



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Mercado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Víctor López Reyes
Director: Isidoro J. Martínez Mateo



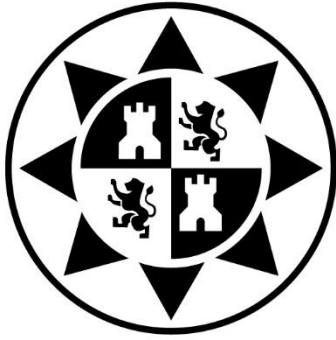
Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, septiembre de 2019

DEDICATORIA

A mis padres, que en todo momento me apoyaron en el cambio de ciudad y me han animado y querido desde la distancia. A mis tíos, que me acogieron en su casa como a un hijo más y me han tratado como tal. A Bea, que ha estado conmigo en los buenos momentos y en los no tan buenos y este logro es tan mío como suyo. Y a mi tutor del TFG Isidoro por su amabilidad y paciencia en todo momento.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES**



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

DOCUMENTO I

MEMORIA DESCRIPTIVA

Alumno: Víctor López Reyes

Director: Isidoro J. Martínez Mateo

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Departamento: Ingeniería de Materiales y Fabricación

Fecha: Septiembre de 2019

INDICE

INDICE.....	2
1. OBJETO	4
2. NORMATIVA	4
2.1. Normas de aplicación general.....	4
2.2. Normas reguladoras de la actividad.....	4
2.3. Normas relacionadas con el depósito y la planta satélite.....	4
2.4. Normas y criterios de explotación	5
2.5. Otras normas de aplicación general.....	5
3. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS.....	6
3.1. Términos y definiciones	6
3.2. Símbolos	7
4. PRODUCTO A ALMACENAR	7
5. PLANTA SATÉLITE	15
6. DISEÑO DEL DEPÓSITO	16
6.1. Estimación de medidas	16
6.2. Material empleado.....	17
6.3. Tipo de almacenamiento.....	20
6.4. Estructura del depósito	21
7. MARCADO Y ETIQUETADO	23
8. ELEMENTOS DE SEGURIDAD Y CONTROL.....	24
8.1. Recipiente interior.....	24
8.2. Envoltente exterior	31
8.3. Vaporizador	31
8.4. Tuberías.....	33
8.5. Apagallamas	34
9. UBICACIÓN E INSTALACIÓN DEL DEPÓSITO	34
9.1. Estudio de resistencia del suelo	35
9.2. Condiciones generales	35
9.3. Distancias de seguridad.....	36
9.4. Instalación eléctrica.....	37
9.5. Protección contra incendios.....	37
9.6. Protección contra derrames.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Temperaturas de ebullición del metano líquido a diversas presiones.....	8
Tabla 2: Información Técnica Gas Natural Licuado	10
Tabla 3: Información reglamentaria	12
Tabla 4: Tipo de depósito según capacidad	16
Tabla 5: Composición química AISI 316L	17
Tabla 6: Propiedades mecánicas AISI 316L.....	18
Tabla 7: Composición química SAE 1045.....	18
Tabla 8: Propiedades típicas a temperatura ambiente con temple en agua	19
Tabla 9: Propiedades térmicas: Lana de roca.....	20
Tabla 10: Leyenda de elementos auxiliares	30
Tabla 11: Tubos PPR según caudal	33
Tabla 12: Categoría según capacidad	36
Tabla 13: Distancias mínimas	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de riesgos según ADR	13
Figura 2: Ejemplo de depósito similar	16
Figura 3: Dimensiones básicas envolvente interior.....	22
Figura 4: Ángulo de contacto envolvente-silleta.....	22
Figura 5: Pernos de alta resistencia.....	23
Figura 6: Placa de diseño	23
Figura 7: Placa de identificación.....	24
Figura 8: Válvula de alivio	25
Figura 9: Esquema sistema de seguridad	26
Figura 10: Válvula de control Bypass.....	27
Figura 11: Válvula de control de vaciado	28
Figura 12: Válvula de llenado fase gas	28
Figura 13: Válvula de llenado fase líquido.....	29
Figura 14: Esquema general de elementos auxiliares	29
Figura 15: Vacuostato digital	31
Figura 16: Válvula de control PPR.....	32
Figura 17: Colocación del PPR	33
Figura 18: Parcela donde se instalará el equipo.....	34
Figura 19: Cartel en exterior de parcela	35
Figura 20: Extintor 25 kg.....	37

1. OBJETO

El presente proyecto viene a satisfacer la necesidad de suministro de Gas Natural para una industria que lo solicite. En la actualidad el suministro de este combustible se realiza en su mayoría mediante la acometida a gasoducto, pero en este caso, para la industria solicitante del servicio no se ha obtenido una viabilidad favorable de acometida, y después de realizar un estudio de consumo se ha llegado a la conclusión de que se suministrará el combustible en forma de Gas Natural Licuado (GNL) almacenado en un depósito que será recargado periódicamente por la empresa proveedora del combustible.

El objeto de este proyecto es el diseño del tanque de almacenamiento, así como la elección de los elementos auxiliares que lo acompañaran, formando lo que se conoce como *planta satélite*. Se detallará el proceso de diseño del depósito desde la estimación del volumen necesario hasta la fabricación y puesta en funcionamiento, pasando por la selección de material o materiales apropiados para cada elemento y cálculo de espesores de los mismos.

Para el diseño del depósito se ha utilizado una norma reconocida internacionalmente, tal como UNE-EN 13445: *“Recipientes a presión no sometidos a llama”*.

2. NORMATIVA

Para realizar el proyecto se ha tenido en cuenta la siguiente normativa vigente aplicable a los depósitos de Gas Natural Licuado, especialmente las contenidas en el Reglamento Técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos del Ministerio de Industria.

2.1. Normas de aplicación general

- Real Decreto 919/2006 de 26 de julio. Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11, y en particular la ITC-ICG 04 Plantas satélite de gas natural licuado (GNL).
- UNE-EN ISO 16903:2016. Industrias del petróleo y del gas natural. Características del GNL que influyen en el diseño y en la selección de los materiales.

2.2. Normas reguladoras de la actividad

- Ley 34/1998 de 7 de octubre del Sector Hidrocarburos.
- Real Decreto 1434/2002 de 27 de diciembre por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de gas natural.
- Norma de Gestión Técnica del Sistema Gasista NGTS-02 “Condiciones generales sobre el uso y la capacidad de las instalaciones del sistema gasista”.

2.3. Normas relacionadas con el depósito y la planta satélite

- UNE 60210: 2015. Plantas Satélite de Gas Natural Licuado (GNL).
- UNE-EN 13445: Recipientes a presión no sometidos a llama.

- UNE EN 1160. Instalaciones y equipos para gas natural licuado. Características generales del gas natural licuado.
- Directiva 2014/68/UE del parlamento europeo y del consejo relativa a la armonización de las legislaciones de los Estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión.
- Protocolo de Detalle PD-12 «Procedimientos a aplicar a las cisternas de gas natural licuado con destino a plantas satélites».
- UNE-EN 1473:2017. Instalaciones y equipos para gas natural licuado. Diseño de las instalaciones terrestres.
- UNE-EN 1993-4. Proyecto de estructuras de acero: Silos, depósitos y conducciones.
- UNE EN 1090-2 Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero.
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- UNE-EN 17635:2017. Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Reglas generales para los materiales metálicos.
- UNE-EN 17637:2017. Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Examen visual de uniones soldadas por fusión.
- Norma UNE-EN 22825:2012. Ensayo no destructivo de soldaduras. Ensayo por ultrasonidos. Ensayo de soldaduras en aceros austeníticos y aleaciones base níquel.
- Norma UNE-EN 17636-2:2013. Ensayo no destructivo de soldaduras. Ensayo radiográfico. Parte 2: Técnicas de rayos X y gamma con detectores digitales.
- Norma EN ISO 12944-2. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 2: Clasificación de ambientes (ISO 129442:1998).

2.4. Normas y criterios de explotación

- Real Decreto 949/2001, de 3 de agosto, por el que se regula el acceso a terceros a las instalaciones gasistas y se establece un sistema económico integrado del sector del gas natural.
- Orden IET / 2445/2014, de 19 de diciembre, por la que se establecen los peajes y cánones asociados al acceso de terceros a las instalaciones gasistas y la retribución de las actividades reguladas.

2.5. Otras normas de aplicación general

- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre de 1997, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.
- Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo, aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (BOE 85 de 08 de abril de 1996).

- Real Decreto 889/2006, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida.

3. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

En este apartado se definirán los términos y símbolos que se utilizarán en el proyecto de forma que sean fácilmente comprensibles. Las definiciones y símbolos han sido extraídos de la Norma UNE-EN 13445.

3.1. Términos y definiciones

- **Piezas principales sometidas a presión:** Piezas que constituyen la envolvente sometida a presión y que son vitales para la integridad del equipo.
- **Recipiente a presión:** Alojamiento y sistemas auxiliares que permiten unir el interior del recipiente con el punto de acoplamiento que lo conecta a otros equipos, diseñado y construido para contener fluidos bajo presión.
- **Fluido:** Gas, líquido y vapor en fase pura, así como mezclas de los mismos.
- **Tuberías:** Tubo o sistemas de tubos, tubería, accesorios, juntas de dilatación, tubos flexibles u otros componentes sometidos a presión y destinados al transporte de fluido, conectados entre sí e integrados en un sistema de presión.
- **Conjunto:** Varias piezas de equipos de presión montadas por un fabricante para constituir un todo integrado y funcional.
- **Conductos:** Tuberías o sistema de tuberías diseñado para el transporte de cualquier fluido o sustancia a o desde una instalación (en el mar o en tierra) que comienza en el primer dispositivo de aislamiento, incluido el mismo, situado dentro de la instalación e incluye todos los equipos añadidos diseñados específicamente para conductos.
- **Presión máxima admisible (PS):** La presión máxima para cual está diseñado un recipiente a presión de acuerdo con lo especificado por el fabricante.
- **Temperatura máxima/mínima admisible (TS):** Temperatura máxima/mínima para cual está diseñado un recipiente a presión de acuerdo con lo especificado por el fabricante.
- **Grupo de ensayos:** Uno de los cuatro grupos establecidos para especificar el alcance de los ensayos no destructivos y de los ensayos destructivos que son necesarios, asociadas con el coeficiente de unión de la soldadura, agrupación de materiales, proceso de soldeo, espesor máximo e intervalo de temperaturas de servicio.
- **Coeficiente de unión soldada:** Coeficiente de reducción relacionado con el nivel de inspección y que se relaciona con la tensión nominal de diseño.
- **Espesor mínimo de cálculo:** Espesor excluido el margen de corrosión y otros márgenes especificados en la Norma EN 13445.
- **Categoría de peligro:** Categoría del recipiente a presión teniendo en cuenta los peligros potenciales.
- **Factor de ensayo:** Un factor con el que se tiene en cuenta la cantidad de ensayos END en piezas fundidas, y que se aplica a las tensiones nominales de diseño.

- **Fabricante del material:** Individuo o empresa encargado de fabricar el material en la forma básica del producto, que se utiliza para la posterior fabricación de equipos a presión.
- **Fabricante:** Individuo o empresa responsable del diseño, fabricación, ensayos, inspección, instalación de equipos a presión y montaje cuando procede.
NOTA 1: El fabricante puede subcontratar una o más de las tareas mencionadas anteriormente bajo su responsabilidad.
NOTA 2: En los estados miembros de la Unión Europea el fabricante es responsable de cumplir la Directiva de Equipos a Presión 97/23/CE.
- **Unión soldada:** Se entiende por unión soldada al conjunto que forman metal de aportación, zona térmicamente afectada y material(es) base(s) adyacente(s).

3.2. Símbolos

t	tiempo (s, min, h)
l	longitud (mm)
e	espesor (mm)
c	margen de corrosión (mm)
d, D	diámetro (mm)
r, R	radio (mm)
A, S	superficie (mm ²)
V	volumen (mm ³)
W	peso (N, kN)
ρ	densidad (kg/mm ³)
Z	módulo de sección (mm ³)

4. PRODUCTO A ALMACENAR

Este depósito va a ser diseñado para almacenar Gas Natural Licuado. La elección de este producto ha sido condicionada por su creciente importancia en la industria debido a sus excepcionales características. El gas natural es un combustible fósil, altamente inflamable y que en condiciones normales (0 °C y 1 bar) se encuentra en estado gaseoso. Puede ser almacenado en estado gaseoso en depósitos de alta presión, o puede ser licuado y almacenado en depósitos criogénicos de presión intermedia o baja.

Para mantener el gas en estado líquido, a presiones relativamente bajas, es necesario almacenarlo a temperaturas que rondan entre -165 °C y -140°C, dependiendo de su composición química y su presión en el momento. Con respecto a su volumen, la relación volumétrica entre el estado gaseoso y líquido es de aproximadamente 560 m³, dependiendo de su composición molar exacta. Esto quiere decir que durante el proceso

de regasificación de 1m³ de GNL se van a obtener aproximadamente 560 m³ (n) de gas natural.

Cuando el GNL está confinado dentro de un tanque o depósito, como será nuestro caso, el intercambio térmico entre el interior y el exterior será mínimo debido a la estructura de doble pared con aislante intermedio y vacío. Aun así, siempre se produce una pequeña regasificación dentro del recipiente del orden del 0,12% del contenido total del depósito. El gas fruto de esta regasificación es un fluido incompresible. Esto quiere decir que, si no hay consumo, la presión dentro del recipiente aumentará debido a la relación volumétrica antes mencionada. Para compensar esta sobrepresión, el depósito será diseñado para soportar una presión diferencial interior máxima de 15 bar, muy superior a la presión en la que se mantendrá el depósito la mayor parte del tiempo, de entre 4 y 6 bar. Las temperaturas y presiones de equilibrio para el metano líquido (Componente mayoritario del Gas Natural) son:

Tª (°C)	P (bar)
-161.52	1,0132
-161	1,0444
-159	1,2263
-157	1,4316
-155	1,6619
-153	1,9193
-151	2,2057
-149	2,5230
-147	2,8732
-145	3,2583
-143	3,6804
-141	4,1416
-139	4,6439
-137	5,1895
-135	5,7805
-133	6,4191
-131	7,1075
-129	7,8478
-127	8,6423
-125	9,4933

Tabla 1: Temperaturas de ebullición del metano líquido a diversas presiones

Origen: (Asociación española del Gas, 2012-2013)

Cuando se produce regasificación dentro de un depósito cerrado este gas no se puede licuar de nuevo ni extraer del mismo modo que el GNL, por tanto será necesario instalar vientos o salidas de gas.

Por otra parte, si existe un gran consumo de combustible, la presión puede bajar demasiado provocando depresiones en el interior del recipiente, con todo lo que ello conlleva. Si esto ocurre se regasificará una pequeña parte del combustible para equilibrar la presión en el interior.

A pesar de haberse establecido una presión máxima muy elevada, será necesario establecer un nivel de llenado máximo que rondará el 95% de la capacidad total del recipiente.

Actualmente es el mejor combustible que pueden usar las empresas manufactureras que en su actividad industrial utilicen hornos y calderos. Gracias a sus características ecológicas y económicas reemplaza ventajosamente a los combustibles convencionales como: Gas licuado del petróleo, diésel, biodiésel, queroseno, carbón y leña.

Entre sus múltiples usos se encuentran principalmente:

- En la industria alimenticia, el gas natural se utiliza durante los procesos de cocimiento y secado. Este combustible permite cumplir rigurosamente con las exigencias de calidad ISO, que son requeridas para ciertos productos de importación.
- En la industria textil viene a sustituir el tradicional sistema de calentamiento mediante fluidos intermedios para calentar directamente por convección, con el consiguiente ahorro de entre el 20% y el 30% de electricidad.
- En la fabricación del acero, el gas natural es usado como reductor para la producción de hierro esponja, siendo además utilizado como materia prima en la industria petroquímica.
- En la industria del vidrio, gracias a las propiedades físico-químicas del gas natural es posible la implementación de quemadores que permiten una llama que brinda la luminosidad y radiación necesaria para conseguir una óptima transmisión de la energía calórica en la masa del cristal. Otra ventaja de usar este combustible es que el vidrio queda más limpio debido a la ausencia de residuo sólido.
- En la industria cerámica el uso de gas natural consigue un ahorro económico a la vez que permite la obtención de productos de mayor calidad.
- En la fundición de metales el gas natural es utilizado en todos los procesos que requieren del calentamiento del metal, ya sea en los tratamientos térmicos como en la fusión del metal o su posterior recalentamiento.

Se trata por tanto de una energía de suministro continuo, con una combustión limpia que no deja residuo sólido, lo cual permite que los equipos y quemadores requieran menos mantenimiento y por tanto mayor duración en el tiempo.

A continuación, se presenta una tabla con toda la información técnica relativa al Gas Natural Licuado, de acuerdo con el Real Decreto 255/03.

Información Técnica Gas Natural Licuado	
<i>Identificación de la sustancia</i>	
Nombre del producto	Gas Natural Licuado
Fórmula química	CH ₄
Nombre IUPAC	Metano
Número Cas	74-82-8
Número ONU	1972
Uso	Combustible
<i>Composición</i>	
Sustancia o Mezcla	Mezcla
Impurezas y/o componentes	Contiene pequeñas cantidades de propano, etano, i-butano, n-butano, i-pentano, n-pentano, hexanos, N ₂ y CO ₂
<i>Propiedades Físico-químicas</i>	
Aspecto	Gas licuado, fuertemente refrigerado
Color	Incoloro
Olor	Inodoro
Tª de autoignición	540 °C
Tª de ebullición	-160 °C a 1 atm
Punto de congelación	-182 °C
Densidad	460 kg/m ³
Densidad relativa del vapor a Tª ambiente	0,6
Límites de explosividad	Superior 15%, inferior 5%
Calor de combustión	11.900 kcal/kg
Peso específico líquido	0,450
Peso molecular	16

Tabla 2: Información Técnica Gas Natural Licuado

Origen: ENAGÁS S.A.

Está contemplada como una sustancia peligrosa, por tanto, es necesario considerar una serie de pautas para su manipulación, almacenamiento y tratamiento en caso de accidente.

4.1. Identificación de riesgos

El gas Natural es un gas extremadamente inflamable. En estado líquido su temperatura puede llegar a alcanzar -160°C , pudiendo provocar quemaduras por congelación en el contacto con la piel. El gas arde con llama casi invisible. Cuando se combina con el oxígeno del aire forma una mezcla muy explosiva, especialmente en proporciones metano/aire 1:10.

La vaporización del producto produce nubes de vapor blanco. Los vapores desprendidos del líquido son muy fríos y se comportan como un gas pesado, aproximadamente 1,5 veces más que el aire, y se extiende por el suelo, hasta que su temperatura alcanza -104°C , entonces se hace más ligero que el aire y sube.

Cuando el líquido entra en contacto con el agua, se forma hielo y un sólido blanco que se evapora rápidamente.

4.2. Estabilidad y reactividad

Se trata de un producto inflamable y combustible. Se evitarán las fugas de líquido ya que estas pueden producir fragilidad en materiales estructurales.

En contacto con el aire forma mezclas explosivas y es incompatible con oxidantes fuertes.

Los productos de combustión y descomposición peligrosos son el CO y CO₂

4.3. Primeros auxilios

Si se produce contacto del producto con la piel se aconseja lavar la zona con agua abundante y quitar la ropa impregnada si no se ha adherido a la piel.

Si por el contrario se produce contacto con los ojos se deberá lavar con abundante agua, al menos durante 15 minutos.

En caso de inhalación será necesario trasladar al afectado al aire fresco, y utilizar respiración artificial si no respira. Evitar que la persona afectada se autolesione debido al estado de confusión mental y desorientación transitoria, provocados por la inhalación. En todos los casos recibir asistencia médica.

4.4. Manipulación y almacenamiento

Para manipular el producto es necesario utilizar prendas de protección personal adecuadas por tratarse de un producto extremadamente frío. Evitar el contacto con la piel y no aplicar agua sobre el producto. No fumar ni tener puntos de ignición cercanos cuando se manipule el producto.

Con respecto al almacenamiento debe de ser a prueba de incendio, y debe ser en un lugar fresco con ventilación a ras de suelo y techo. Conectar a tierra todo elemento que contenga o transporte GNL. Peligro de explosión de mezclas con el aire al llegar a un foco de ignición.

4.5. Controles de exposición/ Protección personal

Se debe asegurar una buena ventilación si existen fugas

Utilizar traje de trabajo con brazos cubiertos y no ajustado para protección corporal. Para protección de manos es necesario utilizar guantes de cuero largos, mientras que para protección ocular es necesario utilizar careta o pantalla anti salpicaduras. Para protección de pies se utilizará calzado de seguridad con suela de neopreno o similar, sin herrajes metálicos.

4.6. Medidas en caso de vertido accidental

Con respecto a precauciones personales es necesario evacuar el área. No fumar durante la evacuación ni hacer fuegos, alejando toda fuente de ignición. Evitar cargas electrostáticas. Para ello cortar el suministro eléctrico. Permanecer del lado donde sopla el viento y guardar una distancia de seguridad de 50-60 metros de la nube de gas.

Respecto al medio ambiente la precaución a tomar para su protección será intentar parar el escape/derrame. Una vez controlado el escape/derrame se limpiará dejando ventilar el área.

4.7. Información ecológica

Puede causar hielo que dañe la vegetación.

La vida media de biodegradación del metano es de 70 días. La vida media de evaporación del compuesto procedente de aguas continentales se ha estimado de 1,17h en ríos a 13,89h en lagos. A temperatura ambiente está en fase gaseosa en la atmósfera, donde apenas sufre hidrólisis o fotólisis, siendo las reacciones químicas con especies radicáticas las que más contribuyen a la transformación atmosférica del metano.

No presenta problemas de bioacumulación ni de incidencia en la cadena trófica alimenticia. El metano es prácticamente insoluble en agua, lo que indica que la bioconcentración en organismos acuáticos es mínima. Fundamentalmente permanece en la atmósfera donde es degradado mediante reacciones químicas.

4.8. Información reglamentaria

Información reglamentaria	
Clase y código de clasificación (ADR)	2,3F
Etiqueta de peligro	Signo de llama negro o blanco sobre fondo rojo. Cifra "2" en la esquina inferior del rombo.
Frases de riesgo	R12 extremadamente inflamable
Frases de seguridad	S9 Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado S16 Conservar alejado de toda llama o fuente de chispa. No fumar S33 Evítese la acumulación de cargas electrostáticas

Tabla 3: Información reglamentaria

Origen: ENAGÁS S.A.

Para entender correctamente la tabla anterior se incluirán todas las etiquetas existentes y se explicarán brevemente los criterios que toma. Estas etiquetas son unas marcas indicativas de los riesgos de cada tipo de materia que se transporta y tienen como finalidad hacer que las mercancías peligrosas sean fácilmente identificables a distancia por el aspecto general (símbolo, color y forma) de sus etiquetas.

Según ADR 2011:

5.2.1.1 ADR 2011 Salvo que se disponga otra cosa en el ADR, sobre cada bulto deberá figurar el número ONU correspondiente a las mercancías contenidas, precedido de las letras "UN", de manera clara y duradera. En el caso de objetos no embalados, el marcado debe figurar sobre el objeto, sobre su armadura o sobre su dispositivo de manipulación, de estiba o de lanzamiento.

5.2.2.2.1.1 ADR 2011 Todas las etiquetas deberán tener la forma de un cuadrado colocado sobre un vértice (en rombo); sus dimensiones mínimas serán de 100 mm x 100 mm. Llevarán una línea trazada a 5 mm. del borde, del mismo color que los signos convencionales. Las etiquetas deberán figurar sobre un fondo de color que ofrezca un buen contraste o ir rodeadas de un borde de trazo continuo o discontinuo Para los recipientes concebidos para el transporte de gases licuados refrigerados, se puede también utilizar el formato normal A7 (74 x 105 mm.). Si la dimensión del bulto lo exige, las etiquetas podrán tener dimensiones reducidas, siempre que queden bien visibles.

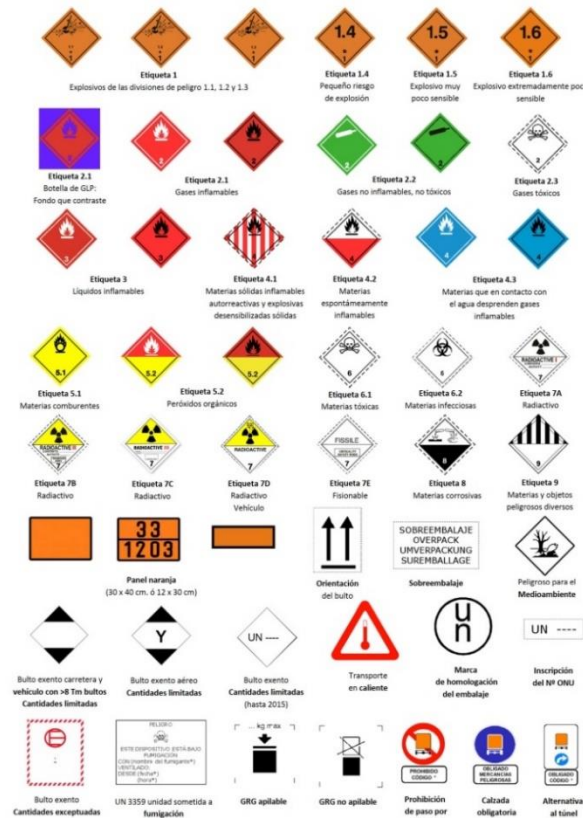


Figura 1: Clasificación de riesgos según ADR

En la figura 1 se visualizan todas las etiquetas ordenadas por categorías que posteriormente se nombrarán y se profundizará especialmente en la clase 2 que es la que respecta al gas natural:

- Peligro de clase 1 – Materias y objetos explosivos
- Peligro de clase 2 – Gases:
 - **(No. 2.1) Gases inflamables**
Signo convencional (llama): negro o blanco (salvo según 5.2.2.2.1.6 c)) sobre fondo rojo; cifra "2" en la esquina inferior.
 - **(No. 2.2) Gases no inflamables, no tóxicos**
Signo convencional (botella de gas): negro o blanco sobre fondo verde; cifra "2" en la esquina inferior.
 - **(No 2.3) Gases tóxicos**
Signo convencional (calavera sobre dos tibias): negro sobre fondo blanco; cifra "2" en la esquina inferior.
 - **(No. 3)**
Signo convencional (llama): negro o blanco sobre fondo rojo; cifra "3" en la esquina inferior.
- Peligro de clase 4:
 - 4.1 - Materias sólidas inflamables, materias autorreactivas y materias explosivas desensibilizadas.
 - 4.2 - Materias espontáneamente inflamables.
 - 4.3 - Materias que, al contacto con el agua, desprenden gases inflamables.
- Peligro de clase 5:
 - 5.1 - Materias comburentes.
 - 5.2 - Peróxidos orgánicos: Peligro de incendio.
- Peligro de clase 6:
 - 6.1 - Materia tóxica: tenerla aislada de productos alimenticios u otros objetos destinados al consumo en los vehículos, sobre los lugares de carga, descarga o transbordo.
 - 6.2 - Materias infecciosas: se mantendrán aislados de productos alimenticios u otros objetos destinados al consumo en los vehículos, sobre los lugares de carga, descarga o transbordo.
- Peligro de clase 7: Materias radiactivas.
- Peligro de clase 8: Materias corrosivas.
- Peligro de clase 9: Materias y objetos peligrosos diversos
- Etiqueta nº 11: De pie. Fijar las etiquetas con las puntas de las flechas hacia arriba.

De forma genérica, se puede deducir la naturaleza del riesgo mediante los símbolos contenidos en las etiquetas siendo la bomba peligro de explosión, la llama peligro de incendio, la calavera y las tibias cruzadas peligro de envenenamiento, el trébol esquematizado peligro de radiactividad y los líquidos goteando de dos tubos de ensayo sobre una mano y una plancha de metal peligro de corrosión.

5. PLANTA SATÉLITE

Se conoce como planta satélite al conjunto del depósito, dentro del recinto vallado, comprendiendo todos los elementos de gobierno del mismo y vaporizadores correspondientes para transformar el líquido en gas, excepto el sistema de mezcla o tratamiento, para transformar la composición del gas. Este tipo de instalación es característica en lugares no abastecidos por las redes de gas natural canalizado.

El equipo de vaporización será el conjunto de elementos tales como vaporizadores, recalentadores, bombas y otros, con sus accesorios correspondientes, colocados a continuación del depósito criogénico y cuya misión es transformar el gas licuado almacenado en gas a la salida de la válvula de bloqueo que limita la instalación.

El proceso que sufre el gas desde que se encuentra en la refinería en estado gas hasta que llega al punto de entrega en estado gas también es el siguiente:

- Deshidratación: Se puede realizar mediante enfriamiento directo, absorción de agua en glicoles o bien por adsorción de agua por sólidos.
- Tratamiento: En este proceso se trata el gas con el objetivo de eliminar gases ácidos tales como CO_2 , H_2S y otros componentes del azufre.
- Recuperación del azufre perdido.

Hasta este punto el objetivo era eliminar todos los elementos no deseados y aquellos elementos susceptibles de congelarse. La licuefacción se completa con:

- Circuito de refrigeración: Se elimina el calor sensible y latente del gas natural, de modo que se pasa de estado gaseoso a alta presión a estado líquido a presión atmosférica. Antes de pasar a almacenamiento el gas es subenfriado para compensar posibles ganancias residuales de calor.
- Almacenamiento para transporte: El gas licuado es almacenado en grandes tanques a la espera de ser transportado en buques metaneros, camiones cisterna o bien trenes cisterna.
- Almacenamiento en depósito de planta satélite: Para el traslado de un recipiente a otro se utilizan tuberías de alta presión.
- Regasificación: El gas natural es llevado de nuevo a su estado natural gaseoso devolviéndole el calor eliminado en el circuito de refrigeración. Este proceso se realiza en vaporizadores que utilizan agua a temperatura ambiente como fluido intercambiador.

La planta que incluirá el dep3sito dise1ado en este proyecto se considera del tipo F seg1n la Norma UNE 60210:2001 como se puede observar en la tabla 1.4:

A	Capacidad	Hasta 5 m ³
B	A partir de 5 m ³	Hasta 20 m ³
C	A partir de 20 m ³	Hasta 60 m ³
D	A partir de 60 m ³	Hasta 200 m ³
E	A partir de 200 m ³	Hasta 400 m ³
F	A partir de 400 m ³	Hasta 1500 m ³

Tabla 4: Tipo de dep3sito seg1n capacidad

6. DISE1O DEL DEP3SITO

6.1. Estimaci3n de medidas

Antes de realizar ning1n c1lculo es conveniente estudiar el uso que va a recibir el dep3sito, as1 como la frecuencia con la que va a ser llenado, y el consumo que se va a realizar de combustible.

Este dep3sito est1 destinado a suministrar GNL a una empresa alimenticia de tama1o mediano que usar1 el combustible para los quemadores en los procesos de secado y cocido. Se estima un consumo aproximado de 25 m³ de combustible diarios, y una frecuencia de llenado semanal. En base a esto se necesita una capacidad de almacenamiento de 175 m³, para un abastecimiento en condiciones normales. El dep3sito se sobredimensionar1 para poder cubrir un pico de demanda o una demora en el repostaje. La capacidad definitiva del dep3sito deber1 de ser por tanto de 240 m³ con una presi3n m1xima de trabajo de 15 bar. El di1metro inicial se tomar1 como 4 metros, pudiendo variar este valor seg1n los criterios de la norma. Ser1 similar estructuralmente al de la Figura 2.



Figura 2: Ejemplo de dep3sito similar

Para la instalación del depósito se dispone de un solar anexo a la factoría cuyas dimensiones permiten la instalación de un depósito de longitud máxima 25 metros. El suelo de dicho solar está formado por arena compacta con una resistencia de 2 kg/cm².

6.2. Material empleado

Para el diseño de este depósito se ha optado por una solución dual. Esta solución consiste en dos depósitos concéntricos con pared de aislamiento de vacío entre ambos. El depósito interior será de acero inoxidable austenítico capaz de resistir temperaturas negativas extremas, previniendo la fragilización a estas temperaturas y la capa exterior será de acero al carbono, protegido con un acabado superficial anticorrosión para aguantar a la intemperie sin sufrir desperfectos. La cámara entre ambas paredes estará rellena de un material aislante de alta capacidad, al que se le incorporará una lámina de polietileno que frenará cualquier paso de vapor de agua, y posteriormente se realizará un vacío de la cámara asegurando así su aislamiento térmico.

6.2.1. Material base

Para el depósito interior el acero seleccionado es AISI 316L. Este acero se trata del N.º 14404 y su designación es X2CrNiMo17-12-2 y su código AISI 316L. Se trata de una versión mejorada del AISI 316 al que se le ha reducido la cantidad de C para minimizar la precipitación de carburos perjudiciales en la zona afectada por el calor de la soldadura.

Su composición química es:

Composición química AISI 316L

Elemento	Composición (%)
Carbón	0,030 máx.
Manganeso	2,00 máx.
Azufre	0,030 máx.
Fósforo	0,045 máx.
Silicio	0,75 máx.
Cromo	16,0 a 18,0
Níquel	10,0 a 14,0
Molibdeno	2,00 a 3,00
Nitrógeno	0,10 máx.

Tabla 5: Composición química AISI 316L

Las propiedades mecánicas de este son:

Propiedades mecánicas AISI 316L

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia a la tracción (Rm)	500 N/mm ²
Resistencia a la tracción mínima (Rm ₁)	460 N/mm ²
Límite de elasticidad aparente (Re)	240 N/mm ²
Porcentaje mínimo de alargamiento después de la rotura (A ₁)	40 %

Tabla 6: Propiedades mecánicas AISI 316L

Las ventajas de utilizar este acero frente a un acero al carbono son las siguientes:

- Menor adherencia de la suciedad y agentes externos.
- Rápida limpieza de la superficie.
- Gran durabilidad.
- Mínimo mantenimiento.
- Buena estética.
- Resistencia a temperaturas extremas.
- Menores problemas de oxidación y corrosión.

6.2.2. Material de recubrimiento

Para la pared exterior el material seleccionado es el acero SAE 1045 debido a que no se requiere un grado alto de resistencia, es fácilmente soldable y de bajo coste. Puede ser endurecido mediante temple en agua para espesores delgados.

Su composición química es:

Composición química SAE 1045

Elemento	Composición (%)
Carbón	0,43 - 0,45
Manganeso	0,6 – 0,9
Fósforo	0,04 máx.
Azufre	0,05 máx.
Silicio	0,2 – 0,4

Tabla 7: Composición química SAE 1045

Sus propiedades mecánicas cuando es templado en agua son:

Propiedades típicas a temperatura ambiente con temple en agua – Redondo de 25 mm

Temperatura de revenido (° C)	Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Punto de fluencia (N/mm ²)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
320	1034	786	8	33
430	965	731	13	43
540	827	621	19	52
650	717	503	24	60
705	669	455	27	62

Tabla 8: Propiedades típicas a temperatura ambiente con temple en agua

Las ventajas de utilizar este acero son:

- Puede ser mecanizado fácilmente en estado recocido, normalizado o templado.
- Puede ser conformado fácilmente en caliente a temperaturas entre 980 y 1230 °C.
- Está cerca del límite superior de aceros con porcentaje de carbono que pueden ser soldados satisfactoriamente por todos los métodos comunes sin llegar a sobrepasar ese límite. Hay que mencionar que puede ser necesario precalentamiento y postcalentamiento en función del espesor.
- Nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo. No es necesaria más resistencia ya que su función será proteger de la intemperie el depósito.
- Buen acabado superficial.

6.2.3. Material aislante

Entre las dos capas de acero se encuentra una capa de material aislante con el fin de mejorar la eficiencia térmica del depósito y reducir la transmisión de calor hacia el interior del mismo. Se utilizará lana de roca junto con una lámina de polietileno pegada a la superficie más caliente, es decir la capa exterior, que actuará de barrera de vapor para mantener el aislante seco en todo momento y de esta forma no pierda sus propiedades aislantes.

La lana de roca es un material fabricado a partir de roca natural como la basáltica, un tipo de roca muy abundante en la corteza terrestre debido a su naturaleza volcánica. Se trata además de un material sostenible que se puede reciclar.

Este material se fabrica calentando la roca en un horno a una temperatura de 1650 °C. Al ser una roca ígnea se licua y se obtiene una sustancia parecida a magma que

posteriormente se transforma. Para ello se expone el material fundido a un chorro de aire o vapor a alta presión y es centrifugado a tal velocidad que se obtiene un producto en forma de hebras largas en forma de fibras. Dichas fibras son capturadas y comprimidas formando láminas similares a mantas. Por último, se cortan formando paneles en el formato que vayan a ser vendidas. Si estas láminas no se comprimen se forman flóculos o copos de lana de roca para soplar o insuflar.

Las propiedades térmicas de este material son:

Propiedades térmicas: Lana de roca

Propiedad	Valor
Conductividad térmica (W/mK)	0,038
Reacción al fuego	Incombustible – Clase A1
Permeabilidad al vapor de agua (μ)	1
Capacidad térmica específica (J/kgK)	840
Densidad aplicada (kg/m ³)	70
Componentes	Roca volcánica y basalto
Homologación	Avis Technique 20/04-38

Tabla 9: Propiedades térmicas: Lana de roca

Entre los diversos motivos por los que se ha elegido este material se encuentran su eficiencia térmica, constituyendo una gran barrera al flujo de calor, su durabilidad, ya que puede aguantar más de 50 años sin sufrir la pérdida de prestaciones y su protección contra el fuego ya que, a diferencia de este, la mayoría de los materiales aislantes son altamente inflamables. Al tratarse de una sustancia inflamable la almacenada en el interior del depósito es necesario tomar todas las precauciones posibles.

6.3. Tipo de almacenamiento

Cuando se refiere a hidrocarburos y su almacenamiento, hay principalmente 3 tipos de tanques usados en la industria. La elección de un tipo u otro viene condicionada por varios factores como por ejemplo la relación producción-consumo, las condiciones ambientales, la localización del tanque y el tipo de fluido a almacenar.

Los 3 tipos de tanque existentes en la industria son:

- Atmosféricos y baja presión: Su presión relativa es menor que 2,5 psi (aproximadamente 0,17 bar). Dentro de los tanques atmosféricos se encuentran:
 - De techo fijo
 - De techo flotante
 - De techo abierto

- Media presión: La presión relativa oscila entre 2,5 y 15 psi (aproximadamente entre 0,17 y 1,34 bar). Dentro de los tanques de media presión se encuentran:
 - Refrigerados
 - No refrigerados
- Alta presión o presurizados: La presión relativa es superior a 15 psi (aproximadamente 1,34 bar). Dentro de los tanques de alta presión se encuentran:
 - Cilíndricos
 - Esféricos

Este tipo de formas son las más indicadas para los recipientes a presión ya que la distribución de presiones es más uniforme que en los depósitos rectangulares o cuadrados, evitando de esta forma los picos de presión en una sección reducida o crítica.

En nuestro caso el tipo de tanque de almacenamiento elegido es de alta presión cilíndrico. Se trata de un fluido a temperatura criogénica, lo que podría llevar a pensar en la utilización de un tanque de media presión refrigerado, pero por motivos de eficiencia es necesario elevar la presión. Dentro de los depósitos de alta presión se trata más concretamente de un depósito de doble membrana con material aislante térmico colocado entre ambas membranas.

6.4. Estructura del depósito

El depósito a diseñar parte de ciertos requerimientos previos elegidos por el diseñador y en función de los cuales se han dimensionado el resto de elementos. El requisito principal es la capacidad, que se establece inicialmente en 240 m³ y se parte de un diámetro exterior de envolvente de 4m. Para los fondos unidos a la envolvente se ha seleccionado el tipo Korbogen, utilizando para su cálculo la normativa asociada a este tipo de fondo. Todas las dimensiones han sido obtenidas siguiendo las disposiciones establecidas en la Norma EN UNE 13445-3 para el diseño de recipientes a presión no sometidos a llama.

En primer lugar, se han obtenido los espesores de chapa de envolvente y fondos, obteniendo espesores de 19 y 20 mm relativamente. Con el fin de evitar discontinuidades en el interior y de zonas donde se pueda alcanzar un pico de presión se ha optado por igualar el diámetro interior de ambas partes en la zona de soldadura ($D_i = 3962 \text{ mm}$), quedando un escalón de 1 mm en la zona exterior, donde se aplicará el procedimiento de soldadura explicado ampliamente en el apartado dedicado a ello.

Una vez calculados los espesores, el siguiente paso a dar es calcular la longitud de la envolvente para obtener la capacidad nominal deseada. La longitud de la envolvente cilíndrica es la única parte que se puede modificar para aumentar la capacidad del recipiente ya que el espesor está directamente relacionado con el diámetro de esta al igual que los fondos, los cuales además siguen una serie de restricciones geométricas invariables. Del cálculo se obtiene:

Longitud de envolvente (L) = 17,96 m

Longitud total (L + h' + h'') = 20,14 m

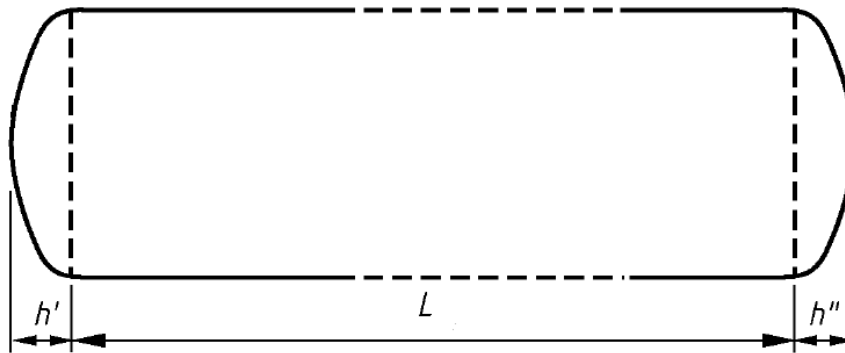


Figura 3: Dimensiones básicas envolvente interior

El recipiente estará apoyado sobre dos anillos de apoyo del tipo empotrado, es decir, el apoyo rodeará un ángulo determinado δ de la envolvente como en la Figura 4:

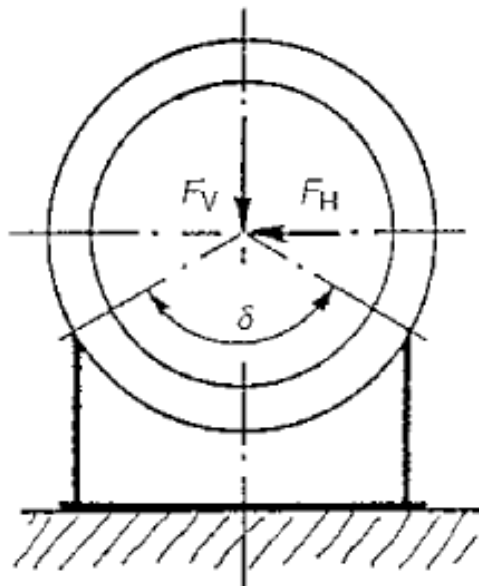


Figura 4: Ángulo de contacto envolvente-silleta

Este tipo de apoyo tiene la ventaja de un reparto equitativo de la presión frente al apoyo en dos puntos (patas). La silleta estará fabricada de Acero al Carbono SAE 1045, al igual que la envolvente exterior, y no estará en contacto directo con el acero austenítico inoxidable de la placa de refuerzo, ya que entre ambas se instalará una lámina de teflón que hará la función de aislante y anti-deslizante. Para la unión de la silleta a la placa se utilizará una brida, la cual utilizará pernos de alta resistencia de 12,7 mm de diámetro como los que se muestran en la figura 5:



Figura 5: Pernos de alta resistencia

7. MARCADO Y ETIQUETADO

El depósito debe constar de dos inscripciones según la reglamentación técnica vigente:

- 1) Placa de diseño: Todos los depósitos criogénicos sometidos a presión deben estar provistos de una placa de diseño de acuerdo con el artículo 19 del Reglamento de Aparatos a Presión como la que se muestra a continuación:

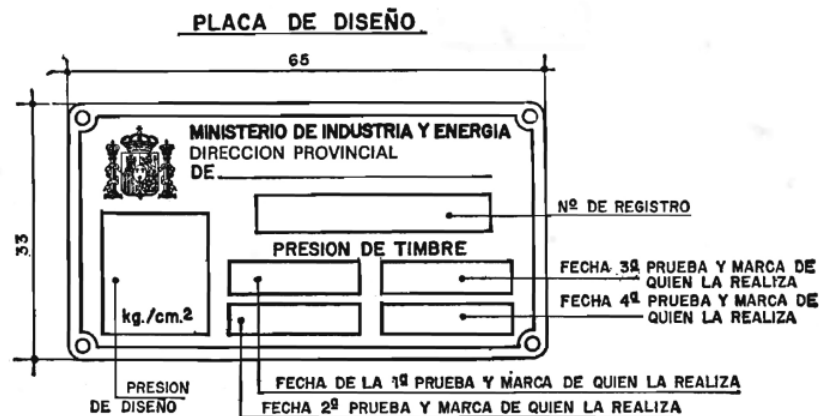


Figura 6:Placa de diseño

- 2) Placa de identificación: Además de la placa de diseño que se especifica en el apartado anterior los equipos contarán con otra placa en la que debe aparecer como mínimo la siguiente información:
 - i. Nombre o razón social del fabricante.
 - ii. Contraseña de registro si procede.
 - iii. Modelo y número de serie.
 - iv. Presión de prueba en bar.
 - v. Presión máxima de trabajo en bar.
 - vi. Capacidad geométrica en litros.
 - vii. Capacidad útil en litros.
 - viii. Máxima y mínima temperaturas de servicio.
 - ix. Tipo de aislamiento.
 - x. Año de fabricación.
 - xi. Gas licuado: Gas natural licuado – GNL.

En el aislamiento se indicará que es al vacío. Las capacidades se pueden utilizar las calculadas en el proceso de diseño.

Ambas placas deberán ir escritas en castellano, o en su defecto en otros idiomas oficiales de cada Comunidad Autónoma.

Las placas se colocarán en el lateral de la silleta más próxima a los elementos auxiliares de forma que sean fácilmente visibles.

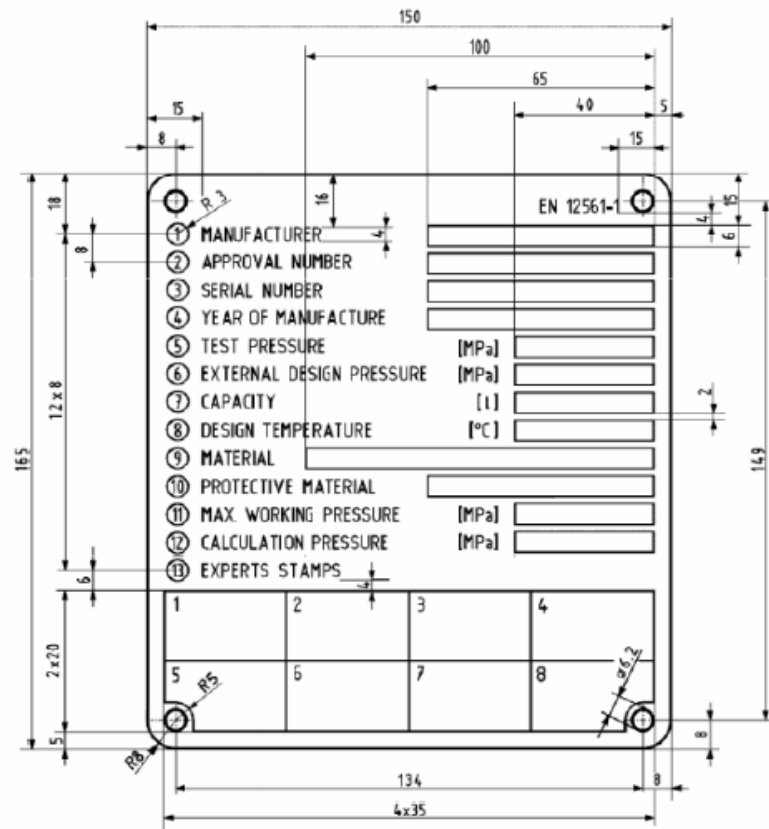


Figura 7: Placa de identificación

8. ELEMENTOS DE SEGURIDAD Y CONTROL

8.1. Recipiente interior

8.1.1. Elementos de seguridad

El recipiente interior debe estar protegido por dos válvulas de seguridad, colocadas en la fase gas y en comunicación permanente con el interior del recipiente. Al tratarse de válvulas de seguridad es posible que en algún momento se produzca salida de producto a través de ellas, por este motivo estas deben estar dirigidas de forma que el producto a su salida no dañe la estructura del depósito, personas o vegetación próximas.

Una de las válvulas ha de estar tarada a la presión de trabajo y su diseño debe permitir que la presión en el interior del depósito nunca sobrepase del 110 por 100 de la máxima

presión de trabajo. La presión es una variable condicionada al calor aportado al líquido, por tanto, se considerará la máxima aportación de calor en las siguientes condiciones:

- Sistema elevador de presión trabajando a máxima carga en continuo.
- Elementos exteriores tales como bombas que tengan la capacidad de aumentar la presión del depósito se considerarán en servicio continuo.
- Aportación de calor a través del aislamiento.

La segunda válvula de seguridad será tarada para un valor del 130 por 100 de la presión máxima de trabajo. Llegados a este punto ambas válvulas trabajarán simultáneamente y deberán ser capaces de evacuar el caudal necesario de producto para aliviar la presión. Para la segunda válvula se establece la condición de una aportación de calor equivalente al calor aportado por un fuego próximo al depósito, es decir, una temperatura exterior de 900 °C.

El modelo de válvula de alivio utilizada es de la marca EPMRT de la serie EG63:

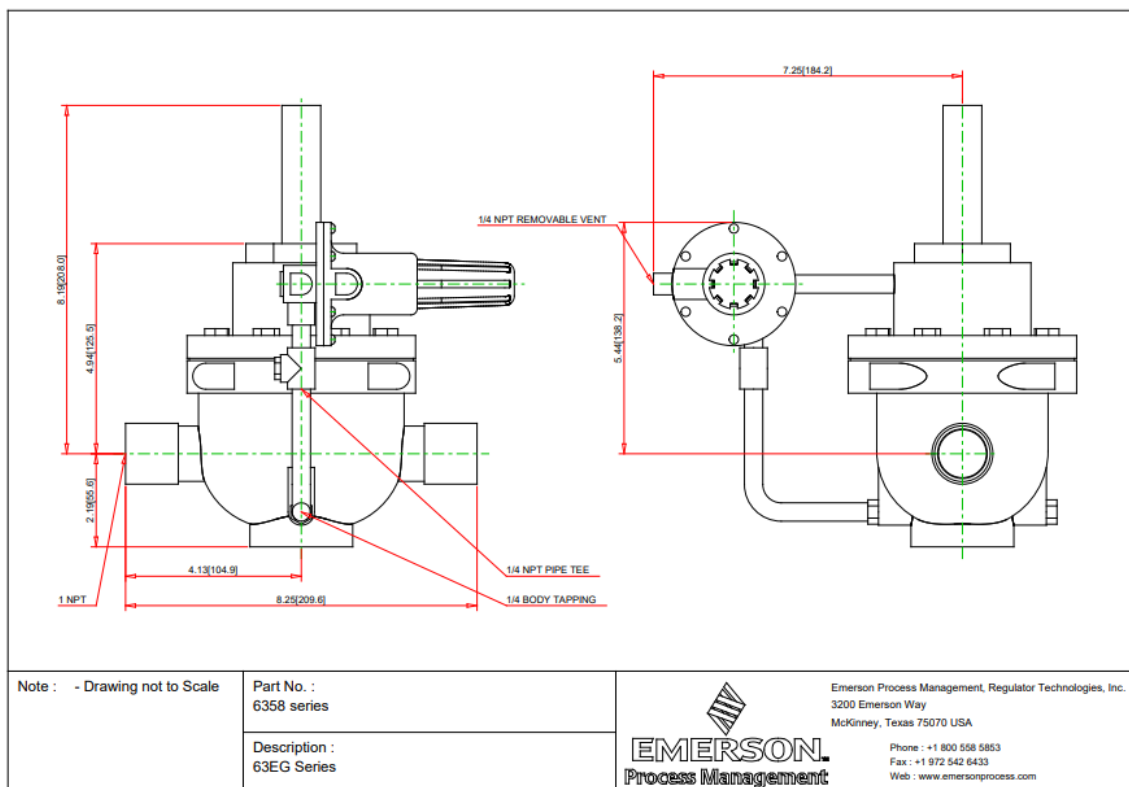


Figura 8: Válvula de alivio

Además de las válvulas de alivio y seguridad el depósito debe estar equipado con un manómetro conectado a la fase gas que permita conocer la presión en el interior del recipiente, así como de una báscula para saber con exactitud la cantidad de producto almacenado y un dispositivo que permita medir el vacío, en el caso de que lo hubiera. El manómetro debe tener reflejadas las presiones de trabajo y disparo de las válvulas de seguridad.

Para la colocación de las válvulas se considerará la posible formación de hielo en el interior de estas, de forma que se forme el mínimo posible. El sistema quedará conformado de tal manera que se disponga de una válvula de alivio principal junto con otra auxiliar en paralelo taradas según se describía unas líneas más arriba.

A la entrada de la válvula principal existirá una ramificación, que actuará como bypass de dicha válvula, en la cual se instalará una válvula de 3 vías. En cada una de las dos vías de salida se ramificará la tubería de forma que se obtengan 4 conductos en total, los cuales acabarán cada uno en una válvula de seguridad. Cada una de estas 4 válvulas de seguridad tendrá dos entradas, una que será la salida de la válvula de alivio principal, y otra que vendrá del bypass. Las 4 válvulas de seguridad estarán taradas de la misma forma que la válvula de alivio principal. En la figura 9 se puede observar de manera gráfica la instalación.

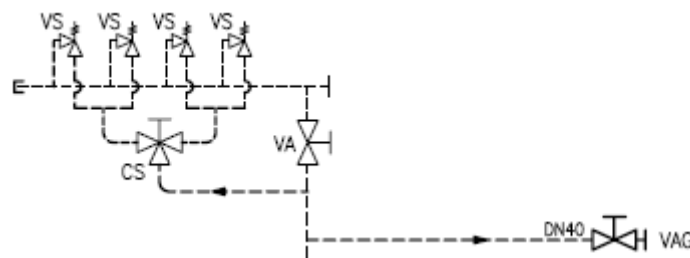


Figura 9: Esquema sistema de seguridad

El sistema de tarado de cada válvula será precintado una vez se haya realizado el ajuste. Si las válvulas se desajustaran con el tiempo el precinto roto deberá ser sustituido por otro nuevo y el proceso debe ser debidamente documentado y registrado.

Aunque se haya fijado un porcentaje de la presión máxima de trabajo que no se puede sobrepasar para cada válvula (110 por 100 ó 130 por 100) las válvulas deberán activarse de tal manera que empiecen a abrir a una presión no superior a la presión máxima de trabajo. Una vez abiertas completamente se debe asegurar una sección mínima de paso del 80 por 100 de la sección neta de paso en el asiento.

Las válvulas deben tener conexión permanente con la cámara de gas del depósito en el punto más alto y las tuberías a las que se conecta el sistema de seguridad para dar paso al gas exigido por dicho sistema deben tener como mínimo un diámetro de 18 milímetros. Además, a la salida de dichas válvulas se debe colocar un sistema de venteo que oriente el gas en la dirección requerida según las indicaciones que se proporcionaban al principio de este apartado. El sistema de venteo en ningún caso podrá reducir el caudal exigido por el sistema de seguridad, así como la acumulación de sustancias extrañas que puedan provocar un tapón.

No debe existir ninguna válvula de cierre entre el depósito y el sistema de seguridad. En este caso se ha colocado la válvula de 3 vías con opción de cierre manual debido a que, aunque esta válvula esté cerrada, el sistema de seguridad seguiría contando con al menos uno de los sistemas de seguridad.

Las válvulas de seguridad estarán provistas de sistema apagallamas, además de estar terminantemente prohibido la descarga de gas en puntos donde pueda crearse una atmósfera explosiva. Queda prohibido el uso de válvulas de peso muerto o contrapeso.

También se incluye un sistema de protección contra el sobrellenado que permitirá el llenado del recipiente hasta un 95% del volumen geométrico. La salida de la tubería de protección por sobrellenado deberá conducirse a una zona segura, alejada de las zonas de paso y a una distancia mínima de 3 metros de cualquier componente del depósito o la planta. La altura del punto de salida estará situada a una altura de entre 100 y 200 mm del suelo, quedando la salida en paralelo al suelo.

7.1.2. Elementos de control

En el depósito interior se incluye un sistema de bypass que une la fase gas con la fase líquida en el cual se incluye el manómetro y un dispositivo medidor de nivel. Ambos medidores incluyen un transductor electrónico que proporciona un valor de forma digital. El nivel se incorpora como sistema alternativo a la báscula para conocer la cantidad de producto restante en el interior del depósito.

Este sistema de bypass queda controlado por dos válvulas de paso situadas en la toma superior e inferior. Las válvulas seleccionadas son de tipo bola, de la marca Fisher, de la serie Z500, preparadas para resistir condiciones severas como alta presión o temperaturas extremas:



Figura 10: Válvula de control Bypass

Además, dentro de la conducción se incluyen tres válvulas más: Las válvulas de nivel superior e inferior y la válvula de bypass.

Para el llenado y vaciado del tanque se utilizará un conducto que se bifurcará en dos. Uno será el circuito de llenado y el otro de vaciado o consumo.

En el circuito de vaciado se instalará una válvula de consumo. Se ha elegido un obturador externo del fabricante FORT VALE que sirva como cierre en caso de avería y que además cierra el circuito de consumo cuando el depósito este siendo llenado. Se trata de una válvula de accionamiento manual.



Figura 11: Válvula de control de vaciado

Para el circuito de llenado se cuenta con una válvula de 3 vías preparada para la separación de las fases gas y líquido. Si el combustible es suministrado en fase gas por algún tipo de fallo, o simplemente es mezcla de fases por pérdidas en las conducciones, se derivará a través de una válvula de activación electrónica que recibirá una señal en función de la fase del GNL. La válvula utilizada es de tipo mariposa, con control eléctrico, pudiendo utilizarse también manualmente si fuera necesario. Es del fabricante KSB, el modelo TRIOBIS 150, y puede alcanzar temperaturas de 250 °C negativos y soportar 25 bar:



Figura 12: Válvula de llenado fase gas

Una vez superada esta válvula el gas accederá directamente al depósito por la parte superior.

Por el contrario, si el combustible se proporciona en fase líquida, o contiene mezcla de líquido-gas, la fase líquida será dirigida en la válvula de 3 vías hacia la válvula de llenado de fase líquida, la cual será de tipo bola controlada eléctricamente, capaz de resistir temperaturas criogénicas y presiones de decenas de bar. Esta válvula además contará

La leyenda del esquema es:

Nombre	Elemento
VG	Válvula llenado fase gas
VL	Válvula llenado fase líquida
VC	Válvula consumo
VR	Válvula rebosadero
PPR	Evaporador (Puesta Presión Rápida)
VEP	Válvula entrada PPR
VSP	Válvula salida PPR
RP	Regulador presión
F	Filtro
VAG	Válvula auxiliar fase gas
IN	Nivel
IP	Manómetro
vn	Válvula paso nivel
re	Válvula bypass
ri	Válvula nivel inferior
rs	Válvula nivel superior
TP	Transmisor de presión
TN	Transmisor de nivel
CS	Válvula de 3 vías (seguridad)
VS	Válvula de seguridad
SL	Válvula de seguridad línea
VA	Válvula alivio de presión
Pe	Dispositivo de seguridad envolvente
Tv	Toma de vacío
Mv	Dispositivo de medición de vacío

Tabla 10: Leyenda de elementos auxiliares

8.2. Envoltente exterior

El depósito dispone de cámara de asilamiento al vacío entre las dos envoltentes por lo que será necesaria la instalación de un sistema de protección que sea capaz de eliminar la presión que se pueda generar en esta cámara. Se establece según la legislación vigente que la superficie de salida de este sistema debe ser, como mínimo, de 0,2 milímetros cuadrados por cada litro de capacidad del depósito. Para este caso se cuenta con un depósito de 400000 litros, por lo que la superficie de salida será como mínimo de 80000 milímetros cuadrados. Si la abertura de salida es redonda se establece un diámetro mínimo de salida 319 mm, estableciendo en 320 mm el diámetro de salida.

Este sistema funciona por pérdida de vacío, es decir, se activará cuando se sobrepase en la cámara de vacío 1 bar de presión. Para ello se instala también un dispositivo de medición de vacío que enviará una señal eléctrica al dispositivo de seguridad cuando detecte la sobrepresión establecida. El vacuostato digital elegido es el siguiente:

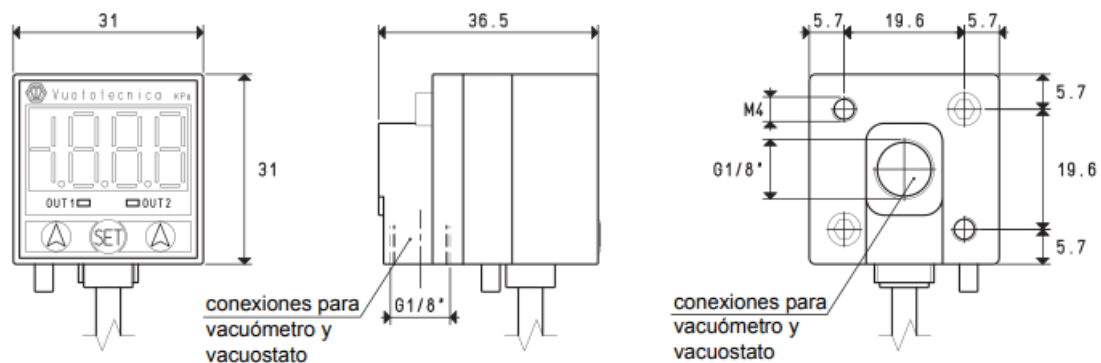


Figura 15: Vacuostato digital

Para la creación del vacío se dispone de una toma de vacío a través de la cual se conectará la instrumentación y equipamiento necesario para crear el vacío.

8.3. Vaporizador

Este apartado se centra en el regasificador de puesta en presión rápida (PPR) que irá situado bajo el depósito. Este elemento tiene la función básica de mantener la presión de servicio de la instalación. Su funcionamiento consiste en coger gas licuado del interior del tanque y vaporizarlo instantáneamente, introduciéndolo posteriormente en la zona gaseosa del tanque. Este sistema no tiene un funcionamiento continuado, ya que como se explicaba anteriormente el propio depósito regasificará una pequeña parte del gas licuado en el interior del recipiente debido a las pequeñas fugas de calor que puedan entrar, aumentando la presión en el interior.

La válvula reguladora de presión del PPR se instalará en la fase gas y contará con conexiones roscadas NPT hembra. Se instalará también un filtro criogénico del tipo “Y” a la entrada del regulador, a una distancia máxima de 300 mm de la válvula.

Las válvulas de entrada y salida del PPR deberán ser del tipo manuales criogénicas, una en la fase líquido y otra en la fase gas. Las válvulas elegidas son del fabricante Parker Bestobell de acero inoxidable:



Figura 16: Válvula de control PPR

El PPR dispondrá una conexión para dar suministro alternativo de gas de control de la planta. Esta toma deberá colocarse entre el regulador y la válvula de retorno al depósito, ya que es donde se puede obtener el gas con mayor temperatura.

Al tratarse de un depósito considerado de gran tamaño, el líquido deberá ser transformado a gas completamente. En depósitos más pequeños es posible compartir fases.

El PPR se dispondrá a modo de parrilla de tubos aleteados, de 5 metros de longitud, que compartirán colectores de entrada y salida, teniendo ambos colectores disposición diagonal. La unión del PPR al resto de la instalación se realizará mediante bridas para su fácil desmontaje en caso de avería.

El PPR será montado con una inclinación mínima de 5° y máxima de 10° para favorecer el tránsito y evitar estancamientos, siendo la cota máxima la salida de gas. Se establece la salida como cota máxima para evitar que pueda salir gas en fase líquida por la inclinación del PPR. La cota máxima debe quedar por debajo de la cota correspondiente a la generatriz inferior del depósito.

Dado que se trata de aportar el máximo calor posible al gas, se evitará colocar el PPR debajo de la generatriz inferior del depósito con el fin de evitar la sombra permanente del depósito o la posible aportación de agua de condensación que pueda escurrir a través de la superficie del depósito. Para la elección del lado en el que se va a instalar se realizará un estudio de la zona y se determinará el lado en el que recibirá mayor aportación solar.

El vaporizador y demás elementos complementarios deberán estar anclados al depósito y sus tuberías serán lo suficientemente flexibles para soportar los efectos de las dilataciones y contracciones térmicas que se puedan producir.

El perímetro de las aletas de los tubos (punta) debe quedar a una separación mínima de 250 mm del suelo, y de 300 mm del punto más cercano a la envolvente exterior del depósito, tal y como se indica en la figura 17:

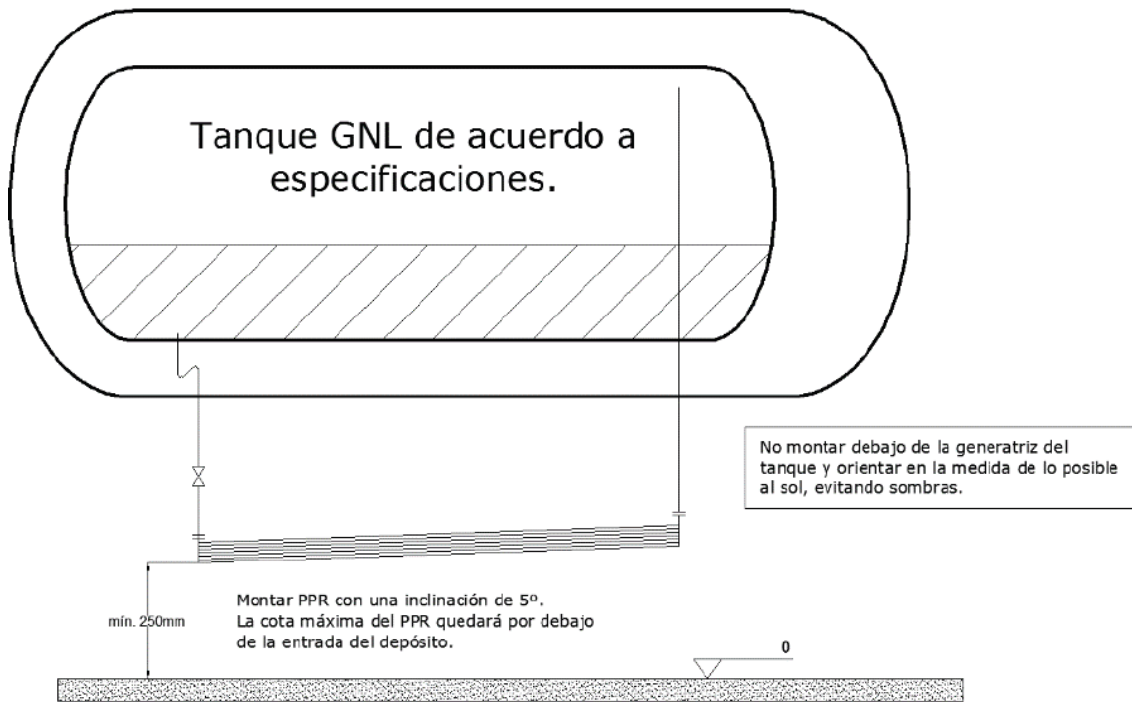


Figura 17: Colocación del PPR

Será necesario asegurar que la presión mínima del depósito no baje de los 3 bar en situaciones donde el caudal de extracción sea máximo. Para ello se instalará un número de tubos en función del caudal siguiendo las directrices de la tabla:

Consumo (Nm ³ /h)	Dimensionamiento PPR
Hasta 700	2 tubos
De 701 hasta 1400	4 tubos
De 1401 hasta 2350	6 tubos
De 2351 hasta 4700	7 tubos

Tabla 11: Tubos PPR según caudal

El caudal de consumo estimado no sobrepasa los 700 m³ por tanto se opta por un diseño con 2 tubos aleteados de 5 metros de longitud.

8.4. Tuberías

Los tramos de tubería comprendidos entre dos válvulas de cierre deben estar protegidos por un sistema de alivio de presión ya que en los cierres se produce el efecto “golpe de ariete” que puede multiplicar varias veces la presión en el interior de la tubería. También se puede elevar la presión si queda líquido criogénico o gas frío atrapado entre ambas válvulas.

La longitud mínima entre los dispositivos de seguridad y la zona fría debe ser como mínimo de 10 cm de forma que queden protegidos de la formación de hielo. La presión de tarado de estos dispositivos de seguridad será del 90% de la presión nominal de diseño de la tubería en la que se opere.

Para evitar el paso y salida de líquido criogénico se instalará una válvula automática de bloqueo en el límite de la instalación que cuando detecte que la temperatura del fluido sea inferior a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ corte la circulación.

8.5. Apagallamas

En todos los sistemas de evacuación de gas o líquido criogénico se debe instalar el correspondiente sistema apagallamas, y la descarga se realizará en puntos donde no se puedan crear atmósferas explosivas.

9. UBICACIÓN E INSTALACIÓN DEL DEPÓSITO

Para la instalación del depósito se dispone de un solar de 5000 m^2 anexo a la factoría a la que se pretende dar servicio de gas natural. El solar presenta un suelo de arena compacta con una resistencia de 2 kg/cm^2 . No hay vegetación en un radio de 80 metros desde el centro del solar. En la Figura 18 se indica en amarillo la parcela en la que se instalará el depósito, y en rojo la ubicación del depósito dentro de la parcela:



Figura 18: Parcela donde se instalará el equipo

El depósito quedará situado por tanto a 15 metros de la pared colindante a la fábrica en su punto más cercano, y por tanto a 50 metros de la factoría, y a 20 de la valla metálica que da al exterior, y por tanto a 30 de la carretera, cumpliendo las distancias mínimas que se especificarán más adelante.

9.1. Estudio de resistencia del suelo

Cuando se instala un elemento tan pesado como el depósito de este proyecto es necesario realizar un estudio previo del suelo para verificar que el peso no supondrá un problema, ya que de excederse el peso máximo soportado por el terreno este podría ceder o resquebrajarse pudiendo dañar el depósito, con el riesgo que ello conlleva.

Se trata por tanto de un suelo de arena compacta de resistencia 2 kg/cm^2 que debe sostener un depósito de 160 toneladas cuando se encuentra lleno. El depósito reposará sobre dos silletas, donde cada una tendrá una superficie de contacto con el suelo de 1212400 mm^2 . La superficie total de contacto con el suelo es por tanto 2424800 mm^2 , que deberán de soportar 160000 kg , obteniendo un coeficiente de resistencia:

$$R_{\text{depósito}} = \frac{160000 \text{ kg}}{2424800 \text{ mm}^2} \cdot \frac{100 \text{ mm}^2}{1 \text{ cm}^2} = 6,59 \text{ kg/cm}^2$$

El resultado obtenido no es válido ya que la resistencia del terreno debería ser mayor que la que ejerce el depósito. Para obtener un valor correcto de resistencia se realizará una cimentación con hormigón armado de arena y grava natural que una vez estabilizado en el tiempo ofrecerá una resistencia de 89 kg/cm^2 . Esta cimentación se aprovechará para la construcción del cubeto de hormigón que se detallará más adelante.

9.2. Condiciones generales

El recinto en el que se encuentra el depósito quedará protegido por una valla metálica ligera de altura superior a 2 metros que impida el acceso de personas no autorizadas para evitar que las instalaciones puedan ser manipuladas. En la zona colindante a la factoría se construirá un muro de cumplimiento de distancia de seguridad.

La valla contará con dos salidas contrapuestas para la carga y descarga de GNL, con puertas de apertura en la dirección de salida. Se instalarán también dos accesos peatonales al recinto, uno desde la factoría y otro desde la calle.

Se realizará un vial desde la puerta exterior hasta el lado contiguo del depósito para el acceso del camión cisterna marcha atrás. Además de la construcción de este vial se limpiará el recinto de maleza o elementos que sean inflamables para reducir el riesgo de incendio.

En el exterior de la valla metálica se colocará en un lugar visible un cartel como el siguiente:

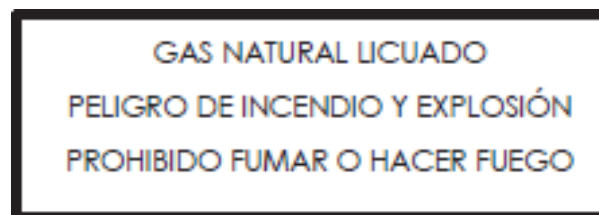


Figura 19: Cartel en exterior de parcela

9.3. Distancias de seguridad

En este punto se detallarán las distancias mínimas que deberán existir entre los límites del depósito y sus elementos auxiliares y los lugares que se citan.

Estas distancias vienen especificadas en la Instrucción Técnica Reglamentaria MIE-AP15 del reglamento de aparatos a presión referente al almacenamiento de gas natural licuado en depósitos criogénicos. Las distancias se dan en función del tipo de depósito al que se refieran:

CATEGORÍA	CAPACIDAD
A	Desde 450 a 5000 litros.
B	Desde 5001 a 20000 litros.
C	Desde 20001 a 60000 litros.
D	Desde 60001 a 200000 litros.
E	Desde 200001 a 3000000 litros.

Tabla 12: Categoría según capacidad

El depósito de este proyecto es por tanto del tipo E, siendo este el mayor de todos. Para este tipo se definen las distancias mínimas:

Tipo de riesgo	Distancia mínima (m)
Locales de trabajo (edificaciones, vestuarios...).	20
Sótanos, alcantarillas, galerías de servicio.	20
Motores, interruptores (no antideflagrantes).	15
Depósitos de materiales inflamables aéreos.	10
Depósitos de materiales inflamables subterráneos.	5
Vías públicas, carreteras, ferrocarriles.	30
Instalaciones con peligro de incendio.	30
Llamas controladas (mecheros, sopletes).	5
Propiedad colindante.	5
Proyección líneas eléctricas.	15
Edificios habitables.	15

Tabla 13: Distancias mínimas

9.4. Instalación eléctrica

El depósito y todos los elementos auxiliares en contacto con él deberán estar conectados a tierra con resistencia inferior a 20 ohmios, siguiendo en todo momento la reglamentación técnica vigente relativa a equipos electrotécnicos de baja tensión, en el apartado especificado para locales que presenten riesgo de incendio o explosión.

9.5. Protección contra incendios

Por reglamentación la instalación deberá contar con extintores cumpliendo la proporción de 10 kg de polvo seco por cada 1000 kg de combustible. Si el depósito tiene una capacidad máxima de 105087 kg serán necesarios 105 kg de polvo seco, que serán proporcionados en 5 extintores de tipo carro de 25 kg cada uno.



Figura 20: Extintor 25 kg

Los depósitos estarán colocados en la zona de los depósitos bajo un techado sin paredes para su fácil acceso.

9.6. Protección contra derrames

Los depósitos de capacidad superior a 50000 litros contarán con cubeto de contención del combustible derramado.

El cubeto estará formado por hormigón armado y será construido sobre la cimentación, de forma que rodee completamente el depósito formando un muro de altura aún por determinar. Este deberá de soportar las acciones mecánicas, químicas y térmicas que el fluido pueda provocar.

Cuando el hormigón se enfrenta a temperaturas negativas se produce un fenómeno conocido como sobrepresión del hielo que consiste en que las partículas de agua albergadas en los poros al convertirse en hielo comienzan a dilatar los poros debido al

incremento de volumen de un 9%. Como consecuencia, se presentan unos esfuerzos de tensión que originan grietas y pueden debilitar la estructura.

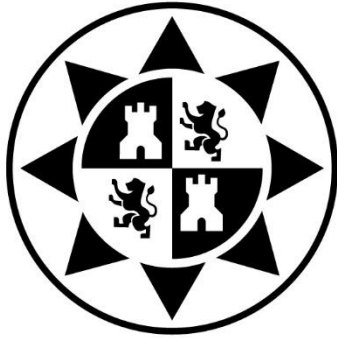
La solución a este problema consiste en el recubrimiento del hormigón armado, aislándolo completamente del exterior y del vapor de agua contenido en el ambiente. El recubrimiento se realizará con un termoplástico criogénico capaz de soportar temperaturas de hasta -200 °C sin que su estructura se vea debilitada.

El termoplástico elegido ha sido Poliimida sin aditivos, cuyo nombre comercial es *TECASINT 4011 natural*. Este tipo de plástico tiene muy baja absorción de humedad y alta estabilidad oxidativa, además de ofrecer una gran resistencia química. Su conductividad térmica es muy reducida, por lo que será buen aislante térmico para que el hormigón se resienta lo menos posible.

La capacidad del cubeto deberá ser tal que el volumen útil mínimo sea aquel que permita recoger todo el contenido del depósito cuando se encuentra lleno. Para ello se establecerá la condición de que la altura del cubeto no supere los 1,5 metros, siendo necesario alcanzar el volumen deseado aumentando el perímetro.

Se establecen unas medidas iniciales para el cubeto por tanto de 1,5 m x 30 m x 10 m que otorgan un volumen de 450 m³. Al que habrá que descontarle la parte de volumen sumergida del depósito y los elementos auxiliares.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES**



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

DOCUMENTO II

CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Alumno: Víctor López Reyes

Director: Isidoro J. Martínez Mateo

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Departamento: Ingeniería de Materiales y Fabricación

Fecha: Septiembre de 2019

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	3
1. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS.....	4
1.1. Términos y definiciones	4
1.2. Símbolos	5
2. MATERIAL.....	6
2.1. Elección del material base.....	6
2.2. Soldadura	8
2.3. Revestimiento	8
3. DISEÑO	8
3.1. Generalidades	8
3.2. Criterios básicos de diseño.....	9
3.3. Cálculo del espesor.....	13
3.4. Tuberías en la zona de enlace	19
3.5. Cálculo del volumen	24
3.6. Cargas adicionales distintas de la presión.....	25
3.7. Peso del recipiente en vacío.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Contenidos máximos de carbono, fósforo y azufre para aceros destinados a soldadura	7
Tabla 2: Aceros inoxidables austeníticos y sus temperaturas de metal mínimas más bajas TM.....	7
Tabla 3: Relaciones en fondo tipo Korbbogen	13
Tabla 4: Relaciones en fondo tipo Korbbogen	13
Tabla 5: Relaciones de validez para fondo Korbbogen	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema fondo Korbbogen	13
Figura 2: Gráfica para obtención de Beta.....	17
Figura 3: Gráfica para obtención del espesor de la placa de refuerzo.....	20
Figura 4: Elementos y medidas para un fondo cóncavo	21
Figura 5: Fondo tipo Korbbogen.....	24
Figura 6: Esquema de silletas	26
Figura 7: Longitud válida según espesor	27
Figura 8: Obtención del coeficiente K11	28
Figura 9: Esquema de orejetas para izado	29
Figura 10: Camión grúa del tipo GROVE GMK5220.....	30
Figura 11: Mapa de izado para el camión grúa GROVE GMK5220.....	30
Figura 12: Cargas máximas según altura	31
Figura 13: Fuerzas en las orejetas durante el izado	31
Figura 14: Elementos necesarios para la sujeción sobre silletas	34
Figura 15: Esquema de silleta rectangular	34
Figura 16: Determinación de longitudes en la silleta	35

1. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

Para este documento se establecen unas definiciones y símbolos complementarios a los aportados en la memoria descriptiva que ayudarán a comprender lo descrito en este capítulo.

1.1. Términos y definiciones

- **Acción:** Efecto termomecánico impuesto por un agente externo que genera una tensión y/o una deformación en una estructura como puede ser presión, fuerza o temperatura impuesta.
- **Espesor útil:** Espesor real capaz de soportar las cargas cuando el metal se encuentra en estado corroído.
- **Espesor admisible:** Espesor aceptable entre el espesor mínimo requerido e y el espesor útil e_a .
- **Presión de cálculo:** Presión diferencial utilizada para el cálculo de un componente.
- **Temperatura de cálculo:** Temperatura utilizada para el cálculo de un componente.
- **Compartimento:** Espacio de fluido de una sola pieza en un equipo a presión.
- **Componente:** Elemento individual del equipo a presión que puede ser calculado por separado.
- **Intervalo de fluencia:** Intervalo de temperatura en el cual las características del material utilizadas en el diseño son función del tiempo.
- **Aplicaciones criogénicas:** Aplicaciones que implican gases a temperaturas inferiores a -80 °C.
- **Presión de diseño:** Presión en la parte superior de cada compartimento del equipo a presión, elegida para la determinación de la presión de cálculo de cada componente.
- **Temperatura de diseño:** Temperatura del fluido elegida para la determinación de la temperatura de cálculo de cada componente.
- **Presión diferencial:** Presión cuyo valor se obtiene por diferencia de la presión interior y exterior.
- **Unión soldada determinante:** Unión soldada a tope, con plena penetración y cuya configuración debido al hecho de las tensiones de membrana es determinante para el espesor del componente.
- **Situación:** Combinación de acciones simultáneas.
- **Unión principal:** Unión soldada que une las partes principales sometidas a presión.
- **Presión máxima permitida:** Para un recipiente a presión completo, el valor mínimo de las presiones máximas permitidas de todos los componentes.
- **Espesor mínimo posible después de la fabricación:** Espesor mínimo posible después de la fabricación.
- **Tensión nominal de cálculo:** Valor de la tensión a utilizar en las fórmulas para el cálculo de componentes sometidos a presión.

- **Espesor nominal:** Espesor tal como est́ especificado en los planos.
- **Presi3n de ensayo:** Presi3n a la cual se somete el equipo para probarlo.
- **Temperatura de ensayo:** Temperatura a la cual se realiza de la prueba de presi3n de un equipo.
- **Volumen:** Volumen interno de cada compartimento, incluido el volumen de las tuberías hasta el primer elemento de conexi3n (brida, acoplamiento, soldadura) y excluido el volumen de las estructuras internas permanentes (por ejemplo, deflectores, agitadores).

1.2. Símbolos

a	Espesor de la garganta de soldadura (mm)
e	Espesor requerido (mm)
e_n	Espesor nominal (mm)
$e_{mín.}$	Espesor mínimo posible después de la fabricaci3n (mm)
e_a	Espesor útil (mm)
c	Sobreespesor de corrosi3n o de erosi3n (mm)
f	Tensi3n nominal de ćculo (MPa)
f_d	Valor ḿximo de la tensi3n nominal de ćculo para las situaciones normales de servicio (MPa)
f_{exp}	Valor ḿximo de la tensi3n nominal de ćculo para las situaciones excepcionales (MPa)
f_{test}	Valor ḿximo de la tensi3n nominal de ćculo para las situaciones de ensayo (MPa)
n_{eq}	Número de ciclos de presi3n de plena amplitud equivalentes
P	Presi3n de ćculo (MPa)
P_d	Presi3n de diseño (MPa)
$P_{ḿx}$	Presi3n ḿxima permitida (MPa)
PS, P_s	Presi3n ḿxima admisible (MPa)
P_{test}	Presi3n de ensayo (MPa)
R_{eH}	Valor ḿnimo del límite superior de fluencia (MPa)
R_m	Valor ḿnimo de la resistencia a la tracci3n (MPa)
$R_{m/T}$	Valor ḿnimo de la resistencia a la tracci3n a la temperatura T (MPa)
$R_{p0,2}$	Valor ḿnimo del límite convencional de elasticidad al 0,2% (MPa)

$R_{p0,2/T}$	Valor mínimo de límite convencional de elasticidad al 0,2% a la temperatura T (MPa)
$R_{p1,0}$	Valor mínimo del límite convencional de elasticidad al 1,0% (MPa)
$R_{p1,0/T}$	Valor mínimo del límite convencional de elasticidad al 1,0% a la temperatura T (MPa)
T	Temperatura de cálculo (°C)
T_d	Temperatura de diseño (°C)
T_{test}	Temperatura de ensayo (°C)
$TS_{máx.}, TS_{mín.}$	Temperaturas admisibles máximas/mínimas (°C)
z	Coeficiente de unión
ν	Relación de Poisson

2. MATERIAL

2.1. Elección del material base

2.1.1. Requisitos generales

En la memoria descriptiva se elegía como material para la fabricación del depósito interior el acero inoxidable austenítico AISI 316L. Para considerar como válido este material es necesario cumplir ciertos requisitos establecidos en la norma UNE EN 13445-2. Estos requisitos serán:

- Los materiales para partes destinadas a soportar presión deberán de ir acompañados por documentos de inspección de acuerdo con la norma EN 10204:2004.
- Los materiales deben estar exentos de defectos superficiales e internos que puedan dar lugar a fallo en servicio y perjudicar la posibilidad de utilizarlos según el diseño inicial.
- Los aceros deben tener un alargamiento mínimo especificado después de la rotura, medido sobre una longitud de referencia.

$$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$$

Donde:

S_0 es la sección transversal original dentro de la longitud de referencia.

El alargamiento mínimo permitido después de la rotura debe ser mayor o igual que el 14%.

Para el acero AISI 316L este valor se aproxima al 40%, por lo que sería válido.

- La composición química de los aceros destinados a soldeo o conformación no debe superar los valores que se indican en la siguiente tabla:

Aceros inoxidables austeníticos	% C	% P	% S
Con contenidos de CR \leq 19%	0,08	0,045	0,015
Con contenidos de CR $>$ 19%	0,10	0,035	0,015

Tabla 1: Contenidos máximos de carbono, fósforo y azufre para aceros destinados a soldadura

Origen: UNE-EN 13445-2

En el caso que nos concierne, para el acero AISI 316L se cumpliría este requisito ya que si se comprueba la composición química su contenido en Níquel es $<19\%$, perteneciendo al primer grupo. Su contenido en Carbono es 0,03, su contenido en Fósforo es máximo 0,045 y su contenido en Azufre es máximo 0,03. En este último caso no sería válido por tanto sería necesario reducir su nivel de Fósforo ya que 0,03 es el valor máximo admisible, pudiendo tomar un valor inferior.

2.1.2. Requisitos de temperatura

Este depósito está siendo diseñado para albergar GNL en su interior, que como ya se ha mencionado anteriormente, debe ser almacenado a -163°C . Para equipos sometidos a presión con temperaturas de diseño iguales o inferiores a 50°C hay 3 métodos alternativos para establecer criterios para la prevención de rotura frágil a bajas temperaturas de aceros que se presentan en forma de chapa, tubo, banda, colada, bridas, elementos de fijación, soldados y forjados utilizados en las partes sometidas a presión. Estos criterios están basados en requisitos de energía de choque a las temperaturas especificadas para el material de la base, la zona afectada térmicamente en la soldadura y los metales soldados.

El método 1 consiste en una serie de tablas empíricas basadas en la experiencia en servicio de los aceros aleados al níquel con $\text{Ni} \geq 3\%$ hasta 9% , para aceros austeníticos y para pernos y tuercas. Las tablas que se muestran a continuación enumeran una lista de temperaturas de referencia por diseño para espesores máximos a unos niveles de resistencia dados representados por los aceros especificados en las normas europeas armonizadas de materiales. Para el caso que nos concierne, relativo al material X2CrNiMo17-12-2 con número 14404, al tratarse de un acero inoxidable austenítico recocido, puede ser utilizado por debajo de la temperatura T_M sin ensayo de choque:

Material	Número Material	T_M en $^{\circ}\text{C}$
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	-196

Tabla 2: Aceros inoxidables austeníticos y sus temperaturas de metal mínimas más bajas T_M

Origen: UN UNE 13445-2

La temperatura de servicio a la que operará el depósito es superior a -196°C , por lo tanto, este material es válido.

2.2. Soldadura

2.2.1. Generalidades

Cuando se unen metales por procedimientos de soldadura, es necesaria la elección de los consumibles y de los procedimientos de soldadura adecuados, de acuerdo con los requisitos establecidos por la Norma EN 13445-4. También será necesario asegurar el cumplimiento de las propiedades requeridas de energía de choque en el material soldado y en las regiones afectadas térmicamente, según los mismos criterios de elección que el apartado anterior.

Los procedimientos de soldadura se verán más adelante, mientras que los requerimientos de energía de choque por parte del material base son de sobrado cumplimiento ya que al tratarse de un acero inoxidable austenítico recocido no necesita ensayo de choque.

2.3. Revestimiento

2.3.1. Generalidades

En este caso no procede la aplicación de la norma ya que esta está pensada para el contacto directo entre el material base y el revestimiento, no superando en más de 50 cm² la superficie no adherida. Para el caso que nos concierne se situará una capa de material aislante entre ambos aceros, siendo el acero exterior exclusivamente protector, no realizando ningún esfuerzo mecánico.

3. DISEÑO

3.1. Generalidades

Antes de comenzar con el diseño es conveniente comprender cuando se puede aplicar la norma EN 13445-3, la cual vamos a usar en este diseño. Las condiciones que se imponen son:

- Los materiales y soldaduras no estarán sometidos a una corrosión localizada producida por el producto que se va a almacenar en el recipiente, o que vaya a estar en presencia directa en condiciones razonablemente previsibles.
- Todas las temperaturas de cálculo están por debajo del intervalo de fluencia o bien una temperatura de cálculo está dentro de este intervalo, pero las características del material que dependen del tiempo están disponibles en las normas de materiales.

Una vez aclarados los aspectos anteriores mencionar que cuando se haga referencia a corrosión se referirá al sentido de oxidación, formación de cascarilla, abrasión, erosión y todas las demás formas de desgaste.

En todos los casos en los que pueda reducirse el espesor de pared debido a corrosión o erosión superficial por los productos contenidos en el recipiente o por la atmósfera, se deberá de proporcionar un sobreespesor suficiente para asegurar la vida útil para la cual está diseñado el recipiente. Aplicando esto a nuestro caso no nos influye en el diseño, no siendo necesario calcular un sobreespesor, ya que el GNL propiamente dicho no es

una sustancia altamente corrosiva, si pudiendo serlo el agua contenida en él. Es por esto que el combustible se somete a un proceso de deshidratación. Además, el acero austenítico AISI 316L es altamente resistente a la corrosión debido a su alto contenido en Cromo, siendo este una versión mejorada del acero AISI 316, preparado para minimizar la precipitación de carburos durante la soldadura y de esta forma no perder prestaciones frente a la corrosión.

3.2. Criterios básicos de diseño

3.2.1. Situaciones

Durante el diseño de un recipiente será necesario tener en cuenta las cargas siguientes:

- a) presión interior y/o exterior;
- b) peso del recipiente;
- c) peso máximo del producto contenido, en las condiciones de servicio;
- d) otras cargas o reacciones soportadas por el recipiente, incluidas las ejercidas durante el transporte y la instalación.

Además de las ya mencionadas, será necesario tener en cuenta el efecto de las cargas siguientes si no hubiera sido posible demostrar la adecuación del diseño propuesto para el comportamiento previsto:

- e) tensiones engendradas por las orejetas para izar, anillos, tensores, silletas, estructuras internas o tuberías conectadas o desalineación intencional de las fibras medias de componentes adyacentes;
- f) las cargas debidas a impactos generados por un golpe de ariete o por los movimientos del contenido del recipiente;
- g) las tensiones engendradas por las fluctuaciones de presión y temperatura y por las cargas exteriores aplicadas al recipiente;

3.2.2. Clasificación de las situaciones

- *Situaciones normales de servicio*

Son aquellas situaciones en las cuales el recipiente esta sometido a la presión de funcionamiento, incluidos el arranque y la parada. En estas situaciones los parámetros de cálculo que deben utilizarse son:

- La presión P de cálculo basada en las condiciones mas severas de presión diferencial y temperatura que puedan existir simultáneamente. En su caso se debe de tener en cuenta la presión hidrostática y la presión hidrodinámica y debe basarse en la presión diferencial máxima posible en valor absoluto entre la presión interior del recipiente y la exterior.
- La tensión nominal de cálculo $f = f_d$ a la temperatura de cálculo viene definida a partir de las características de los materiales, así como de los coeficientes de seguridad definidos en la Norma UNE-EN 13445-3. Es necesario utilizar los valores de resistencia a la tracción y límite elástico mínimos especificados en la documentación técnica del material. Si el material se somete un tratamiento térmico que reduzca los valores

mínimos de estas propiedades, será necesario utilizar este nuevo valor más bajo.

Para el acero AISI 316L tal y como se definió en la memoria descriptiva los valores son:

- Resistencia a la tracción mínima (R_m): 460 N/mm²
- Límite de elasticidad aparente (R_e): 240 N/mm²
- Alargamiento mínimo después de rotura (A): 40%

Las condiciones a temperatura de diseño son:

- Resistencia a la tracción mínima ($R_{m/T}$): 460 N/mm²
- Límite de elasticidad aparente ($R_{e/T}$): 240 N/mm²
- Alargamiento mínimo después de rotura (A_T): 40%

Se ha considerado que la temperatura de diseño o cálculo es la misma que la temperatura de servicio.

Para aceros austeníticos con alargamiento a la rotura >35% la tensión nominal de cálculo para situaciones normales de servicio f no debe ser superior a f_d , siendo este último el valor superior de cualquiera de los valores siguientes:

- El valor mínimo del límite convencional de elasticidad al 1% a la temperatura de cálculo, dividido por el coeficiente de seguridad 1,5.

$$f_d = \frac{240}{1,5} = 160 \text{ N/mm}^2$$

- Si el valor de $R_{m/T}$ está disponible, será el menor de los siguientes:
 - El valor mínimo de la resistencia a la tracción a la temperatura de cálculo dividido por el coeficiente de seguridad 3,0.

$$f_d = \frac{460}{3} = 153,33 \text{ N/mm}^2$$

- El valor mínimo del límite convencional de elasticidad al 1% a la temperatura de cálculo dividido por el coeficiente de seguridad 1,2.

$$f_d = \frac{240}{1,2} = 200 \text{ N/mm}^2$$

De esta segunda forma se obtiene el valor $f_d = 153,33$ al tratarse del valor menor.

Si se compara el valor obtenido con el primer resultado y eligiendo el valor superior, se puede afirmar definitivamente que

$f_d = 160 \text{ N/mm}^2$, y por tanto **en situaciones normales de servicio**, a temperatura de servicio,

$$f = f_d = 160 \text{ N/mm}^2$$

El cálculo de f_d se puede resumir como:

$$f_d = \text{máx.} \left[\left(\frac{R_{e/T}}{1,5} \right); \text{mín} \left(\frac{R_{e/T}}{1,2}; \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right]$$

- El espesor útil es $e_a = e_{min} - C$, donde C es el espesor de corrosión o erosión, que en este caso no tendrá influencia.
- El coeficiente de unión será directamente $z = 1,0$.

- *Situaciones excepcionales*

Son aquellas con baja probabilidad de aparecer, pero dado el caso necesitarían el paro de emergencia con paso a condiciones de seguridad y la posterior revisión e inspección del recipiente antes de la vuelta a condiciones normales de servicio. En estas situaciones los parámetros de cálculo a utilizar son:

- La presión P de cálculo definida para condiciones normales de servicio.
- La tensión nominal de cálculo $f = f_{exp}$ a la temperatura de cálculo. Se considerará que en este caso los coeficientes de seguridad no deberán ser inferiores a los utilizados para las situaciones de ensayo.
- El espesor útil es $e_a = e_{min} - C$, donde C es el espesor de corrosión o erosión, que en este caso no tendrá influencia.
- El coeficiente de unión será directamente $z = 1,0$.

- *Situaciones de ensayo para la evaluación final*

Se consideran las situaciones correspondientes a los ensayos después de fabricación que se ven en el apartado de Fabricación. En estas situaciones los parámetros de cálculo a utilizar son:

- La presión de ensayo $P_{test} = P_t$ queda definida por las condiciones del ensayo definidas en el apartado de Fabricación.
- La tensión nominal de cálculo $f = f_{test}$ se puede definir de forma resumida de la siguiente forma:

$$f_{test} = \text{máx.} \left[\left(\frac{R_{e/T, test}}{1,05} \right); \left(\frac{R_{m/T, test}}{2} \right) \right]$$

Se va a considerar que los valores a utilizar para la resistencia a la tracción y el límite elástico van a ser los mismos que para las condiciones normales, ya que no se somete a ningún tratamiento térmico que reduzca estos valores.

$$f_{test} = \text{máx.} \left[\left(\frac{240}{1,05} \right); \left(\frac{460}{2} \right) \right] = \text{máx.} [(228,57); (230)]$$

Se deduce por tanto que en condiciones de ensayo para evaluación final el valor de la tensión nominal podrá alcanzar como valor máximo:

$$f = f_{test} = 230 \text{ N/mm}^2$$

- El espesor útil es $e_a = e_{min}$.
- El coeficiente de unión será directamente $z = 1,0$.

- *Situaciones de ensayo en servicio*

Corresponden a los ensayos que se le realizarán al depósito durante toda su vida útil, definidos por el usuario. Los parámetros de cálculo a utilizar son:

- La presión de ensayo P_{test} será aquella presión de ensayo en servicio que decida el usuario final del depósito respetando siempre las reglamentaciones nacionales. Para recipientes con presión hidrostática durante el funcionamiento que exceda el 3% de la presión de diseño, la presión de ensayo debe modificarse de acuerdo con la ecuación:

$$P_{t,mod} = P_t + (P_{hyd,ope} - P_{hyd,test})$$

Pero siempre se tiene que cumplir que

$$P_{t,mod} > P_t$$

Donde

$P_{t,mod}$ es la presión de ensayo modificada;

P_t es $P_t = 1,25 \cdot P_d$;

$P_{hyd,ope}$ es la presión hidrostática máxima durante el funcionamiento;

$P_{hyd,test}$ es la presión hidrostática máxima durante el ensayo hidrostático.

- La tensión nominal de cálculo $f = f_{test} = 230 \text{ N/mm}^2$ al tratarse de las mismas condiciones que el apartado anterior.
- El espesor útil es $e_a = e_{min} - C$, donde C es el espesor de corrosión o erosión, que en este caso no tendrá influencia.
- El coeficiente de unión será directamente $z = 1,0$.

3.3. Cálculo del espesor

En este apartado se va a proceder al cálculo del espesor necesario. Se utilizará el método DBF (Diseño por Fórmulas). Para ello se va a definir primero la forma y partes del recipiente.

El depósito va a estar constituido en su estructura básica por una envolvente cilíndrica formada por diversas virolas soldadas y dos fondos tipo Korbogen. Dentro del depósito se instalarán rigidizadores para asegurar la forma de la estructura en servicio.

Un fondo tipo Korbogen tiene las siguientes características:

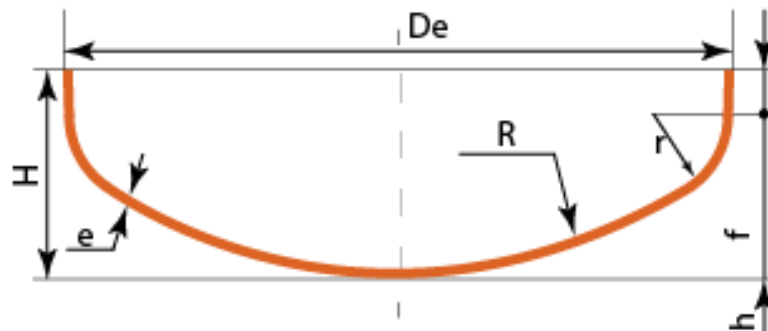


Figura 1: Esquema fondo Korbogen

Sus dimensiones vienen definidas por las siguientes relaciones:

Relaciones en fondo tipo Korbogen	
R/D_e	0,8
r/D_e	0,154

Tabla 3: Relaciones en fondo tipo Korbogen

Las abreviaturas y símbolos siguientes se utilizan como complemento de los mencionados al principio de este informe:

- D_e es el diámetro exterior de la envolvente
- D_i es el diámetro interior de la envolvente
- D_m es el diámetro medio de la envolvente
- r es el radio de la parte tórica de enlace
- R es el radio de la parte cóncava del fondo

Si se toma el valor de D_e como 4 metros, según la estimación inicial, se obtienen unos valores para los radios de:

Relaciones en fondo tipo Korbogen		
$R/4$	0,8	$R = 3,2 \text{ m}$
$r/4$	0,154	$r = 0,616 \text{ m}$

Tabla 4: Relaciones en fondo tipo Korbogen

Es necesario tener en cuenta que el valor de la relación e/D_e no sea superior a 0,16.

3.3.1. Envoltente cilíndrica

Para envoltente cilíndricas la norma UNE-EN 13445-3 dicta que el espesor requerido debe calcularse a partir de una de las dos ecuaciones siguientes:

$$e = \frac{P \cdot D_i}{2f \cdot z - P}$$

o bien

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P}$$

También se puede calcular la presión máxima admitida para un espesor dado, pero elegiremos la segunda ecuación de las anteriores, ya que se dispone de el diámetro exterior. El espesor calculado corresponde a la situación normal de servicio, ya que estas serán las condiciones en las que opere el depósito la mayor parte del tiempo. Los valores utilizados son, por tanto:

$$P = 15 \text{ bar} = 1,5 \text{ N/mm}^2$$

$$D_e = 4000 \text{ mm}$$

$$f = 160 \text{ N/mm}^2$$

$$z = 1$$

$$e_1 = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P} = \frac{1,5 \cdot 4000}{2 \cdot 160 + 1,5} = \mathbf{18,66 \text{ mm}}$$

Se obtiene por tanto que el espesor mínimo requerido para las condiciones normales de servicio es de 18,66 mm. Ahora se va a comprobar el espesor mínimo en condiciones de ensayo para evaluación final. Para este caso los valores de las variables son los mismos, variando únicamente la tensión nominal de cálculo:

$$f = f_{test} = 230 \text{ N/mm}^2$$

El cálculo del espesor requerido para condiciones de ensayo se obtendrá de la misma forma que para condiciones normales de servicio.

$$e_2 = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P} = \frac{1,5 \cdot 4000}{2 \cdot 230 + 1,5} = \mathbf{13,00 \text{ mm}}$$

Para el diseño final se seleccionará el mayor de estos espesores, siendo este el espesor de condiciones normales de servicio, es decir:

$$e = e_1 = 18,66 \text{ mm} \approx 19 \text{ mm}$$

3.3.2. Fondos torisféricos tipo Korbbogen

Para el cálculo del espesor mínimo requerido en los fondos es necesario plantear primero una serie de símbolos y abreviaturas específicos que serán utilizados para el cálculo:

- D_e es el diámetro exterior del borde cilíndrico;
- D_i es el diámetro interior del borde cilíndrico;
- e_b es el espesor requerido para la parte tórica de unión, para evitar el pandeo plástico;
- e_s es el espesor requerido para el fondo, para limitar la tensión de membrana en la parte central;
- e_y es el espesor requerido para la parte tórica de unión, para evitar una plastificación asimétrica;
- f_b es la tensión de cálculo en la ecuación relativa al pandeo;
- h_i es la altura interior del fondo medida a partir de la línea de tangencia;
- K es el factor de forma para un fondo elíptico;
- N es un parámetro definido más adelante;
- R es el radio interior de la parte esférica central del fondo torisférico;
- X es la relación del radio del borde al diámetro interior de la envolvente;
- Y es un parámetro definido más adelante;
- Z es un parámetro definido más adelante;
- β es un coeficiente obtenido gráficamente.

Si en el caso anterior se partía de un diámetro exterior, para este cálculo se va a usar el diámetro interior. Este diámetro será el mismo que el diámetro interior de la envolvente, para dar continuidad interior y evitar zonas donde se puedan formar picos de presión.

$$D_i = D_e - 2 \cdot e = 4000 - 2 \cdot 19 = 3962 \text{ mm}$$

También han sido establecidos previamente los valores de:

$$r = 616 \text{ mm}$$

$$R = 3200 \text{ mm}$$

$$P = 1,5 \text{ N/mm}^2$$

$$f = 160 \text{ N/mm}^2$$

$$z = 1$$

Para poder utilizar la fórmula de cálculo incluida en la Norma UNE-EN 13445 es necesario que se cumplan las siguientes condiciones de aplicación:

$$r \leq 0,2 D_i$$

$$r \geq 0,06 D_i$$

$$r \geq 2e$$

$$e \leq 0,08 D_e$$

$$e_a \geq 0,001 D_e$$

$$R \leq D_e$$

El espesor requerido debe de ser el mayor de los espesores e_s , e_y y e_b , donde:

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2f \cdot z - 0,5P}$$

$$e_y = \frac{\beta \cdot P(0,75R + 0,2D_i)}{f}$$

Donde β es obtenida a partir de la siguiente figura:

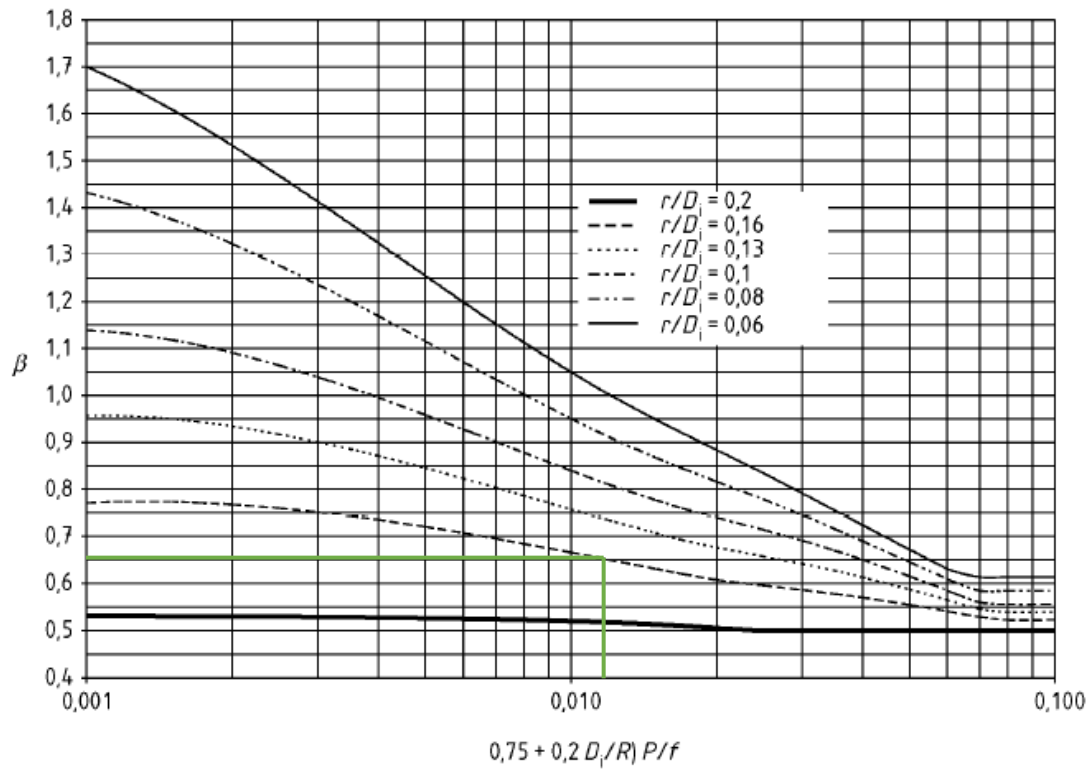


Figura 2: Gráfica para obtención de Beta

$$r/D_i = 616/3962 = 0,155 \sim 0,16$$

$$\left(0,75 + 0,5 \frac{D_i}{R}\right) P/f = \left(0,75 + 0,5 \frac{3962}{3200}\right) 1,5/160 = 0,01286$$

$$\beta = 0,65$$

Y por último:

$$e_b = (0,75R + 0,2D_i) \left[\frac{P}{111f_b} \left(\frac{D_i}{r}\right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}}$$

Donde

$$f_b = \frac{R_{e/T}}{1,5} = \frac{240}{1,5} = 160 \text{ N/mm}^2$$

Ya se pueden calcular los tres espesores al disponer del valor de todas las variables que intervienen:

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2f \cdot z - 0,5P} = \frac{1,5 \cdot 3200}{2 \cdot 160 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1,5} = 15,04 \text{ mm}$$

$$e_y = \frac{\beta \cdot P(0,75R + 0,2D_i)}{f} = \frac{0,65 \cdot 1,5 \cdot (0,75 \cdot 3200 + 0,2 \cdot 3962)}{160} = 19,43 \text{ mm}$$

$$e_b = (0,75R + 0,2D_i) \left[\frac{P}{111f_b} \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} =$$

$$= (0,75 \cdot 3200 + 0,2 \cdot 3962) \left[\frac{1,5}{111 \cdot 160} \left(\frac{3981}{616} \right)^{0,825} \right]^{\frac{1}{1,5}} = 17,17 \text{ mm}$$

De aquí se deduce que para un fondo torisférico tipo Korbogen, en su forma más simple sin tuberías y unido mediante cordón de soldadura a la envolvente cilíndrica, el espesor mínimo requerido es:

$$e = \max. [e_s, e_y, e_b] = 19,43 \text{ mm} \sim 20 \text{ mm}$$

También se va a calcular la altura interior del depósito h_i definida anteriormente como:

$$h_i = R - \sqrt{\left(R - \frac{D_i}{2}\right) \cdot \left(R + \frac{D_i}{2} - 2r\right)} =$$

$$= 3200 - \sqrt{\left(3200 - \frac{3962}{2}\right) \cdot \left(3200 + \frac{3962}{2} - 2 \cdot 616\right)} = 1005,95 \text{ mm}$$

Una vez obtenidos todos los espesores y medidas necesarias se va a comprobar su validez mediante las relaciones que se especificaban al principio de este apartado.

Relaciones de validez en mm	
$r \leq 0,2 D_i$	$616 \leq 792,4$
$r \geq 0,06 D_i$	$616 \geq 237,72$
$r \geq 2e$	$616 \geq 40$
$e \leq 0,08 D_e$	$20 \leq 320,08$
$e_a \geq 0,001 D_e$	$20 \geq 4$
$R \leq D_e$	$3200 \leq 4001$

Tabla 5: Relaciones de validez para fondo Korbogen

Se comprueba que todas las relaciones se cumplen y, por tanto, todas las medidas son válidas.

3.4. Tuberías en la zona de enlace

En este apartado se va a estudiar la influencia de todas las tuberías que atraviesan uno de los fondos. En total son 7 las tuberías de acceso y salida del interior, todas colocadas en el mismo fondo, y desplazadas del centro del fondo hacia el cuadrante inferior izquierdo excepto la tubería de consumo, no superando ninguna abertura el radio crítico $0,4D_e$ desde el centro del fondo.

Para saber si es necesario tomar medidas adicionales al cálculo del espesor simple hay unos requisitos establecidos que tienen en cuenta la relación entre diámetros de la tubería y de la envolvente cilíndrica. Las tuberías a estudiar tienen un diámetro interior (d_i) máximo de 25 mm, y mínimo de 18 mm, que es el mínimo permitido por la Instrucción Técnica Complementaria MIE-AP15. Por tanto:

$$d_i / D_e = 18/4000 = 0,0045 \leq 0,6$$

$$\frac{d_i}{\sqrt{e_a \cdot D_e}} = \frac{18}{\sqrt{19 \cdot 4000}} = 0,0653 \leq 6,7$$

Se cumplen ambas relaciones, por lo que será necesario aumentar el espesor en la zona de enlace de las tuberías.

El calculo será específico para el fondo tipo Korbogen, siendo par las tuberías de 10mm:

$$V = \log_{10} \left(1000 \frac{P}{f} \right) = \log_{10} \left(1000 \frac{1,5}{160} \right) = 1,7959$$

$$A = 0,54 + 0,41V - 0,044V^3 = 1,0215$$

$$B = 7,77 - 4,53V + 0,744V^2 = 2,0342$$

$$\beta_k = \text{máx.} \left(A + B \frac{d_i}{D_e}; 1 + 0,5B \frac{d_i}{D_e} \right) =$$

$$= \text{máx.} \left(1,0215 + 2,0342 \frac{18}{4000}; 1 + 0,5 \cdot 2,0342 \frac{18}{4000} \right) =$$

$$= \text{máx.} (1,0307; 1,0046) = 1,0307$$

Donde V, A y B son parámetros y β_k es el coeficiente de debilitamiento debido a la presencia de la tubería.

Para las tuberías de 25 mm los parámetros V, A y B son los mismos, mientras que:

$$\beta_k = \text{máx.} \left(A + B \frac{d_i}{D_e}; 1 + 0,5B \frac{d_i}{D_e} \right) =$$

$$= \text{máx.} \left(1,0215 + 2,0342 \frac{25}{4000}; 1 + 0,5 \cdot 2,0342 \frac{25}{4000} \right) =$$

$$= \text{máx.} (1,0342; 1,0064) = 1,0342$$

Para el cálculo del espesor requerido se sustituirá P por $P \cdot \beta_k$ en la siguiente gráfica:

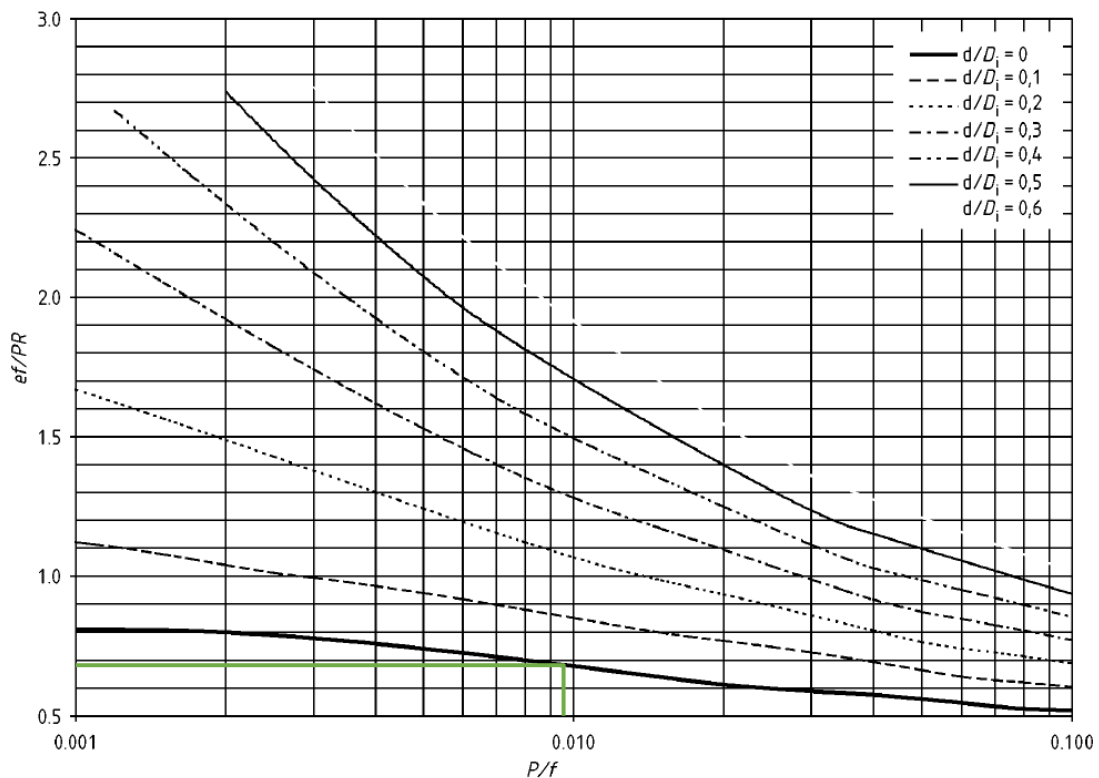


Figura 3: Gráfica para obtención del espesor de la placa de refuerzo

La relación d/D se puede aproximar a 0 y $\frac{P \cdot \beta_k}{f} = \frac{1,5 \cdot 1,0342}{160} = 0,009695$

Se obtiene un valor de 0,68 para la relación $\frac{e \cdot f}{P \cdot \beta_k \cdot R}$.

Despejando el valor del espesor:

$$e_{c,s} = \frac{P \cdot \beta_k \cdot R}{f} = \frac{1,5 \cdot 1,0342 \cdot 3200}{160 \cdot 0,68} = 45 \text{ mm}$$

Donde $e_{c,s}$ es considerado el espesor supuesto de la pared de la envolvente, o fondo en este caso, para comprobar el refuerzo de una abertura. Se parte de una pared de 20 mm de espesor, por tanto los 25 mm restantes se obtendrán mediante una placa de refuerzo colocada en la zona de la abertura.

Algunas tuberías están aisladas, como la toma de consumo por ejemplo, pero otras están agrupadas necesitando un análisis extraordinario. Para aberturas reforzadas sin manguito es necesario cumplir la relación:

$$d/2r_{1s} = 25/(2 \cdot 3200) = 0,0039 \leq 0,5$$

Donde d es el diámetro máximo de una abertura en la envolvente sin manguito y r_{1s} es el radio de curvatura interno de la envolvente en el centro de la abertura. La relación es

sobradamente cumplida, no siendo necesario el uso de maguitos como refuerzo y permitiendo el uso de placa de refuerzo.

La placa será del mismo material que la envolvente, es decir, acero inoxidable austenítico AISI 316L con el objetivo de reducir la aparición de concentraciones de tensiones térmicas.

3.4.1. Tuberías aisladas

Algunas tuberías se suponen aisladas, como la de alimentación, por ejemplo. Antes de asegurar el refuerzo de esta abertura es necesario comprobar que efectivamente se trata de una abertura aislada. Se considerará como tal si satisface la siguiente condición:

$$L_b \geq a_1 + a_2 + l_{so1} + l_{so2}$$

donde L_b es la distancia entre centros de dos aberturas en toda la superficie media de la envolvente, a_1 y a_2 se muestran en las siguientes figuras y l_{so1} y l_{so2} se calculan como:

$$l_{so} = \sqrt{(2r_{1s} + e_{c,s}) \cdot e_{c,s}} = \sqrt{(2 \cdot 3200 + 45) \cdot 45} = 538,53 \text{ mm}$$

donde $e_{c,s}$ se ha calculado antes como el espesor supuesto de la envolvente y r_{1s} viene dado por R en fondos torisféricos.

Para tomar el valor de a_1 y a_2 se realiza una comprobación en la siguiente figura que representa a un fondo cóncavo o bien una envolvente esférica, ya que el modelo es válido para ambos:

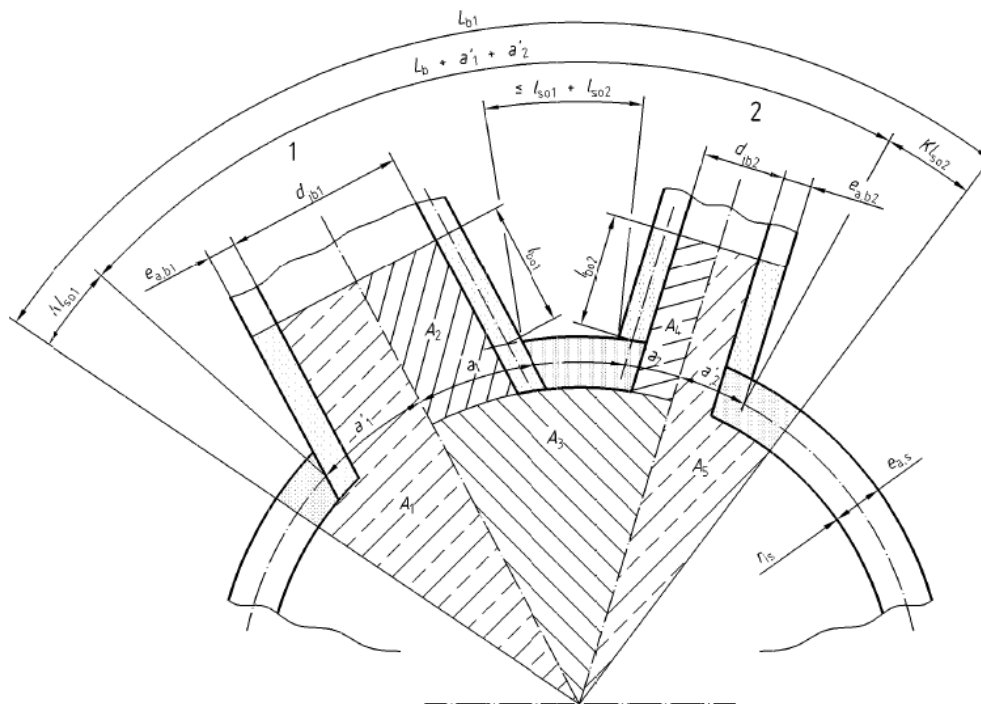


Figura 4: Elementos y medidas para un fondo cóncavo

De la figura se deduce que los valores que habrá que tomar serán el del radio interior de la tubería además de el valor de espesor de esta. En el caso que nos compete la tubería 1 será la de alimentación y la tubería 2 será la de salida auxiliar en fase gas, siendo esta la más próxima en línea recta. La distancia que separa los centros de ambas tuberías es de 930 mm. Ambas tuberías son de 25 mm de diámetro interno, teniendo un espesor de 2 mm, por lo cual:

$$a_1 = a_2 = 14,5 \text{ mm}$$

Ya se dispone de toda la información necesaria para confirmar si se trata de una tubería aislada:

$$L_b \geq a_1 + a_2 + l_{so1} + l_{so2}$$

$$930 \text{ mm} \geq 14,5 + 14,5 + 583,53 = 612,53 \text{ mm}$$

Efectivamente se trata de una tubería aislada.

La ecuación general para el refuerzo de una abertura aislada viene dada por:

$$(Af_s + Af_w)(f_s - 0,5P) + Af_p(f_{op} - 0,5P) + Af_b(f_{ob} - 0,5P) \geq P(Ap_s + Ap_b + 0,5Ap\phi)$$

donde

$$f_{ob} = \text{mín.}(f_s; f_b)$$

$$f_{op} = \text{mín.}(f_s; f_p)$$

Esta ecuación incluye el cálculo con manguito (todos los términos referidos a *b*), así como el cálculo con placa de refuerzo (todos los términos referidos a *p*). Los términos referidos a *w* se refieren a soldadura, mientras que los referidos a *s* hacen mención a la envolvente. El diseño será realizado sin manguitos, por tanto, todos los términos referidos a *b* serán suprimidos.

En la ecuación general, el término Af_x se refiere a la sección transversal sometida a tensión como refuerzo del tipo *b*, *p* o *w*, y f_s , f_b y f_p se refieren a la tensión de diseño nominal del material de la envolvente, de la placa de refuerzo y del manguito respectivamente, siendo utilizado el acero austenítico AISI 316L para la envolvente y la placa de refuerzo y por tanto teniendo los 2 términos el mismo valor. Por último, se define A_p como la superficie cargada por presión en cada tipo (*s*, *b*, *p*). Para la primera estimación se despreciará la sección transversal sometida a tensión como refuerzo proporcionada por la soldadura ya que es el caso más desfavorable. El resto de los parámetros se calculan según la relación:

$$l'_s = \text{mín.}(l_{so}; l_s) = \text{mín.}(538,53; 800) = 538,55 \text{ mm}$$

donde l_s es la distancia desde el borde de la abertura hasta la discontinuidad más cercana.

$$r_{ms} = (r_{1s} + 0,5 \cdot e_{a,s}) = 3200 + 0,5 \cdot 20 = 3210 \text{ mm}$$

$$\delta = \frac{d}{2 \cdot r_{ms}} = \frac{29}{2 \cdot 3210} = 0,004517$$

donde d es el diámetro máximo de la abertura, es decir, el diámetro interno más el espesor de la tubería.

$$a = r_{ms} \cdot \arcsen \delta = 3210 \cdot \arcsen(0,004517) = 830,79 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} Ap_s &= 0,5 \cdot r_{1s}^2 \cdot \frac{l'_s + a}{0,5 \cdot e_{a,s} + r_{1s}} + a \cdot (e_{a,s} + e_{a,p}) = \\ &= 0,5 \cdot 3200^2 \cdot \frac{538,55 + 830,79}{3210} + 830,79 \cdot (20 + 25) = 2221504,179 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

donde $e_{a,p}$ es el espesor de análisis de la placa de refuerzo.

$$Af_s = l'_s \cdot e_{c,s} = 538,55 \cdot 45 = 24232,5 \text{ mm}^2$$

Con todo esto se puede obtener la ecuación general de refuerzo:

$$\begin{aligned} (Af_s + Af_w)(f_s - 0,5P) + Af_p(f_{op} - 0,5P) + Af_b(f_{ob} - 0,5P) \\ \geq P(Ap_s + Ap_b + 0,5Ap\phi) \end{aligned}$$

$$(24232,5 + 0)(160 - 0,5 \cdot 1,5) + 13462,5 (160 - 0,5 \cdot 1,5) \geq 1,5(2221504,179)$$

$$(24232,5)(159,25) + 13462,5 (159,25) \geq 3332256,269$$

$$6002880,975 \geq 3332256,269$$

La ecuación se cumple perfectamente a pesar de no haber incluido la soldadura, pudiendo tomar esta cualquier valor dentro de los rangos aceptables para soldadura, además de confirmando que esta abertura puede ser subsanada con una placa de refuerzo de 25 mm de espesor y un diámetro de 538,55 mm.

3.4.2. Aberturas múltiples

En este apartado se estudiarán el resto de aberturas en el fondo torisférico, agrupadas aparentemente en un solo grupo de dimensiones reducidas. Se trata por tanto de aberturas adyacentes para las cuales será necesario realizar una comprobación de ligamento si la distancia entre centros L_b de estas aberturas no satisface la ecuación que se muestra a continuación. Ningún ligamento entre manguitos debe ser inferior a:

$$\text{máx.} \left(3 \cdot e_{a,s}; 0,2 \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{c,s}) \cdot e_{c,s}} \right)$$

$$\text{máx.} \left(3 \cdot 20; 0,2 \sqrt{(2 \cdot 3200 + 45) \cdot 45} \right) = \text{máx.} (60; 107,71) = 107,71$$

La distancia mínima entre aberturas o manguitos propuesta es de 150 mm. Sin embargo, existe una condición que puede hacer innecesaria la comprobación anterior. Esta condición es que todos los manguitos estén totalmente situados dentro de un círculo de un diámetro dado por:

$$d_c = 2 \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{c,s}) \cdot e_{c,s}} = 2 \sqrt{(2 \cdot 3200 + 45) \cdot 45} = 1077,08 \text{ mm}$$

El diámetro que formarían las aberturas sería de 610 mm, menos que los 1077,08 mm requeridos, por tanto no sería necesaria la comprobación de ligamento. Esto quiere decir que el análisis realizado en el apartado anterior para una abertura aislada es extrapolable al caso actual, por lo cual se tomará como solución constructiva una única placa de refuerzo de 25 mm de espesor que agrupe todas las aberturas.

3.5. Cálculo del volumen

Como se comentaba en la Memoria Descriptiva, el depósito va a estar formado por una envolvente y dos fondos soldados a sus extremos. Esta estructura va a formar un único compartimento, a pesar de la adición de rigidizadores interiores cuyo volumen se va a despreciar en esta primera aproximación. Primero se calculará el volumen de un fondo y posteriormente se obtendrá la longitud necesaria de envolvente cilíndrica para obtener la capacidad nominal deseada.

El fondo es de tipo Korbbogen y cumple la normativa DIN-28013. En dicha normativa se puede consultar la información técnica complementaria a la ya contemplada anteriormente necesaria para el cálculo del volumen:

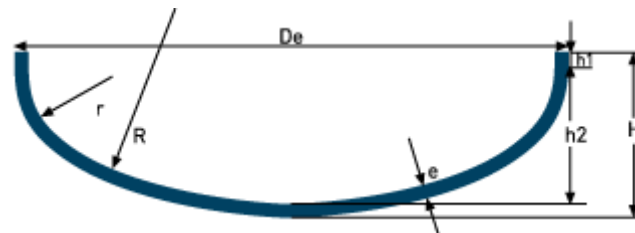


Figura 5: Fondo tipo Korbbogen

En el apartado anterior se definen:

$$D_e = 4001 \text{ mm}$$

$$e = 20 \text{ mm}$$

$$R = 3200 \text{ mm}$$

$$r = 616 \text{ mm}$$

Con estos valores se obtiene:

$$h1 \geq 3e \geq 60 \text{ mm}$$

$$h2 = 0,255D_e - 0,635e = 1007,55 \text{ mm}$$

$$H = h2 + h1 + e = 1087,55 \text{ mm}$$

$$D_d = 1,16D_e + 2h1 = 4761,16 \text{ mm}$$

$$V_f(h2) = 0,1298(D_i)^3 = 0,1298 (3962)^3 = 8,189 \times 10^9 \text{ mm}^3 = 8,189 \text{ m}^3$$

El volumen de un fondo es de $8,189 \text{ m}^3$, por tanto el de los dos fondos será es doble, es decir, $16,378 \text{ m}^3$. Hasta 240 m^3 de capacidad requerida faltan $223,622 \text{ m}^3$ que determinarán la longitud de la envolvente cilíndrica. El diámetro interior de la envolvente es de 3981 mm y su área circular es:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 = 12,45 \text{ m}^2$$

Para la construcción de la envolvente cilíndrica se van a utilizar virolas de 2 m de anchura soldadas entre sí. El número de virolas se calcula a partir de la longitud necesaria de la envolvente, L_e , obtenida de la siguiente forma:

$$V_e = S \cdot L_e = 223,622 \text{ m}^3$$

$$L_e = \frac{223,622 \text{ m}^3}{12,45 \text{ m}^2} = 17,96 \text{ m}$$

El número de virolas necesarias será:

$$NV = \frac{L_e}{\text{Anchura de 1 virola}} = \frac{17,96 \text{ m}}{2 \text{ m}} = 8,98 \sim \mathbf{9 \text{ virolas}}$$

Como el número de virolas debe de ser entero, se aproxima a 9 y la capacidad del recipiente aumenta con respecto a la planeada. La nueva capacidad nominal será:

$$V = (\text{Anchura de 1 virola} \cdot NV) \cdot S + 16,378 = \mathbf{240,478 \text{ m}^3}$$

La longitud total del recipiente sin contar el sistema de valvulería es de:

$$L = L_e + 2H = 17,96 + 2 \cdot 1,08755 = \mathbf{20,14 \text{ m}}$$

3.6. Cargas adicionales distintas de la presión

En este apartado se proporcionarán reglas para el diseño de envolvente de recipientes bajo cargas distintas de la presión en combinación con la propia presión. Se estudiará más concretamente el caso de los dos apoyos o silletas sobre los que reposará el depósito

3.6.1. Silletas

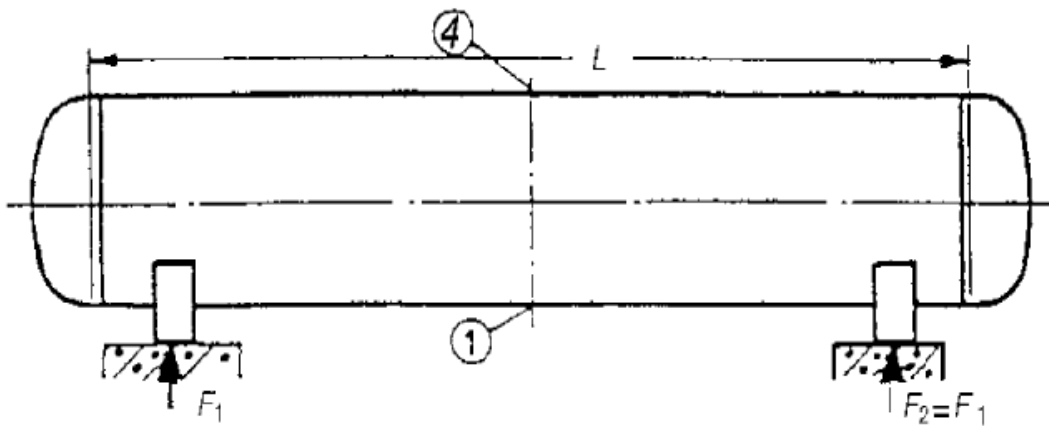


Figura 6: Esquema de silletas

El recipiente quedará suspendido sobre dos silletas colocadas simétricamente de forma que abracen la envolvente un ángulo δ como se indica en la figura 6:

Para la utilización de silletas es necesario aplicar las condiciones siguientes:

$$0,001 \leq e_n/D_i \leq 0,05$$

Donde la relación e_n/D_i toma el valor $19/3962 = 0,00479$ y por tanto la condición queda validada. La otra condición para aplicar es:

$$60^\circ \leq \delta \leq 180^\circ$$

Se utilizará inicialmente un ángulo de 120° para validar la condición.

Las silletas estarán cargadas verticalmente, no pudiendo soportar esfuerzos laterales y serán soldadas al recipiente, pudiendo estar el depósito apoyado de forma uniforme únicamente si no fuera posible el soldeo. Sólo se anclará una silleta al suelo, quedando la otra libre para desplazarse axialmente debido a la dilatación térmica esperada.

Para recipientes con dos silletas de la forma seleccionada no es necesario realizar el cálculo si se cumplen las condiciones siguientes:

- No hay presión externa: El cálculo es referido a la envolvente interior que es la que soporta todos los esfuerzos, por tanto, en su lado exterior la presión será cercana a 0 ya que se generará vacío entre ambas envolventes.
- Densidad del fluido contenido $\leq 1000 \text{ kg/m}^3$: La densidad del gas natural licuado es 460 kg/m^3 .
- Material de la envolvente con $f \geq 130 \text{ MPa}$: Se ha calculado $f = 160 \text{ MPa}$ para el acero AISI 316L en condiciones normales.
- Factor de soldadura $\geq 0,8$: Se ha tomado factor de soldadura $z=1$.
- $a_1 \leq 0,5 D_i$: Se considera a_1 como la distancia desde la silleta hasta el extremo adyacente de la parte cilíndrica. Por tanto esta distancia deberá de ser menor

que 1990 mm. Las silletas se colocarán a 600 mm de distancia del final de la parte cilíndrica, validando esta condición.

- $L \leq L_{max}$: La longitud de la envolvente cilíndrica fue obtenida en el apartado anterior, con un valor de 18 m. Si se consulta en la siguiente figura:

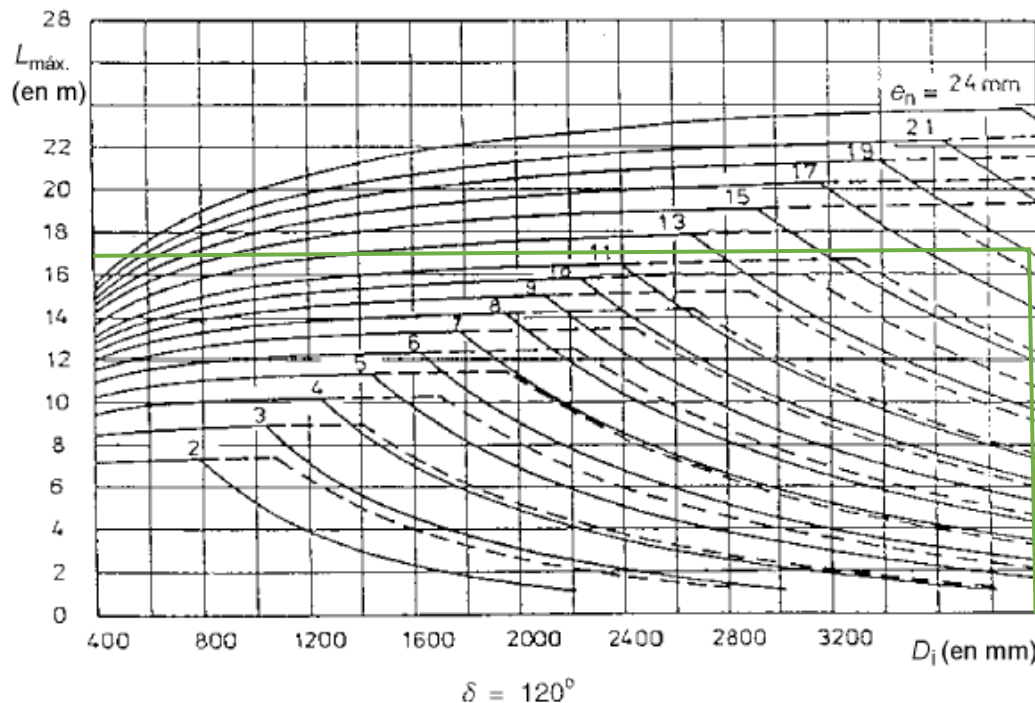


Figura 7: Longitud válida según espesor

Para el espesor nominal de 19 mm y el diámetro interior calculado anteriormente se obtiene una longitud máxima de 17 m. Para validar esta condición se usará una placa de refuerzo con la que llegar a un espesor de 24 mm y poder validar la condición. Al incluir una placa de refuerzo, se incluyen unas nuevas condiciones a tener en cuenta. Por tanto, a modo de resumen de esta condición se han colocado las silletas a 600 mm del final de la envolvente cilíndrica y se utilizará una placa de refuerzo de 5 mm.

- $b_1 \geq 1,1\sqrt{D_i e_n}$: Se considera b_1 a la anchura axial de la silleta. Se establece el valor mínimo de esta en $1,1\sqrt{3962 \cdot 19} = 301,81 \text{ mm}$. Se elige como valor final para la anchura de la silleta $b_1 = 350 \text{ mm}$, debido a que cuanto mayor sea la anchura, mayor será el reparto de peso, lo cual será beneficioso a la hora de realizar el análisis de resistencia del suelo.

Estas eran las condiciones generales. Para silletas con placa de refuerzo es necesario considerar también:

- $e_2 \geq e_n$: Donde e_2 es el espesor total de la pared, sumando la placa de refuerzo y el espesor nominal.

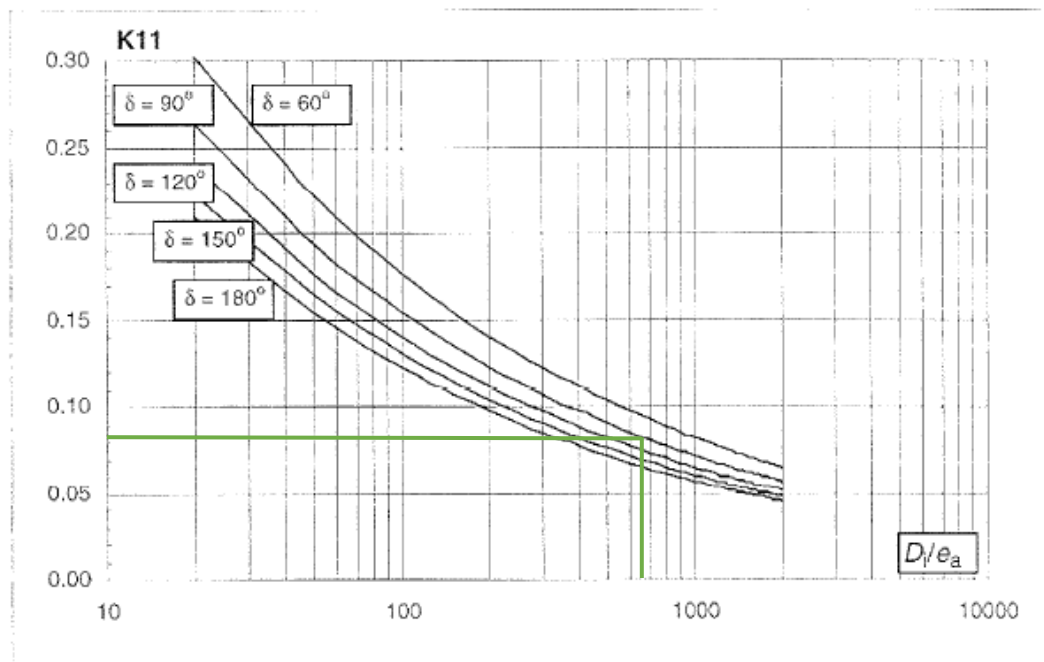


Figura 8: Obtención del coeficiente K_{11}

- $b_2 \geq K_{11} \cdot D_i + 1,5b_1$: El coeficiente b_2 indica la anchura de la placa de refuerzo y el coeficiente K_{11} se obtiene gráficamente de la siguiente figura:

El coeficiente $D_i/e_a = 3962/24 = 165,875$ y $\delta = 120^\circ$. Se obtiene un valor para $K_{11} = 0,083$. La relación queda como:

$$b_2 \geq 0,083 \cdot 3962 + 1,5 \cdot 350 = 855,423 \text{ mm}$$

El valor tomado para la anchura de la placa de refuerzo es, por tanto:

$$b_2 = 860 \text{ mm}$$

3.6.2. Orejetas para izar

En este apartado se proporcionan las reglas para el diseño de envolventes con cargas locales debidas a orejetas para el izado y transporte del depósito. Para el cálculo de este apartado es necesario conocer la masa del recipiente en estado vacío, que es calculada en el apartado siguiente. Se tomará el valor de 55092 kg.

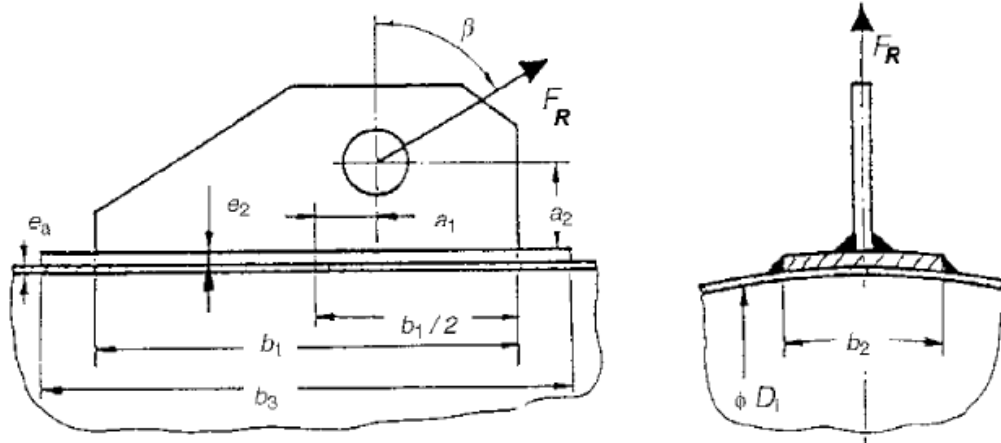


Figura 9: Esquema de orejetas para izado

El tipo de orejeta elegido es longitudinal, es decir, el agujero pasador quedará perpendicular a la línea del eje de la envolvente cilíndrica, de forma similar a la Figura 9: donde:

- a_1 es la excentricidad de la carga;
- a_2 es la distancia desde la carga hasta la envolvente o placa de refuerzo;
- b_1 es la longitud de la orejeta para izar, en la unión con la envolvente;
- b_2 es la anchura de la placa de refuerzo;
- b_3 es la longitud de la placa de refuerzo;
- x es la distancia entre el eje del fondo semielipsoidal y el centro de la orejeta para izar;
- F_R es la fuerza local en una envolvente;
- $F_{R,máx.}$ es a la fuerza local máxima admisible en una envolvente;
- W es el peso total del recipiente;
- β es el ángulo entre la dirección de la fuerza y la normal a la envolvente.

Es necesario analizar el izado del depósito para conocer el reparto de fuerzas en cada orejeta. Para el izado se utilizará una grúa pluma, más concretamente el modelo "GROVE GMK5220" como el de la Figura 10, capaz de izar hasta 220 toneladas de carga, operando en radios de trabajo y espacios muy pequeños sin perder la estabilidad (Figura 11).



Figura 10: Camión grúa del tipo GROVE GMK5220

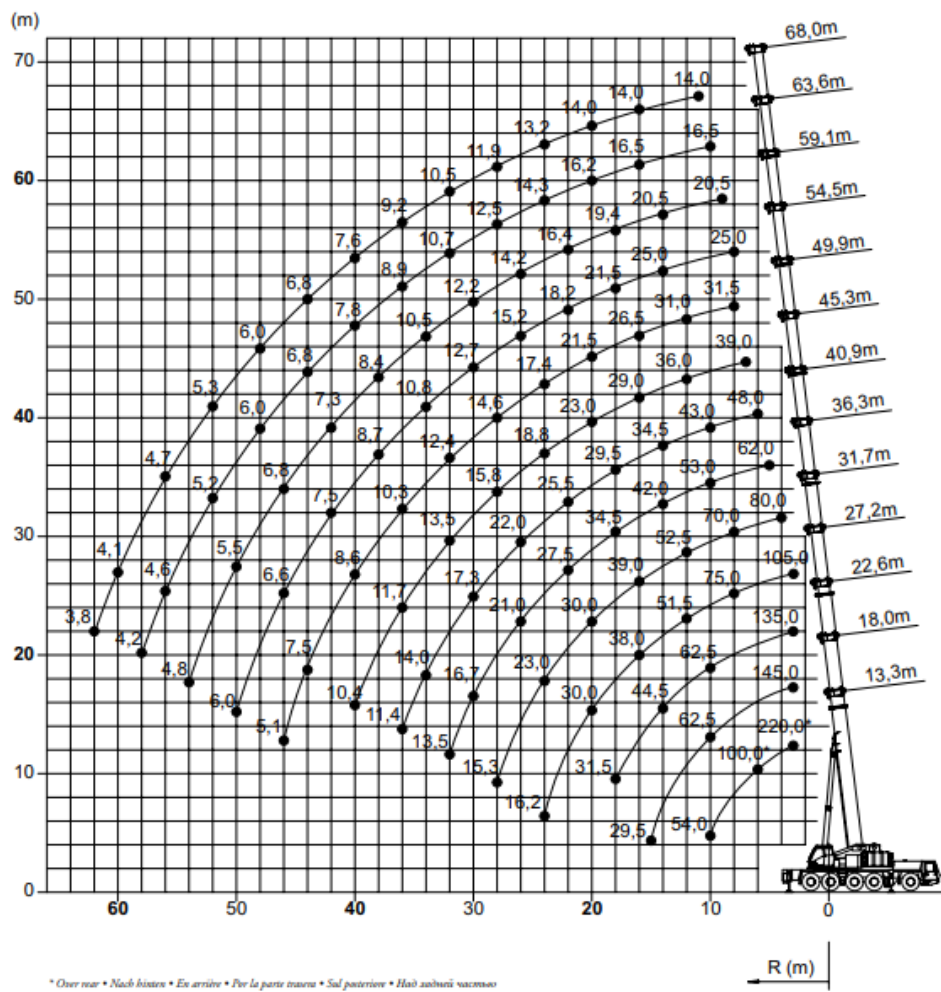


Figura 11: Mapa de izado para el camión grúa GROVE GMK5220

Con la gráfica del movimiento de la pluma y las tablas de carga se puede determinar la longitud máxima permitida para el brazo para un radio de trabajo.

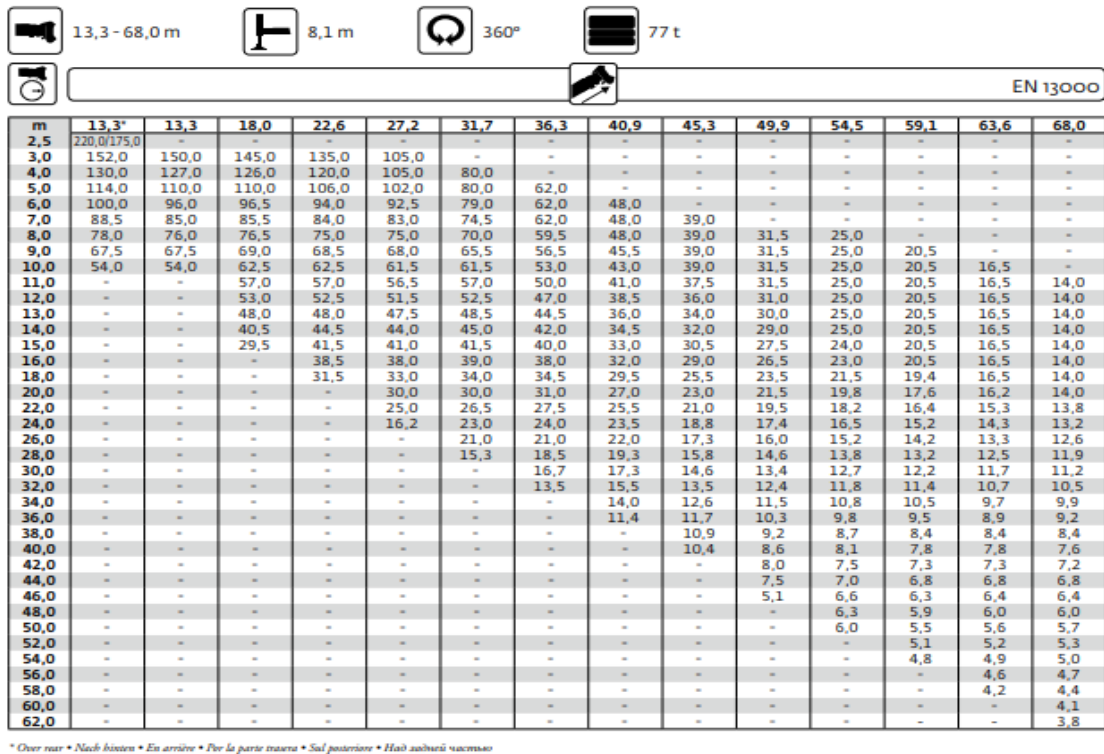


Figura 12: Cargas máximas según altura

Para un contrapeso de 77 toneladas y una altura de izado de 18 metros, suficiente para salvar la valla metálica que protege la parcela, se puede conseguir un radio de hasta 11 metros. Esta versatilidad a la hora de operar permite colocar el depósito dentro de la parcela destinada a ello sin necesidad del paso del camión dentro de la propia parcela.

Para la sujeción del recipiente se utilizará cable de acero de altas prestaciones fabricado conforme a la Norma EN 12385-4 con acabado galvanizado. Este cable formará una estructura triangular cuando esté en tensión de forma similar a la Figura 13:

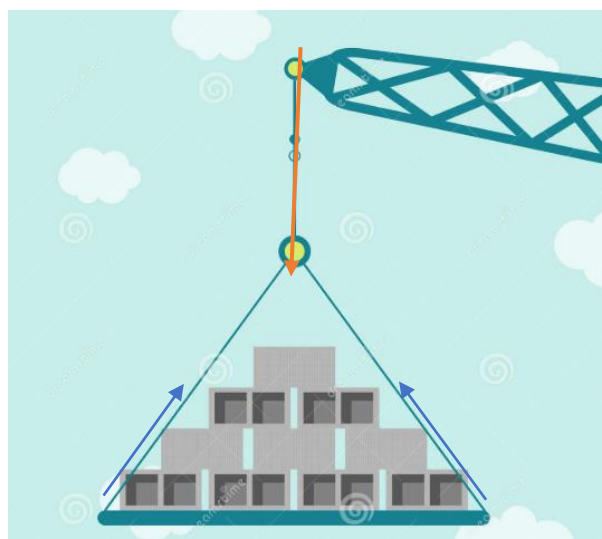


Figura 13: Fuerzas en las orejetas durante el izado

Se sabe que la separación entre orejetas es de 17 metros y el cable tiene una longitud de 25 metros. Con estos datos se puede calcular el ángulo β mediante relaciones trigonométricas, obteniéndose $\beta = 42,85^\circ$.

También se calcula el peso como:

$$W = 55092 \cdot 9,81 = 540452,52 \text{ N}$$

La fuerza aplicada F_R en cada orejeta es por tanto:

$$F_R = \frac{W}{2 \cos \beta} = \frac{540452,52}{2 \cos(42,85)} = 368589,2 \text{ N}$$

Al tratarse de orejetas para izar longitudinales, se deben definir los valores de λ , u_1 , u_2 , K_{13} Y K_{14} , con $b = b_3$ ya que se utilizará la misma placa de refuerzo que en los apoyos, de espesor 5 mm y de dimensiones 100x150 mm (b_1 y b_2). También es importante reseñar que a_2 junto con la base e_2 deberá ser suficientemente largo como para salvar la capa de aislante y la envolvente exterior, que combinadas suponen un espesor de 48 mm. Las dimensiones de la orejeta y los parámetros son:

$$a_1 = 12 \text{ mm}$$

$$a_2 = 30 \text{ mm}$$

$$b_1 = 100 \text{ mm}$$

$$b_2 = 100 \text{ mm}$$

$$b_3 = 150 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$\lambda = \lambda_1 = \frac{b_3}{\sqrt{D_i \cdot e}} = 0,5454$$

$$v_1 = \text{mín.}(0,08 \cdot \lambda_1; 0,20) = 0,0436$$

$$v_2 = 0,7464$$

$$K_{13} = \frac{1}{1,2 \sqrt{1 + 0,06 \lambda^2}} = 0,82599$$

$$K_{14} = \frac{1}{0,6 \sqrt{1 + 0,03 \lambda^2}} = 1,6593$$

$$K_{15} = \text{mín.} \left[1 + 2,60 \left(\frac{D_i}{e} \right)^{0,33} \left(\frac{b_2}{D_i} \right); 2,0 \right] = 1,3747$$

Con todo esto se calcula la carga máxima admisible para poder compararla con la real:

$$F_{R,max.} = \frac{K_{15} \sigma_{b,all} e^2}{K_{13} |\cos \beta| + K_{14} |a_2 \sin \beta - a_1 \cos \beta| / b_3} = 503692,73 \text{ N}$$

donde $\sigma_{b,all}$ es la tensión límite de flexión, obtenida como:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \nu_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \nu_2\right)^2 + (1 - \nu_2^2) \nu_1^2}} = 0,6062$$

$$\sigma_{b,all} = K_1 K_2 f = 0,6062 \cdot 1,25 \cdot 160 = 121,239$$

Comparando la carga admisible con la carga real:

$$F_R = 368589,2 \text{ N} < F_{R,max.} = 503692,73 \text{ N}$$

Con lo cual las orejetas quedarían perfectamente definidas.

3.7. Peso del recipiente en vacío

Una vez conocidos todos los elementos estructurales del depósito se va a proceder al cálculo aproximado del peso del recipiente cuando no contiene la carga y en una atmósfera de vacío, y a continuación cuando está completamente cargado. Estos datos son de gran utilidad para el cálculo de la resistencia del suelo o para el izado y transporte del depósito. El peso será estimado a partir de las densidades de los materiales que componen el recipiente, por tanto, el primer paso será calcular el volumen del depósito:

- Volumen de envolvente interior (AISI 316L):

$$V_{ei} = L_e \cdot \pi \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \right] = 18 \cdot \pi \left[\left(\frac{4}{2}\right)^2 - \left(\frac{3,981}{2}\right)^2 \right] = 2,1437 \text{ m}^3$$

- Volumen de los fondos interiores (AISI 316L):

$$V_{fi} = 2 \cdot S_f \cdot e = 2 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{D_d}{2}\right)^2 \right] \cdot e = 2 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{4,761}{2}\right)^2 \right] \cdot 0,020 = 0,7121 \text{ m}^3$$

- Volumen de envolvente exterior (SAE 1045):

Para esta envolvente se utilizará un espesor genérico de 8 mm ya que su única función es proteger de la intemperie y contener alguna posible fuga, sin soportar ningún tipo de esfuerzo mecánico. Se deja un espesor de aislante de 40 mm por tanto:

$$V_{ee} = L_e \cdot \pi \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \right] = 18 \cdot \pi \left[\left(\frac{4,096}{2}\right)^2 - \left(\frac{4,080}{2}\right)^2 \right] = 1,8494 \text{ m}^3$$

- Volumen de los fondos exteriores (SAE 1045):

$$V_{fe} = 2 \cdot S_f \cdot e = 2 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{D_d}{2}\right)^2 \right] \cdot e = 2 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{4,871}{2}\right)^2 \right] \cdot 0,008 = 0,2982 \text{ m}^3$$

- Volumen de aislante (Lana de roca):

El cálculo de este volumen será realizado por diferencia de capacidades de la pared interior del recipiente exterior con la exterior del recipiente interior.

$$V_{aislante} = V_e - V_i = (2 \cdot V_{fe} + V_{cil,exterior}) - (2 \cdot V_{fi} + V_{cil,interior}) =$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(2 \cdot 0,1298 \cdot (D_{i,exterior})^3 + V_{cil,ext} \right) - \left(2 \cdot 0,1298 \cdot (D)^3 + V_{cil,int} \right) = \\
 &= \left(2 \cdot 0,1298 \cdot (4,080)^3 + 229,60 \right) - \left(2 \cdot 0,1298 \cdot (4)^3 + 226,19 \right) = \\
 &= 4,4269 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

- Volumen de las silletas (SAE 1045):

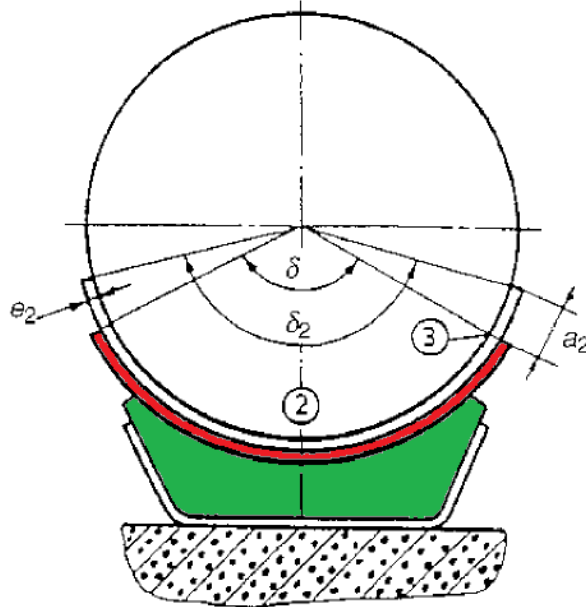


Figura 14: Elementos necesarios para la sujeción sobre silletas

En la Figura 14 se muestra en verde la silleta de 350 mm de longitud en dirección axial y en rojo la placa de refuerzo de 860 mm de longitud en dirección axial. Para la placa se eligió un espesor de 5 mm. La imagen solo es un esquemático para ilustrar la estructura de la silleta en contacto con la placa de refuerzo. Realmente la pieza representada de color verde será de forma rectangular tal como se muestra en la Figura 15, amoldándose a la forma de la placa de refuerzo en la zona superior formando el ángulo $\delta = 120^\circ$. La forma de la silleta será:

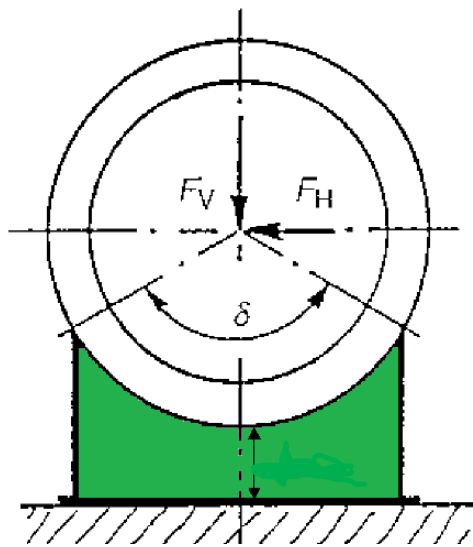


Figura 15: Esquema de silleta rectangular

Donde se deja un espacio de 250 mm desde el punto mas bajo de la envolvente hasta el suelo. Para calcular el área verde se utilizarán relaciones trigonométricas derivadas del ángulo conocido δ . El ángulo se divide entre dos y se obtiene:

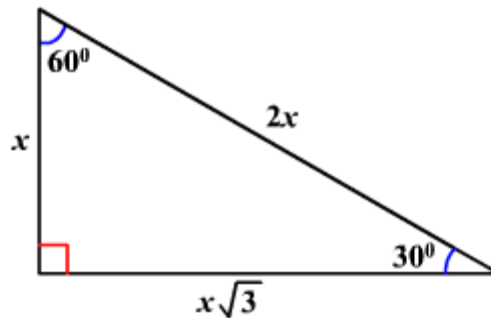


Figura 16: Determinación de longitudes en la silleta

Donde el lado horizontal mide 1732 mm y el vertical mide 1000 mm. La anchura total del prisma es entonces 3464 mm y su altura total 1250 mm. Ahora se calcula el área ocupada por la envolvente haciendo la parte proporcional de 120° a la superficie de la envolvente completa:

$$S = \frac{120}{360} \pi (D/2)^2 = 4,188 \text{ m}^2$$

Por tanto, el área frontal de la silleta es:

$$S_{\text{frontal}} = 1,25 \cdot 3,464 - [4,188 - 2 \cdot 1,732] = 2,3012 \text{ m}^2$$

Su volumen es:

$$V_{\text{silletas}} = 2 \cdot 0,350 \cdot 2,3012 = 1,611 \text{ m}^3$$

- Volumen de placas de refuerzo (AISI 316L):

Se cuenta con 4 placas de refuerzo: Tubería de consumo, resto de tuberías y las dos silletas. Para la tubería de consumo:

$$V_{p1} = 0,025 \cdot 0,53855 = 0,0134 \text{ m}^3$$

Dado que el volumen es muy pequeño y similar al de la otra placa de refuerzo para tuberías se despreciarán ambos y solo se tendrán en cuenta las placas de las silletas.

$$V_{p,\text{silletas}} = 2 \cdot 0,860 \cdot \left(\frac{120}{360} 2 \cdot \pi \cdot \frac{4}{2} \right) \cdot 0,05 = 0,36 \text{ m}^3$$

Estos son todos los elementos que van a tener una contribución significativa en el peso final del recipiente. Sabiendo que la densidad del acero austenítico inoxidable AISI 316L es de 7960 kg/m^3 , del acero SAE 1045 es de 7805 kg/m^3 y de la lana de roca es de 70 kg/m^3 . Los volúmenes totales de cada uno son:

$$V_{\text{AISI 316L}} = 3,209 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{SAE 1045}} = 3,7589 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{lana de roca}} = 4,4269 \text{ m}^3$$

Y los pesos de cada material:

$$W_{AISI\ 316L} = \rho \cdot V_{AISI\ 316L} = 7960 \cdot 3,209 = 25543,64\ kg$$

$$W_{SAE\ 1045} = \rho \cdot V_{SAE\ 1045} = 7805 \cdot 3,7589 = 29338,215\ kg$$

$$W_{lana\ de\ roca} = \rho \cdot V_{SAE\ 1045} = 70 \cdot 4,4269 = 309\ kg$$

El peso total del depósito vacío es:

$$W = 55190\ kg = \mathbf{55,190\ tm}$$

Si el depósito está cargado al 95%, en su interior habrá 228,45 m³ de GNL. La densidad del GNL es de 460 kg/m³, entonces:

$$W_{carga} = W + W_{GNL} = W + \rho \cdot V_{GNL} = 55190 + 460 \cdot 228,45 = 160179\ kg$$

$$W_{carga} = \mathbf{160,179\ tm}$$

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES**



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

DOCUMENTO III

**FABRICACIÓN, SOLDADURA
Y ENSAYOS**

Alumno: Víctor López Reyes

Director: Isidoro J. Martínez Mateo

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Departamento: Ingeniería de Materiales y Fabricación

Fecha: Septiembre de 2019

ÍNDICE

1.	FABRICACIÓN	4
1.1.	Fabricación del cuerpo del depósito.....	4
1.2.	Conformación de partes sometidas a presión	5
1.3.	Seguimiento de los materiales.....	7
1.4.	Unión de partes de distintos espesores	8
1.5.	Tolerancias para recipientes sometidos a presión interna.....	9
1.6.	Recipientes fabricados con más de una virola.....	13
2.	SOLDADURA	13
2.1.	Cualificación de las especificaciones del procedimiento de soldeo (WPAR) ..	15
2.2.	Cualificación de soldadores y operadores de soldadura	16
2.3.	Preparación de la unión	16
2.4.	Precalentamiento.....	17
2.5.	Ensayos de producción	17
2.6.	Alcance de los ensayos	18
2.7.	Realización de ensayos y criterios de aceptación.....	18
3.	REPARACIONES.....	19
3.1.	Reparaciones de defectos superficiales en el metal base	20
3.2.	Reparaciones de defectos de soldadura.....	20
4.	PUESTA EN FUNCIONAMIENTO.....	20
5.	PRUEBAS PERIÓDICAS	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Pico máximo permitido P en soldaduras longitudinales para cargas dinámicas y cíclicas.....	10
Tabla 2: Pico máximo permitido P en soldaduras longitudinales para cargas no cíclicas	10
Tabla 3: Tolerancias para fondos cóncavos.....	12
Tabla 4: Tolerancias para fondos cóncavos.....	13
Tabla 5: Probetas requeridas para ensayo	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Productos intermedio y final	6
Figura 2: Producto inicial	6
Figura 3: Galga de perfil 20°	10
Figura 4: Parámetros para un fondo cóncavo	11
Figura 5: Alineación de piezas y borde en X.....	16
Figura 6: Alineación de piezas y preparación en V	17
Figura 7: Soldadura de piezas a tope con ángulo de 90°	17

1. FABRICACIÓN

1.1. Fabricación del cuerpo del depósito

El diseño del recipiente ha resultado en la utilización de dos envolventes cilíndricas, una interior y otra exterior, cada una con sus respectivos fondos de tipo Korbogen, tal y como se indicaba en la memoria descriptiva y más tarde se justificaban sus dimensiones.

Para el recipiente interior, de acero inoxidable austenítico AISI 316L, en primer lugar, se fabrica la envolvente. Esta está formada por 9 virolas de 2 metros de anchura cada una. Cada virola es conformada en caliente a partir de chapas cortadas que posteriormente serán curvadas mediante el uso de rodillos, tal como se muestra en la Figura 1 y 2, para finalmente soldar los dos extremos quedando de esta manera la sección lista para ser soldada al resto. Las virolas serán pulidas tanto exterior como interiormente con el fin de eliminar defectos y posibles puntos de inicio de corrosión. Si las chapas fueron cortadas térmicamente deben acabarse mediante mecanizado o rectificado con el fin de eliminar las posibles entallas marcadas, escoria y escamas.

Una vez fabricadas las virolas se procede a su unión, ya que el recipiente no incorpora elementos interiores tales como rompeolas o anillos de refuerzo, y se deja preparado para unir los fondos.

Los fondos, al ser torisféricos de tipo Korbogen en lugar de los clásicos, se fabrican mediante conformado en frío a partir de una plancha metálica circular, y al igual que las virolas, se pulirán tanto interior como exteriormente para conseguir un acabado superficial de la máxima calidad. En la zona de unión con la envolvente cilíndrica se realizará un pequeño biselado de 1 milímetro en la zona exterior para igualar espesores y facilitar la soldadura de ambas piezas.

Una vez cerrado el recipiente interior, se procede a soldar las placas de refuerzo calculadas anteriormente y al taladrado de los agujeros necesarios para los elementos de servicio. Todas las tuberías y los apoyos serán soldados al recipiente interior, no estando el exterior preparado para soportar ningún esfuerzo notable.

Para las silletas se utilizarán placas de acero soldadas formando la estructura que se detallaba en los cálculos justificativos, añadiendo dos placas perpendiculares a la estructura principal de la silleta, formando un perfil en H, para dotarla de mayor estabilidad. Una vez fabricados ambos apoyos se soldarán en el lugar que se indica a la correspondiente placa de refuerzo.

Para el recipiente exterior, una vez fabricado y montado todo lo detallado hasta aquí, se seguirá un proceso similar de fabricación al utilizado para el interior, excepto los fondos que debido a requerimientos del acero SAE 1045 deberán ser conformados en caliente por su baja conformabilidad en frío. Se utilizarán virolas de 2 metros de anchura de acero SAE 1045. El acero será tratado una vez montado con pintura protectora antioxidante en su lado exterior y pulido en el interior. En este caso será necesario abrir las aberturas necesarias en la chapa para el paso de tuberías y apoyos.

El montaje se realizará por módulos, es decir, se irán colocando las virolas sobre el recipiente interior una a una. Cuando la virola esté colocada en la posición deseada se añade la siguiente para ser soldada a la contigua. Una vez construido el armazón que forma la envolvente cilíndrica exterior se añadirá el material aislante que va alojado entre ambos recipientes.

Ya se pueden añadir los fondos torisféricos tipo Korbogen, que han sido fabricados por conformado en frío de nuevo, y los cuales cerrarán el recipiente. Todas las aberturas realizadas en la envolvente exterior deberán de ser selladas mediante cordón de soldadura para garantizar el vacío en el espacio concéntrico de ambos depósitos, especialmente en las silletas, ya que será este punto el que haga de apoyo para el recipiente exterior.

1.2. Conformación de partes sometidas a presión

El fabricante de las piezas sometidas a presión conformadas debe mantener los registros del procedimiento de conformación y del tratamiento térmico aplicado posteriormente.

1.2.1. Relación de deformación

Para los fondos cóncavos que se van a fabricar debe calcularse la deformación F mediante la siguiente fórmula, independientemente del método de fabricación empleado:

$$F = 100 \ln \frac{D_b(x)}{D_e - 2e} [\%]$$

donde

e es el espesor del producto intermedio o inicial;

$D_{b(x)}$ es el diámetro de la pieza bruta o el diámetro del producto intermedio;

D_e es el diámetro exterior del producto terminado;

\ln es el logaritmo natural.

Para las virolas que componen la envolvente cilíndrica, fabricadas por laminación con rodillos como se indicaba en el apartado anterior, la deformación F se calcula como:

$$F = \frac{50e}{R_m} \cdot \left(1 - \frac{R_m}{R_{m0}}\right) [\%]$$

donde

e es el espesor del producto intermedio o inicial;

R_{m0} es el radio medio del producto intermedio (en el caso de un producto inicial sin conformar será $R_{m0} = \infty$);

R_m es el radio medio del producto terminado.

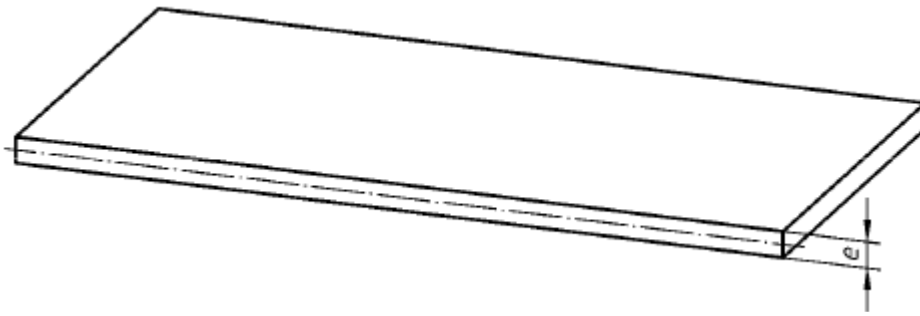


Figura 2: Producto inicial

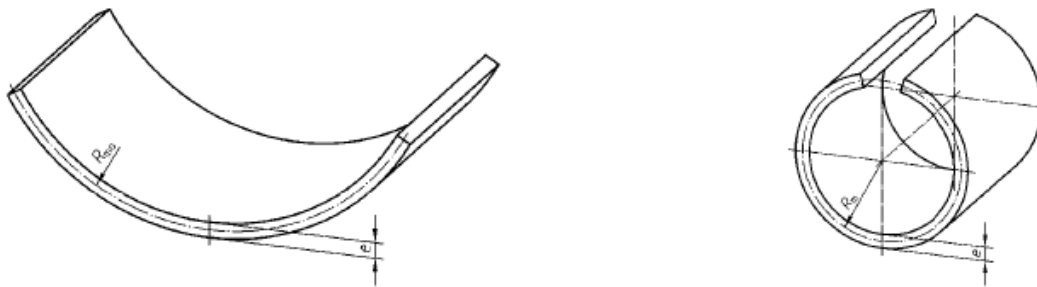


Figura 1: Productos intermedio y final

1.2.2. Procedimientos de conformación

Para la fabricación del recipiente encontramos dos métodos de conformación y dos materiales diferentes:

a) Conformación en frío:

Para el caso del acero inoxidable austenítico AISI 316L el único requerimiento es mantener la temperatura de trabajo por debajo de 300 °C durante el proceso de conformado.

b) Conformación en caliente:

Para el conformado en caliente del acero inoxidable austenítico AISI 316L es necesario elevar la temperatura más allá de los 300 °C, existiendo un intervalo diferente según el tipo de producto. Al contener un porcentaje superior al 0,03 % de carbono la temperatura máxima que se podrá alcanzar en el proceso de conformado es de 1150 °C, y la mínima de 850 °C. El enfriamiento se define a partir del espesor de la chapa. Al tratarse de un espesor superior a 6 mm será necesario el uso de agua para el enfriamiento.

Para el acero al carbono SAE 1045 el conformado se realizará a temperaturas por encima de la temperatura máxima admisible para liberación de tensiones, normalmente dentro del intervalo de temperaturas de normalización. Este intervalo se puede consultar en la ficha técnica del material y sus límites inferior y superior son 856 °C y 900 °C respectivamente. El enfriamiento de la chapa se realizará con aire en calma.

1.2.3. Tratamiento térmico después de la conformación

No siempre es necesario tratar térmicamente el material después de ser conformado, por eso es este apartado se va a analizar en que casos es necesario, y de serlo, que tratamiento aplicar.

- Tratamiento térmico después de conformación en frío:
La una pieza conformada en frío es el fondo de acero inoxidable austenítico, que en caso de temperatura de diseño por encima de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ no requiere tratamiento térmico.
- Tratamiento térmico después de la conformación en caliente:
Para el acero al carbono SAE 1045 es necesario el tratamiento térmico independientemente del método de fabricación utilizado. Se puede realizar un temple corriente, o bien normalización y temple o doble normalización y temple. Es indistinto el método utilizado siempre y cuando se n los requisitos mecánicos fijados en diseño. Se opta por temple en agua ya que se puede obtener un endurecido total para un espesor delgado.
Para el acero inoxidable austenítico AISI 316L no se requiere tratamiento térmico ya que fue conformado según el proceso indicado anteriormente. Si por el contrario hubiera sido conformado de cualquier otro método hubiera sido necesario recocido de solución y posterior enfriamiento.

1.3. Seguimiento de los materiales

El fabricante del material debe establecer un sistema de identificación del material utilizado en la fabricación de forma que todo material sometido a tensiones debidas a presión y todo material soldado al mismo una vez terminado pueda ser seguido hasta su origen.

1.3.1. Sistema de identificación

El sistema de identificación debe satisfacer la necesidad de conocer y asegurar que todos los materiales utilizados en el recipiente se han sometido y superado satisfactoriamente lo siguiente:

- Examen del material previo a la fabricación en el cual se pueda detectar cualquier defecto o imperfección que pueda afectar al correcto desempeño de su función.
- Comprobación del espesor requerido para el material.
- Comprobación del material para asegurar que este cumple la normativa europea vigente y está permitido, pudiendo realizarse un seguimiento completo hasta la certificación de material correcto según las especificaciones de diseño.
- Comprobación de los consumibles de soldeo para tener la seguridad de que las marcas son correctas y se mantienen en condiciones óptimas para evitar su deterioro.

El seguimiento del material hasta los marcados identificativos originales debe hacerse por uno o varios de los métodos siguientes:

- Transferencia exacta de los marcados de identificación originales a un lugar del recipiente terminado donde dichos marcados sean accesibles para consultar.
- Identificación mediante un marcado codificado que se pueda seguir hasta el marcado original.
- Registro de los marcados de identificación utilizando listas de materiales o esquemas de las piezas según se han construido que puedan asegurar la identificación de cada pieza de material durante la fabricación y su posterior identificación en el recipiente terminado.
- Se deben registrar los números de lote de los consumibles de soldeo.

1.3.2. Visibilidad

Para los materiales que queden ocultos o no se puedan sellar una vez terminado el recipiente, o bien piezas pequeñas que no estén sometidas a presión, el fabricante tiene la posibilidad de trabajar con un sistema documentado que asegure el seguimiento del material para todos los materiales incorporados en el recipiente terminado.

1.3.3. Revisión de la certificación del material y de la identificación del material

Todas las certificaciones de materiales deben revisarse a su recepción. Se elaborarán informes por comparación de lo siguiente:

- Propiedades mecánicas y químicas requeridas que tienen que ser indicadas en la especificación del material.
- Seguridad de que los resultados de los informes satisfacen los requisitos de la especificación.
- Existen todos los marcados requeridos por la especificación del material, y existe la posibilidad de seguimiento entre los marcados reales y los de la especificación del material registrados en la certificación.

1.3.4. Transferencia de marcados

Dado el caso que por requerimientos de diseño o ausencia de alternativas sea necesario cortar los marcados de identificación original o de que el material vaya a ser dividido en dos o mas piezas, los marcados deberán de ser transferidos con total exactitud por el personal designado por el fabricante antes de proceder a su corte y en ningún caso después.

El marcado real de los materiales deberá de efectuarse por métodos que no dañen el material y no comprometan su integridad estructural en su uso posterior.

1.4. Unión de partes de distintos espesores

Este apartado va especialmente enfocado en el cambio de sección que se produce en la unión de la envolvente cilíndrica con el fondo. Al tratarse de 1 mm de diferencia se

puede optar por cualquiera de las siguientes soluciones, siendo la segunda la más apropiada:

- Adelgazar la chapa mas gruesa de acuerdo con el plano de diseño.
- Obtener la reducción progresiva necesaria a través de todo el ancho de las soldaduras o mediante una combinación de recrecimiento con soldadura en la superficie inferior mediante aportación de metal de soldadura, para obtener a continuación la inclinación requerida a través de todo el ancho de la soldadura.

1.5. Tolerancias para recipientes sometidos a presión interna

1.5.1. Diámetro exterior

Para recipientes sometidos a presión cilíndricos el diámetro medio exterior obtenido durante la medida de la circunferencia no se debe desviar en más del 1,5% respecto al diámetro especificado en el proceso de diseño.

1.5.2. Ovalización

La ovalización (O) se obtiene mediante la relación siguiente:

$$O [\%] = \frac{2 \cdot (D_{max} - D_{min})}{D_{max} + D_{min}} \cdot 100$$

El resultado no puede ser superior a los valores siguientes:

- a) 1,5% para la relación $e/D < 0,01$;
- b) 1,0% para la relación $e/D \geq 0,01$;

Para el recipiente diseñado la relación $e/D = 19/4000 = 0,00475$, por lo cual habrá que ceñirse a la condición a).

Puede darse el caso de existir una ovalización mayor a la permitida siempre que se pueda demostrar que es admisible por cálculo o mediante mediciones con galgas extensiométricas.

1.5.3. Desviación respecto al eje longitudinal

La desviación respecto al eje longitudinal en la parte cilíndrica del recipiente a presión no debe ser superior al 0,5% de la longitud total del recipiente.

1.5.4. Irregularidades en el perfil

- Irregularidades locales en el perfil del depósito.
Las irregularidades como pueden ser abolladuras, salientes o planos en las posiciones de los manguitos deben ser suaves y su profundidad se debe comprobar con una galga de 20° y no debe superar:
 - 1) 2% de la longitud de la galga;
 - 2) 2,5% de la longitud de la galga, siempre que la longitud de las irregularidades no sea mayor que la cuarta parte de la longitud de la parte de envolvente entre dos irregularidades.

Para irregularidades mayores se requiere una demostración mediante cálculo como las realizadas en el documento *Cálculos Justificativos*.

- Formación de picos en soldaduras a tope longitudinales.
Cuando la irregularidad en el perfil se produzca en la unión soldada y además esté asociada con planos adyacentes a la soldadura, la irregularidad del perfil no debe ser superior a los valores indicados en las siguientes tablas:

Espesor de la pared del recipiente e	Pico máximo permitido P
$e \leq 3$	1,5
$3 \leq e < 6$	2,5
$6 \leq e < 9$	3,0
$9 \leq e$	El menor de los dos valores $e/3$ y 10 mm

Tabla 1: Pico máximo permitido P en soldaduras longitudinales para cargas dinámicas y cíclicas

Relación entre el espesor de la pared e y el diámetro D del recipiente	Pico máximo permitido P
$e/D \leq 0,025$	5
$e/D > 0,025$	10

Tabla 2: Pico máximo permitido P en soldaduras longitudinales para cargas no cíclicas

La medida de los picos se debe hacer con una galga de perfil 20° como la que se muestra en la Figura 3, o bien con galgas de puente o de aguja.

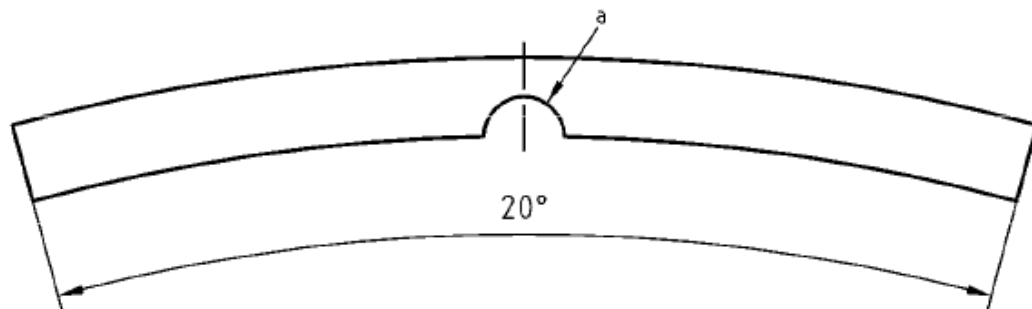


Figura 3: Galga de perfil 20°

Cuando los picos son exteriores es necesario hacer dos lecturas, P_1 y P_2 una a cada lado de la unión en cualquier posición concreta y el pico máximo se determina haciendo uso de la ecuación:

$$P = 0,25 \cdot (P_1 + P_2)$$

Se debe medir el pico hacia el interior P , y el radio interior de la galga debe ser igual al radio nominal exterior del recipiente. Las mediciones se deben realizar en intervalos de 250 mm en costuras longitudinales para poder determinar la posición en la que se da el máximo pico, para posteriormente compararlo con las tablas adjuntas anteriormente.

1.5.5. Adelgazamiento local

Se deben admitir zonas en la superficie donde el espesor local sea inferior al espesor e calculado en diseño, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- La diferencia en el espesor de la pared no debe ser superior al menor de los dos valores $0,05e$ o bien 5 mm ;
- La zona de espesor inferior al mínimo de diseño debe de poder contenerse en un círculo cuyo diámetro no debe ser superior al menor de los dos valores e o 60 mm .
- La distancia entre dos zonas de borde a borde de espesor de pared por debajo del espesor mínimo de diseño debe ser igual como mínimo a la anchura $\sqrt{D \cdot e}$ donde
 - D es igual al diámetro exterior de la parte sometida a presión;
 - e es el espesor mínimo requerido para la chapa.
- El área total de espesor por debajo del mínimo diseñado no debe superar el 2% del área total de superficie.
- La superficie no se encuentra en la zona de reborde de un fondo cóncavo.

Existen algunas situaciones excepcionales en las que se puede permitir un espesor de pared inferior al espesor mínimo de diseño:

- Siempre que el diámetro de un círculo circunscrito a la zona con un espesor de pared por debajo del espesor mínimo de diseño no tenga unas dimensiones superiores a las calculadas para una abertura sin reforzar admisible con sujeción a un máximo de 200 mm .
- Cuando el espesor de pared residual sea superior al espesor de un fondo plano del mismo diámetro y calculado con un factor C de $0,35$.
- Siempre que se registren las zonas de espesor de pared reducido.

1.5.6. Fondos cóncavos

Los fondos cóncavos se deben alinear dentro de las tolerancias especificadas en la siguiente tabla, con la excepción de que el radio de la corona no debe ser mayor que el

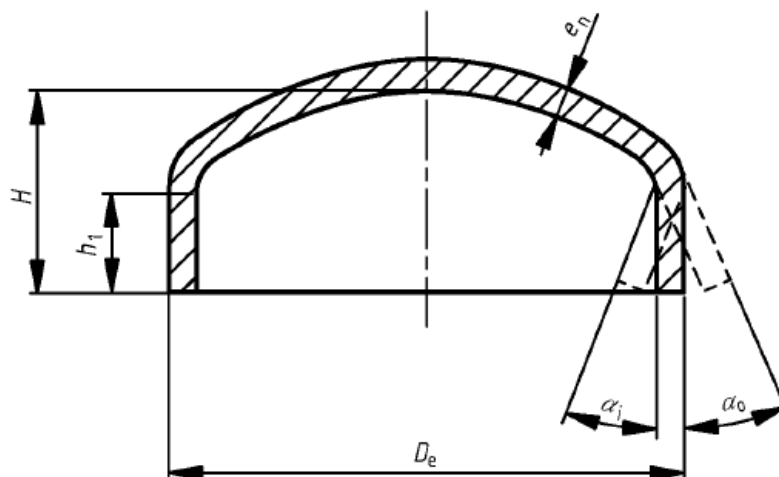


Figura 4: Parámetros para un fondo cóncavo

especificado en el diseño y el radio de reborde no debe tener valores inferiores a los especificados en el diseño.

Símbolo	Magnitud	Unidad
D_e	Diámetro exterior	mm
H	Altura interior	mm
h_1	Brida recta	mm
e_n^a	Espesor nominal de pared	mm
α_i	Desviación de brida respecto al ángulo lateral interior de la forma cilíndrica	grado
α_o	Grado de desviación de brida respecto al ángulo lateral exterior de la forma cilíndrica	grado
C	Circunferencia	mm
O	Ovalización	%

^a En lugar de pedir los fondos cóncavos especificando el espesor nominal de la pared e_n , se pueden pedir especificando el espesor mínimo de la pared.

Tabla 3: Tolerancias para fondos cóncavos

Origen: UNE-EN 13445-4

Símbolo	Intervalo de aplicación	Desviaciones límites	Notas
C	$D_e \leq 300$ mm	± 4 mm	
	Materiales ferríticos:		
	$300 \text{ mm} < D_e \leq 1000$ mm	$\pm 0,4\%$	
	$1000 \text{ mm} < D_e$	$\pm 0,3\%$	
	Materiales austeníticos:		
	$D_e > 300$ mm	+ 0,5% / -0,7%	
O	Materiales de revestimiento:		
	$D_e > 300$ mm	$\pm 1\%$	
O	Todos	$\leq 1\%$	
H	Todos	El mayor de:	

e_n	$e_n \leq 10 \text{ mm}$	+ 0,015 D_e ó + 10 mm	Si se especifica el espesor mínimo de la pared para el fondo cóncavo no es admisible una tolerancia de espesor (δ_e) negativa. En el caso de fondos cóncavos en los que el ángulo del lado exterior se vea influenciado por una perturbación debida al proceso de conformación, la desviación de la brida sólo se debe medir en el interior del fondo cóncavo.
	$10 \text{ mm} < e_n \leq 30 \text{ mm}$	- 0,3 mm	
	$30 \text{ mm} < e_n \leq 50 \text{ mm}$	- 0,5 mm	
	$e_n > 50 \text{ mm}$	- 0,8 mm	
α_i α_0	Todos	$\leq 2^\circ$	
		$\leq 5^\circ$	
Si no se especifica otra cosa distinta en el plano, la longitud de la brida recta h_1 debe ser la siguiente:			
h_1	Todos	$h_1 = 3 \cdot e_n$ o bien $h_1 = 3 \cdot e_{min}$	La longitud de la parte recta necesita no ser mayor que 120 mm para el espesor del recipiente diseñado

Tabla 4: Tolerancias para fondos cóncavos

Origen: UNE-EN 13445-4

1.6. Recipientes fabricados con más de una virola

Debido a que las dos envolventes cilíndricas están fabricadas a partir de la unión de virolas, las uniones soldadas longitudinales de virolas adyacentes tienen que estar escalonadas en $4 \cdot e$, con un mínimo de 10 mm, o un mínimo de 30 mm, cuando el recipiente o parte de este se encuentre trabajando fuera del intervalo de fluencia o se haya diseñado utilizando el análisis mediante diseño, que no es el caso, ya que se utilizó diseño por fórmulas y además se encuentra trabajando dentro del intervalo de fluencia.

2. SOLDADURA

El soldeo de las partes componentes del recipiente a presión sólo se debe emprender si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) El fabricante tiene una especificación del método de soldeo;
- b) Los procedimientos de soldeo seleccionados por el fabricante son válidos para su finalidad;
- c) Los trabajadores y soldadores están debidamente cualificados para desempeñar su función con su correspondiente aprobación.

Una vez descritos los requerimientos generales, el tipo de soldadura elegida para la unión de todas las partes del recipiente es soldadura MIG (Metal Inert Gas).

La soldadura MIG es un proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible. El arco se produce mediante un electrodo formado por un hilo continuo y las piezas a unir, quedando este protegido de la atmosfera circundante por un gas inerte como es el Argón. El electrodo de metal sirve como material de relleno para la soldadura y se consume durante la soldadura.

Este es uno de los principales motivos por los que se ha elegido este método, ya que al tratarse de unos espesores relativamente grandes y unos cordones muy largos el método debe ser ágil. Si el espesor fuera más delgado el método más aconsejable sería TIG, en el cual el consumible viene suministrados en forma de varillas.

La soldadura MIG tiene un nivel de productividad muy alto debido a que no es necesario parar para reponer el electrodo consumible. El uso de hilos sólidos y tubulares han aumentado la eficiencia del proceso hasta unos valores que rondan el 90%. La introducción de los hilos tubulares ha permitido que las soldaduras que se realizan sean de alta resistencia. El hilo viene suministrado en forma de bobina y viene recubierto de cobre para optimizar la conductividad del hilo con el tubo de contacto. Para el tipo de soldadura que se va a realizar el diámetro ideal de hilo es de 1,6 mm.

En este tipo de soldeo el metal puede depositarse muy deprisa y en cualquier posición, lo que lo convierte en uno de los procesos más versátiles.

Para espesores menores de 6 mm no es necesario preparación de los bordes. En este caso al tener espesores de 20 mm será necesario preparar los bordes en X para soldar desde ambos lados de la chapa.

Otro de los motivos por los que se ha seleccionado este procedimiento de soldadura es que el gas protector simplifica la soldadura de materiales ferrosos y no ferrosos, no necesitando el uso de desoxidantes, con la escoria que esto pueda generar. Además, se puede controlar la temperatura de manera muy precisa.

La soldadura MIG permite obtener cordones de soldadura más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que el resto de procedimientos, debido a que el gas protector impide el contacto del oxígeno de la atmosfera con el baño de fusión. Estas propiedades son altamente interesantes aplicadas a la soldadura de recipientes a presión, ya que por su condición de presión deben aguantar esfuerzos mucho mayores que en recipientes a presión atmosférica. Otra ventaja de la utilización de este método es la obtención de una soldadura limpia y uniforme gracias a la escasez de humos. El

cordón obtenido es de muy buena calidad con un buen acabado superficial y apenas requiere de mejora posterior.

El gas empleado es Argón, que se aplicará en cantidades inferiores al 5% mezclado con oxígeno ya que el argón puro produce mordeduras y cordones irregulares.

A modo de resumen las principales ventajas de este método de soldeo son:

- Utilizable en cualquier posición.
- Buena apariencia, dejando pocos salpicados.
- Poca formación de gases contaminantes y tóxicos
- Proceso fácilmente automatizable.
- Alta productividad.

2.1. Cualificación de las especificaciones del procedimiento de soldeo (WPAR)

Las especificaciones del procedimiento de soldeo que se vayan a utilizar en la producción deben cualificarse por referencia a una WPAR adecuada.

En este tipo de soldaduras que tienen que resistir presión (las del recipiente interior y silletas) esto se debe lograr haciendo los ensayos de aprobación del procedimiento de soldeo de acuerdo con la Norma EN ISO 15614-1. Además de los ensayos especificados en esa norma tales como ensayos no destructivos, se deben realizar los ensayos siguientes que serán descritos con detalle en apartados posteriores:

- a) Para el caso de uniones a tope de espesor superior o igual a 20 mm, siendo este el caso especificado en este proyecto, se debe realizar un ensayo de tracción longitudinal de la soldadura sobre una probeta de diámetro 6 mm. En la fabricación de la probeta se debe asegurar que $R_{c/T}$, R_m y A_5 deben satisfacer los requisitos mínimos del material base. Al no haber consumible de soldadura no será necesario fabricar más probetas de ensayo.
- b) Para el acero inoxidable austenítico tal como el usado en la fabricación del recipiente se debe realizar una micrografía en las soldaduras. El resultado de esta micrografía debe mostrar una microestructura adecuada donde se podrían llegar a admitir microfisuras de hasta 1,5 mm, siendo necesario recoger en el informe la presencia de las microfisuras de este tamaño. También se realizará una micrografía de la zona afectada térmicamente (ZAT), en la cual se analizará el contenido de ferrita. Este debe estar comprendido entre un mínimo del 30% y un máximo del 70%. En la ZAT de temperatura elevada, considerada aproximadamente hasta el doble del tamaño de grano desde la línea de fusión, el contenido de ferrita debe ser como máximo del 85%.
- c) El ensayo de choque se utilizará un péndulo CHARPY con una serie de entallas predefinidas, que deberán cumplir los requisitos establecidos en la Norma EN ISO 15614-1.

Para las soldaduras que no tienen que resistir presión como las de las patas de apoyo o las de la envolvente exterior pueden ser aceptables especificaciones del

procedimiento de soldeo conservando registros de aprobación del procedimiento de soldeo de acuerdo con las normas EN ISO 15611 y EN ISO 15612.

2.2. Cualificación de soldadores y operadores de soldadura

Los soldadores y operadores de soldadura deben registrarse según la norma EN 287-1 o en su defecto EN 1418. La formación, supervisión y control de soldadores y operadores de soldeo es responsabilidad única del fabricante. Este debe tener una lista actualizada donde aparezcan los soldadores y operadores de soldeo, junto con registros de su ensayo de aprobación.

La prolongación (cada seis meses) y la repetición de aprobación (cada dos años) se deben realizar de acuerdo con la norma EN 287-1.

2.3. Preparación de la unión

El material será cortado mediante un procedimiento de corte térmico antes del conformado, y repasado una vez obtenida la pieza mediante medios mecánicos para obtener la pieza final de acuerdo al tamaño y forma diseñados. Para la realización del corte térmico es necesario adoptar precauciones para que los bordes no se van afectados adversamente por endurecimiento.

La superficie a soldar se debe limpiar perfectamente de óxido, cascarilla, aceite, grasa u otras sustancias que puedan perjudicar la unión. También deberá estar exenta de defectos tales como inclusiones, laminaciones o grietas para evitar cualquier efecto perjudicial sobre la calidad final de la soldadura.

Los bordes a soldar se deben mantener en la posición que les corresponda, ya sea con sujeciones mecánicas, fijaciones temporales, puntos de soldadura o bien una combinación de estos métodos. En el caso de recurrir a los puntos de soldadura se deberán quitar o fundir de nuevo en el cordón de soldadura. En cualquier caso, será necesario asegurar que el método de fijación no afecta a la calidad final de la soldadura.

Para la soldadura de las chapas de gran espesor tales como las virolas que conforman la envolvente interior, y la unión de esta a los fondos se realizará desde ambos lados, con una preparación del borde en X tal y como se muestra en la Figura 5. Por la imposibilidad física de soldar desde dentro, el último fondo que se una se preparará para la soldadura de un solo lado, tal y como se muestra en la Figura 6.

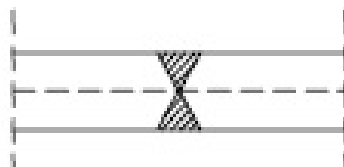


Figura 5: Alineación de piezas y borde en X

Para formar la envolvente exterior se utilizarán soldaduras desde un solo lado en la unión de las virolas y su posterior unión a los fondos. El espesor es de 8 mm por lo que se encuentra en el límite para necesitar preparación de bordes. Para la obtención de una soldadura de la máxima calidad posible se prepararán los bordes en V como se muestra en la Figura 6. El fabricante deberá asegurarse de que la alineación de las dos piezas a unir y la separación de los bordes a soldar es la indicada para la correcta penetración en la raíz de la soldadura.



Figura 6: Alineación de piezas y preparación en V

Para la soldadura del resto de partes adyacentes a las virolas tales como la unión de la envolvente exterior a los fondos, se utilizarán juntas en ángulo soldadas continuamente a la pieza y a la envolvente, como se muestra en la Figura 7:

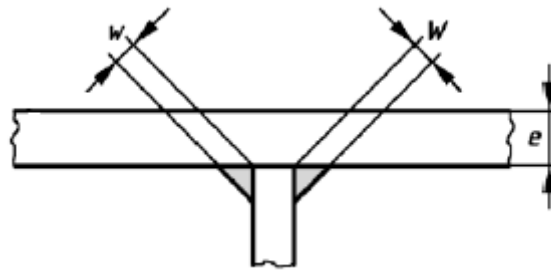


Figura 7: Soldadura de piezas a tope con ángulo de 90°

2.4. Pre calentamiento

No se requiere de pre calentamiento por tratarse de un acero inoxidable austenítico el material a soldar. La excesiva acumulación de calor en las zonas soldadas podría dar lugar a defectos como por ejemplo fases intermetálicas frágiles, precipitados de carburos que pueden disminuir la resistencia a la corrosión, fisuración en caliente, además de provocar mayor distorsión en los materiales que se sueldan.

2.5. Ensayos de producción

Con el objeto de controlar la calidad sostenida de la fabricación y asegurar el cumplimiento de las propiedades mecánicas establecidas para la soldadura, antes y durante la fabricación se deben soldar y ensayar chapas de ensayo de producción que representarán el soldeo de las piezas originales con gran exactitud, sirviendo esto como simulación. Estas chapas de ensayo se utilizan solamente para controlar las soldaduras de la envolvente, ya sean longitudinales o circunferenciales.

El recipiente diseñado en este proyecto está fabricado con acero inoxidable austenítico por tanto se debe aplicar lo siguiente en relación a los ensayos:

- Para soldaduras longitudinales será necesaria una sola chapa de ensayo, en el caso de coeficiente de unión de 1,0.
- Una chapa de ensayos por cada 100 m de soldaduras longitudinales en el caso de coeficiente de unión 0,85 y de soldaduras en fondos en el caso de coeficiente de unión de 1,0.
- Si las soldaduras circunferenciales se realizan de un modo diferente a las longitudinales, serán necesarias dos chapas de ensayo al año, o en su defecto si la fabricación dura menos de un año con una chapa de ensayo es suficiente.

2.6. Alcance de los ensayos

Una vez terminado el proceso de soldadura se deben tomar una serie de probetas de diferente tipo a partir de la chapa de ensayo. Según el tipo de material empleado el número y tipo de probetas será diferente.

La chapa de ensayo fabricada debe tener un tamaño suficiente que permita obtener todas las probetas necesarias, incluyendo un margen para la obtención de más probetas en caso de que sea necesario repetir algún ensayo.

Antes de la extracción de las probetas es necesario asegurar que la chapa de ensayo se encuentra en las condiciones óptimas. Esto se comprueba mediante ensayos no destructivos.

Consultando tablas, se deduce que para el material utilizado y el espesor de chapa obtenido es necesario obtener 3 probetas del tipo IW, 1 probeta del tipo TT y una probeta del tipo Mi. A cada probeta le corresponde el siguiente ensayo:

Abreviatura	Designación del ensayo
IW	Ensayo de choque, depósito de soldadura según la Norma EN 875
TT	Ensayo de resistencia a la tracción transversal según la Norma EN 895
Mi	Análisis micrográfico según la norma EN 1321

Tabla 5: Probetas requeridas para ensayo

2.7. Realización de ensayos y criterios de aceptación

2.7.1. Ensayo de resistencia de tracción transversal

Tomando como referencia la Norma EN ISO 15614-1 el ensayo debe representar todo el espesor para que sea significativo. Los ensayos a tracción deben asegurar que todos los procesos de soldeo utilizados y las variables esenciales incluidas son sometidos a ensayo. Para las soldaduras circunferenciales es necesario retirar el sobreespesor de soldadura con el fin de obtener una probeta con el mismo espesor que la pared a soldar.

La carga de rotura de la probeta no debe ser inferior al valor mínimo especificado correspondiente al metal base, salvo que se indique lo contrario antes del ensayo.

2.7.2. Ensayo de resistencia a la tracción de las soldaduras longitudinales

Para chapas de ensayo en uniones a tope de espesor igual o superior a 20 mm como es el caso, se debe realizar un ensayo de resistencia a la tracción de la soldadura longitudinal donde la probeta tiene que tener un diámetro mayor o igual que 6 mm de acuerdo con la Norma EN 876, y los parámetros $R_{c/T}$, R_m y A_5 deben cumplir los requisitos especificados para el material base, en cuyo caso se dará el ensayo por válido.

2.7.3. Ensayo de choque

Para la realización de este ensayo se utilizará un radio de péndulo de 2 mm de acuerdo con la Norma ISO 148.

Para el metal de soldadura se utilizarán probetas del tipo VWT y para la ZAT probetas del tipo VHT donde cada letra significa:

- V: entalla en V Charpy.
- W: entalla en el metal de soldadura.
- T: entalla a través del espesor.
- H: entalla a la zona afectada térmicamente.

En cada situación especificada cada juego debe constar de tres probetas. Para la obtención de las probetas es importante tener en cuenta que estas se deben de obtener a un máximo de 2 mm por debajo de la superficie del metal base y transversales a la soldadura.

En la ZAT el punto medio de la entalla debe estar a una distancia de entre 1 mm y 2 mm de la línea de fusión. En el metal de la soldadura la entalla debe estar en el eje central de la soldadura.

Para este caso en el que se van a unir dos piezas del mismo material con las mismas especificaciones y designación, la energía absorbida debe ser en todo caso la especificada en la correspondiente norma del metal base, salvo que se indique lo contrario al inicio del ensayo.

El valor medio de las tres probetas debe cumplir los requisitos especificados, y por tanto, el valor único de cada entalla debe ser menor que el valor medio mínimo especificado, siempre que no sea menor que el 70% de dicho valor.

2.7.4. Análisis micrográfico

Se establece como requisito fundamental que el análisis micrográfico muestre una microestructura adecuada para la aceptación de la soldadura.

En el apartado 2.1 b) se describen los criterios de aceptación de la soldadura basándose en el contenido de ferrita en la ZAT y las microfisuras aceptadas.

3. REPARACIONES

En este capítulo se tratarán los temas relacionados con las reparaciones de las soldaduras y la superficie en caso de que fuera necesario.

3.1. Reparaciones de defectos superficiales en el metal base

En el caso de que el defecto a reparar no sea muy profundo como el puede provocar por ejemplo el cebado accidental del arco, una marca hecha accidentalmente con una herramienta, marcas de corte con oxiacetileno, etc., se debe eliminar mediante esmerilado, y la zona esmerilada debe presentar una transición suave respecto a las superficies adyacentes. Una vez esmerilada la zona se debe realizar una inspección visual para detectar posibles defectos en la reparación de la superficie. Para el caso de cebado accidental del arco sobre acero inoxidable austenítico debe ensayarse o bien por ensayo MT (partículas magnéticas) o bien por ensayo PT (líquidos penetrantes).

Una vez reparada e inspeccionada la superficie es necesario comprobar la profundidad de la reparación para asegurar que se cumplen los límites de tolerancia para el material restante.

En caso de que el espesor una vez esmerilado quede por debajo del mínimo permitido es necesario una reparación por soldeo, con lo cual se deberá realizar esta operación bajo un procedimiento cualificado y utilizando soldadores y operadores cualificados.

3.2. Reparaciones de defectos de soldadura

Una vez terminadas las soldaduras se analizan todas las imperfecciones inaceptables y se procede a su eliminación por medios mecánicos como esmerilado o mecanización, o bien por medios térmicos como arranque al aire por arco o arranque térmico. El método elegido en este proyecto es arranque térmico salvo que una vez analizada la situación se disponga lo contrario.

Al tratarse de un acero austenítico es necesaria la completa eliminación de cualquier contaminación presente en la soldadura o el material restante.

Cuando se eliminan defectos no seguidos por soldadura, todo el espesor restante debe ser mayor que el espesor mínimo necesario que satisfaga las condiciones de diseño. La zona debe tener cierta inclinación respecto a las superficies colindantes y se debe unir suavemente a las mismas.

Las reparaciones por soldadura deberán realizarse de acuerdo a la misma WPS utilizada para la realización de las soldaduras durante la fabricación, es decir, TIG, y de la misma forma que antes, deberán ser realizadas por soldadores cualificados y operadores cualificados. Una vez reparada la zona se someterá a los mismos ensayos que las soldaduras de la fabricación del recipiente.

4. PUESTA EN FUNCIONAMIENTO

Esta se llevará a cabo según lo establecido en el artículo 2 del Real Decreto 2135/1980 y Orden de 19 de diciembre sobre normas y procedimiento del mismo.

La instalación deberá someterse a una prueba de comprobación de los sistemas de seguridad, en los cuales las válvulas de seguridad deberán estar precintadas de forma que se pueda asegurar que no han sido manipuladas. Para la comprobación de la estanqueidad del interior se realizará una medición de vacío de la cámara aislante entre

ambas membranas. El resultado obtenido deberá ser inferior a 60 pascales (0,60 mbar) para poder dar la prueba por válida. En caso de que la prueba no resulte exitosa se deberá realizar una comprobación de estanqueidad tradicional.

Se deberá comprobar que se cumplen todas las prescripciones dadas en la memoria descriptiva, sobre todo aquellas relacionadas con distancias de seguridad y todo lo que pueda comprometer la seguridad de la instalación.

Todo el proceso de prueba en el lugar de emplazamiento definitivo deberá ser certificado por parte del instalador o bien por el Órgano Territorial competente de la administración pública.

5. PRUEBAS PERIÓDICAS

Una vez puesto en marcha el depósito y funcionando correctamente es necesario realizar pruebas periódicas para asegurar que se mantiene el correcto funcionamiento. Estas pruebas se realizarán cada 5 años y consistirán en la repetición de las pruebas de estanqueidad y comprobación de los sistemas de seguridad que se realizó en la puesta en funcionamiento.

Cada 15 años debe realizarse una prueba de presión neumática a una presión de 1.1 veces la presión máxima de trabajo, pudiendo ser realizada la prueba con el propio gas natural licuado para evitar la posible entrada de humedad en el interior. La prueba se realizará sin retirar el aislamiento y se irá incrementando la presión desde un valor inicial del 50% de la presión máxima de trabajo. Una vez conseguido este valor la presión se aumentará en etapas de un 10% de la presión final hasta alcanzar la presión objetivo, que posteriormente se reducirá a 4/5 de dicha presión final. Una vez alcanzado este nivel de presión se mantendrá durante el tiempo suficiente para comprobar que no hay fallos en la estructura y realizándose a esta presión una prueba de estanqueidad.

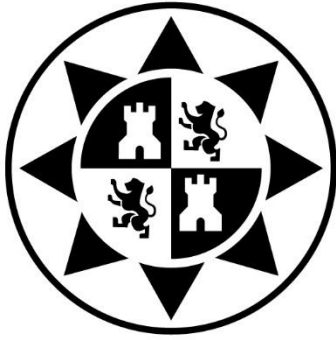
El encargado de la realización de las pruebas puede ser el instalador del aparato, o bien el Órgano Territorial competente de la administración pública.

Si el encargado de realizar las pruebas finalmente es el instalador junto al titular de la instalación, estas pruebas deberán ser justificadas frente al Órgano Territorial de la administración pública, acreditando que se dispone del personal y el equipamiento necesario para la correcta realización de las pruebas.

Si las pruebas han sido superadas satisfactoriamente se hará entrega de un certificado por parte del Órgano Territorial competente, el cual permanecerá en poder del titular y que será necesario para el suministro de GNL. La empresa suministradora deberá negarse a realizar dicho suministro si no se dispone de los certificados correspondientes.

En caso de detección de deficiencias que supongan un riesgo inminente de daños a personas o bienes, el servicio de conservación del titular deberá ponerlo en conocimiento del Órgano Territorial competente de la Administración Pública para que se tomen las medidas pertinentes.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES**



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

DOCUMENTO IV

PLANOS

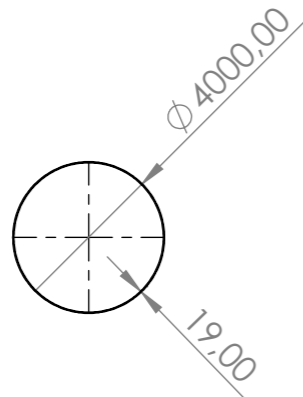
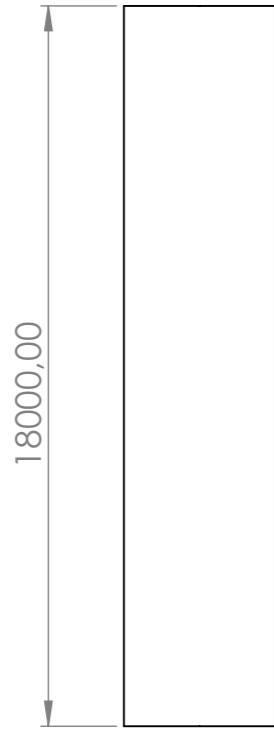
Alumno: Víctor López Reyes

Director: Isidoro J. Martínez Mateo

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Departamento: Ingeniería de Materiales y Fabricación

Fecha: Septiembre de 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

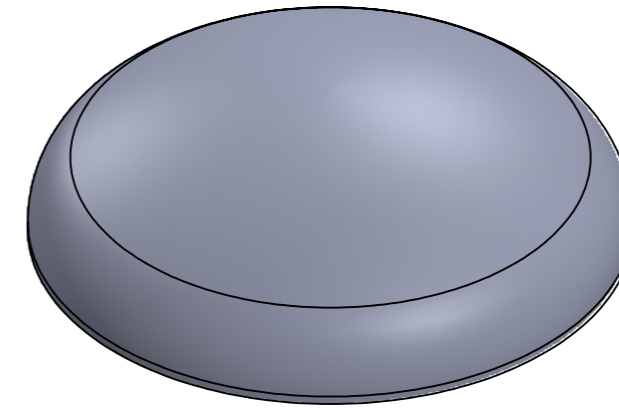
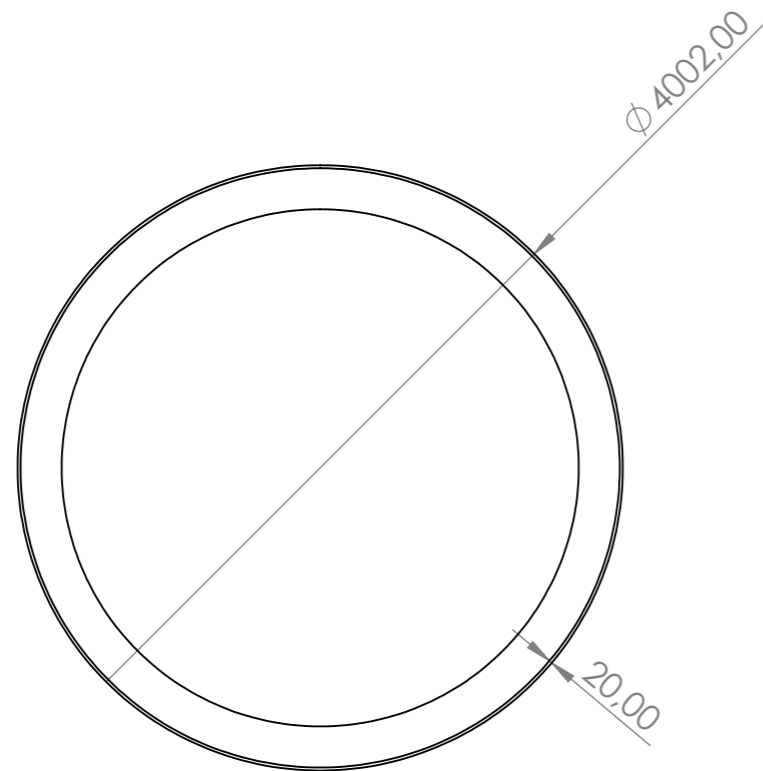
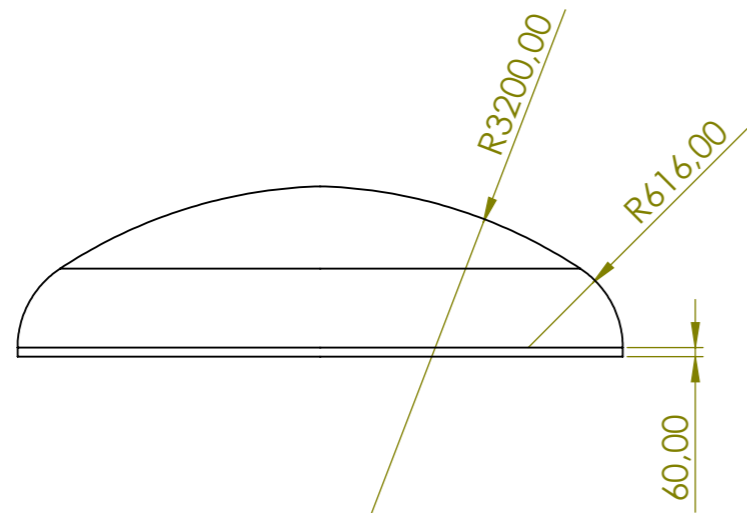
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Envolvente interior

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

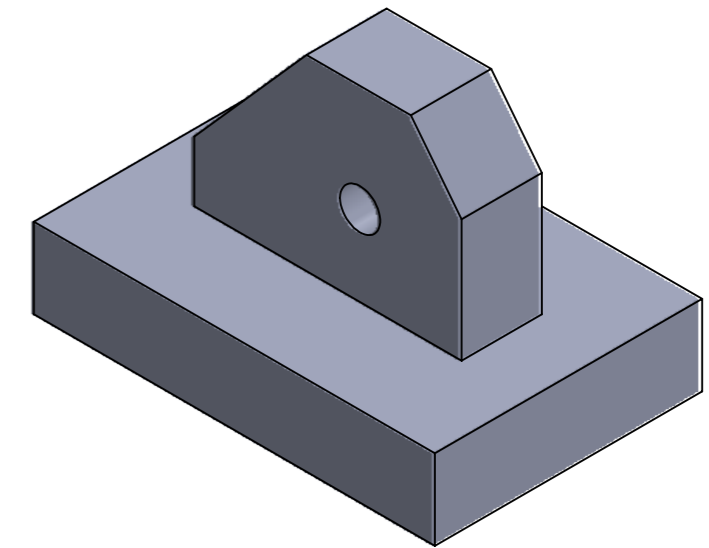
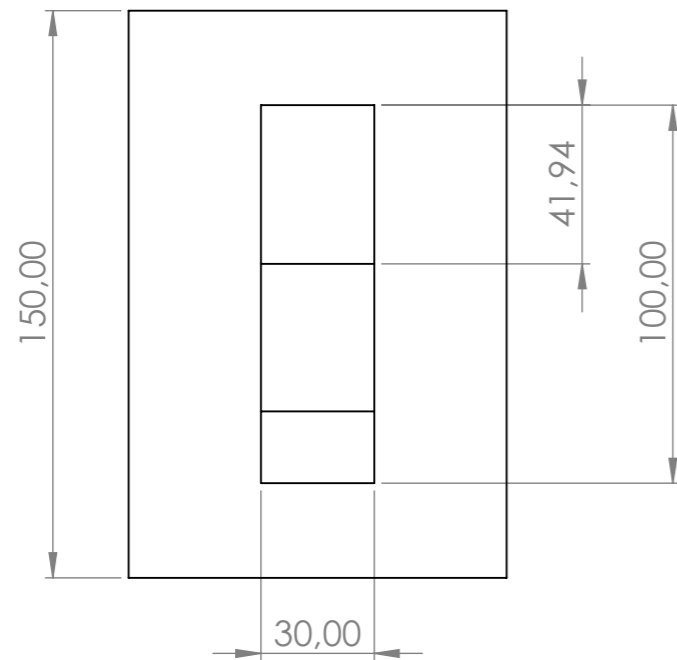
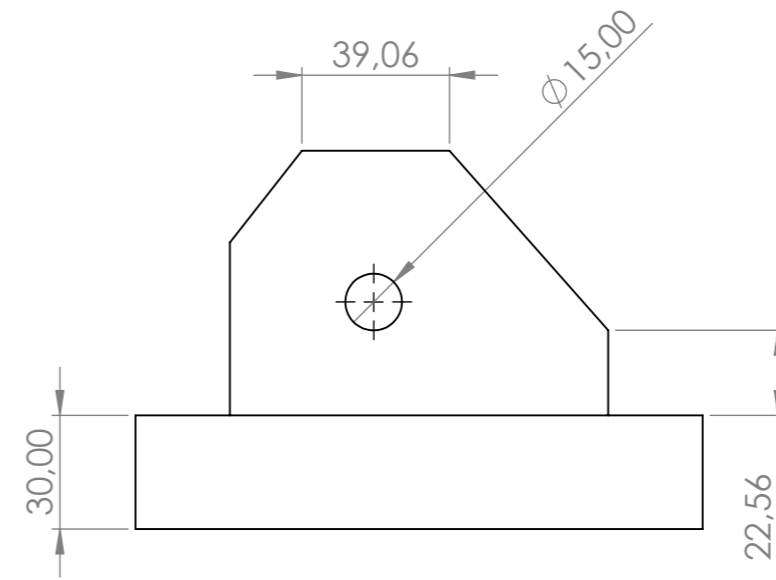
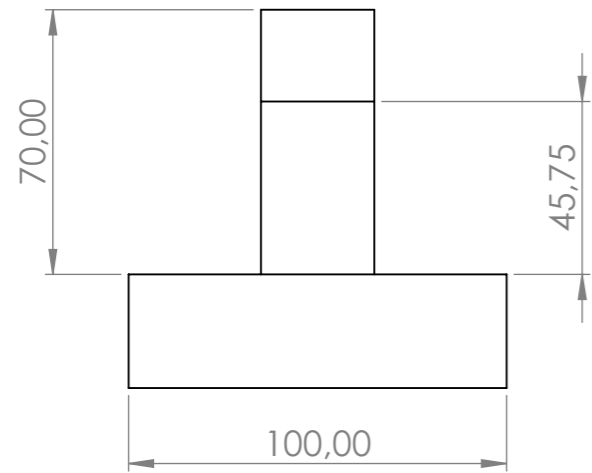
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Fondo interior

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

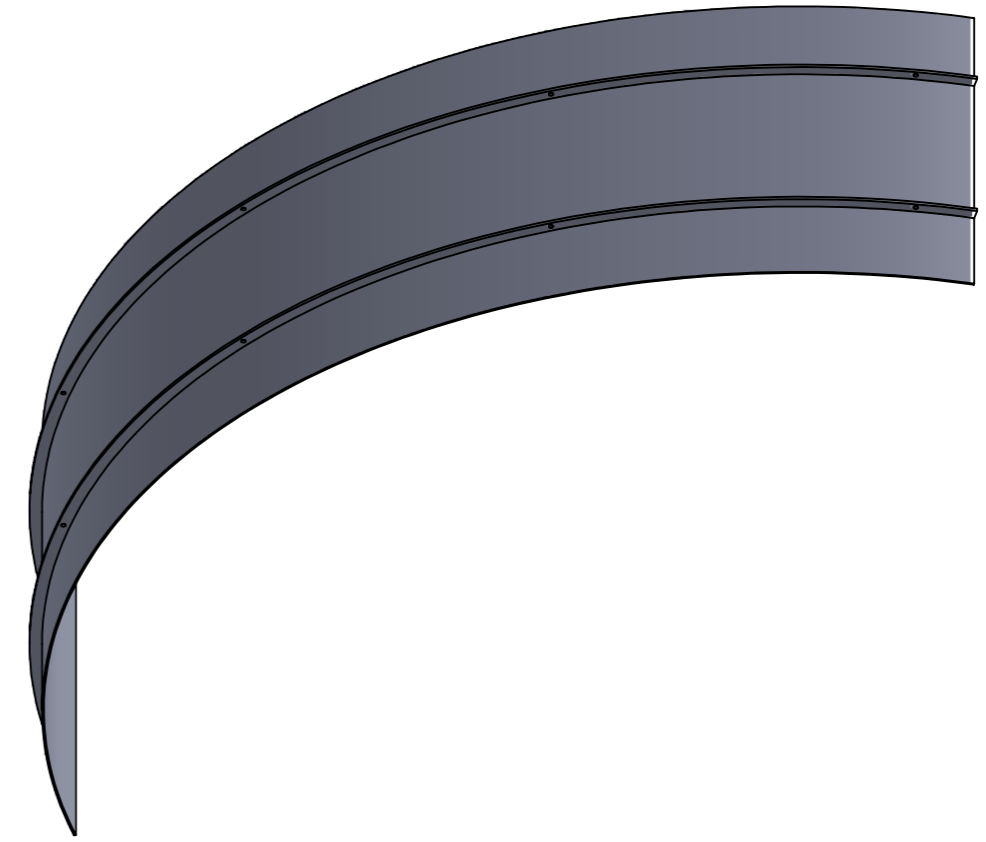
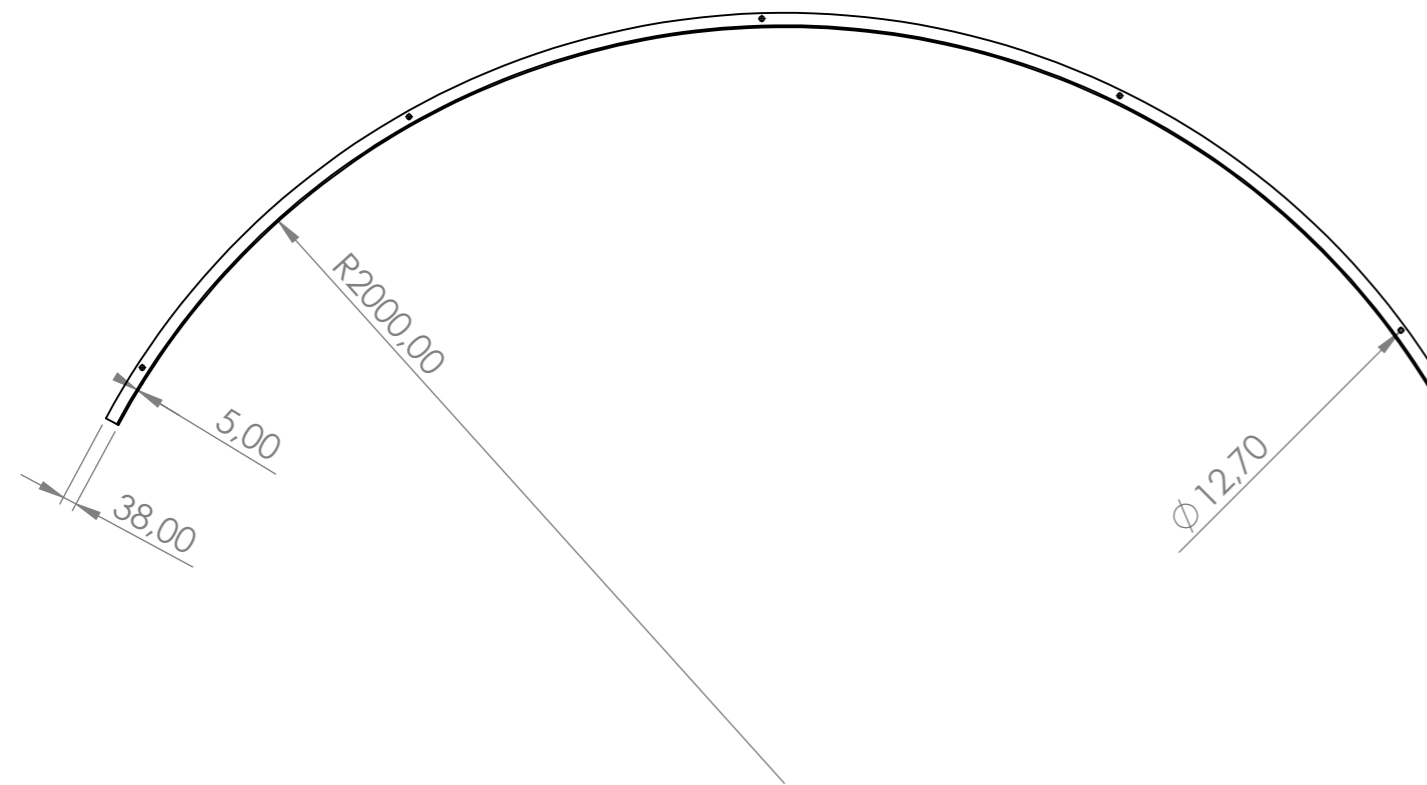
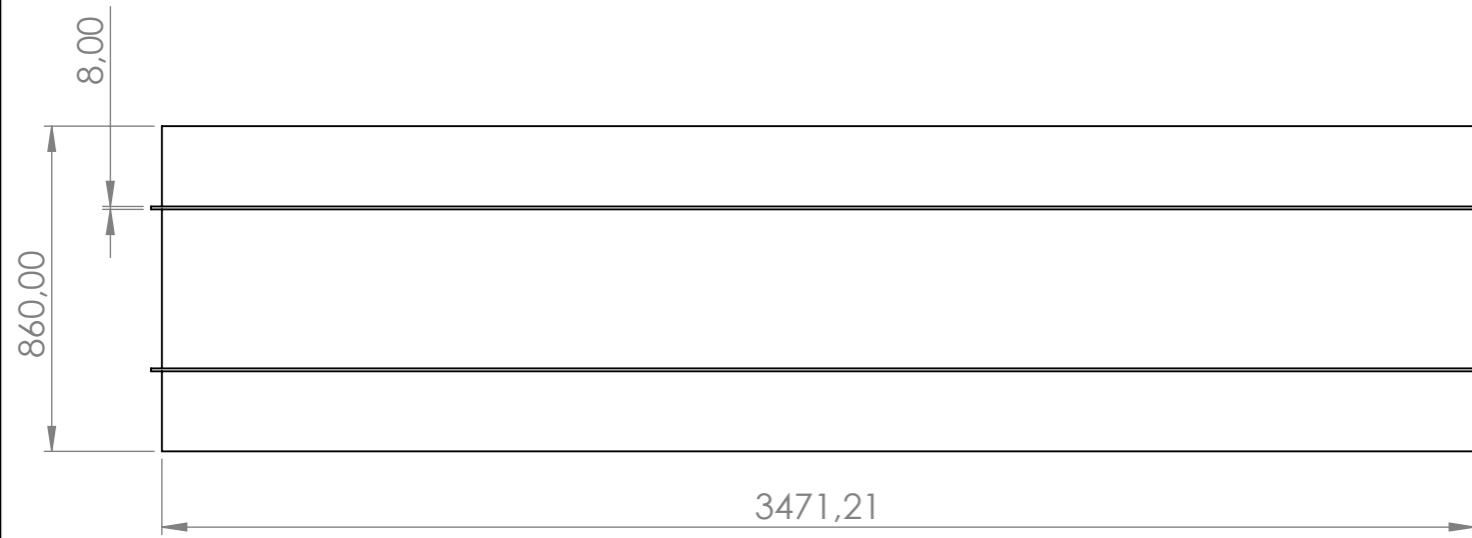
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

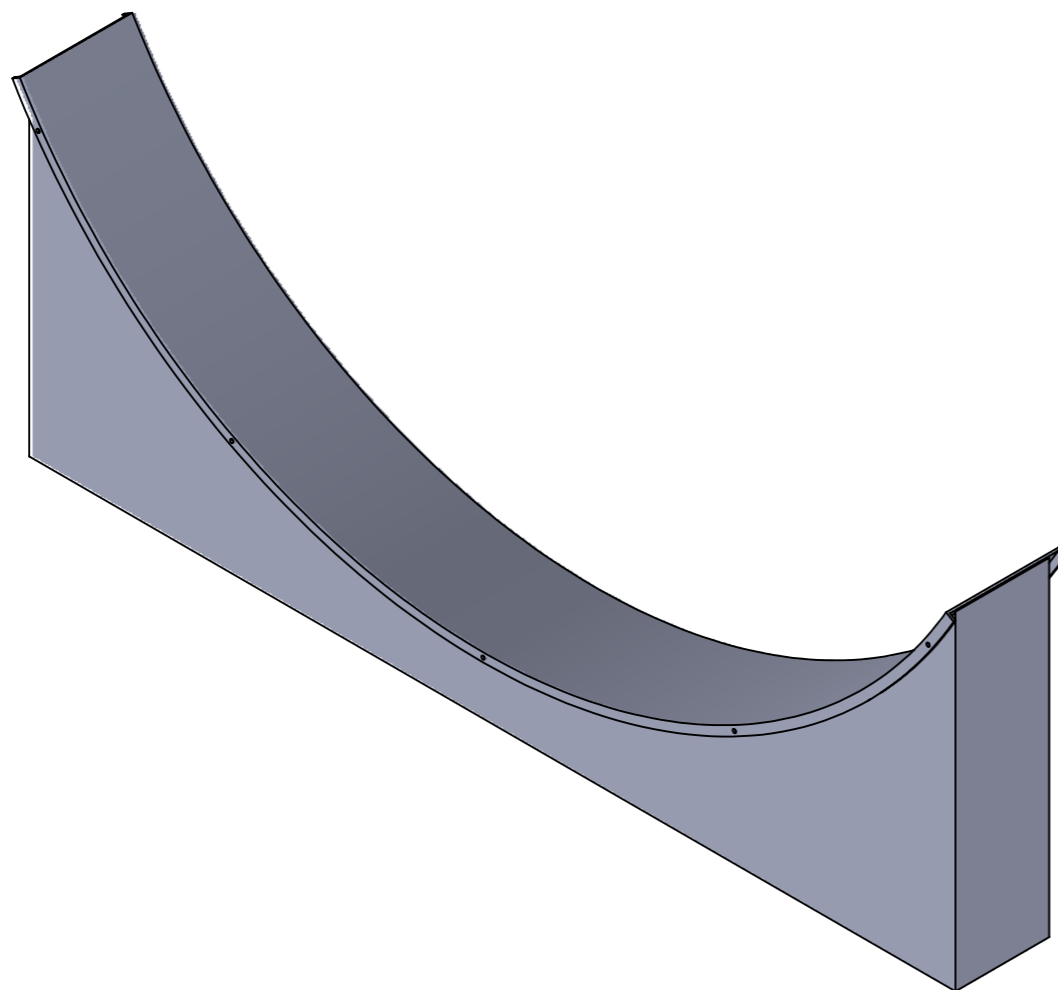
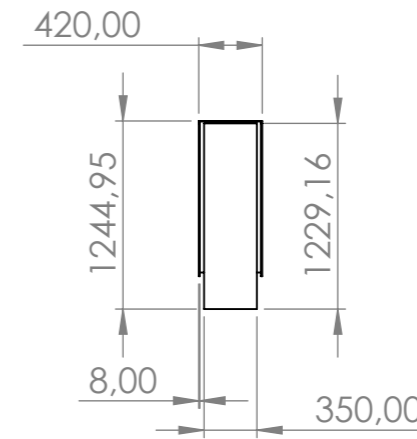
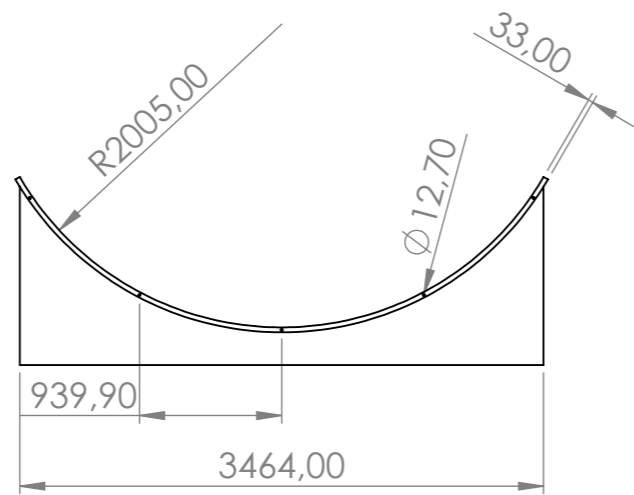
Pieza:
Orejeta

Nombre: Víctor López Reyes

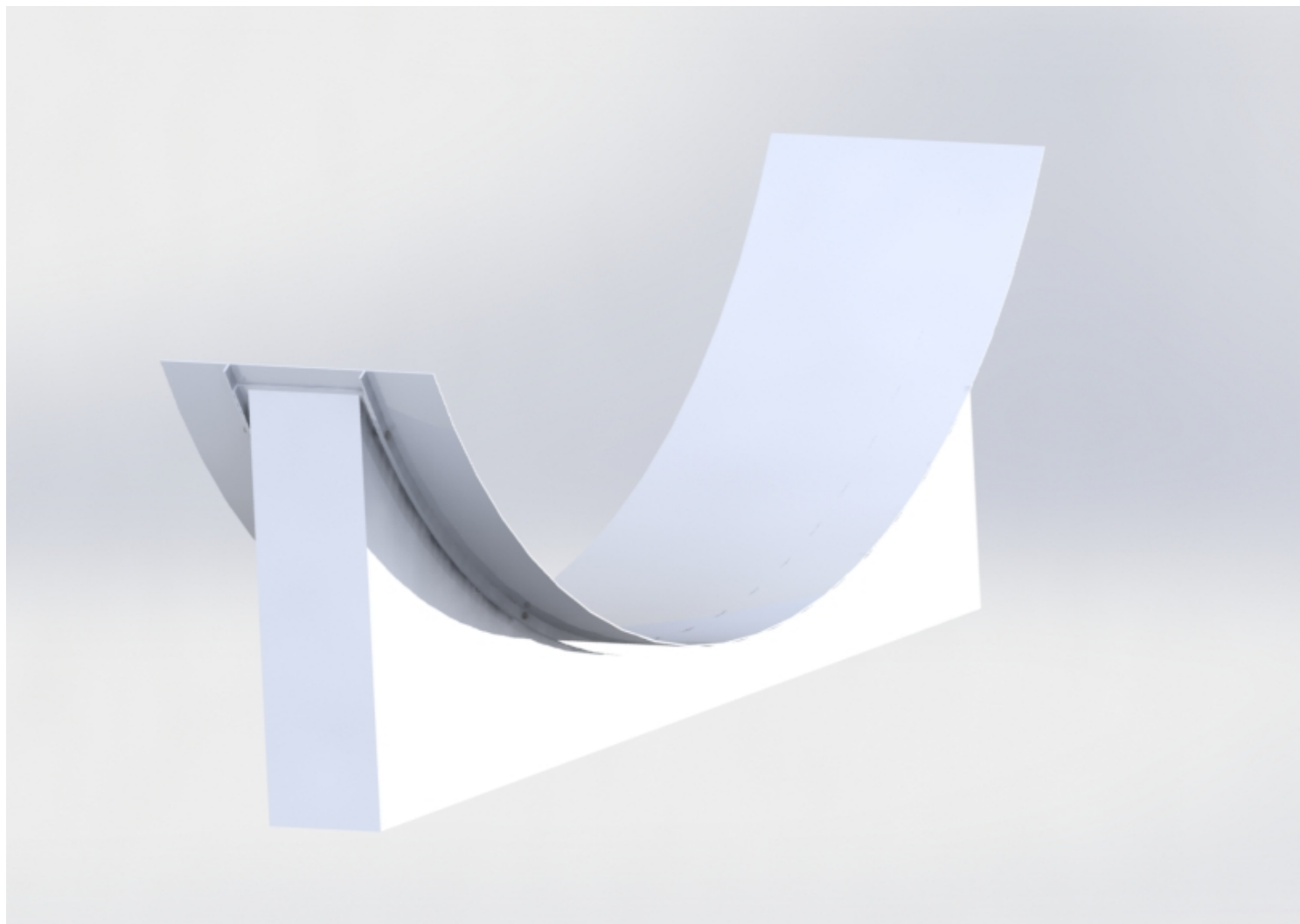
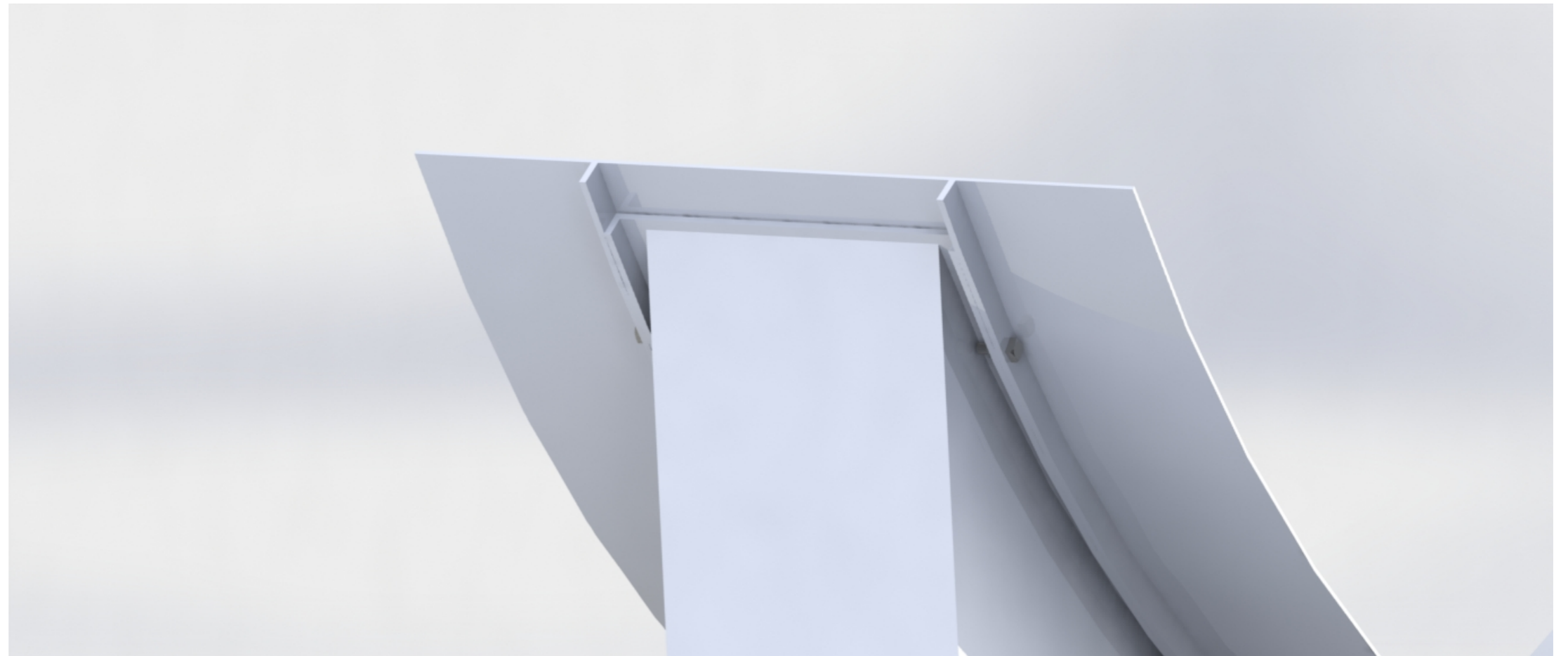
Fecha: Septiembre 2019



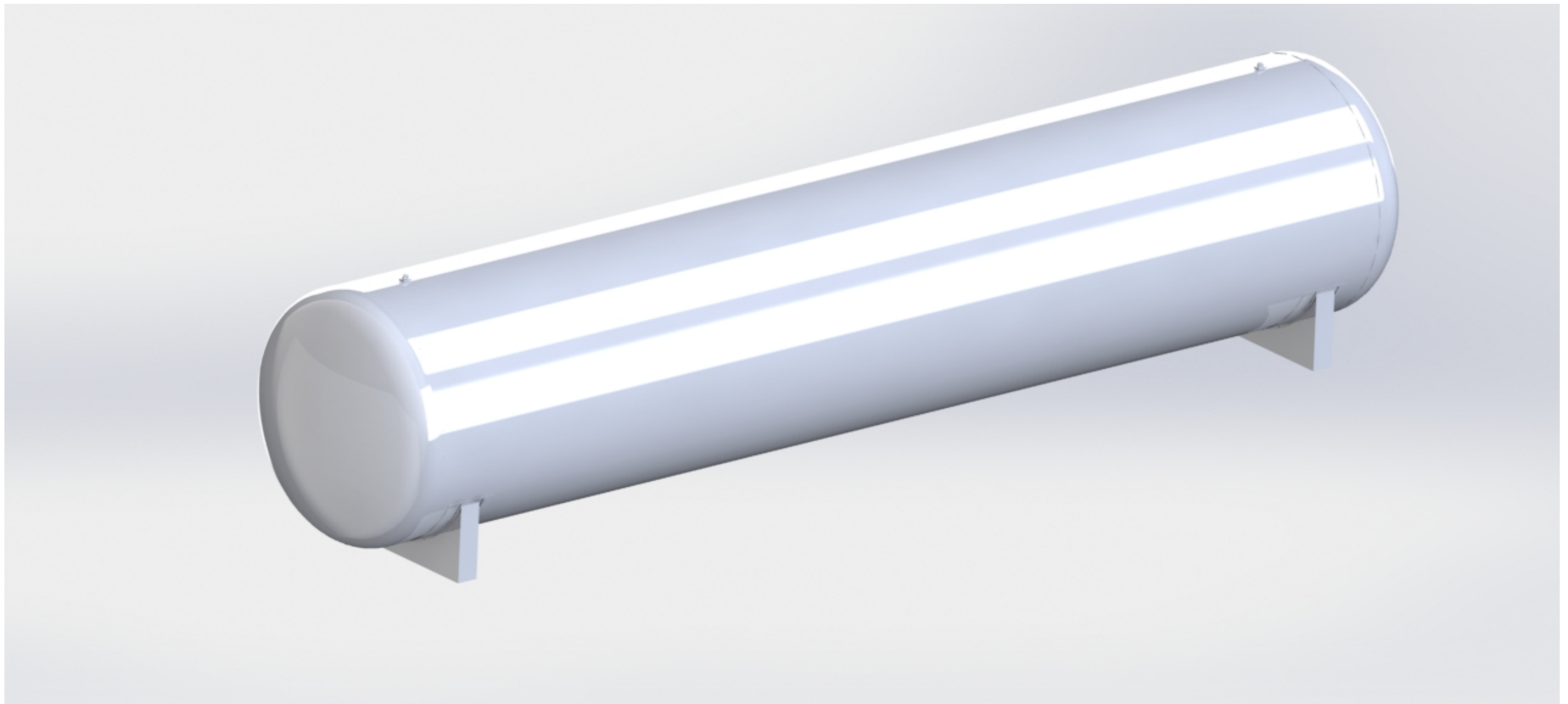
 <p>Universidad Politécnica de Cartagena</p>	<p>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES Y FABRICACIÓN</p>	
<p>Proyecto: Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.</p>	<p>Pieza: Placa de refuerzo con taladros para silleta</p>	
<p>Nombre: Víctor López Reyes</p>	<p>Fecha: Septiembre 2019</p>	



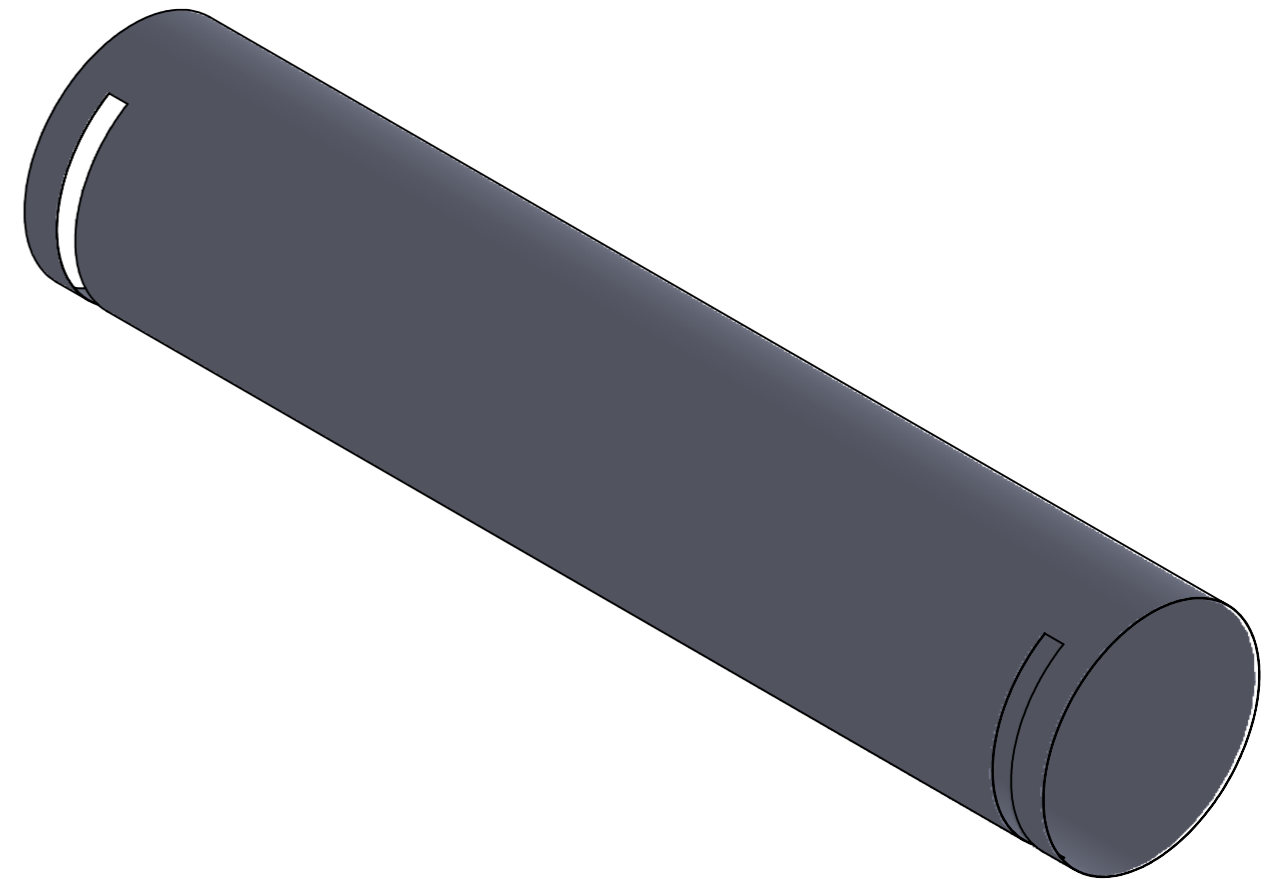
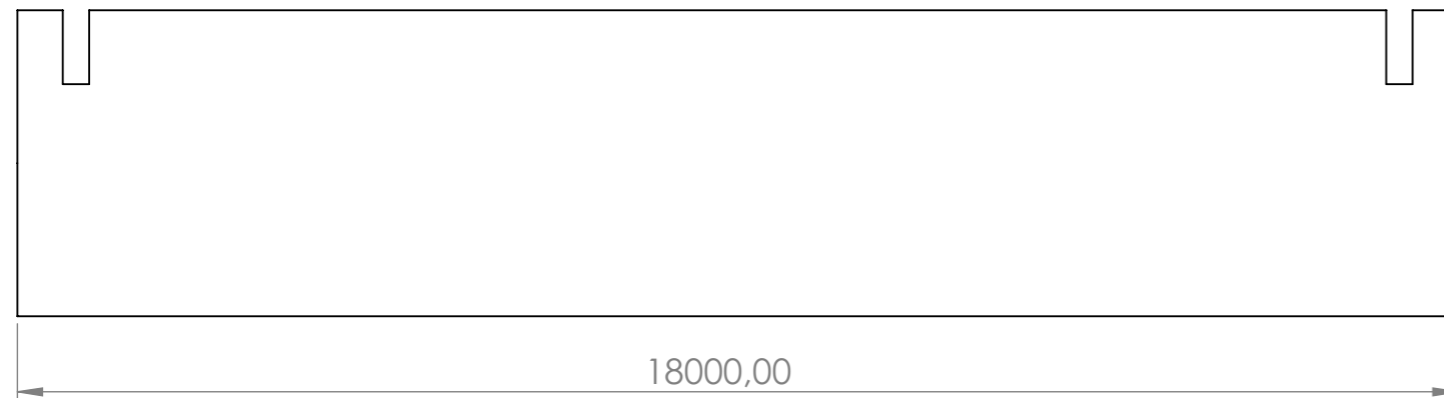
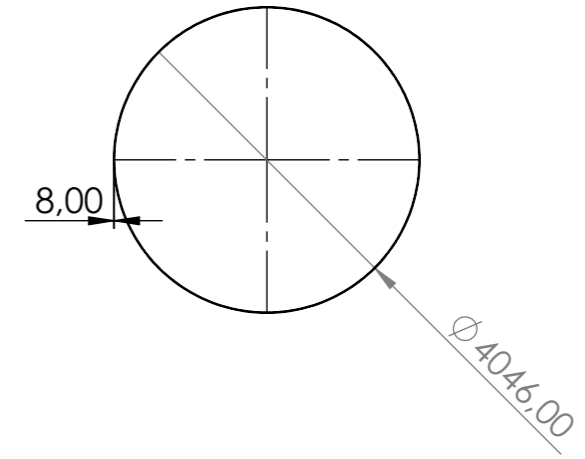
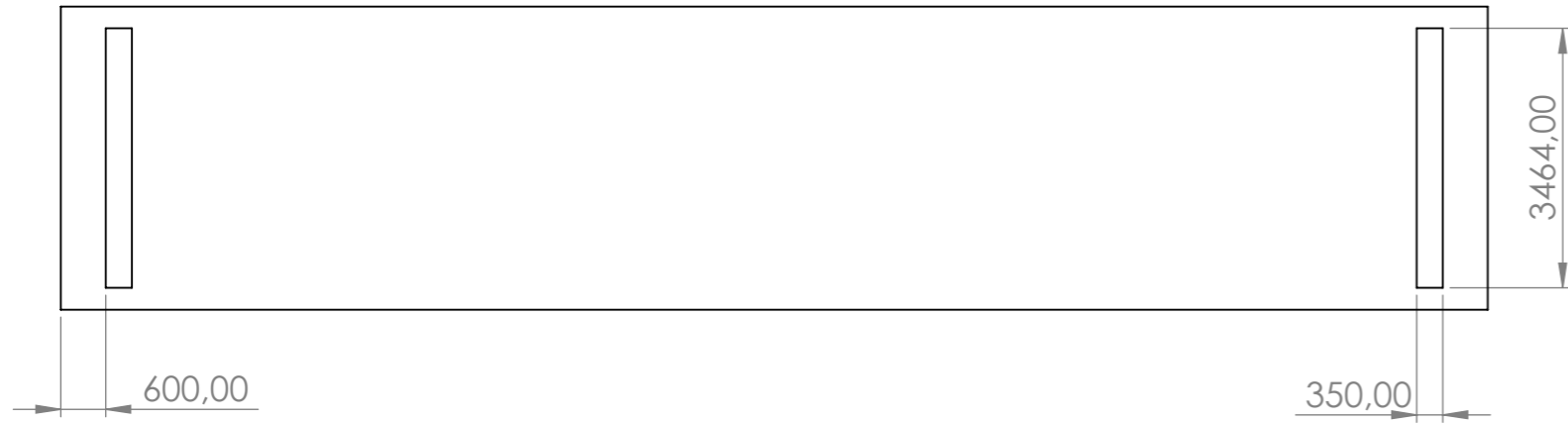
 <p>Universidad Politécnica de Cartagena</p>	<p>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES Y FABRICACIÓN</p>	
<p>Proyecto: Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.</p>	<p>Pieza: Sileta con taladros para fijación</p>	
<p>Nombre: Víctor López Reyes</p>	<p>Fecha: Septiembre 2019</p>	



 Universidad Politécnica de Cartagena	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES Y FABRICACIÓN	
Proyecto: Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.	Pieza: Renderizado unión silleta con placa de refuerzo y detalle de pernos de unión	
Nombre: Víctor López Reyes	Fecha: Septiembre 2019	



 Universidad Politécnica de Cartagena	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES Y FABRICACIÓN	
Proyecto: Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.	Pieza: Renderizado ensamblaje interior	
Nombre: Víctor López Reyes	Fecha: Septiembre 2019	



Universidad
Politécnica
de Cartagena

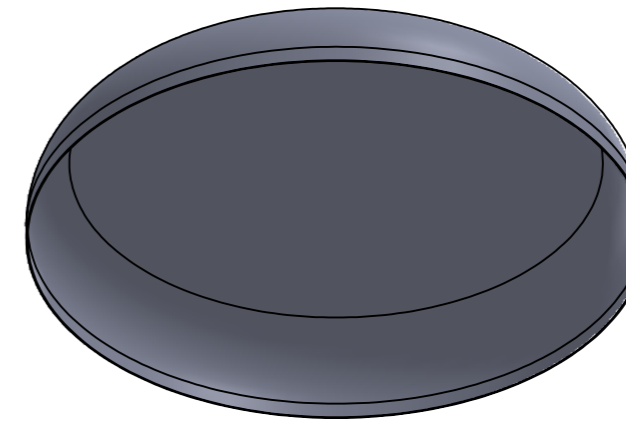
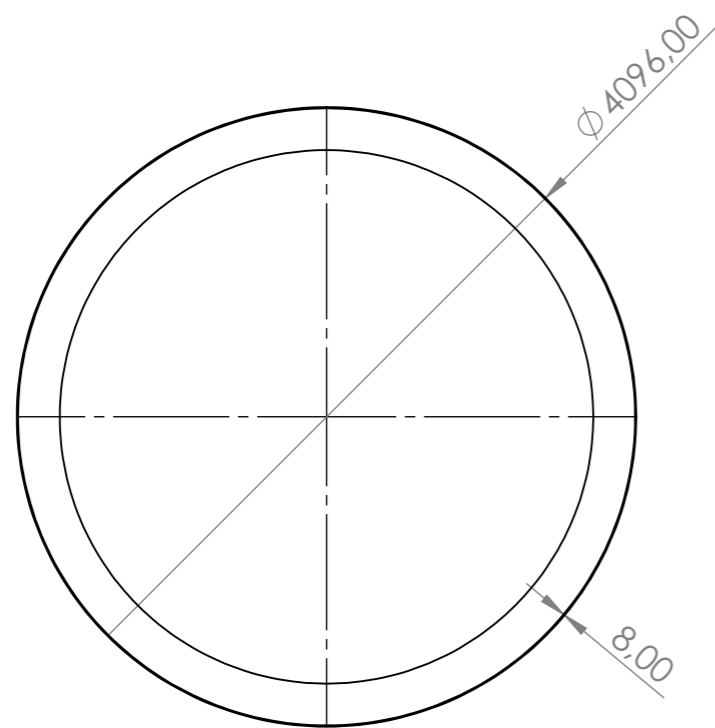
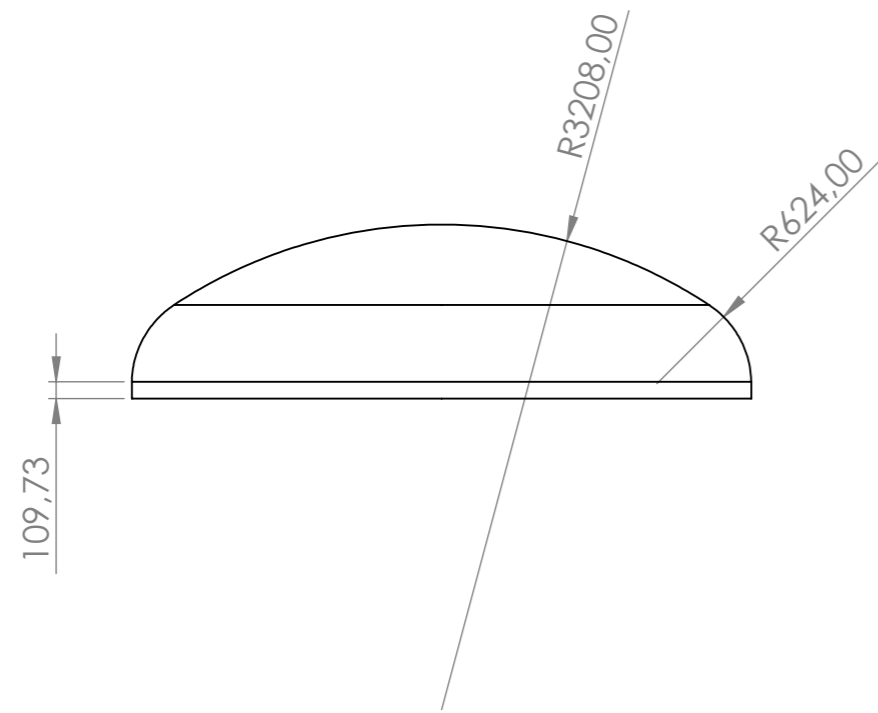
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la
conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL
para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Envoltorio exterior

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

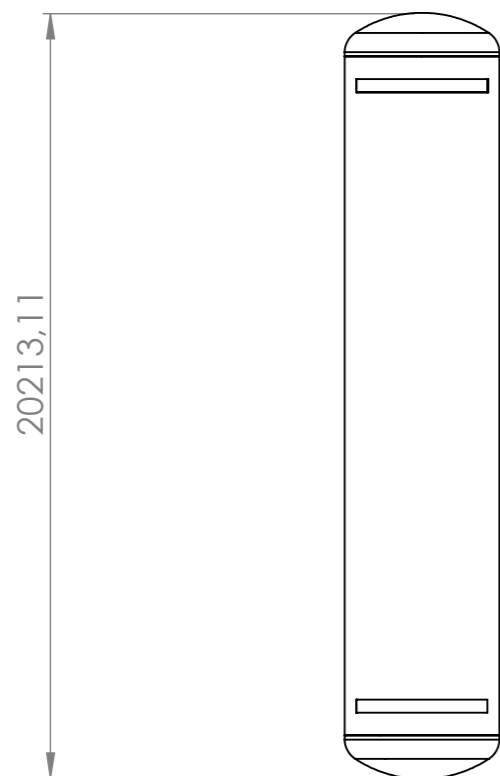
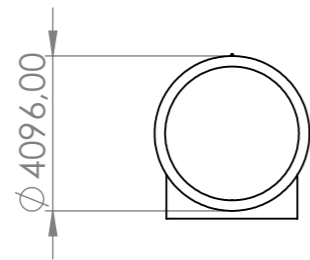
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Fondo exterior

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

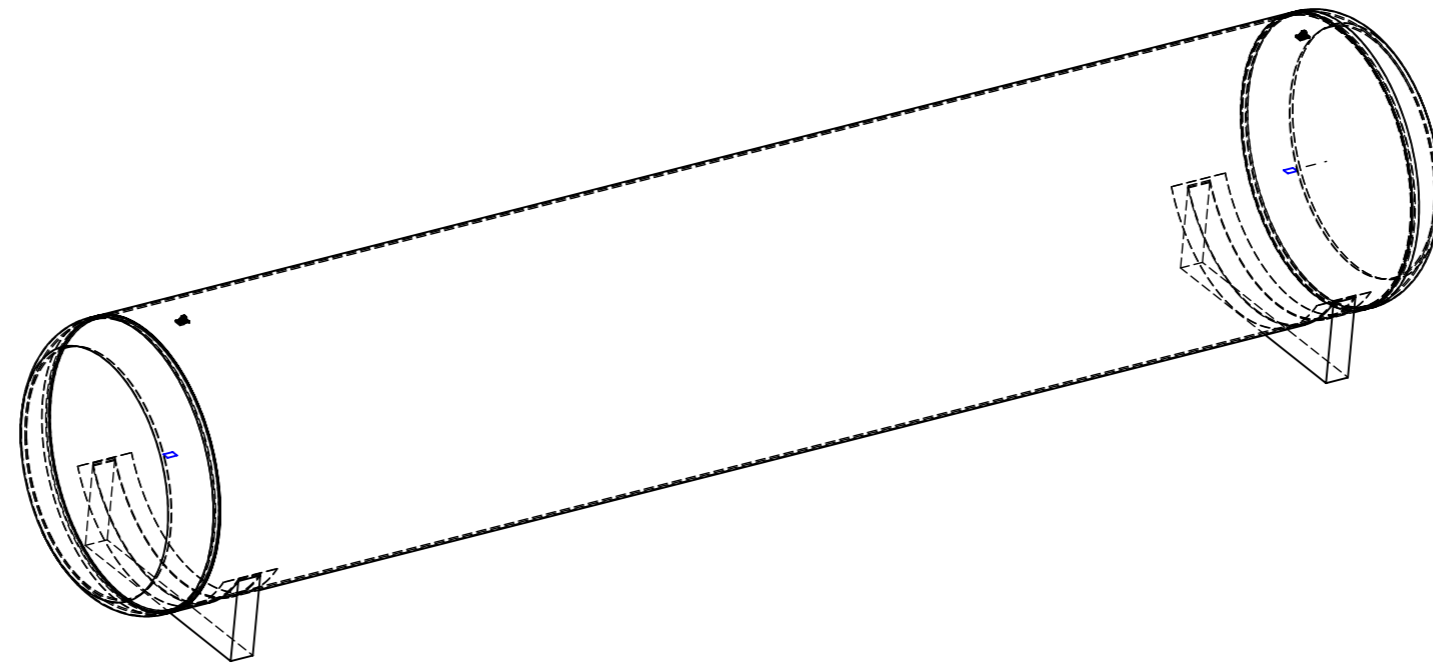
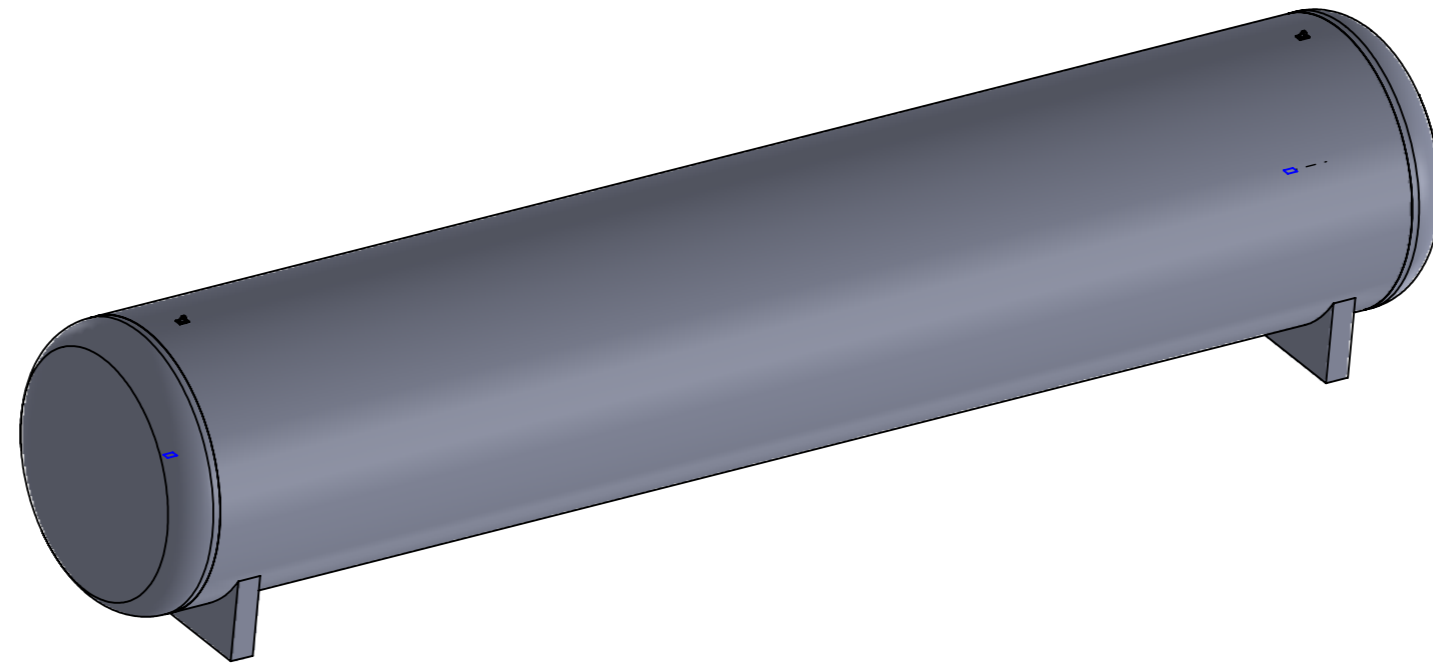
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Ensamblaje completo

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

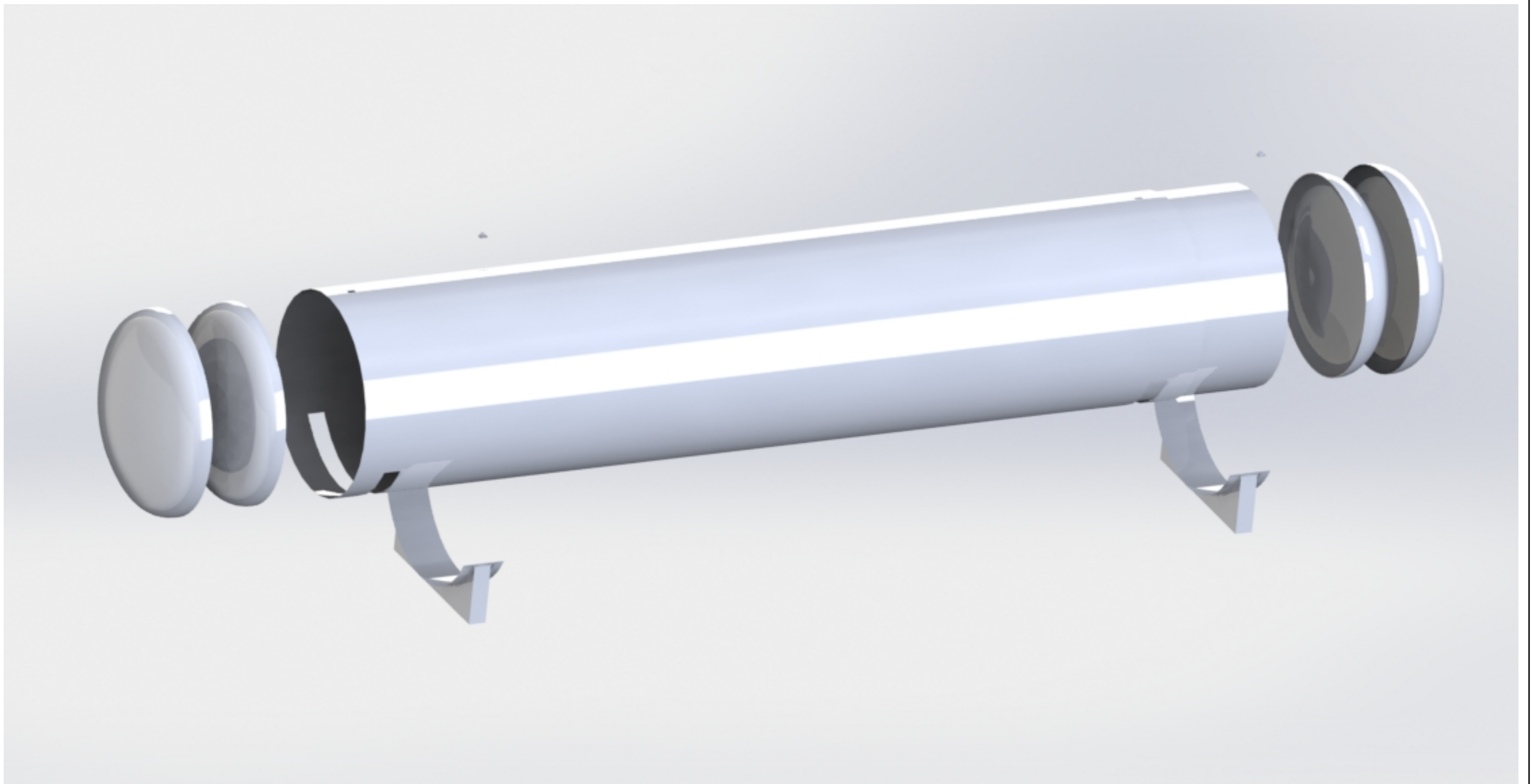
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Ensamblaje completo realista y con transparencia

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

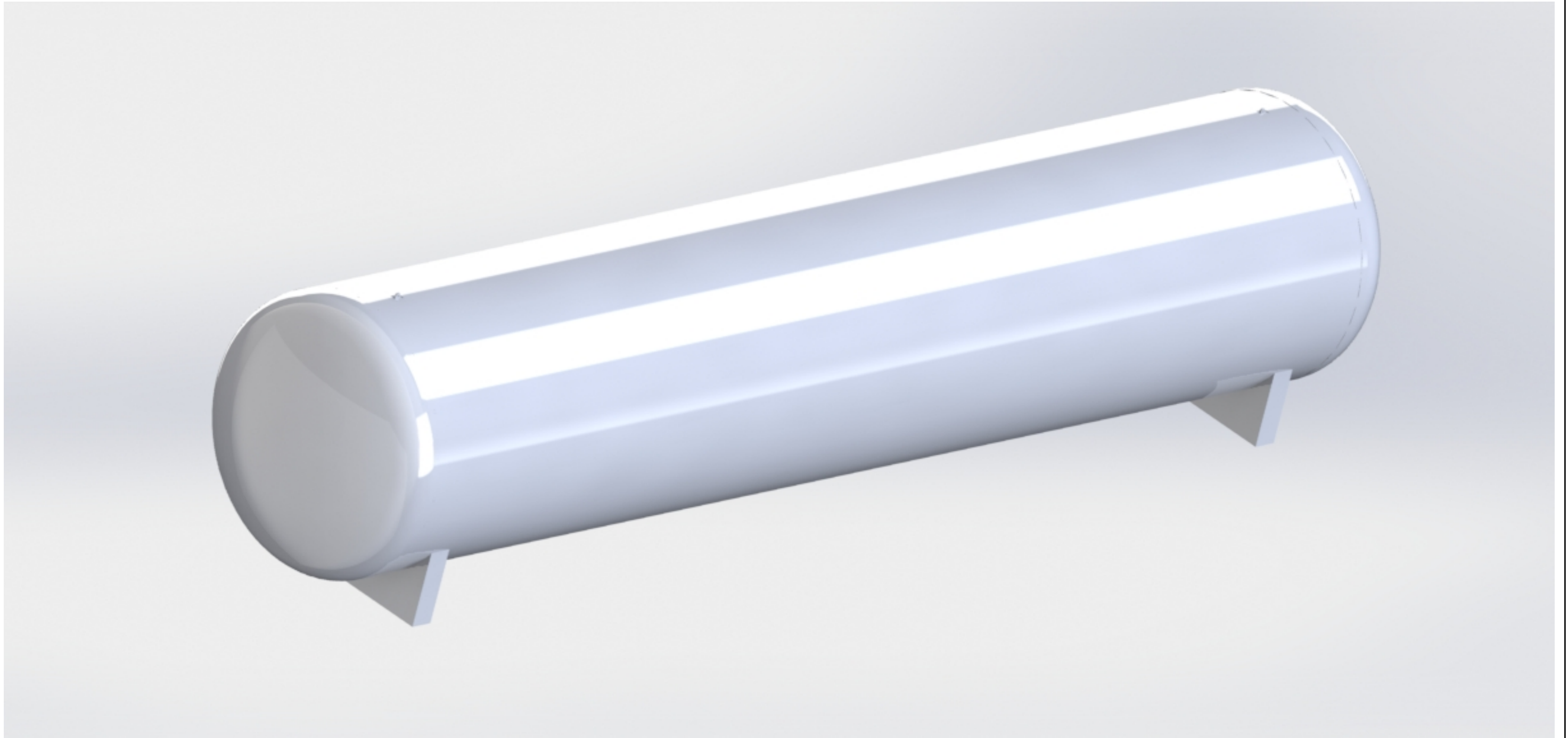
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la
conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL
para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Vista explosionada

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE
MATERIALES Y FABRICACIÓN

Proyecto:
Cálculo, diseño, fabricación y evaluación de la conformidad (Marcado CE) de una cisterna GNL para el suministro a una instalación industrial.

Pieza:
Renderizado de ensablaje final

Nombre: Víctor López Reyes

Fecha: Septiembre 2019