0.75 * D} \right)^2 \right] = 5.22 * 0.1 * 1.8 * 45^2 * \left[\frac{16.996}{0.75 * 45} - 0.5 * \left(\frac{16.996}{0.75 * 45} \right)^2 \right] = \mathbf{717.7 \text{ N/mm}}$$

Para hallar la fuerza membranales convectiva en la última virola del tanque, se sustituyen los datos de antes en la fórmula:

$$N_c = \frac{1.85 * A_c * G * D^2 * \cosh[3.68(H-Y)/D]}{\cosh(3.68 * H/D)} = \frac{1.85 * 0.032 * 1.8 * 45^2 * \cosh[3.68(17 - 16.996)/45]}{\cosh(3.68 * 17/45)} = \mathbf{38 \text{ N/mm}}$$

Por último, se pide calcular la fuerza membranal hidrostática del producto (N_h), la cual se hallará por la teoría membranal:

$$P_z = -\gamma * s$$

$$\rho_m = \text{inf.}$$

$$\rho_t = R$$

Por tanto, aplicando Laplace: $n_t = -P_z * \rho_t = \gamma * s * R = \rho * g * s * R = -1800 * 9.8 * 45 * s = -793800 * s$

$$\text{Para } s=0: n_t=0$$

$$\text{Para } s=17: n_t=13494600 \text{ N/m}=13494 \text{ N/mm}$$

Por equilibrio: $n_m=0$

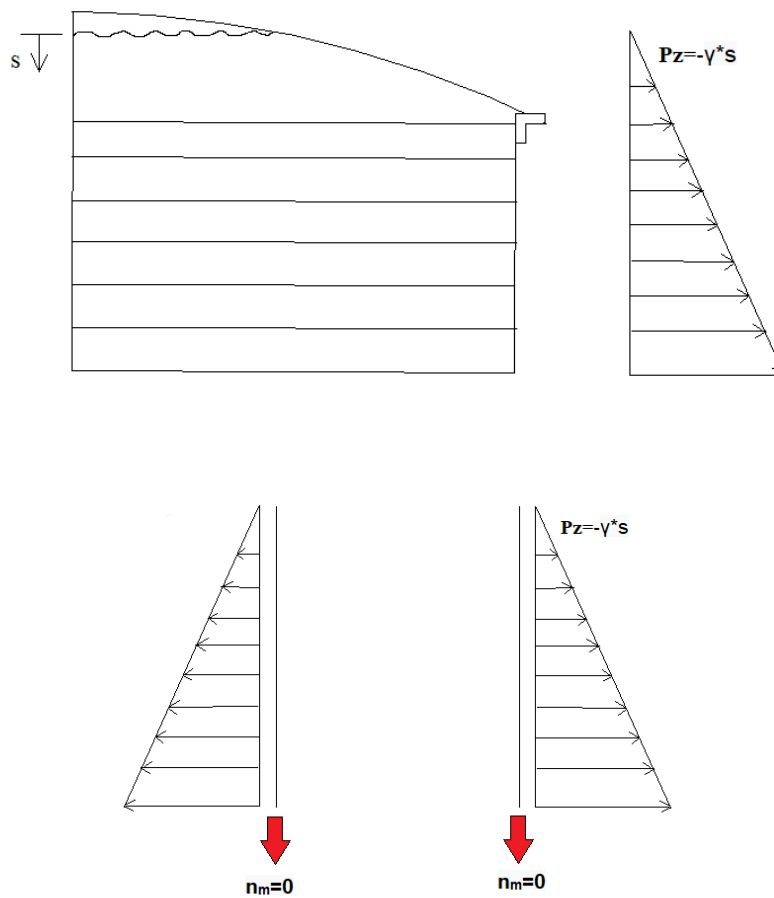


Figura 69: Cálculo de a fuerza membranal hidrostática según la Teoría Membranal

Por tanto $Nh=nt=13494 \text{ N/mm}$

Para calcular la presión combinada de los efectos verticales (σ_T) se calcula como la suma de la presión hidrostática del producto sobre las virolas (σ_h) y la presión en las virolas debido a los efectos impulsivos y convectivos del producto (σ_s):

$$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{Nh \pm \sqrt{Ni^2 + Nc^2 + (Av * Nh)^2}}{t} = \frac{13494 \pm \sqrt{717.7^2 + 38^2 + (0.015 * 13494)^2}}{41.64} = \frac{13494 \pm 746.7}{41.64}$$

$$\sigma_{T1} = 342 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{T2} = 306.1 \text{ MPa}$$

Como la resistencia a tracción para el acero AISI 347 H es de 520-1100 MPa, los efectos verticales no causan problemas.

4.9.3.2 RESISTENCIA A LAS CARGAS DE DISEÑO

Cuando se consideran los efectos sísmicos, las tensiones permisibles de los elementos estructurales operando en condiciones normales se elevan un 33% como se verá más adelante.

4.9.3.2.1 ANCLAJE

Un tanque se considera auto-anclado cuando se puede llevar a cabo éste a través de su configuración y el peso del producto. Si no se consiguiera el auto-anclaje, se anclaría a través de dispositivos mecánicos como son correas o pernos.

El anclaje proporcionado depende del ancho supuesto de un anillo inferior levantado por el momento de vuelco.

Como en el cálculo de comprobación a la carga de viento resultó que era necesario anclar el tanque, éste se realizará a través de uniones mecánicas.

4.9.3.2.2 COMPRESIÓN DE LA ENVOLVENTE EN TANQUES MECÁNICAMENTE AISLADOS

Para calcular la tensión de compresión máxima longitudinal de la envolvente en la última virola se aplica la fórmula del apartado E.6.2.2.2 de la norma Standard API-650 siguiente:

$$\sigma_c = (w_t * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * Mrw}{D^2}) * \frac{1}{1000 * t_1}$$

siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
σ_c	MPa	Compresión máxima longitudinal de la envolvente en tanques mecánicamente	$\sigma_c = (w_t * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * Mrw}{D^2}) * \frac{1}{1000 * t_1} =$	$\sigma_c = 1.01$ MPa
w_t	N/m	El peso del tanque y del techo que actúa en la base del tanque	$w_t = [\frac{W_s}{\pi D} + w_{rs}]$	$w_t = 41327.2$ N/m
W_s	N	Peso total de las paredes del tanque y sus accesorios	$W_s = M_{cuerpo} * g$	$W_s = 3828.5$ kN

w_{rs}	N/m	El peso total de la envolvente del tanque y sus accesorios, ya calculado anteriormente	$w_{rs} = \frac{W_{rs}}{\pi D} = \frac{2014}{\pi * 45}$	$w_{rs} = 14246.1$ N/m
A_v	%	Coefficiente de aceleración de terremoto vertical	$A_v = 0.14 * SD1$	$A_v = 0.015\%$
M_{rw}	N m	Momento del anillo de resistencia de la base	$M_{rw} = \sqrt{M_i^2 + M_c^2}$	$M_{rw} = 124500.9$ kN m
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	D=45 m
t_1	mm	Espesor de la envolvente	$td = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{Sd * E} + CA$	$t_1 = 41.64$mm

Tabla 23: Cálculos de la compresión de la envolvente en tanques mecánicamente aislados

Previamente, hay que calcular el peso del tanque y del techo que actúa en la base del tanque (w_t) como:

$$w_t = \left[\frac{W_s}{\pi D} + w_{rs} \right]$$

donde W_s el peso total de la envolvente del tanque y sus accesorios, ya calculado anteriormente y w_{rs} la carga de techo que actúa sobre la membrana de la envolvente incluido el 10% de carga de nieve.

$$w_{rs} = \frac{W_{rs}}{\pi D} = \frac{2014}{\pi * 45} = 14246.1 \text{ N/m}$$

Por tanto,

$$w_t = \left[\frac{W_s}{\pi D} + w_{rs} \right] = \left[\frac{3828500}{\pi * 45} + 14246.1 \right] = 41.33 \frac{kN}{m} = 41327.2 \text{ N/m}$$

$$\sigma_c = (w_t * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * Mrw}{D^2}) * \frac{1}{1000 * t_1} = (41327.2 * (1 + 0.4 * 0.015) + \frac{1.273 * 124500.9}{45^2}) * \frac{1}{1000 * 41.64} = 1.01 \text{ MPa}$$

4.9.3.2.3 TENSION DE COMPRESIÓN DE LA ENVOLVENTE-MEMBRANA LONGITUDINAL PERMISIBLE EN LA CARCASA DEL TANQUE

La tensión permisible sísmica (F_c) ha de ser mayor que la tensión de compresión máxima longitudinal (σ_c) ya que se ha elevado un 33% debido al efecto sísmico como ya se había descrito. F_c se determina de la siguiente manera considerando el efecto de la presión interna debido al contenido líquido:

$$\text{Como } \frac{G * H * D^2}{t_6^2} = \frac{1.8 * 17 * 45^2}{7.93} = 7814 \geq 44 \rightarrow F_c = 83 * t_6 / D$$

Siendo,

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
F_c	MPa	Tensión permisible sísmica	$F_c = 83 * t_6 / D$	$F_c = 76.8$ MPa
G	-	Gravedad específica	$G = \frac{\rho_{fluido}}{\rho_{agua}}$	G=1.8
H_{liq}	m	Nivel máximo de diseño del producto	Dato de partida	H=17 m
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	D=45 m
t_6	mm	Espesor de la primera virola	$td = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{Sd * E} + CA$	$t_6 = 7.93$ mm

Tabla 24: Cálculos de la tensión permisible sísmica

Resultando:

$$\frac{G * H * D^2}{t_6^2} = \frac{1.8 * 17 * 45^2}{7.93} = 7814 \geq 44 \rightarrow F_c = \frac{83 * t_6}{D} = \frac{83 * 41.64}{45} = 76.8 \text{ MPa} > \sigma_c$$

5 AISLAMIENTO DEL DEPÓSITO

El depósito es cubierto por paneles rígidos que sirven de aislante térmico. La función de estos paneles es evitar el flujo de calor entre el fluido interior y el ambiente exterior para reducir al máximo las pérdidas de calor. Esto se implica un ahorro de energía en el mantenimiento del proceso en equilibrio térmico, lo que conlleva un ahorro en costes y tiempos de vida más largos.

La inexistencia de aislantes, especialmente en tanques que contienen productos de alta temperatura, podría provocar pérdidas de material, incendios de materiales combustibles, reducción del impacto ambiental o daños humanos, así como un aumento general de costes.

La Guía de las Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial recomienda que en procesos industriales las pérdidas máximas recomendadas sean menores de 90 W/m^2 . Por esto, se hará un balance energético del tanque eligiendo un tipo y una marca de aislante.

Los principales aislantes que se utilizan en la industria son los siguientes:

- *Lana mineral*: Son productos naturales entrelazados en filamentos formando un fieltro. Es comúnmente utilizado en tanques ya que existe una amplia gama de productos. Soportan temperaturas entre 0° y 800°C .
- *Vidrio expandido*: Producto elaborado a partir de polvo de vidrio cocido. Su temperatura de trabajo es aproximadamente desde -265°C a 430°C .
- *Fibra cerámica*: Formado por filamentos de alúmina y sílice con fibras orgánicas. Consiguen resistir altas temperaturas ($\leq 1200^\circ\text{C}$)
- *Espumas de polietileno*: Se trata de espumas plásticas con base de polietileno cuyo rango de temperatura de trabajo va desde -220°C hasta 175°C .

Una vez estudiadas en profundidad las características de estos tipos de aislantes, se eligió la lana mineral como material aislante. Los argumentos de esta selección fueron: dadas las características del depósito en concreto (el fluido contenido puede llegar a 600°C); la temperatura exterior según su situación geográfica (en Las Vegas no es común temperaturas bajo 0°C durante todo el año); y por último, el gran volumen de oferta de lanas minerales en el mercado.

Una vez seleccionado el tipo de aislante, de las distintas marcas existentes se ha tomado la lana de roca TECH Slab HT 6.1 de la marca ISOVER (htt8). Sus aplicaciones son en grandes depósitos de alta temperatura, calderas de calefacción e industriales y hornos industriales principalmente. Proporcionan aislamiento térmico, acústico y calorifugado. Las propiedades técnicas más relevantes se reúnen en la siguiente tabla:

	Símbolo	Unidades	Valor
Conductividad térmica declarada	λ_D	$\text{W/m}\cdot\text{k}$	0,039 - 0,172
Reacción al fuego		Euroclase	A1
Temperatura máxima de servicio		$^\circ\text{C}$	700
Absorción de agua	WS	Kg/m^2	< 1
Resistencia a la difusión del vapor de agua, μ	MU		1
Estabilidad dimensional, $\Delta\epsilon$		%	< 1

Figura 70: Características del aislamiento

A continuación, se realizará un equilibrio térmico de la pared del tanque junto con los paneles de lana mineral seleccionados. Se ha impuesto que el flujo de calor máximo de conducción entre el fluido y la sección de tanque sea de 90 W/m^2 (pérdidas máximas) y un incremento de temperaturas entre la pared y el aislante de 5°C como máximo. Así, se podrá calcular una aproximación del espesor de panel aislante para la base, la envolvente y el domo. Por tanto, iterando espesores para cada caso:

Datos:

Conductividad de la pared de acero AISI 347H (100°C)= 16.3 W/mK

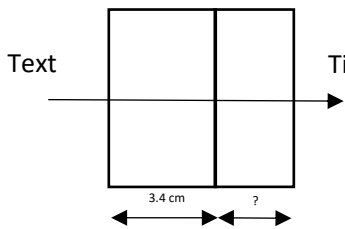
Conductividad del aislante TECH Slab HT 6.1 (100°C)= 0.044 W/mK

Espesor medio de la envolvente cilíndrica= 3.4 cm

Espesor del domo= 1.3 cm

Espesor de la base= 2 cm

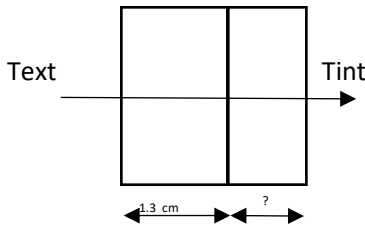
- *Espesor panel aislante en la envolvente:*



$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}}$$

$$90 = \frac{5}{\frac{0.034}{16.3} + \frac{e_{aisl}}{0.044}} \rightarrow e_{aisl} = 0.053 \text{ m} = 5.3 \text{ cm}$$

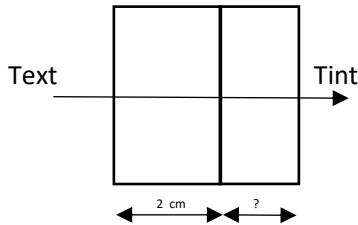
- *Espesor panel aislante en el domo:*



$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}}$$

$$90 = \frac{5}{\frac{0.013}{16.3} + \frac{e_{aisl}}{0.044}} \rightarrow e_{aisl} = 0.055 \text{ m} = 5.5 \text{ cm}$$

- *Espesor panel aislante en la base:*



$$q \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total}}$$

$$90 = \frac{5}{\frac{0.02}{16.3} + \frac{e_{aisl}}{0.044}} \rightarrow e_{aisl} = 0.054 \text{ m} = \mathbf{5.4 \text{ cm}}$$

Se concluye que, para el tanque propuesto, el espesor de aislante es aproximadamente de 5 cm. Se ha de señalar que, tratándose de un cálculo general, no se han tenido en cuenta flujos de calor de convección ni radiación.

Por último, se tendrá en cuenta que para la colocación de las planchas de aislantes hay que seguir la siguiente secuencia:

1. Soporte del aislamiento
2. Colocación del material aislante
3. Protección metálica (recubrimiento)
4. Montaje
5. Acabado final
6. Mantenimiento

A continuación se muestran algunos detalles de colocación del material aislante (paso 2) para los casos siguientes:

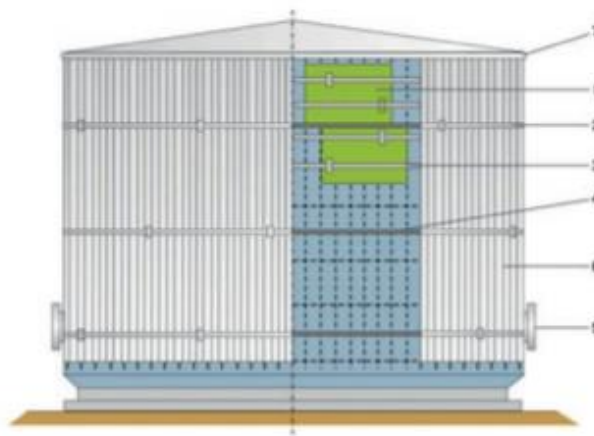


Figura 71: Colocación de los paneles en la envolvente cilíndrica

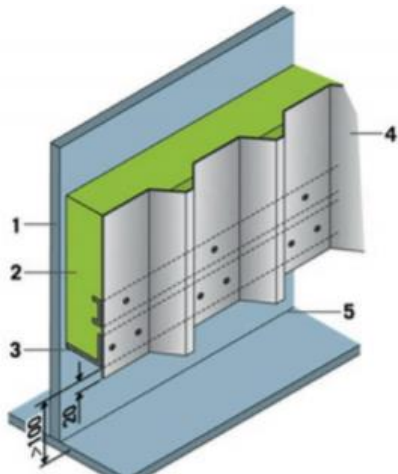


Figura 72: Unión fondo del tanque, pared cilíndrica y recubrimiento exterior

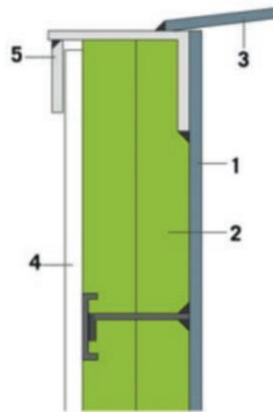


Figura 73: Unión anillo coronación-domo-envolvente

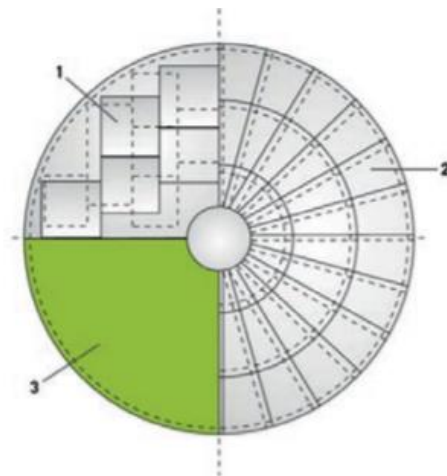


Figura 74: Colocación de los paneles en el domo

6 CONCLUSIONES

Tras la elaboración de este proyecto, se ha llegado a la conclusión de que intervienen numerosos factores en el diseño de un depósito para su correcto funcionamiento. Entre otros se encuentran la selección del material, la forma, espesores de la base, cuerpo y techo, el anillo de coronación, el anclaje y el aislamiento.

En primer lugar, antes de la realización de cálculos específicos, dos factores relevantes son la forma y el material del depósito. La selección de la forma va a venir determinada principalmente por su uso y el producto contenido, y la selección del material esencialmente por el tipo de producto contenido y los agentes externos. Por esto, se considera que es importante estudiar y contemplar las diferentes alternativas existentes antes de realizar cualquier cálculo.

Después de la elección de estos dos factores de diseño y la realización de los cálculos de comprobación de cargas propuestas, se determina la enorme importancia del elemento del anillo de coronación. En la comprobación a cargas de presión interna y externa de diseño y presión hidrostática con ANSYS, se pudo observar la diferencia entre la adición de éste o no. Se ha considerado que es un elemento esencial para rigidizar la primera virola dado su mínimo espesor y las elevadas cargas a las que está expuesto. Asimismo, en la comprobación con cálculos de la carga de viento y del sismo, se puede observar la importancia de estas cargas junto con el peso de los elementos del tanque para provocar un momento de vuelco elevado en la base de éste. Se ha comprobado que es necesario anclarlo para evitar el vuelco del tanque debido a estas cargas, en las que indirectamente influyen el peso del acero, la altura y el diámetro del tanque.

Para terminar, al tratarse de un depósito que contiene un fluido a alta temperatura, ésta ha sido una variable determinante en el cálculo. Como el producto puede llegar a alcanzar los 600°C, se han tenido que considerar aspectos en el cálculo (que aparecen en los anejos de la norma Standard API-650), que no se tienen en cuenta a menores temperaturas. Además de esto, se ha de señalar la correcta selección de un aislamiento, que ayuda a evitar las pérdidas de las cargas y mejora el rendimiento del tanque.

7 SOSTENIBILIDAD Y RESPONSABILIDAD SOCIAL

La labor de un ingeniero consiste, además de resolver problemas de la manera más eficiente, en tener en consideración ciertos aspectos relacionados con la responsabilidad social y el respeto al medio ambiente, aun suponiendo un coste económico superior al pretendido.

Para este proyecto en particular, se señalarán a continuación ejemplos de decisiones que se han tomado para contemplar estas implicaciones éticas.

En primer lugar, el uso de este tipo de depósitos de almacenamiento en centrales termosolares ya supone un ahorro de energía, ya que podría desaprovecharse si las sales fundidas no tuviesen donde acumularse.

A la hora de elegir la forma de un depósito de este tipo, el ingeniero es el encargado de tomar la decisión de si poner techo a un fluido que puede ser dañino para el ambiente o no. Ésta consistiría en otra medida de responsabilidad con el medio.

Asimismo, el material del tanque podría ser contaminante con el suelo o el aire, o ser corrosivo con la piel, por tanto se ha de tomar el más adecuado respetando al medio y al trabajador.

Se han de tener en cuenta medidas de seguridad para los trabajadores, además de facilitarle sus tareas como la colocación de escaleras para la inspección del techo y del producto almacenado, o por ejemplo situar las suficientes bocas de hombre para simplificar la inspección del interior del tanque.

Por último, la selección de un aislamiento adecuado supondrá un ahorro energético, que implicará un ahorro económico e igualmente se considera una medida de sostenibilidad.

En resumen, se demuestra la importancia de estos aspectos en el ámbito de la ingeniería ya que es necesario incorporarlos a la hora de tomar decisiones.

8 BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). Obtenido de <http://www.ingenieriadepetroleo.com/tipos-de-tanques-de-almacenamiento/>
- (s.f.). Obtenido de <http://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/AISI-347347H-Niobium-Stabilized-Austenitic-Stainless.pdf>
- (s.f.). Obtenido de https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/silos/ASCE_JPCF_Silos_3_2009.pdf
- (s.f.). Obtenido de <http://snowload.atcouncil.org/index.php/component/vcpsnowload/item>
- (s.f.). Obtenido de <https://earthquake.usgs.gov/designmaps/beta/us/>
- (s.f.). Obtenido de <https://www.isover.es/productos/tech-slab-ht-61>
- ANSYS. (s.f.). Obtenido de <http://www.ansys.com/customerportal/>. Ansys Customer Portal.
- Arslan, M. A. (2015). *Hands on Applied Finite Element Analysis. Application with ANSYS*. New York: Arslan.
- ASCE 7. (s.f.). Obtenido de https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_waterfix/exhibits/docs/dd_jardins/DDJ-148%20ASCE%207-10.pdf
- ASTM. (s.f.). Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/A240.htm>
- Diseño y Cálculo de Tanques de Almacenamiento*. (s.f.). Obtenido de <http://www.inglesa.com.mx/books/DYCTA.PDF>
- Institute, A. P. (2007). *API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage*.
- Jangid, M. S. (2002). *Earthquake Response of Liquid Storage Tanks with Sliding Systems*. Obtenido de http://www.iiees.ac.ir/fa/wp-content/uploads/2009/04/V4N2-3_SummerFall02_5.pdf
- Malhotra, P., Wenk, T., & and Wieland, M. (2000). *Simplified Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks*.
- UNESA. (s.f.). Obtenido de <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1350-central-solartermica>

9 PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

9.1 PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Para la realización de este proyecto se han empleado una aproximación de 320 horas desde finales de septiembre de 2017 hasta mediados de junio de 2018. Desde su comienzo hasta mediados de mayo de 2018 se han dedicado una media de 2h diarias compaginando actividades laborales y de formación universitaria, y a partir de abril de 2018 hasta su finalización, de 5h diarias. Se han recogido en la siguiente tabla las horas aproximadas por cada actividad y en el diagrama de Gantt las distintas fases desarrolladas a lo largo del periodo total.

ACTIVIDAD	HORAS
Búsqueda de información general	8
Selección de la forma del tanque	12
Selección del material del tanque	12
Cálculo del espesor del cuerpo	18
Cálculo del espesor del techo	22
Diseño del anillo de coronación	26
Comprobación para carga de viento	22
Comprobación para carga sísmica	48
Revisión de resultados y dudas	22
Selección del aislante	10
Comprobaciones en ANSYS	32
Comparativa final	10
Redacción de la memoria	35
Correcciones	40
Tutorías	5
TOTAL	322

Figura 75: Horas de las actividades realizadas en el proyecto

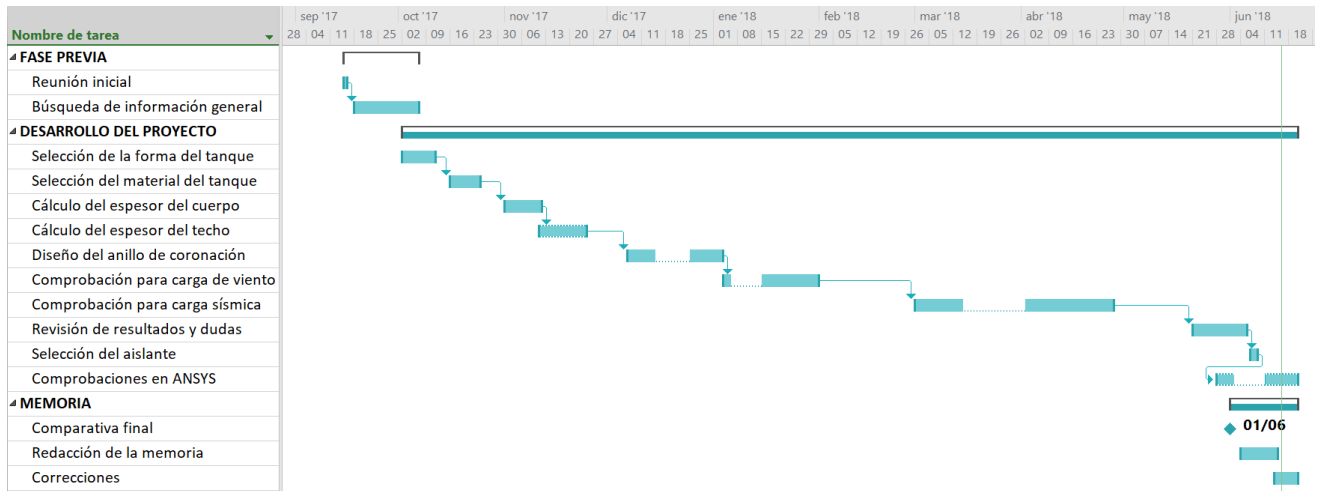


Figura 76: Diagrama de Gantt

9.2 PRESUPUESTO

El presupuesto supone la evaluación económica de este proyecto, en el que han considerado en los siguientes criterios:

- Horas trabajadas por el alumno
- Horas trabajadas por el profesor
- Licencia de ANSYS
- Licencia de Microsoft

La licencia de ANSYS se ha obtenido de manera gratuita debido a que se trata de la versión estudiantil y la de Microsoft se puede adquirir gratuitamente como alumno de la UPM.

No se han tenido en cuenta amortizaciones, como el ordenador, ni la electricidad consumida ya que es un uso que iba a ser consumido realizando o no el proyecto, además de que no lo encarecería en gran cantidad.

A estos conceptos, hay que añadir el Impuesto al Valor Agregado (IVA). Consiste en integrar un 21% al subtotal de los servicios y productos adquiridos por el comprador.

Por tanto, el resultado total del presupuesto será de **7018€**

CONCEPTO	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	COSTE (€)
Horas del alumno (h)	320	15	4800
Horas del profesor (h)	25	40	1000
Licencia ANSYS (ud.)	1	0	0
Licencia Microsoft (ud.)	1	0	0
SUBTOTAL			5800
IVA		21%	1218
TOTAL+IVA			7018

Figura 77: Presupuesto del proyecto

10 GLOSARIO, UNIDADES Y RESULTADOS

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	MODO DE OBTENCIÓN	VALOR
t_t y t_d	mm	Espesor de la envolvente	El mayor entre: $t_t = \frac{4.9 \cdot D \cdot (H - 0.3)}{S_t \cdot E}$ $t_d = \frac{4.9 \cdot D \cdot (H - 0.3) \cdot G}{S_d \cdot E} + CA$	$t_1 = 41.64$ mm $t_2 = 34.60$ mm $t_3 = 27.58$ mm $t_4 = 20.55$ mm $t_5 = 13.52$ mm $t_6 = 7.93$ mm
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	D=45 m
H	m	Altura de diseño del nivel del líquido	$H = H_i - 2.09$	$H_1 = 12.5$ m $H_2 = 10.41$ m $H_3 = 8.32$ m $H_4 = 6.23$ m $H_5 = 4.14$ m $H_6 = 2.05$ m
G	-	Gravidad específica	$G = \frac{\text{Densidad del líquido}}{\text{Densidad del agua}}$	G=1.8
CA	mm	Corrosión permisible	Dato de partida	CA=0.6 mm
S_d	MPa	Esfuerzo permisible por condiciones de diseño	Figura 16	$S_d = 118$ MPa
S_t	MPa	Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática	Figura 17	$S_t = 155$ MPa
t_{domo}	mm	Espesor de techo	4) $\frac{rr}{2.4} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA$ 5) $\frac{rr}{2.7} \sqrt{\frac{U}{2.2}} + CA$ 6) 5 mm Siendo $t_{\text{domo}} < 13$ mm	$t_{\text{domo}} = 13$ mm

r_r	m	Radio del techo	Según apartado 5.10.6.1 API-650	$r_r=54$ m
T	kPa	El mayor de las combinaciones de las cargas de gravedad con carga de nieve equilibrada S_b	$T = \max.(p_{h3}, p_{h6})$	T=1.594 kPa
U	kPa	El mayor de las combinaciones de las cargas de gravedad sin carga de nieve equilibrada S_u	$U = \max.(p_{h2}, p_{h5})$	U=1.634 kPa
p_{hi}	kPa	Combinaciones de carga para el cálculo del espesor de domo	$p_{h1} = D_L + L_r + 0.4P_e$ $p_{h2} = D_L + S_u + 0.4 P_e$ $p_{h3} = D_L + S_b + 0.4 P_e$ $p_{h4} = D_L + P_e + 0.4 L_r$ $p_{h5} = D_L + P_e + 0.4 S_u$ $p_{h6} = D_L + P_e + 0.4 S_b$	$p_{h1}=2.214$ kPa $p_{h2}=1.514$ kPa $p_{h3}=1.414$ kPa $p_{h4}=1.914$ kPa $p_{h5}=1.634$ kPa $p_{h6}=1.594$ kPa
D_L	kPa	Carga muerta del domo	$D_L = \rho * e_{domo} * g$	$D_L=1.014$ kPa
L_r	kPa	La fuerza ejercida por cuerpos externos, tales como: nieve, lluvia, viento, personas y/o objetos en tránsito, etc	Código ASCE 7	$L_r=1$ kPa
P_e	kPa	Presión externa específica	Dato de partida	$P_e=0.5$ kPa
S_u	kPa	Carga de nieve sin equilibrar	$S_u = 1.5 * S_b = 1.5 * 0.2 = 0.3$ kPa	$S_u=0.3$ kPa
g	m/s ²	Constante de gravedad	Dato de partida	$g=9.8$ m/s²
ρ_{acero}	kg/m ³	Densidad del acero	Dato de partida	$\rho_{acero}=7960$ kg/m³
S_b	kPa	Carga de nieve equilibrada	$S_b = 0.84 * S_g$	$S_b=0.2$ kPa
S_g	kPa	Carga de nieve de suelo	Código ASCE 7	$S_g=0.239$ kPa

A _{min}	m ²	Área de participación en la junta entre el techo y el cuerpo bajo presión externa	$A_{min} = \frac{Ph * D^2}{8 * Fa * \tan\theta}$	A_{min}=0.010 m²
P _h	kPa	Mayor de las combinaciones de carga entre p _{h1} , p _{h2} , p _{h3} , p _{h4} , p _{h5} y p _{h6}	P _h =max(p _{h1} , p _{h2} , p _{h3} , p _{h4} , p _{h5} y p _{h6})	P_h=2.214 kPa
Fa	MPa	Tensión de tracción mínima permisible	Fa=Sd ya que es el esfuerzo permisible por condiciones de diseño	Fa=118 MPa
θ	°	Ángulo del cono a la horizontal	Por geometría	θ=25.2 °
A	mm ²	Área de compresión total requerida en la unión techo y cuerpo bajo presión interna	$A = \frac{200 * D^2 * (Pi - 0.08 * th)}{Fy * \tan\theta}$	A=0.016mm²
P _i	kPa	Presión interna de diseño	Dato de partida	P_i= 3 kPa
t _h =t _{domo}	mm	Espesor nominal del techo	7) $\frac{rr}{2.4} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA$ 8) $\frac{rr}{2.7} \sqrt{\frac{U}{2.2}} + CA$ 9) 5 mm Siendo t _{domo} <13 mm	t_h=13 mm
F _y	MPa	Límite de elasticidad mínimo especificado	Figura 22	F_y=105 MPa
H ₁	m	Altura entre la viga de viento intermedia y el ángulo superior de la cubierta	$H_1 = 9.47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} * \left(\frac{190}{V}\right)^2$	H₁=9.54 m
t	mm	Espesor más delgado del cuerpo del tanque	t=t ₆	t=7.93 mm
v	Km/h	Velocidad del viento de diseño	Dato de partida	v=145 km/h
H _{tr}	m	Altura de la pared transformada	$H_{tr} = \sum W_{tr, i} = W_{tr, 1} + W_{tr, 2} + W_{tr, 3} + W_{tr, 4} + W_{tr, 5} + W_{tr, 6}$	H_{tr}=3.01 m

W_{tr}	mm	Ancho traspuesto de cada anillo	$W_{tr} = W * \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5}$	$W_{tr,1}=33.08 \text{ mm}$ $W_{tr,2}=52.56 \text{ mm}$ $W_{tr,3}=92.65 \text{ mm}$ $W_{tr,4}=193.33 \text{ mm}$ $W_{tr,5}=550.67 \text{ mm}$ $W_{tr,6}=2090 \text{ mm}$
W	mm	Ancho real de cada anillo	$W = \frac{\text{altura del cilindro}}{n^{\circ} \text{ de virolas}}$	$W=2090 \text{ mm}$
$t_{uniforme}$	mm	Espesor real del anillo más delgado	$t_{uniforme}=t_6$	$t_{uniforme}=7.93 \text{ mm}$
M_{Pi}	kN m	Momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión interna del diseño	$M_{Pi} = \frac{1}{2} * D * F$	$M_{Pi}=107354.1 \text{ kN m}$
M_w	kN m	Momento de vuelco sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión del viento horizontal y vertical	$M_w = Pws * D * H * \frac{H}{2} + Pws * D * \frac{H}{2} * \frac{H}{2} + Pwr * \pi * \frac{D^2}{4} * \frac{D}{2}$	$M_w=32695.9 \text{ kN m}$
M_{DL}	kN m	Momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del techo	$M_{DL} = Pt * \frac{D}{2}$	$M_{DL} = 114309 \text{ kN m}$
M_F	kN m	Momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del líquido	$M_F = F * \frac{D}{2}$	$M_F = 158579.1 \text{ kN m}$
$F_{b,diseño}$	N	Fuerza debido a la presión interna de diseño	$F_{lev}=P_1 * A_{int}$	$F_{b,diseño}=4771.29 \text{ kN}$
P_{ws}	kPa	Presión sobre el depósito debido al viento	$P_{ws}=0.86 * \left(\frac{v}{190}\right)^2$	$P_{ws}=0.50 \text{ kPa}$
P_{wr}	KPa	Presión sobre el techo debido al viento	$P_{wr}=1.44 * \left(\frac{v}{190}\right)^2$	$P_{wr}=0.84 \text{ kPa}$
H	m	Altura total del tanque	Dato de partida	$H=17.6 \text{ m}$

h	m	Altura del cuerpo del tanque	Dato de partida	h=12.5 m
H _{liq}	m	Altura de diseño del líquido	Dato de partida	H_{liq}=17 m
P _T	kN	Peso del domo y de la carcasa	P_T=P_{domo}+P_{cilindro}	P_T=114309 kN
P _{domo}	kN	Peso del domo	P_{domo}= M_{domo} * g	P_{domo}=1751.3 kN
P _{cilindro}	kN	Peso del cilindro	P_{cilindro}= M_{cilindro} * g	P_{cilindro}=3329.1 kN
V _{domo}	m ³	Volumen del domo	Por geometría	V_{domo}=22.45 m³
V _{cilindro}	m ³	Volumen del cilindro	Por geometría	V_{cilindro}=42.68 m³
F _{liq}	kN	Fuerza del peso del líquido	$F_{liq} = \frac{W_L * \pi * \frac{D}{1000}}{1000} = 59 * t_b * \sqrt{F_{by} * H} * \pi * \frac{D}{1000}$	F_{liq}=7048 kN
t _b	mm	Espesor de la placa inferior bajo la carcasa usado para resistir la carga de vuelco de viento	Según la Standard API-650	t_b= 2 cm
F _{by}	MPa	Límite elástico mínimo especificado de la placa inferior bajo la carcasa	Dato del acero AISI 347H seleccionado.	F_{by}=105 MPa
t _u	mm	Espesor equivalente uniforme de la carcasa del tanque	$t_u = \frac{\Sigma t_i}{6}$	t_u=24.3 mm
T _i	s	Periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento impulsivo	$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{C_i * H \sqrt{\rho}}{\sqrt{t_u} \sqrt{E}}$	T_i=0.347 s
ρ _{liq}	kg/m ³	Densidad del fluido	Dato de partida	ρ_{liq}=1800 kg/m³

E	GPa	Módulo de elasticidad del material del tanque	Dato tomado del acero AISI 347H	E=196 GPa
C _i	-	Coefficiente para determinar el periodo impulsivo del tanque	Figura 60	C_i= 7.00
T _c	s	Periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento convectivo	$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt{D}$	T_c=7.17 s
K _s	-	Coefficiente del periodo de desbordamiento	$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * H}{D}\right)}}$	K_s=0.594
S _{DS}	%	Parámetro de aceleraciones de respuesta espectral al 5% de amortiguamiento de diseño en periodos cortos (T=0.2 s) basado en los métodos ASCE 7	Según ASCE 7	S_{DS}=0.320 %
R _{wi}	-	Factor de reducción de fuerza para el modo impulsivo utilizando métodos de diseño de tensión permisible	Figura 62	R_{wi}=4
K	-	Coefficiente para ajustar la aceleración espectral desde el 5% hasta el 0.5% de amortiguación	Según Standard API-650	K=1.5
S _{DI}	%	Parámetro de aceleraciones de respuesta espectral al 5% de amortiguamiento de diseño en periodos cortos (T=1 s) basado en los métodos ASCE 7	Según ASCE 7	S_{DI}=0.106%
T _L	s	Periodo de transición dependiente de la región para largos periodos de movimientos de tierra	Según ASCE 7	T_L=6 s

T_c	s	El primer periodo de onda de comportamiento convectivo	$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt{D}$	$T_c = 7.17$ s
I	-	Coefficiente de factor de importancia dado por un grupo de uso sísmico	Figura 63	$I = 1.25$
R_{wc}	-	Factor de reducción de fuerza para el modo convectivo usando métodos de diseño de tensión permisibles	Figura 62	$R_{wc} = 2$
V	kN	Cizalladura sísmica en la base	$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2}$	$V = 19203.6$ kN
V_i	kN	Cizalladura de diseño en la base debido a la componente impulsiva del peso efectivo del tanque y su contenido	$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i)$	$V_i = 18978$ kN
V_c	kN	Cizalladura de diseño en la base debido a la componente convectiva del peso efectivo del oleaje	$V_c = A_c * W_c$	$V_c = 2934.9$ kN
W_s	kN	Peso total de las paredes del tanque y sus accesorios	$W_s = M_{cuerpo} * g$	$W_s = 3828.5$ kN
W_r	kN	Peso total del techo del tanque fijo, incluyendo bastidores, nudillos, cualquier accesorio permanente y 10% de la carga de nieve de diseño del techo (N)	$W_r = M_{domo} * g$	$W_r = 2014$ kN
W_f	kN	Peso del fondo del tanque	$W_f = \pi * R^2 * e * \rho * g$	$W_f = 2481.3$ kN
W_p	kN	Peso total del contenido del tanque basado en la gravedad específica del diseño del producto	$W_p = \rho_L * g * (Vol_{fluido \text{ en el cuerpo}} + Vol_{fluido \text{ en el domo}})$	$W_p = 424610.1$ kN
$Vol_{f, cilindro}$	m^3	Volumen de fluido en el cilindro	$Vol_{fluido \text{ en el cilindro}} = \pi * R_{ext, cil}^2 * h$	$Vol_{f, cilindro} = 19859.2$ m^3

$Vol_{f, \text{domo}}$	m^3	Volumen de fluido en el domo	$Vol_{\text{fluido en el domo}} = \frac{\pi}{3} [h1 * (3 * R_{\text{domo}} - h1) - h2 * (3 * R_{\text{domo}} - h2)]$	$Vol_{f, \text{domo}} = 4211.7 \text{ m}^3$
W_i	kN	Parte impulsiva efectiva del peso del líquido adherido a las paredes del tanque	$W_i = \frac{\tanh(0.866 * \frac{D}{H})}{0.866 * \frac{D}{H}} * Wp$	$W_i = 181456 \text{ kN}$
W_c	kN	Porción efectiva de convectiva del peso del líquido	$W_c = 0.230 * \frac{D}{H} * \tanh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right) * Wp$	$W_c = 244575.1 \text{ kN}$
M_{rw}	N m	Momento del anillo de resistencia de la base	$M_{rw} = \sqrt{Mi^2 + Mc^2}$	$M_{rw} = 124500.9 \text{ kN m}$
A_i	%	Parámetro de aceleración espectral impulsiva	$A_i = Sds * \frac{I}{Rwi}$	$A_i = 0.1 \%$
X_i	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de acción de fuerzas sísmicas laterales aplicadas a W_i	Como $\frac{D}{H} = \frac{45}{17} = 2.65 \geq 1.333$: $X_i = 0.375 * H$	$X_i = 6.38 \text{ m}$
X_s	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del cilindro	$X_s = \frac{H_{cil}}{2}$	$X_s = 6.25 \text{ m}$
X_r	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del domo y sus accesorios	$X_r = ZC.M - (R_{\text{domo}} - H)$	$X_r = 14.6 \text{ m}$
X_c	m	Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de acción de fuerzas sísmicas laterales aplicadas a W_c	$X_c = \left(1 - \left(\frac{\cosh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67 * H}{D} * \sinh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right)} \right) \right) * H$	$X_c = 9.64 \text{ m}$
N_i	N/mm	Fuerza membranal convectiva en las virolas del tanque	$N_i = 5.22 * A_i * G * D^2 * \left[\frac{Y}{0.75 * D} - 0.5 * \left(\frac{Y}{0.75 * D} \right)^2 \right]$	$N_i = 717.7 \text{ N/mm}$

Y	m	Distancia desde la superficie libre del líquido al punto a analizar	Por geometría	Y=16.996 m
N _c	N/mm	Fuerzas membranales convecticas en las virolas del tanque	$N_c = \frac{1.85 * A_c * G * D^2 * \cosh[3.68(H-Y)/D]}{\cosh(3.68 * H/D)}$	N_c=38 N/mm
A _c	%	Parámetro de aceleración espectral convectiva (%)	$A_c = K * S_d1 * \left(\frac{TL}{T_c^2}\right) * \left(\frac{I}{R_{wc}}\right)$	A_c=0.012 %
N _h	N/mm	Fuerza membranal debido a la presión hidrostática	Por Teoría Membranal	N_h=13494 N/mm
σ _T	N/mm	Presión combinada de los efectos verticales	$\sigma_T = \sigma_h \pm \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + (A_v * N_h)^2}}{t}$	σ_{T1}=342 MPa σ_{T1}=306.13 MPa
A _v	%	Coefficiente de aceleración vertical	A _v =0.14 * S _{D1}	A_v=0.015%
σ _c	MPa	Compresión de la envolvente en tanques mecánicamente aislados	$\sigma_c = \left(wt * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * M r w}{D^2} \right) * \frac{1}{1000 * t_1} =$	σ_c=1.01 MPa
w _t	N/m	Peso del tanque y del techo que actúa en la base del tanque	$w_t = \left[\frac{W_s}{\pi D} + w_{rs} \right]$	w_t=41327.2 N/m
w _{rs}	N/m	El peso total de la envolvente del tanque y sus accesorios, ya calculado anteriormente	$w_{rs} = \frac{W_{rs}}{\pi D} = \frac{2014}{\pi * 45}$	w_{rs}=14246.1 N/m
F _c	MPa	Tensión permisible sísmica	F _c =83 * t ₆ /D	F_c=76.8 MPa

Tabla 25: Resumen total de los cálculos

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Depósito cilíndrico vertical, fondo plano y techo cilíndrico
Figura 2: Depósito cilíndrico vertical, fondo cónico y techo plano
Figura 3: Depósito cilíndrico horizontal, fondo
Figura 4: Depósito esférico plano y techo cilíndrico
Figura 5: Partes de un depósito
Figura 6: Fallo por falta de soldadura
Figura 7: Fallo por dimensionamiento incorrecto
Figura 8: Fallo por pequeños movimientos de tierra
Figura 9: Fallo por corrosión
Figura 10: Fallo por terremoto
Figura 11: Esquema del funcionamiento de una planta solar
Figura 12: Esfuerzos en láminas
Figura 13: Descomposición de esfuerzos membranales
Figura 14: Esfuerzos membranales de una lámina
Figura 15: Sección de una lámina según el plano xz
Figura 16: Tabla de esfuerzos permisibles por condiciones de diseño según la API-650
Figura 17: Tabla de esfuerzos permisibles por prueba hidrostática según la API-650
Figura 18: Espesor mínimo de virola según la API-650
Figura 19: Determinación de la carga de nieve en la localización del tanque según el ASCE 7
Figura 20: Distintas combinaciones del anillo de coronación según la API-650
Figura 21: Combinación del anillo de coronación elegida para el problema
Figura 22: Dimensiones del anillo de coronación según la norma API-650
Figura 23: Dimensiones de una sección del tanque
Figura 24: Cálculo del ángulo θ
Figura 25: Límite de elasticidad mínimo especificado según la API-650
Figura 26: Interfaz de ANSYS
Figura 27: Elemento SHELL51
Figura 28: Propiedades isotrópicas ANSYS
Figura 29: Carga aplicada en carga externa
Figura 30: Deformada en carga externa
Figura 31: Desplazamiento en x en carga externa
Figura 32: Desplazamiento en y en carga externa
Figura 33: Tensión en la superficie anterior en carga externa
Figura 34: Tensión en la superficie posterior en carga externa
Figura 35: Carga aplicada en carga interna
Figura 36: Deformada en carga externa
Figura 37: Desplazamiento en x en carga interna
Figura 38: Desplazamiento en y en carga interna
Figura 39: Tensión en la superficie anterior en carga interna
Figura 40: Tensión en la superficie posterior en carga interna
Figura 41: Carga hidrostática
Figura 42: Carga aplicada en carga hidrostática
Figura 43: Deformada en carga externa
Figura 44: Desplazamiento en x en carga hidrostática
Figura 45: Desplazamiento en y en carga hidrostática
Figura 46: Tensión en la superficie anterior en carga hidrostática
Figura 47: Tensión en la superficie posterior en carga hidrostática
Figura 48: Comprobación del vuelco en tanques no anclados
Figura 49: Momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido a la presión interna de diseño
Figura 50: Momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido a la presión del viento
Figura 51: Coordenadas esféricas

- Figura 52: Momento sobre la unión de la envolvente al fondo debido al peso del líquido
- Figura 53: Espesor mínimo de la placa base según la norma API-650
- Figura 54: Espesor de la placa base (tb)
- Figura 55: Momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido al peso del líquido
- Figura 56: Cálculo de los parámetros de aceleración de respuesta espectral según ASCE 7
- Figura 57: Tabla para calcular el coeficiente del sitio basado en la aceleración en $T=0.2$ s según la API-650
- Figura 58: Tabla para calcular el coeficiente del sitio basado en la aceleración en $T=1$ s según la API-650
- Figura 59: Modelo de simulación sísmica
- Figura 60: Gráfico para determinar el periodo impulsivo del tanque
- Figura 61: Gráfico para hallar el coeficiente del periodo de desbordamiento
- Figura 62: Tabla para determinar los factores de modificación de respuesta según la API-650
- Figura 63: Tabla para determinar el factor de importancia según la API-650
- Figura 64: Determinación del periodo de transición dependiendo de la región para largos periodos de movimiento de tierra
- Figura 65: Espectro de aceleraciones particular
- Figura 66: Definición de las cargas que provocan el vuelco y sus centros de gravedad
- Figura 67: Situación del anillo de hormigón situado en la base
- Figura 68: Situación del punto a analizar para el cálculo de las fuerzas membranales
- Figura 69: Cálculo de a fuerza membranal hidrostática según la Teoría Membranal
- Figura 70: Características del aislamiento
- Figura 71: Colocación de los paneles en la envolvente cilíndrica
- Figura 72: Unión fondo del tanque, pared cilíndrica y recubrimiento exterior
- Figura 73: Unión anillo coronación-domo-envolvente
- Figura 74: Colocación de los paneles en el domo
- Figura 75: Horas de las actividades realizadas en el proyecto
- Figura 76: Diagrama de Gantt
- Figura 77: Presupuesto del proyecto

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1: Comparación características principales API-650 y API-620
Tabla 2: Características de los depósitos cilíndricos verticales y horizontales
Tabla 3: Características de los distintos tipos de techo
Tabla 4: Composición del acero AISI 347 H
Tabla 5: Características del acero AISI 347 H
Tabla 6: Cálculos del espesor de la envolvente
Tabla 7: Cálculos del espesor del domo
Tabla 8: Cálculos de las combinaciones de carga para el cálculo del espesor de domo
Tabla 9: Cálculos del área de participación en la junta entre el techo y el cuerpo bajo presión externa
Tabla 10: Cálculos del área de compresión total requerida en la unión techo y cuerpo bajo presión interna
Tabla 11: Cálculos de la altura entre la viga de viento intermedia y el ángulo superior de la cubierta
Tabla 12: Cálculos de la altura de la pared transformada
Tabla 13: Cálculos del momento sobre la unión de la envolvente y el fondo debido a la presión interna del diseño
Tabla 14: Tipos de clase de sitio
Tabla 15: Cálculos del periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento impulsivo
Tabla 16: Cálculos del periodo natural estructural de vibración para un modo de comportamiento convectivo
Tabla 17: Cálculos del parámetro de aceleración espectral impulsiva
Tabla 18: Cálculos del parámetro de aceleración espectral convectiva
Tabla 19: Cálculos de la cizalladura sísmica en la base
Tabla 20: Cálculos de la cizalladura de diseño en la base debido a la componente impulsiva del peso efectivo del tanque y su contenido y cizalladura de diseño en la base debido a la componente convectiva del peso efectivo de oleaje
Tabla 21: Cálculos del momento del anillo de resistencia de la base
Tabla 22: Cálculos de la fuerza membranal convectiva en las virolas del tanque
Tabla 23: Cálculos de la compresión de la envolvente en tanques mecánicamente aislados
Tabla 24: Cálculos de la tensión permisible sísmica
Tabla 25: Resumen total de los cálculos

ANEJOS

ANEXO A: FICHA TÉCNICA DEL ACERO



AISI 347/347H

Niobium Stabilized Austenitic Stainless

INTERNATIONAL DENOMINATION AISI 347/347H

Chemical Composition

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	N	Nb
%	0,04 0,08	2,00	0,75	17,00 19,00	9,00 13,00	0,045	0,03	0,02	10xC min 1,00 máx

Values according to ASTM A240/A240M standard for AISI 347

General Characteristics

Grade 347 from Aperam South America is a stainless steel elaborated to meet the international standards AISI 347 and AISI 347H. Due to the stabilization with niobium, this grade has the corrosion resistance at high temperatures as its main characteristic. When submitted to temperatures ranging from 450-900 °C, some grades tend to form chromium carbide precipitate in the grain boundary region, and the material becomes susceptible to intergranular corrosion. The stabilization with niobium inhibits the formation of chromium carbide, and consequently increases the resistance to this type of corrosion.

Grade AISI 347 has excellent weldability, a characteristic common to austenitic steels, as well as high mechanical properties, which guarantees good ductability, and it is recommended for some cold forming processes.

The application of grade AISI 347 is mainly intended for corrosive environments and high temperatures. It is currently being used in the manufacture of collector rings for aircrafts, engine components for rockets, exhaust manifold for cars, expansion joints and equipment for chemical processing at high temperatures.

Delivery conditions*

- Products: coils and sheets cold rolled and hot rolled

Thickness range (mm)	Mill edge width (mm)	Slitted edge width(mm)
0,40 to 4,84	1040, 1240, 1270, 1320	1000, 1020, 1200, 1219, 1220, 1250, 1300
4,85 to 50,80	1040, 1240, 1270, 1320, 1540	1000, 1020, 1200, 1219, 1220, 1250, 1300, 1500, 1524

* For further information please contact Aperam South America

Mechanical Properties

The following table presents the typical values of the material in the annealed condition for tests according to standard ASTM E-8 M (longitudinal sample, parallel to rolling direction, specimen with $L_0 = 50$ mm).

Yield Strength - 0.2% (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
345	645	51	87

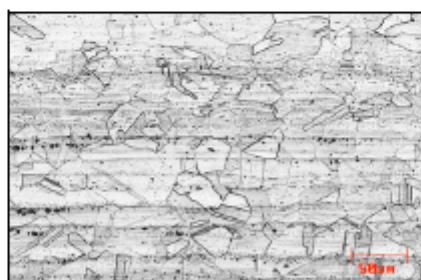
Physical Properties

Density	8.0 g/cm ³
Modulus of Elasticity	193 GPa
Average Coefficient of Thermal Expansion	
from 0°C to 100°C	16.6 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$
from 0°C to 538°C	18.6 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity at 100°C	16.1 W/m.K
Specific Heat	500 J/kg.K
Electrical Resistivity	730 nW.m
Melting Point	1400-1425°C

Source: ASM Specialty Handbook - Stainless Steels

Microstructure

Grade AISI 347 presents a re-crystallized austenitic structure with sparse niobium carbonitrides and grain size of about 7 ASTM.



Microstructure of the hot rolled material after annealing

The information contained in this publication has been obtained from laboratory test results and traditional and respectable bibliographic references. The behavior of stainless steel may change due to conditions of temperature, pH, contaminants, and also the conservation of tools used in welding and conformation. For these reasons, the information contained in this publication may be used only as initial reference for tests or final specification by the customer. Aperam South America is not responsible for any loss or damage caused by inappropriate use of the information contained in this publication.

ANEXO B: COMPONENTES SÍSMICAS

17/6/2018

ATC Hazards by Location

▲ This is a beta release of the new ATC Hazards by Location website. Please contact us with feedback.

ATC Hazards by Location

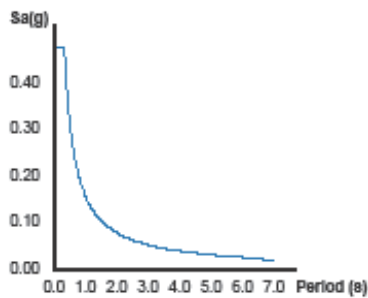
Search Information

Coordinates: 36.3812018, -114.8973457
 Timestamp: 2018-06-17T13:13:08.484Z
 Hazard Type: Seismic
 Reference Document: ASCE7-16
 Risk Category: I
 Site Class: A
 Report Title: Not specified

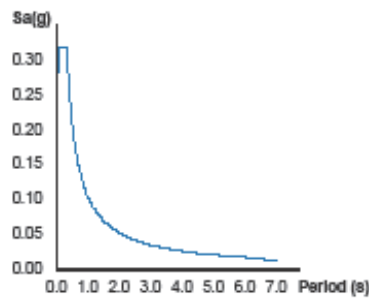
Map Results



MCE_R Horizontal Response Spectrum



Design Horizontal Response Spectrum



Text Results

Basic Parameters

Name	Value	Description
S_0	0.599	MCE _R ground motion (period=0.2s)
S_1	0.198	MCE _R ground motion (period=1.0s)
S_{MS}	0.479	Site-modified spectral acceleration value
S_{M1}	0.158	Site-modified spectral acceleration value
S_{ps}	0.32	Numeric seismic design value at 0.2s SA
S_{p1}	0.106	Numeric seismic design value at 1.0s SA

ANEXO C: FICHA TÉCNICA DEL AISLAMIENTO



TECH Slab HT 6.1

Aislamiento Térmico, Acústico y Calorifugado para altas Temperaturas

Panel rígido de Lana de Roca. Aislamiento térmico, acústico y calorifugado en aplicaciones de alta temperatura:
 • Grandes depósitos • Calderas de calefacción e industriales • Hornos industriales • Mamparas divisorias

Propiedades técnicas

Símbolo	Parámetro	Icono	Unidades	Valor	Norma				
WS	Absorción de agua a corto plazo		kg/m ²	<1	EN 1609				
MU	Resistencia a la difusión de vapor de agua		—	1	EN 14303				
—	Reacción al fuego		Euroclases	A1	EN 13501-1				
DS	Estabilidad dimensional		%	<1	EN 1604				
ST(+)	Temperatura límite de empleo	—	°C	700	EN 14706				
Conductividad térmica									
λ	Temp.* (°C)	50	100	200	300	400	500	600	650
	λ (W/m.K)	0,039	0,044	0,058	0,076	0,098	0,123	0,154	0,172
—	Características de durabilidad								
El comportamiento de reacción al fuego y de resistencia térmica de este producto no varía con el tiempo ni al ser sometido a la temperatura máxima declarada.									

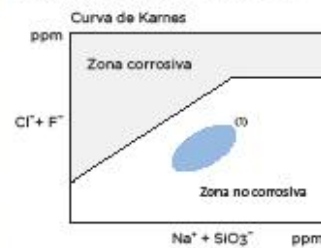
*Temperatura Media en el Aislamiento. Según Norma EN 12667.

Presentación

Espesor d (mm)	Largo l (m)	Ancho b (m)	m ² /bulto	m ² /palet	m ² /camión
30	1,00	0,60	8,40	92,40	2,402
40			4,80	67,20	1,747
50			4,80	57,60	1,497

Corrosión de acero

No corrosivo. Según ASTM C-795 y C-871.



Nota: los análisis químicos de iones realizados según las normas ASTM C-795 y C-871 demuestran que los productos de Lana de Roca ISOVER no provocan la corrosión en el acero ya que la relación de iones F⁻ + Cl⁻ respecto a los Na⁺ + SiO₃⁻ se sitúa en la parte inferior de la Curva de Karnes.
 (1) Posición de las Lanas Minerales ISOVER.

Código de designación

MW-EN 14303-T4-ST(+)-700-WSI-cs(10)20.

Certificados



Guía de instalación

Información adicional disponible en: www.isover.es

- www.isover.es
- ISOVERblog.es
- @ISOVERes
- ISOVERaislamiento
- ISOVERaislamiento
- ISOVERRes
- ISOVER Aislamiento
- ISOVER Aislamiento



15-01-2018 • TECH Slab HT 6.1 • ES