



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Aplicación de depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno para propulsión de motores térmicos.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Iván Méndez Díaz

DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoo

Carlos Pérez Collazo

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Aplicación de depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno para
propulsión de motores térmicos.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

A lo largo del tiempo, se han presentado diversas opciones de propulsión que buscan mejorar los medios de transporte disponibles, desde la propulsión con el remo y la vela, hasta los motores térmicos modernos. Se ha desarrollado una serie de tecnologías y combustibles alternativos, entre los cuales se encuentra el hidrógeno, considerado como la alternativa energética del futuro debido a las múltiples ventajas que presenta. El objetivo de este proyecto consiste en llevar a cabo la primera etapa para la futura adaptación de las lanchas de instrucción RODMAN 66 a una propulsión basada en hidrógeno. Para ello, se llevará a cabo una investigación del estado actual de las alternativas disponibles, analizando tanto las ventajas como las desventajas que presentan los combustibles alternativos. Con base en dicha información, se diseñarán depósitos para el almacenamiento de hidrógeno, que se optimizarán a través de la utilización de software especializado, como SOLIDWORKS y Autodesk Inventor, para determinar los materiales y el diseño más apropiados. Finalmente, se opta por el modelo de fibra de carbono y matriz epoxi al mejorar notablemente las prestaciones de peso y coste respecto al modelo de acero-carbono, a pesar de que su autonomía está lejos de la obtenida con gasoil.

PALABRAS CLAVE

Almacenamiento de Hidrógeno, Combustibles alternativos, Depósito, Propulsión, Motores térmicos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a todo el personal docente de la Escuela Naval Militar por su participación y dedicación en mi formación durante los cinco años de escuela, además de a todos mis compañeros.

En especial quiero agradecer a mis dos tutores, Miguel Ángel y Carlos, que me han ayudado y orientado en el desarrollo del trabajo, especialmente en momentos donde no encontraba una solución. Agradecerles el tiempo dedicado y la paciencia ante las numerosas veces que se les ha requerido.

A mi familia, por la educación y apoyo que he recibido y me han permitido llegar a donde estoy. Por el apoyo recibido en momentos de mayor dificultad durante mis cinco años de estancia.

Por último, a mis compañeros de la promoción 423-153, por haber remado todos juntos y haber pasado numerosas anécdotas, tanto para lo bueno como para lo malo, me llevo un gran recuerdo de ellos.

A todos vosotros, gracias.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
Índice.....	i
Índice de Figuras.....	iv
Índice de Tablas	vii
1 Introducción y objetivos	1
1.1 Motivación del trabajo.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estructura del trabajo	2
2 Estado del arte.....	3
2.1 Introducción.....	3
2.2 La propulsión y su evolución histórica	3
2.2.1 El remo y la palanca	4
2.2.2 La vela	4
2.2.3 La máquina de vapor	5
2.2.4 Motor de combustión interna	5
2.2.5 Turbinas de gas.....	6
2.2.6 Propulsión eléctrica	6
2.2.7 Propulsión nuclear.....	7
2.2.8 Pilas de combustible y motores térmicos de hidrógeno	8
2.3 El problema de los combustibles fósiles.....	8
2.3.1 Carbón	8
2.3.2 Petróleo.....	9
2.3.3 Gas natural.....	10
2.4 Hidrógeno	10
2.4.1 Métodos de producción de hidrógeno	10
2.4.2 Métodos de almacenamiento de hidrógeno	11
2.4.2.1 Almacenamiento de hidrógeno a alta presión	11
2.4.2.2 Almacenamiento de hidrógeno en estado líquido	12
2.4.2.3 El almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos	12
2.4.3 Almacenamiento hidrógeno a alta presión	13
2.4.4 Densidad energética del hidrógeno	14
2.5 El presente y futuro del hidrógeno en propulsión.....	15
2.5.1 Apuesta de Europa por el hidrógeno	15
2.5.2 El papel de España frente al hidrógeno	16
3 Sistema de almacenamiento de hidrógeno modular.	19
3.1 Software empleado	19
3.1.1 Autocad-Autodesk Inventor	19
3.1.2 <i>eLamX2®</i>	19
3.1.3 Solidworks.....	20
3.2 Estudio de la viabilidad de utilizar hidrógeno como combustible para propulsión.....	20

3.3 Diseño e implementación de un sistema de almacenamiento de hidrógeno modulable.....	21
3.3.1 Selección de la forma del depósito.....	22
3.3.2 Selección del tipo de depósito.....	23
3.3.2.1 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido baja presión.....	23
3.3.2.2 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido media presión.....	23
3.3.2.3 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido alta presión.....	24
3.3.2.4 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido baja y media presión con refuerzo.....	24
3.3.3 Cálculo de volumen y masa total de hidrógeno necesario.....	25
3.4 Tipos de tanques de almacenamiento.....	26
3.5 Estudio tensional paredes del depósito.....	27
3.6 Selección de los materiales.....	31
3.6.1 Cálculo espesor del depósito.....	33
3.6.2 Soldadura del depósito.....	36
3.7 Empleo de materiales compuestos.....	38
3.7.1 Análisis micromecánico, modelo de Chamis.....	38
3.7.2 Matriz epoxi.....	40
3.7.3 Fibra de carbono.....	41
3.7.4 Obtención propiedades laminado fibra de carbono-epoxi60 %.....	42
3.7.5 Teoría clásica de laminado.....	44
3.7.5.1 Criterios de fallo de la teoría clásica de laminado.....	47
3.7.5.2 Criterio de fallo Tsai Hill.....	47
3.7.6 Laminado isotrópico.....	48
3.7.7 Laminado optimizado con programa ELAMX2.....	51
4 Diseño y modelado del depósito.....	55
4.1 Introducción.....	55
4.2 Diseño del depósito.....	55
4.2.1 Diseño depósito de acero-carbono SA 106 C.....	55
4.2.2 Diseño depósito material compuesto fibra de carbono-epoxi.....	57
4.3 Simulación mediante FEM.....	59
4.3.1 Análisis en acero-carbono SA 106 C.....	59
4.3.2 Análisis en material compuesto fibra carbono-epoxi 60 %.....	61
5 Adaptación de un sistema modular de almacenamiento de hidrógeno.....	71
5.1 Diseño de modularidad del sistema de almacenamiento.....	71
5.1.1 Compartimentación depósitos acero-carbono.....	73
5.1.2 Compartimentación depósitos materiales compuestos.....	77
5.2 Ampliación del modelo propuesto.....	81
6 Estudio económico.....	85
6.1 Costes fabricación acero carbono SA 106 C.....	85
6.2 Costes fabricación material compuesto.....	88
7 Conclusiones y líneas futuras.....	91
7.1 Conclusiones.....	91

7.2 Líneas futuras.....	92
8 Bibliografía	93
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales.....	98
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales.....	99
Anexo III: Cálculos espesor, diámetro y peso depósito.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Almacenamiento Hidrógeno verde [2].	1
Figura 2-1 Inicio de la propulsión [6].	4
Figura 2-2 Maqueta primera embarcación egipcia a vela [7].	4
Figura 2-3 Máquina a vapor [11].	5
Figura 2-4 Motor de combustión interna [15].	6
Figura 2-5 Turbina de gas durante la Segunda Guerra Mundial [17].	6
Figura 2-6 Isaac Peral, primer submarino de propulsión eléctrica (1888) [20].	7
Figura 2-7 USS Nautilus, primer submarino nuclear (1955) [23].	7
Figura 2-8 Toyota Mirai, pila de combustible propulsada con hidrógeno [25].	8
Figura 2-9 Diagrama de contribución al calentamiento global [28].	9
Figura 2-10 BMW Hydrogen 7 [37].	12
Figura 2-11 Diagrama de densidad-temperatura del hidrógeno según la presión [39].	13
Figura 2-12 Densidad real del hidrógeno en comparación con densidad ideal.	14
Figura 2-13 Columna vertebral de hidrógeno en Europa para 2040 [41].	16
Figura 2-14 Proyecto Green Hysland en Mallorca [43].	17
Figura 2-15 Repsol en el proyecto H24All de hidrógeno [44].	17
Figura 3-1 Logo software Autodesk Inventor [45].	19
Figura 3-2 Logo software eLamX2 [46].	20
Figura 3-3 Logo Software SOLIDWORKS [47].	20
Figura 3-4 Depósitos cilíndricos de hidrógeno comprimido [49].	22
Figura 3-5 Depósitos esféricos de GNC a 300 bar [50].	23
Figura 3-6 Tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido (adaptado de[51]).	24
Figura 3-7 Lancha de instrucción RODMAN 66 [52].	25
Figura 3-8 Volumen cilindro cabezal esférico.	27
Figura 3-9 Semiejes de elipsoide [54].	27
Figura 3-10 Esfuerzos que actúan en cilindros de pared gruesa [55].	28
Figura 3-11 Presurización interna de un cilindro de pared delgada [55].	29
Figura 3-12 Estado tensional de un cilindro a presión [55].	29
Figura 3-13 Esfuerzos en la pared interna del depósito.	31
Figura 3-14 Línea de soldadura con respecto a línea de tangencia en depósitos cilíndricos [59].	36
Figura 3-15 Tipos de soldadura ASME VIII Div 1: a) Junta por ensamble de soldadura doble, picada antes de soldar el segundo lado. b) Junta por ensamble de soldadura simple, con banda de respaldo que puede o no retirarse. c) Junta por ensamble de soldadura simple, sin banda de respaldo (que sólo se permite para algunas soldaduras perimetrales) [58].	37

Figura 3-16 Válvula de sobrepresión [60].	38
Figura 3-17 Propiedades fibra de carbono-epoxi 60 % con ELAMX2.	43
Figura 3-18 Sistema de coordenadas global y local.	44
Figura 3-19 Esfuerzos y momentos sobre un laminado [63].	44
Figura 3-20 Nomenclatura laminado material compuesto.	45
Figura 3-21 Esfuerzo longitudinal en una lámina.	45
Figura 3-22 Laminado unidireccional e isotrópico [64].	48
Figura 3-23 Esfuerzos a los que se somete el material compuesto.	49
Figura 3-24 Representación gráfico polar laminado isotrópico.	50
Figura 3-25 Matriz de esfuerzos y deformaciones laminado isotrópico.	50
Figura 3-26 Tensiones laminado isotrópico según su orientación.	51
Figura 3-27 Datos previos de laminado optimizado.	51
Figura 3-28 Representación gráfico polar laminado anisotrópico.	52
Figura 3-29 Matriz de esfuerzos y deformaciones laminado optimizado.	52
Figura 3-30 Tensiones laminado anisotrópico según su orientación.	53
Figura 4-1 Dimensiones calculadas para depósito acero-carbono SA 106 Grado C.	55
Figura 4-2 Superficie de contorno del depósito.	56
Figura 4-3 Engrosado de la superficie de contorno.	56
Figura 4-4 Diseño soporte depósito SA 106 C.	57
Figura 4-5 Dimensiones calculadas para depósito material compuesto fibra de carbono-epoxi al 60 %.	57
Figura 4-6 Perspectiva modelado depósito material compuesto.	58
Figura 4-7 Perspectiva depósito material compuesto con corte transversal.	58
Figura 4-8 Perspectiva soporte del depósito-	59
Figura 4-9 Perspectiva ensamblaje depósito de material compuesto.	59
Figura 4-10 Restricción y presión aplicadas sobre el depósito.	60
Figura 4-11 Definición de mallado de 2cm.	60
Figura 4-12 Máxima tensión de Von Mises depósito SA 106 C.	61
Figura 4-13 Coeficiente seguridad depósito SA 106 C.	61
Figura 4-14 Definición propiedades mecánicas material compuesto.	62
Figura 4-15 Definición del laminado del material compuesto.	63
Figura 4-16 Definición de equidistancia del material compuesto.	63
Figura 4-17 Representación gráfica de las capas a analizar con SOLIDWORKS.	64
Figura 4-18 Asignación restricciones fijas depósito.	64
Figura 4-19 definición de esfuerzos y presión en depósito.	65
Figura 4-20 Definición mallado del depósito.	65

Figura 4-21 Tensión Von Mises 1 lámina.....	66
Figura 4-22 Punto máxima tensión en 1 lámina.	66
Figura 4-23 Tensión máxima Von Mises 1 lámina.....	67
Figura 4-24 Tensión Von Mises 38 láminas.	67
Figura 4-25 Tensión máxima Von Mises 38 láminas.	68
Figura 4-26 Ensayo ruptura 1400 MPa.	69
Figura 5-1 Dimensiones del tanque de combustible de la lancha de instrucción.	71
Figura 5-2 Disposición modulable depósitos hidrógeno [65].	72
Figura 5-3 Planta y perfil embarcación RODMAN 66.	73
Figura 5-4 Compartimentación de la lancha de instrucción.	73
Figura 5-5 Soporte modular depósitos acero-carbono.	74
Figura 5-6 Propiedades físicas del soporte modular de los depósitos de acero-carbono.	74
Figura 5-7 Planta distribución depósitos acero-carbono.....	75
Figura 5-8 Perfil distribución depósitos acero-carbono.	75
Figura 5-9 Perspectiva distribución depósitos acero-carbono.	76
Figura 5-10 Propiedades físicas depósito acero-carbono.....	76
Figura 5-11 Soporte modular depósitos material compuesto.....	78
Figura 5-12 Propiedades físicas soporte modular depósitos material compuesto.	78
Figura 5-13 Planta distribución depósitos material compuesto.	79
Figura 5-14 Perfil distribución depósitos de material compuesto.....	79
Figura 5-15 Perspectiva distribución depósitos de material compuesto.	79
Figura 5-16 Vista en los compartimentos de los nuevos depósitos.	81
Figura 5-17 Propiedades generales soporte depósito.....	82
Figura 5-18 Resultado de disposición final depósitos.	84
Figura 7-1 Submarino no tripulado de hidrógeno de General Motors para la marina estadounidense...	92
Figura A3- 1 Hoja de cálculo de recipientes a presión.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Recursos y reservas energéticas para combustibles fósiles en millones de toneladas equivalentes al petróleo [28]	10
Tabla 2-2 Técnicas de producción del Hidrogeno y rendimientos [34].....	11
Tabla 3-1 Valores teóricos de energía necesaria y eficiencia de la electrólisis de agua en función de la presión y la temperatura de operación [48].....	21
Tabla 3-2 Comparación densidades diésel e hidrógeno.....	26
Tabla 3-3 Composición SA 106 [56].....	32
Tabla 3-4 Composición acero inoxidable A312 TP316L [57].....	32
Tabla 3-5 Relación entre Øe y tn.	35
Tabla 3-6 Resumen eficiencias máximas permisibles para juntas soldadas con gas y arco [58].	37
Tabla 3-7 Propiedades y subíndices de modelo de Chamis.....	40
Tabla 3-8 Propiedades mecánicas matriz epoxi TGMDA [61].....	41
Tabla 3-9 Propiedades mecánicas M40J [62].	41
Tabla 3-10 Propiedades mecánicas laminado fibra de carbono 60 %.....	42
Tabla 3-11 Constantes ingenieriles de laminado anisotrópico.....	53
Tabla 5-1 Características RODMAN 66.	72
Tabla 5-2 Comparación depósitos.....	83
Tabla 6-1 Partida 1: Oficina técnica.	85
Tabla 6-2 Partida 2: Materiales.	86
Tabla 6-3 Partida 3: Fabricación.	86
Tabla 6-4 Partida 4: Pruebas.	87
Tabla 6-5 Partida 5: Montaje.	87
Tabla 6-6 Partida 6: Control de plataforma.	88
Tabla 6-7: Presupuesto final	88
Tabla 6-8 Partida 1: Oficina técnica.	88
Tabla 6-9 Partida 2: Materiales.	89
Tabla 6-10 Partida 3: Fabricación.....	89
Tabla 6-11 Partida 4: Pruebas.	90
Tabla 6-12 Partida 5: Transporte y montaje.....	90
Tabla 6-13 Partida 6: Control de plataforma.	90
Tabla 6-14 Presupuesto final.....	90
Tabla A3- 1 Ficha técnica motor Caterpillar C18 [53].	100
Tabla A3- 2 Estimación volumen de los depósitos previo al cálculo.	101
Tabla A3- 3 Acero-carbono según esfuerzo máximo admisible.....	101

Tabla A3- 4 Presiones de trabajo.	101
Tabla A3- 5 Tablas UW 12 ASME VIII: Eficiencias máximas permisibles para juntas soldadas con gas y arco [58].	102
Tabla A3- 6 Tolerancias permitidas.....	102
Tabla A3- 7 Fórmulas de diseño de recipientes para presión interna [58]	103
Tabla A3- 8 Diámetros y espesores normalizados.....	104
Tabla A3- 9 Cálculo de diámetro interior.	104
Tabla A3- 10 Relación de espesor SA-106 C en función de presión y $\varnothing_i$ in.....	105

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación del trabajo

Los depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno son una solución innovadora para superar los desafíos asociados con el almacenamiento y transporte de hidrógeno, lo que aumenta su viabilidad como fuente de energía renovable y limpia para la propulsión de vehículos [1]. El hidrógeno se ha convertido en una opción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la seguridad energética en la industria del transporte. Al utilizar depósitos modulares (Figura 1-1), se pueden diseñar soluciones de almacenamiento que sean flexibles y adaptables a diferentes necesidades, lo que hace posible una mayor eficiencia y reducción de costes en el uso del hidrógeno como combustible para vehículos. La investigación en esta área puede llevar a avances en el diseño de motores térmicos y aumentar su eficiencia, lo que contribuiría a reducir los costes y aumentar la competitividad del hidrógeno como combustible. El estudio de estos temas es muy importante ya que se trata de una tecnología emergente con un gran potencial para mejorar la calidad del aire y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.



Figura 1-1 Almacenamiento Hidrógeno verde [2].

El hidrógeno es un combustible limpio y renovable, ya que cuando se quema, su único subproducto es vapor de agua [3]. Esto significa que no emiten dióxido de carbono ni otros contaminantes, lo que ayuda a reducir la contaminación del aire y contribuye a la lucha contra el cambio climático. Además, el hidrógeno puede ser producido a partir de fuentes renovables como la energía solar o eólica, lo que lo convierte en una fuente de energía sostenible [4].

La propulsión de hidrógeno en vehículos se ve como una alternativa atractiva debido a sus emisiones limpias, su capacidad para mejorar la seguridad energética y su potencial para contribuir a la lucha contra el cambio climático. El desarrollo de la tecnología de almacenamiento de hidrógeno ha permitido la

creación de tanques de almacenamiento más seguros y eficientes, lo que ha ayudado a aumentar la confiabilidad de los vehículos alimentados con hidrógeno.

El diseño de depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno busca maximizar la eficiencia en el uso del espacio disponible a bordo de la plataforma, y reducir el peso total del tanque para mejorar el rendimiento del vehículo. Otro objetivo importante es la flexibilidad en el diseño, permitiendo la posibilidad de adaptar el tamaño y la capacidad del tanque según las necesidades específicas de cada vehículo, permitiendo una variedad de aplicaciones en diferentes tipos de vehículos y una mayor adaptabilidad a la demanda del cliente. Por lo general, se busca proporcionar una forma segura y eficiente de almacenar hidrógeno en los vehículos, maximizar la eficiencia en el uso del espacio disponible a bordo del vehículo, reducir el peso total del tanque y ser adaptable a las necesidades específicas de cada vehículo.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar una forma segura y eficiente de almacenar hidrógeno a bordo de los vehículos, de forma modular, para su uso como combustible. Esto incluye cumplir con las normativas y regulaciones de seguridad, y proporcionar una capacidad de almacenamiento adecuada para la autonomía requerida del vehículo. Para ello, se deben evaluar las diferentes tecnologías de depósitos modulares disponibles, y seleccionar las más adecuadas para el almacenamiento de hidrógeno en vehículos.

Para lograr el objetivo principal, se establecen los siguientes hitos:

1. Analizar las ventajas y desventajas de utilizar hidrógeno como combustible para motores térmicos en comparación con otros combustibles.
2. Estudiar los aspectos de seguridad y fiabilidad relacionados con los depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno.
3. Diseñar un sistema de almacenamiento y suministro de hidrógeno para motores térmicos que cumpla con los requisitos de seguridad, fiabilidad y eficiencia.
4. Estudio sobre la adaptación de los tanques de almacenamiento de hidrógeno en las embarcaciones RODMAN 66.

1.3 Estructura del trabajo

El presente trabajo se ha dividido en varias secciones para presentar la información de manera estructurada:

1. **Introducción:** Esta sección presenta la motivación y los objetivos del trabajo.
2. **Estado del arte:** Aquí se revisa y se discute la evolución de la propulsión a lo largo de la historia, el problema del empleo de recursos finitos, las alternativas que han ido surgiendo y el rol del hidrógeno en la propulsión como sucesor.
3. **Materiales y métodos utilizados para el almacenamiento:** En esta sección se detallan el software empleado, los cálculos y los materiales utilizados en el estudio.
4. **Diseño y modelado del depósito:** Se describe el proceso de diseño y modelado del depósito, incluyendo la modularidad de los depósitos, la simulación y su optimización.
5. **Resultados, conclusiones y líneas futuras:** Aquí se presentan los resultados, se discuten, y se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo, así como las líneas futuras de investigación.

Además, se incluye los anexos necesarios para complementar y explicar los cálculos obtenidos, así como los planos correspondientes a los diseños realizados.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

El hidrógeno se ha considerado durante mucho tiempo como una posible solución para la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono [1]. Como combustible, el hidrógeno es limpio y renovable, ya que su único subproducto es el vapor de agua [4]. Sin embargo, su almacenamiento y transporte han sido los grandes retos en la implementación de las tecnologías de hidrógeno. Recientemente, se ha prestado atención especial a los depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno, los cuales ofrecen una gran flexibilidad en términos de tamaño y capacidad, lo que permite su uso en una variedad de aplicaciones, incluyendo la propulsión de vehículos con motores térmicos. Estos depósitos utilizan materiales avanzados para aumentar la densidad de almacenamiento y la seguridad del hidrógeno, y se están desarrollando y evaluando para su uso en vehículos.

Este estado del arte se divide en cuatro capítulos que abordan diferentes aspectos relacionados con la evolución histórica de la propulsión y el uso del hidrógeno como combustible. En primer lugar, se analizará la propulsión y su evolución histórica, desde los primeros sistemas de propulsión hasta los sistemas de propulsión actuales. En segundo lugar, en el capítulo segundo, se discutirá el problema de los recursos combustibles finitos y las implicaciones ambientales y económicas que conlleva su uso. En tercer lugar, en el capítulo tercero, se explorarán las alternativas de combustibles acordes con el medio ambiente y se profundizará en el hidrógeno como una de las mejores opciones. Finalmente, en el capítulo cuarto, se abordará el uso del hidrógeno como combustible, incluyendo su producción, almacenamiento y transporte, así como las aplicaciones en la propulsión de motores térmicos y los depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno. En resumen, este estudio buscará proporcionar una visión completa y actualizada sobre el papel del hidrógeno en la propulsión y su relación con el medio ambiente.

2.2 La propulsión y su evolución histórica

A lo largo de la historia, el hombre ha desarrollado diferentes formas de propulsión, cada una adaptada a las necesidades y tecnologías disponibles en su momento. La evolución histórica de la propulsión en vehículos es un reflejo de la constante búsqueda del hombre por mejorar su capacidad de desplazarse y viajar en diferentes medios. Los primeros vehículos utilizaban sistemas de propulsión humana como el remo o la palanca, mientras que con el tiempo se desarrollaron sistemas mecánicos como el uso de animales, vapor y combustión interna. Actualmente, la tecnología está evolucionando hacia sistemas de propulsión eléctricos y híbridos, y se están investigando nuevas formas de propulsión basadas en energías limpias.

2.2.1 El remo y la palanca

Los primeros métodos de propulsión utilizados por el hombre eran muy básicos y requerían del esfuerzo humano. Los barcos y barcas eran impulsados por remos o palancas (Figura 2-1), que eran manejadas manualmente por los navegantes. Estos sistemas de propulsión eran efectivos para desplazarse en aguas tranquilas, pero eran muy limitados en términos de velocidad y alcance. Además, requerían de un gran esfuerzo físico por parte de los navegantes. Con el tiempo, el hombre comenzó a utilizar animales como caballos o mulas para mover vehículos terrestres, como los carros y carretas, y esto permitió un mayor alcance y velocidad. Sin embargo, estos sistemas de propulsión también eran limitados y requerían de una gran cantidad de alimento y cuidado para los animales [5].



Figura 2-1 Inicio de la propulsión [6].

2.2.2 La vela

La vela es uno de los primeros métodos de propulsión inventados por el hombre después del remo y la palanca. La vela permite aprovechar la energía del viento para mover una embarcación. Los primeros barcos con velas se cree que fueron utilizados por los egipcios y los chinos hace más de 5000 años (Figura 2-2). El uso de velas permitió una mayor velocidad y alcance en comparación con los sistemas de remo y palanca, ya que no dependía del esfuerzo humano directo. Sin embargo, el uso de velas también dependía de las condiciones climáticas y era limitado por las mismas, por ejemplo, en días con poco viento o con viento demasiado fuerte. Con el tiempo, se desarrollaron nuevos diseños de velas y mejoraron las técnicas de navegación, lo que permitió navegar en condiciones más difíciles y con mayor eficiencia.[5]

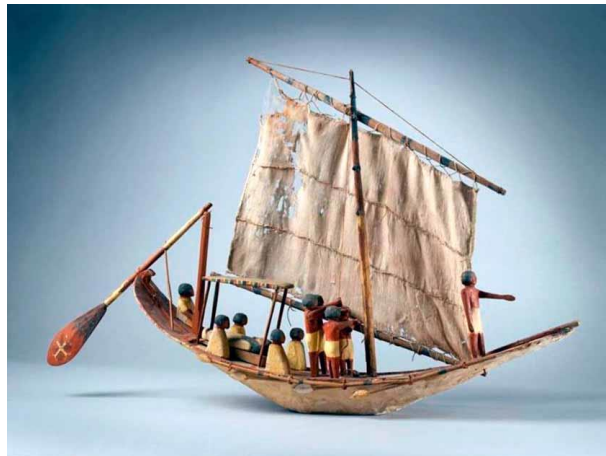


Figura 2-2 Maqueta primera embarcación egipcia a vela [7].

La invención del velero se atribuyó a la diosa Isis en el antiguo Egipto, quien buscaba apresurar su viaje en búsqueda de su hijo y elevando un palo con un lienzo de tal manera que consiguió recibir el viento en su embarcación. Los griegos también tenían varias teorías sobre su invento, ya sea atribuyendo su invención a Dédalo cuando huía del laberinto de Creta o a Eolo, que era el dios de los vientos [8].

Existen diferentes tipos de velas utilizadas en la navegación, cada una con características y diseños específicos que las hacen ideales para diferentes condiciones de viento y velocidad. La vela cuadrada es una de las más utilizadas en barcos de vela tradicionales, ya que su forma cuadrada permite una gran superficie para recibir el viento y proporciona una gran estabilidad. La vela latina, por otro lado, tiene una forma triangular con una base más estrecha que la vela cuadrada, lo que la hace más maniobrable y adecuada para barcos más pequeños y maniobras rápidas. Por último, la vela de cuchillo es una vela con un diseño alargado y estrecho, la cual es ideal para barcos de alta velocidad y condiciones de viento fuerte. Cada tipo de vela tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección de la vela adecuada dependerá de las condiciones meteorológicas y del uso que se le vaya a dar al barco.[9]

2.2.3 La máquina de vapor

La propulsión con máquinas de vapor se remonta a la primera máquina de vapor desarrollada en 1712 por el británico Thomas Newcomen, que se utilizaba principalmente para bombear agua de las minas (Figura 2-3). Sin embargo, fue James Watt quien, en 1765, perfeccionó la máquina de vapor con la inclusión de un condensador separado, lo que permitió una mayor eficiencia y potencia. [10].



Figura 2-3 Máquina a vapor [11]

El funcionamiento de una máquina de vapor se basa en calentar agua para producir vapor, el cual es enviado a un cilindro con un pistón. El vapor se expande al entrar en el cilindro, empujando el pistón hacia abajo, lo que genera movimiento en el eje conectado al pistón. Este movimiento se utiliza para mover ruedas de un vehículo o generar electricidad. La máquina de vapor fue una de las principales formas de propulsión utilizadas en vehículos y barcos durante el siglo XIX y parte del siglo XX, pero ha sido reemplazada en gran medida por motores de combustión interna y turbinas de gas debido a su mayor eficiencia y menor costo [12]. Sin embargo, todavía se utiliza en algunas aplicaciones específicas, como en trenes de vapor y barcos de vapor.

2.2.4 Motor de combustión interna

La historia de la propulsión con motores térmicos de combustión interna se remonta al siglo XVII, cuando el invento del motor de vapor impulsó el desarrollo de la maquinaria y la industria. Sin embargo, el primer motor de combustión interna fue inventado en 1859 por el francés Jean Joseph Etienne Lenoir [13]. Este motor fue de un solo cilindro y utilizaba gas como combustible (Figura 2-4). A medida que se desarrollaron mejores compresores y sistemas de encendido, los motores de combustión interna se volvieron más eficientes y fiables. En 1876, el alemán Nikolaus Otto inventó el motor de cuatro tiempos, que se convirtió en la base para el diseño de la mayoría de los motores de combustión interna actuales

[14]. Con el desarrollo del diésel y la gasolina como combustibles, los motores de combustión interna se convirtieron en la forma predominante de propulsión para vehículos y maquinaria. A medida que la tecnología avanzó, estos motores se hicieron más eficientes y potentes, y se utilizaron en una variedad de aplicaciones, desde automóviles y camiones hasta aviones y barcos.

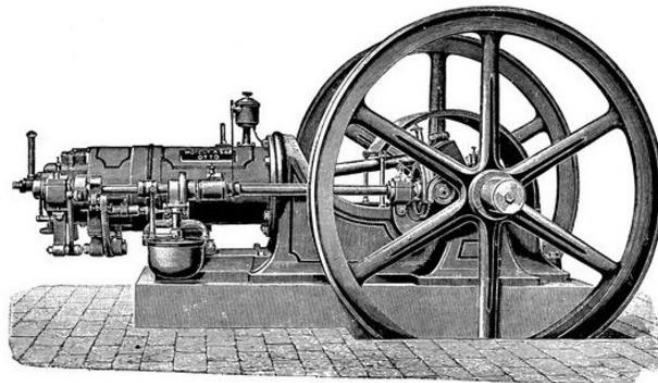


Figura 2-4 Motor de combustión interna [15].

2.2.5 Turbinas de gas

La historia de la propulsión con turbina de gas se remonta a la década de 1890, cuando los ingenieros comenzaron a experimentar con la idea de usar el gas para mover una turbina [16]. Sin embargo, fue en los años treinta cuando las turbinas de gas comenzaron a ser utilizadas en aplicaciones de aviación y generación de energía. Durante la Segunda Guerra Mundial, los motores de turbina de gas se desarrollaron significativamente y se utilizaron en aviones de combate (Figura 2-5).



Figura 2-5 Turbina de gas durante la Segunda Guerra Mundial [17].

La propulsión con turbina de gas se basa en el funcionamiento de un compresor que comprima el aire o el combustible, luego se quema en una cámara de combustión generando un gas caliente y expandido, este gas expandido se dirige a través de las palas de la turbina, haciendo que el rotor gire a alta velocidad y generando movimiento en un generador eléctrico o una hélice de un avión, estas turbinas son altamente eficientes y se utilizan en una variedad de aplicaciones [18].

2.2.6 Propulsión eléctrica

La propulsión eléctrica tiene sus raíces en el siglo XIX, cuando se empleó en submarinos, trenes y barcos comenzaron a utilizar motores eléctricos para moverse (Figura 2-6). Desde entonces, la propulsión eléctrica se ha desarrollado y mejorado, y hoy en día se utiliza en una amplia gama de

aplicaciones, desde automóviles hasta aviones [19]. En términos generales, la propulsión eléctrica funciona convirtiendo la energía eléctrica en movimiento mecánico mediante el uso de motores eléctricos. Los motores eléctricos funcionan mediante la interacción de los campos magnéticos y eléctricos, y su eficiencia y fiabilidad han mejorado significativamente a lo largo de los años, lo que ha permitido una mayor adopción de la propulsión eléctrica en una amplia gama de aplicaciones [19].



Figura 2-6 Isaac Peral, primer submarino de propulsión eléctrica (1888) [20].

2.2.7 Propulsión nuclear

La propulsión nuclear se originó en la década de 1950, cuando los científicos y tecnólogos comenzaron a explorar la posibilidad de utilizar la energía nuclear (Figura 2-7) para proporcionar la propulsión de barcos y submarinos [21]. La idea era utilizar reacciones nucleares para calentar agua y producir vapor que impulsara turbinas para generar energía eléctrica y mover el barco o submarino [22]. Con el tiempo, los diseños evolucionaron para incluir reactores nucleares más pequeños y eficientes, y hoy en día la propulsión nuclear se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo submarinos y buques de investigación.



Figura 2-7 USS Nautilus, primer submarino nuclear (1955) [23].

En términos generales, la propulsión nuclear funciona mediante la fisión de materiales nucleares en un reactor nuclear, lo que libera una enorme cantidad de energía que se utiliza para calentar agua y producir vapor. Este vapor se utiliza para mover turbinas, que generan electricidad y mueven el barco o submarino [24].

2.2.8 Pilas de combustible y motores térmicos de hidrógeno

La propulsión con hidrógeno es una tecnología que ha sido objeto de investigación y desarrollo desde la década de 1950, con el objetivo de evaluar su potencial como fuente de energía para la propulsión de vehículos [1]. La idea se basa en el uso de hidrógeno como combustible en motores de combustión interna o en pilas de combustible, y la tecnología ha experimentado un avance significativo en términos de eficiencia y seguridad. Actualmente, la propulsión con hidrógeno se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo vehículos de carretera (Figura 2-8), aeronaves y barcos [19].



Figura 2-8 Toyota Mirai, pila de combustible propulsada con hidrógeno [25].

El proceso de la propulsión con hidrógeno se lleva a cabo mediante la reacción química del hidrógeno y el oxígeno en una celda de combustible, lo que genera electricidad que se utiliza para impulsar un motor eléctrico. Este proceso se conoce como la pila de combustible, y su funcionamiento se basa en la transferencia de electrones a través de un material conductor de electrones, como un electrodo, generando un flujo de corriente eléctrica. Durante este proceso, el hidrógeno se combina con el oxígeno para formar agua, lo que la convierte en una opción atractiva para aplicaciones en las que se busca reducir la huella de carbono y mejorar la sostenibilidad [19].

2.3 El problema de los combustibles fósiles

Los combustibles fósiles se emplean abundantemente en numerosos sistemas de propulsión. Pudiendo generalizarse en tres combustibles principalmente, algunos asentados en la industria de la propulsión como el caso del petróleo, otros cuyo empleo en propulsión está en continua desaparición y, por último, combustibles fósiles como el caso del gas natural, que van adquiriendo peso en el ámbito de la propulsión en los últimos años.

2.3.1 Carbón

Desde su uso en la revolución industrial en el siglo XVIII, el carbón se ha convertido en una de las principales fuentes de energía en todo el mundo. Durante la Revolución Industrial, el carbón se utilizó como una fuente de energía para mover máquinas y generar electricidad, lo que permitió una mayor producción y una mejor calidad de vida para los trabajadores [26].

El carbón ha aportado una serie de ventajas en el ámbito de la propulsión. Es una fuente de energía muy accesible y disponible, lo que la hace ideal para su uso en una amplia variedad de aplicaciones, incluidas la generación de electricidad y la industria siderúrgica [27]. Además, el carbón es una fuente de energía muy económica, lo que lo hace accesible a una amplia gama de personas y empresas.

Sin embargo, el carbón también tiene una serie de desventajas. Es una fuente de energía altamente contaminante, que emite grandes cantidades de gases de efecto invernadero y contaminantes del aire y del agua (Figura 2-9). Además, la producción y el uso de carbón son perjudiciales para la salud de las personas y el medio ambiente, y pueden tener un impacto negativo en la calidad de vida de las comunidades cercanas a las minas y centrales térmicas [28].

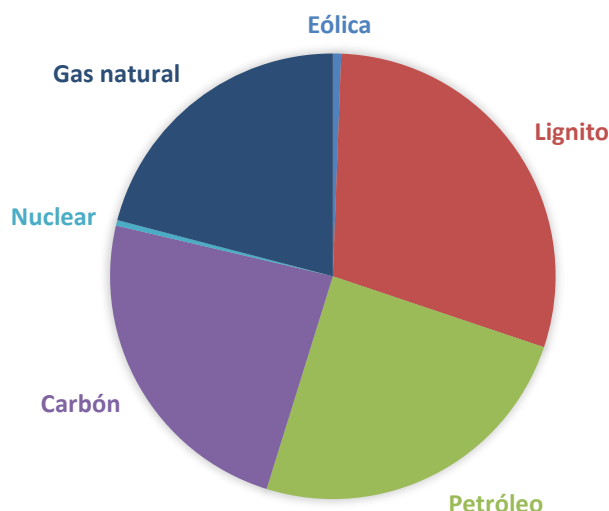


Figura 2-9 Diagrama de contribución al calentamiento global [28].

La energía solar fotovoltaica también participa en el calentamiento global, aunque en sí la energía solar no resulte contaminante, la fabricación de los paneles que conforman el sistema de obtención de energía solar genera una serie de residuos una vez que su vida útil llegue a su fin.

En resumen, el carbón ha sido una fuente clave de energía en la historia de la propulsión, pero es importante que las personas y las empresas busquen alternativas más sostenibles a largo plazo para asegurar un futuro más saludable y sostenible para todos. Aunque el carbón sigue siendo una fuente importante de energía en muchos países, la tendencia global es a reducir su uso y apoyar la transición a fuentes de energía más limpias y renovables.

2.3.2 Petróleo

El petróleo ha tenido un papel fundamental en la historia de la propulsión y su uso se remonta a más de 3000 años atrás en la región de Mesopotamia, donde se utilizaba para iluminación y lubricación [29]. Sin embargo, fue a partir del siglo XIX cuando su uso se popularizó como combustible para las máquinas a vapor y, posteriormente, como combustible para los motores de explosión interna de los automóviles [30].

Con la aparición del automóvil, el petróleo se convirtió en una fuente clave de energía para la propulsión y permitió una revolución en la industria. Fue en 1908 cuando Henry Ford produjo el primer automóvil de masa, el Modelo T, que utilizaba petróleo como combustible. A partir de entonces, el petróleo se convirtió en un factor clave en la economía global y ha aportado muchas ventajas, como una fuente de energía concentrada, portátil y de fácil acceso [28].

Desde los años 70, se ha intensificado la preocupación por los impactos negativos del petróleo en el medio ambiente y se ha puesto en marcha un esfuerzo internacional para encontrar alternativas más sostenibles y seguras para la propulsión. En 1973, la crisis del petróleo marcó un momento crítico en la historia de la propulsión y destacó la necesidad de buscar alternativas más sostenibles y seguras [28]. Desde entonces, se han desarrollado tecnologías y prácticas más sostenibles, como los vehículos eléctricos, híbridos y la energía renovable, para garantizar un futuro más seguro y sostenible.

El petróleo ha aportado una serie de ventajas en el ámbito de la propulsión. Es una fuente de energía muy versátil y fácilmente transportable, lo que la hace ideal para su uso en una amplia variedad de aplicaciones, incluidas la aviación, la marina y la industria automotriz [28]. Además, el petróleo es una fuente de energía muy económica. Sin embargo, el petróleo también tiene una serie de desventajas. Es un recurso finito que se agotará en algún momento, lo que significa que las personas y las empresas necesitan buscar alternativas sostenibles a largo plazo. Además, la producción y el uso de petróleo tienen

un impacto negativo en el medio ambiente, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire y del agua [28].

2.3.3 Gas natural

El gas natural ha sido una importante fuente de energía en la historia de la propulsión. Se ha utilizado como una alternativa más limpia y eficiente al petróleo y al carbón desde la década de 1960, y su uso ha aumentado continuamente desde entonces [28]. El gas natural es una de las principales fuentes de energía en muchos países, especialmente en los Estados Unidos, donde es el principal combustible utilizado para generar electricidad.

Este combustible fósil ha aportado una serie de ventajas en el ámbito de la propulsión. Es una fuente de energía más limpia que el petróleo y el carbón, lo que significa que emite menos gases de efecto invernadero y otros contaminantes del aire y del agua. Además, el gas natural es más eficiente que otros combustibles fósiles, lo que significa que se quema de manera más eficiente y produce más energía por unidad de combustible [31]. Sin embargo, el gas natural también tiene sus desventajas. Una de las principales desventajas es la emisión de metano, un potente gas de efecto invernadero, durante la producción, el transporte y el uso del gas natural [31]. Además, la explotación de gas natural puede tener un impacto negativo en el medio ambiente y en la calidad de vida de las comunidades cercanas.

Combustible	Recursos	Reservas	Reservas/Consumos
Petróleo	360000	143000	41 años
Gas natural	n.d.	154573	61 años

Tabla 2-1 Recursos y reservas energéticas para combustibles fósiles en millones de toneladas equivalentes al petróleo [28]

En resumen, el gas natural ha sido una importante fuente de energía en la historia de la propulsión, y sigue siendo una alternativa más limpia y eficiente al petróleo y al carbón. Sin embargo, es importante tener en cuenta las desventajas y trabajar en la investigación y el desarrollo de alternativas más sostenibles.

2.4 Hidrógeno

La manera más habitual para almacenar hidrógeno es en depósitos a alta presión, aunque también se puede almacenar en estado líquido a -253°C , pero es costoso y requiere depósitos aislados para mantener la temperatura [32]. Otro método es el almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos, pero el problema es que los metales son muy pesados [33].

2.4.1 Métodos de producción de hidrógeno

El desafío en cuanto a la obtención de hidrógeno es que su producción requiere una cantidad mayor de energía en comparación con la energía que se obtiene una vez que ha sido producido, lo que significa que no es una fuente de energía primaria. A continuación, se presenta una lista de los rendimientos de producción en función del método utilizado y la fuente de energía empleada.

Fuente de energía	Tipo de proceso	Temperatura requerida (°C)	Rendimiento (%)
Gas natural	Reformador con vapor (SMR)	$750 < T < 900$	80
	Oxidación parcial (POX)	$1300 < T < 1400$	70
	Reformado autotérmico (ATR)	$1100 < T < 1400$	76
Carbón	Gasificación	$400 < T < 1600$	60
Nuclear	Electrolisis de agua en fase vapor	$1000 < T < 2500$	40
	Ciclos termoquímicos	$450 < T < 900$	60
Hidro eléctrica Eólica Geotérmica Mareomotriz	Electrolisis convencional de agua		70
Solar	Electrolisis fotovoltaica		16
	Ciclos termoquímicos	$450 < T < 900$	60

Tabla 2-2 Técnicas de producción del Hidrogeno y rendimientos [34].

Esta tabla muestra los diferentes tipos de procesos y fuentes de energía utilizados para producir hidrógeno, así como la temperatura requerida y el rendimiento en términos porcentuales. Hay que destacar que las fuentes de energía renovable, como la hidroeléctrica, eólica, geotérmica, mareomotriz y solar, tienen un alto potencial para un futuro sostenible en la producción de hidrógeno. En particular, la electrólisis convencional de agua utilizando energía hidroeléctrica, eólica, geotérmica y mareomotriz tiene un rendimiento del 70 %, lo que es prometedor para un futuro sostenible. Además, los ciclos termoquímicos que utilizan energía solar también tienen un rendimiento del 60 %, lo que indica un futuro potencial positivo en la producción de hidrógeno utilizando energías renovables.

2.4.2 Métodos de almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno es un elemento versátil y prometedor como fuente de energía renovable y limpia, y su almacenamiento es un componente crítico para su uso práctico y comercial. Actualmente existen tres métodos principales para el almacenamiento de hidrógeno:

2.4.2.1 Almacenamiento de hidrógeno a alta presión

Este es el método más comúnmente utilizado para almacenar hidrógeno. El hidrógeno se almacena en tanques de alta presión, con presiones típicas de almacenamiento de 200 bares, 350 bares (estándar hace años para los depósitos que se montaban en vehículos) y 700 bares que actualmente es el estándar utilizado en la industria automotriz [32]. Estos tanques pueden ser fabricados con materiales compuestos como polímeros plásticos a base de nylon con baja permeabilidad al hidrógeno, resina epoxi con fibra

de carbono para dar rigidez estructural y una coraza externa fabricada con un material compuesto a base de fibra de vidrio para proteger al depósito de posibles abrasiones [32]. Estos tanques son más ligeros y manejables que los tanques de acero y son ideales para vehículos y otros sistemas de transporte.

2.4.2.2 Almacenamiento de hidrógeno en estado líquido

Para lograr esto, el hidrógeno debe ser enfriado hasta -253°C , lo que se conoce como estado criogénico. Esto requiere una gran cantidad de energía para bajar la temperatura hasta 20,3 K sobre el cero absoluto, y también necesita depósitos fuertemente aislados para conservar tan baja temperatura [32].

El almacenamiento de hidrógeno líquido tiene la ventaja de permitir almacenar cantidades relativamente grandes de hidrógeno en comparación con el almacenamiento comprimido o en forma de hidruros metálicos. Sin embargo, este método tiene varias desventajas. En primer lugar, el costo de mantener el hidrógeno en estado líquido es muy alto debido a la gran cantidad de energía necesaria para enfriarlo. Además, las pérdidas de hidrógeno pueden ser significativas debido a las fugas en los depósitos o a la evaporación del hidrógeno líquido. Por lo tanto, no es un método adecuado para almacenar hidrógeno a largo plazo [35]. A pesar de esto, algunas compañías como BMW han desarrollado y utilizado la tecnología del hidrógeno líquido en prototipos, utilizando pequeños tanques para almacenar el hidrógeno líquido (Figura 2-10). Sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo y no ha sido ampliamente adoptada en la industria aún [36].



Figura 2-10 BMW Hydrogen 7 [37].

En resumen, el almacenamiento de hidrógeno en estado líquido es una opción para almacenar grandes cantidades de hidrógeno, pero tiene desventajas significativas en cuanto a costo y pérdidas, y no es una opción adecuada para almacenar hidrógeno a largo plazo. Aunque algunas compañías han desarrollado tecnologías para almacenar hidrógeno líquido, aún no ha sido ampliamente adoptada en la industria.

2.4.2.3 El almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos

Es una de las opciones menos utilizadas actualmente, pero que está siendo estudiada con mucho interés. Los hidruros metálicos se forman cuando hidrógeno se encuentra en presencia de metales o aleaciones como magnesio, titanio, hierro, manganeso, níquel o cromo. Los átomos de hidrógeno se empaquetan dentro de la estructura metálica, lo que permite alcanzar mayores densidades de almacenamiento que con el hidrógeno comprimido. Sin embargo, los metales son muy pesados por sí mismos, lo que puede dificultar su uso en aplicaciones donde el peso es un factor crítico. Para liberar el hidrógeno de los hidruros metálicos para su uso, se requiere calor. El calor residual generado por la propia pila de combustible es suficiente para liberar el hidrógeno de la red de los hidruros metálicos de baja temperatura, pero esto no ocurre de forma instantánea [38].

En resumen, el almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos ofrece una mayor densidad de almacenamiento que el almacenamiento comprimido, pero su uso se ve limitado por el peso de los metales y la necesidad de calor para liberar el hidrógeno. A pesar de ello, este método de almacenamiento está siendo estudiado con gran interés debido a las posibles ventajas que podría ofrecer en el futuro.

En conclusión, de las tres opciones de almacenamiento de hidrógeno en vehículos, el almacenamiento a alta presión es el más utilizado debido a su eficacia, manejabilidad y costo razonable. El almacenamiento de hidrógeno en estado líquido permite almacenar grandes cantidades de hidrógeno, pero tiene desventajas en cuanto a costo y pérdidas, y no es adecuado para almacenar hidrógeno a largo plazo. El almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos es una opción menos utilizada actualmente, pero que tiene el potencial de alcanzar mayores densidades de almacenamiento que con el hidrógeno comprimido, pero también tiene el desafío de ser demasiado pesado para ser utilizado en vehículos. Por lo tanto, el almacenamiento a alta presión es la opción más adecuada actualmente para el almacenamiento de hidrógeno en vehículos.

2.4.3 Almacenamiento hidrógeno a alta presión

El método de almacenamiento de hidrógeno a alta presión se ha convertido en una alternativa cada vez más popular en la búsqueda de soluciones de almacenamiento de energía sostenibles. La densidad energética del hidrógeno, que se mide en mega julios por kilogramo (MJ/kg), es alta en comparación con otros medios de almacenamiento (120 MJ/kg), lo que significa que se puede almacenar una cantidad importante de energía en un kilogramo de hidrógeno. Además, la relación entre la densidad de hidrógeno y la presión a la que se almacena es directamente proporcional, lo que significa que a medida que aumenta la presión, aumenta la densidad (Figura 2-11).

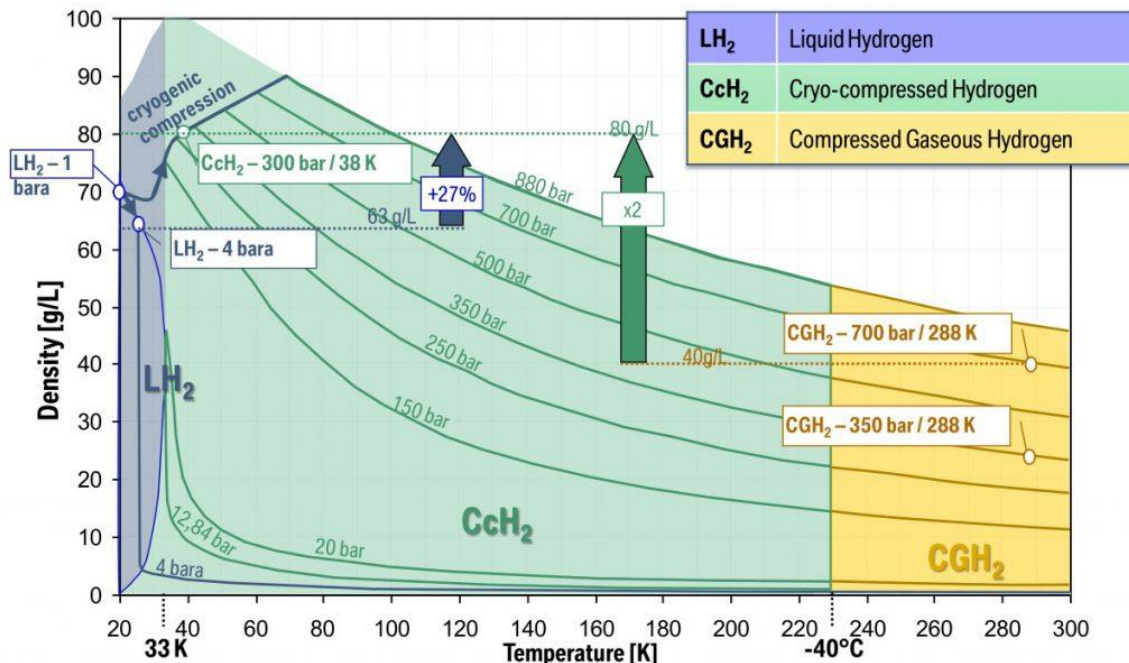


Figura 2-11 Diagrama de densidad-temperatura del hidrógeno según la presión [39].

El diagrama de densidad-temperatura del hidrógeno muestra cómo la densidad del hidrógeno varía con la presión. En este diagrama se ha seleccionado un rango de temperatura de 288K y un rango de presión de 700 bar. Se puede ver que a medida que la presión aumenta, la densidad del hidrógeno también aumenta, alcanzando un valor de 40 g/l en el punto específico de 700 bar de presión. Este diagrama es útil para entender cómo la presión influye en la densidad del hidrógeno y cómo esto a su vez puede afectar a su comportamiento en diferentes aplicaciones.

A la hora del diseño del tanque se debe tener en cuenta que el hidrógeno no se comporta como un gas ideal, a continuación, se muestra en la Figura 2-12 la diferencia de densidad del hidrógeno a medida que aumenta la presión teniendo en cuenta su factor de compresibilidad, en comparación con la densidad del hidrógeno comportándose como gas ideal.

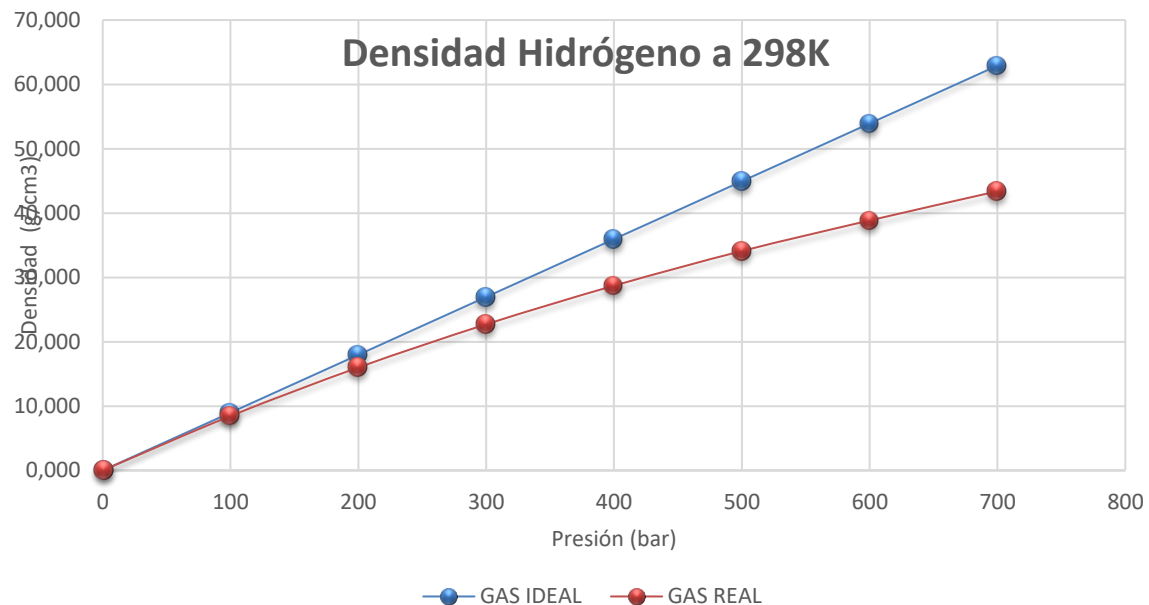


Figura 2-12 Densidad real del hidrógeno en comparación con densidad ideal.

Esta gráfica permite observar el valor de la densidad del hidrógeno a la presión que será sometido (700 bar), teniendo en cuenta que los cálculos serán realizados a temperatura ambiente (298 K), permitiendo obtener el valor real de la densidad del hidrógeno teniendo en cuenta el factor de compresibilidad, siendo finalmente su densidad de 43,39 g/cm³. Este valor será el utilizado para el posterior cálculo de volumen y masa totales de hidrógeno necesario para cumplir las especificaciones de los motores Caterpillar C18, equipados en las lanchas de instrucción RODMAN 66 como se puede ver en la Sección 3.3.3.

El almacenamiento de hidrógeno a alta presión se puede lograr mediante el uso de cilindros de alta resistencia y materiales compuestos, que permiten comprimir y almacenar hidrógeno a presiones extremadamente altas. Estos cilindros están diseñados para resistir las tensiones y los esfuerzos a los que están expuestos, y su diseño y fabricación cumplen con estrictos estándares de seguridad. Estas series de normas y estándares internacionales que se aplican al diseño, construcción y operación de las estaciones de repostaje de hidrógeno, son la norma ISO 14687 y la norma SAE J2601. Además de códigos como ASME VIII Div1.

2.4.4 Densidad energética del hidrógeno

El hidrógeno es un elemento que no tiene rival en términos de contenido de energía en MJ/kg, ya sea comprimido a 350 o 700 bar, o bien como líquido. La densidad energética del hidrógeno es de 120 MJ/kg, muy superior a la de los combustibles fósiles utilizados en los automóviles, como el diésel o la gasolina, cuyos valores de densidad de energía se sitúan en torno a los 50 MJ/kg. El problema, sin embargo, es la densidad de energía medida en relación con el volumen. En este parámetro, la gasolina ofrece 33 MJ/l, el diésel 37 MJ/l, mientras que las distintas formas de hidrógeno se sitúan por debajo de 10 MJ/l. En definitiva, es imprescindible que los tanques de hidrógeno tengan mucho espacio de almacenamiento. Pero además deben ser seguros y eficientes, y para ello es necesario desarrollar soluciones efectivas para todos sus componentes.

2.5 El presente y futuro del hidrógeno en propulsión

A medida que la demanda de combustibles fósiles ha aumentado y la preocupación por el cambio climático ha crecido, muchos países han comenzado a invertir en tecnologías de hidrógeno. En Europa, por ejemplo, la Unión Europea ha establecido una estrategia para el hidrógeno verde y ha destinado fondos para su investigación y desarrollo. En Asia, Japón y Corea del Sur están liderando la denominada “carrera de hidrógeno” en la propulsión de vehículos, mientras en América, Estados Unidos ha invertido en la investigación de hidrógeno para la propulsión de aviones. A medida que la tecnología del hidrógeno avanza, es muy probable que se vea una mayor adopción de vehículos propulsados por hidrógeno en un futuro cercano.

2.5.1 Apuesta de Europa por el hidrógeno

En los últimos años, la apuesta por el hidrógeno verde se ha convertido en una de las principales estrategias energéticas a nivel mundial. Europa, en particular, ha establecido objetivos ambiciosos para el desarrollo de esta tecnología en los próximos años.

Uno de los principales impulsores de esta apuesta es la Unión Europea, que estableció la estrategia de hidrógeno de la UE en julio de 2020, con el objetivo de impulsar el uso del hidrógeno renovable para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Para lograr este objetivo, se prevé una inversión de 470000 millones de euros en el sector del hidrógeno en la UE para 2050 [40].

A continuación, se puede observar en la Figura 2-13 la columna vertebral de conductos de hidrógeno que está previsto tener en funcionamiento para el año 2040. Se puede observar la clara apuesta de Europa por el hidrógeno debido a la gran inversión que este proyecto supone. Entre los países de la Unión Europea más involucrados en el empleo de estas energías limpias destaca, entre otros, España.

En cuanto a los planes futuros para los próximos 20 años, se prevé que el hidrógeno verde tenga un papel clave en la transición hacia una economía más limpia y sostenible. Se espera que su uso se extienda a sectores como el transporte, la industria y la generación de energía. Además, también se espera que el hidrógeno verde se convierta en una fuente de energía renovable competitiva en términos de costes, lo que podría impulsar su adopción en todo el mundo. Para lograr este objetivo, será necesario seguir invirtiendo en investigación y desarrollo, así como en infraestructuras de producción y distribución de hidrógeno verde a gran escala. [40].

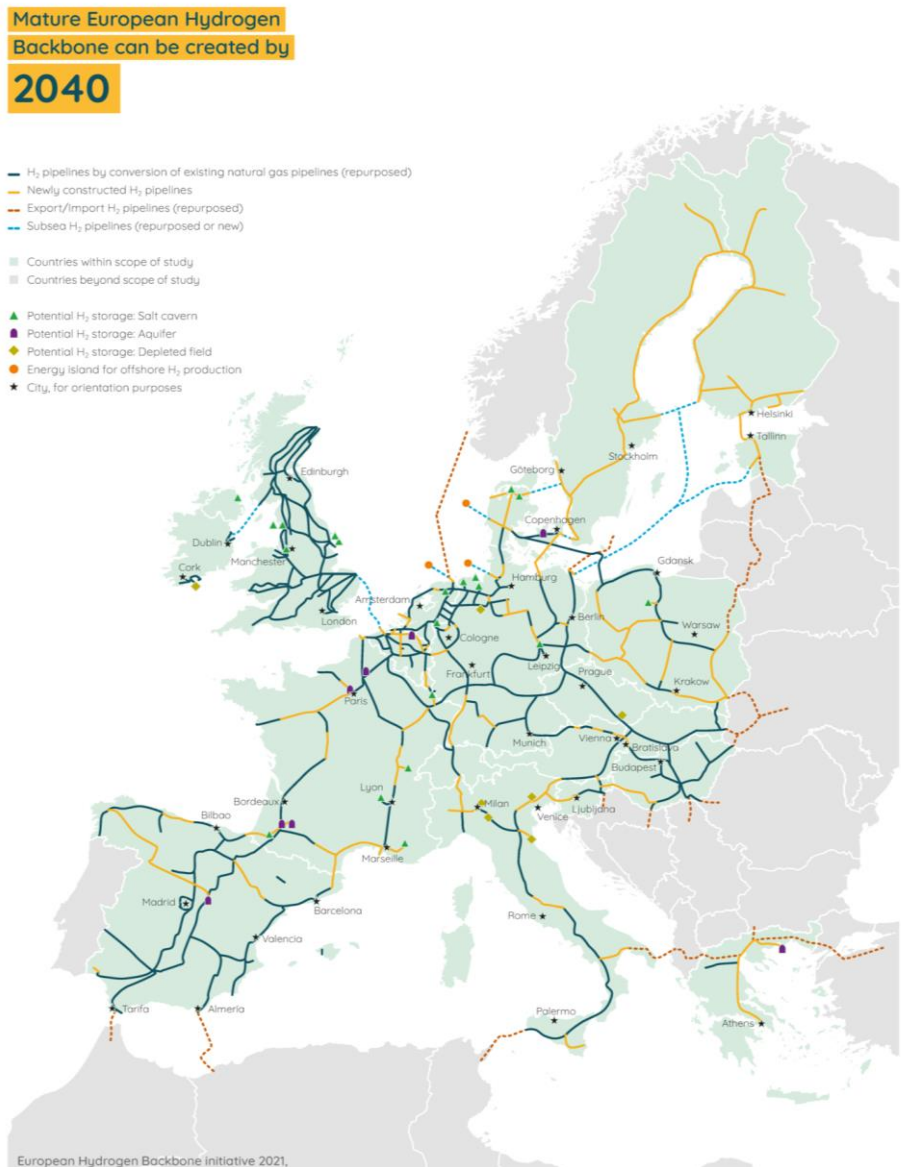


Figura 2-13 Columna vertebral de hidrógeno en Europa para 2040 [41].

2.5.2 El papel de España frente al hidrógeno

España está desarrollando una serie de proyectos para fomentar el uso del hidrógeno como fuente de energía renovable. Estos proyectos están en línea con la estrategia nacional de hidrógeno, que establece el objetivo de alcanzar los 4 GW de capacidad instalada de electrolizadores de hidrógeno renovable para 2030 [42]. En cuanto a la inversión en el sector del hidrógeno en España, se prevé una inversión de más de 8900 millones de euros para el desarrollo de esta tecnología hasta 2030 [40]. Esta inversión se centrará en la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, así como en la mejora de la eficiencia y la competitividad de esta tecnología.

Uno de los proyectos más destacados es Green Hysland (Figura 2-14), que se está llevando a cabo en la isla de Mallorca. Este proyecto prevé la producción y distribución de hidrógeno verde a partir de energía solar y eólica. La planta de producción de hidrógeno tendrá una capacidad de 10 MW y se utilizará para abastecer a una flota de autobuses públicos y a una red de hidrogenadores.



Figura 2-14 Proyecto Green Hysland en Mallorca [43].

Otro proyecto importante es el llamado proyecto H24All (Figura 2-15), liderado por el grupo Enagás en colaboración con la refinería de Repsol en Cartagena. Este proyecto prevé la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar y eólica, y su utilización en la refinería de Repsol como fuente de energía para la producción de hidrógeno de alta pureza.



Figura 2-15 Repsol en el proyecto H24All de hidrógeno [44].

3 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO MODULAR.

3.1 Software empleado

Los programas utilizados para el diseño y la gestión de los depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno para la propulsión de motores térmicos son esenciales para garantizar la seguridad y la eficiencia del sistema. Estos programas pueden ayudar a simular y analizar las condiciones de operación del depósito, incluyendo las variaciones de presión y temperatura, así como también pueden ayudar a optimizar la geometría del tanque para maximizar su capacidad de almacenamiento. Además, los programas empleados son una herramienta fundamental en el diseño y la operación de los depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno y son esenciales para garantizar la seguridad y la eficiencia de la propulsión del vehículo.

Se pretenden utilizar tres sistemas de software para conseguir los objetivos descritos en la Sección 1.2.

3.1.1 Autocad-Autodesk Inventor

Con este software se realizará el diseño conforme a las dimensiones y características desarrolladas para los diferentes prototipos diseñados en función de sus propiedades mecánicas, materiales y dimensiones (Figura 3-1). Se calculan los pesos de estos prototipos para valorar la opción más eficiente. Realizamos simulación mediante elementos finitos del prototipo en las condiciones de presión más desfavorable para validar el mismo, teniendo en cuenta los coeficientes de seguridad correspondientes.



Figura 3-1 Logo software Autodesk Inventor [45].

3.1.2 eLamX²®

eLamX² es un software de simulación desarrollado por la Universidad Técnica de Dresde en Alemania. Específicamente, es un programa de simulación de procesos y fenómenos en sistemas de almacenamiento de energía.

El propósito principal de eLamX² es permitir a los usuarios simular el comportamiento de sistemas de almacenamiento de energía y predecir su rendimiento y eficiencia (Figura 3-2). Esto es especialmente útil en el diseño y desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de energía, ya que permite a los

ingenieros y científicos probar diferentes diseños y parámetros antes de llevarlos a la práctica. Además, permite el empleo de materiales compuestos y su estudio, así como la optimización automática del diseño para conseguir las mejores prestaciones posibles.



Figura 3-2 Logo software eLamX2 [46]

eLamX² se basa en la simulación de elementos finitos y utiliza modelos matemáticos para simular el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía en diferentes condiciones de operación. Esto permite explorar los diferentes parámetros, como la temperatura, la presión y la densidad de energía, afectan el rendimiento del sistema.

3.1.3 Solidworks

SolidWorks es un software CAD que permite a los usuarios crear modelos en 3D de piezas y ensamblajes mecánicos (Figura 3-3). El programa es ampliamente utilizado para diseñar productos como componentes de automóviles, maquinaria industrial y muchos otros productos mecánicos. SolidWorks es muy útil para crear prototipos virtuales de productos para su evaluación y prueba. Permite a los usuarios probar diferentes configuraciones y materiales antes de comprometerse a la fabricación, lo que puede ahorrar tiempo y dinero en el proceso de diseño.



Figura 3-3 Logo Software SOLIDWORKS [47].

Para la utilización de este software al no contar la Universidad de Vigo con licencia para estudiantes de dicho software, se empleará la versión de prueba gratuita la cual permite a los usuarios probar el software durante un tiempo limitado antes de decidir si se quiere comprar la versión completa. La versión de prueba tiene todas las funciones y herramientas de diseño de la versión completa, pero está limitada en cuanto al tiempo de uso.

3.2 Estudio de la viabilidad de utilizar hidrógeno como combustible para propulsión

La viabilidad de utilizar hidrógeno como combustible para propulsión es alta debido a sus ventajas ambientales y energéticas. El hidrógeno es un combustible limpio, ya que su único producto de combustión es agua. Además, el hidrógeno es una fuente de energía renovable y puede ser producido a través de procesos sostenibles, como la electrolisis del agua utilizando energía solar o eólica. Esto lo convierte en una alternativa atractiva a los combustibles fósiles. Además, los vehículos propulsados por hidrógeno tienen un rango de conducción similar a los vehículos tradicionales y pueden ser recargados rápidamente. Sin embargo, todavía hay desafíos a superar en cuanto a la infraestructura de suministro y almacenamiento de hidrógeno, así como en el costo de producción a gran escala. A pesar de estos desafíos, la investigación y el desarrollo en esta área están avanzando rápidamente y se espera que en el

futuro el hidrógeno juegue un papel cada vez más importante en la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono.

Existen varias formas de obtener hidrógeno, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Una de las formas más comunes es el reformado de metano, en el cual se utiliza un proceso químico para romper el metano en hidrógeno y dióxido de carbono. Otra forma de obtener hidrógeno es mediante electroquímica, en la cual se utiliza electricidad para romper el agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno. Además, el hidrógeno se puede obtener a partir de la destilación del petróleo, la biomasa, la electrolisis del agua y la extracción de hidrógeno de compuestos químicos. Cada uno de estos métodos tiene sus propias implicaciones ambientales y de costo, y es importante evaluar cuidadosamente cada opción antes de elegir una para producir hidrógeno.

En cuanto a la obtención de hidrógeno por electrólisis, el cual consiste en la separación del hidrógeno del oxígeno mediante electricidad. Para conseguir la separación de estas moléculas, al ser la molécula de agua muy estable, la energía que se requiere también es grande (286,45 KJ/mol a 25°C)[48]. Además, la eficiencia de la electrólisis de agua aumenta con la presión y la temperatura. A altas presiones, las moléculas de agua están más cerca entre sí, lo que facilita la separación de los iones hidrógeno y oxígeno. A altas temperaturas, las reacciones químicas se llevan a cabo con mayor rapidez, lo que también aumenta la eficiencia (Tabla 3-1). Sin embargo, la energía necesaria para aumentar la presión y la temperatura también aumenta, por lo que se debe encontrar un equilibrio adecuado entre eficiencia y costo.

Presión (bar)	Temperatura (°C)	Electricidad necesaria (GJ/GJ H₂)	Calor necesario (GJ/GJ H₂)	Energía total necesaria (GJ/GJ H₂)	Eficiencia global (%)
1	25	0,98	0,20	1,18	84,60
1	1000	0,74	0,63	1,37	73,10
400	25	1,07	0,20	1,27	78,60

Tabla 3-1 Valores teóricos de energía necesaria y eficiencia de la electrólisis de agua en función de la presión y la temperatura de operación [48].

3.3 Diseño e implementación de un sistema de almacenamiento de hidrógeno modulable

Se pretende desarrollar el diseño de un equipo a presión que cumpla con una serie de especificaciones previas, que serán necesarias tener en cuenta previamente antes de del diseño y modelado del depósito, deberán tenerse en cuenta las siguientes características y especificaciones:

1. Sustituir el sistema de almacenamiento de combustible actual de la embarcación RODMAN 66, con prestaciones cercanas a las actuales. La RODMAN 66 de la ENM, están equipadas con dos motores diésel CATERPILLAR C18 de 715 CV de potencia cada uno, que le permiten alcanzar velocidades máximas superiores a los 28 nudos. Con capacidad de combustible de 6000 l y una velocidad económica de 15 nudos, se estima una autonomía de la embarcación de 300 millas náuticas.
2. Contención de hidrógeno en fase gaseosa con un índice de compresión y volumen tal que la capacidad energética sea asimilable a un depósito de 6000 l.
3. Recipiente cilíndrico, son los más utilizados, y en ellos la envolvente está formada, básicamente, por dos elementos: la parte cilíndrica o cubierta (carcasa) y los fondos o cabezales.
4. Alta capacidad de resistencia mecánica. Debe contener un gas inflamable con un grado de compresión muy elevado (300 a 700 bar).

5. Cuando el diámetro de cubierta es menor de 24 pulgadas (60,9 cm) se utiliza, normalmente, tubería, y en diámetros superiores se realiza a partir de chapa.
6. Geometría adaptable al espacio de confinamiento y modulable: La geometría que optimiza el volumen de almacenamiento y minimiza el espesor necesario, es la esférica. Se descarta por la dificultad de adaptar esta geometría a la ubicación en el espacio confinado de una embarcación y la complejidad de la estandarización del proceso de fabricación. Se opta por un prototipo con forma geométrica cilíndrica, más habitual en este tipo de equipos a presión, que en nuestro caso presenta las ventajas siguientes:
 - a. Modulable: Una vez definido diámetro y espesor óptimo del prototipo, la longitud de cada modelo se adaptará al espacio disponible en la embarcación.
 - b. Disposición matricial: Una vez definido el prototipo, su geometría cilíndrica es óptima para disponer de tantos equipos como sean necesarios (matricialmente, combinando filas y columnas o en forma de malla de abeja) El fluido en estado de gas facilita una disposición en horizontal y una interconexión entre todas las unidades con un equilibrio de presión.
 - c. Fabricación estandarizada: Configuración mediante virola con o sin soldadura.

Una vez definido lo anterior, se realizará el cálculo del prototipo conforme a un Código de diseño tipo ASME VIII o Norma Armonizada UNE-EN 13445-1:2021. Además de tener en cuenta el Código de diseño tipo ASME II para selección del material a emplear.

3.3.1 Selección de la forma del depósito

Existen dos formas principales de los depósitos empleados para almacenar hidrógeno a alta presión: cilíndrica y esférica. Ambas tienen sus ventajas y desventajas que deben ser consideradas para elegir la opción adecuada para su adaptación a espacios confinados como en la sala de máquinas de las lanchas de instrucción.

El depósito cilíndrico tiene la ventaja de ser mejor adaptado a espacios confinados, como en las lanchas de instrucción. Además, su forma cilíndrica permite una mayor capacidad de almacenamiento por unidad de volumen en comparación con el depósito esférico ya que, debido a su forma, permite un mejor aprovechamiento del espacio en lugares confinados, consiguiendo un mayor almacenamiento (Figura 3-4). Sin embargo, el depósito cilíndrico también presenta una desventaja: la mayor presión en los extremos del depósito aumentando el riesgo de fallo en el mismo.



Figura 3-4 Depósitos cilíndricos de hidrógeno comprimido [49].

Por otro lado, una ventaja de los depósitos de almacenamiento a presión esféricos es que tienen una mejor distribución de tensiones en su estructura, lo que les permite soportar mayores cargas de presión y tienen una mayor capacidad de almacenamiento con una huella de tamaño relativamente reducida (Figura 3-5). Sin embargo, estos depósitos son más costosos de fabricar que los depósitos cilíndricos debido a la mayor complejidad en su diseño y construcción. Además, los depósitos esféricos son menos

prácticos en aplicaciones que requieren una geometría específica para la integración en sistemas complejos.



Figura 3-5 Depósitos esféricos de GNC a 300 bar [50].

Por lo tanto, si se requiere una mejor adaptabilidad a espacios confinados, se recomienda elegir el depósito cilíndrico. Sin embargo, si la prioridad es la seguridad y la resistencia a la presión, es mejor elegir el depósito esférico. En el caso estudiado se considera como la opción más práctica el empleo de depósitos cilíndricos, ya que la prioridad en el diseño del depósito y su modularidad es que sea posible adaptarlo a espacios confinados prescindiendo de otras ventajas, como las mencionadas anteriormente.

3.3.2 Selección del tipo de depósito

Los tanques cilíndricos de almacenamiento de hidrógeno son una solución importante para el almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno comprimido. Estos tanques están disponibles en diferentes tipos, como tanques de acero, tanques compuestos y tanques de metal reforzado con materiales ligeros. Cada tipo de tanque ofrece sus propias ventajas y desventajas en términos de capacidad, seguridad, durabilidad y coste, lo que los hace adecuados para diferentes aplicaciones y requisitos.

3.3.2.1 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido baja presión

Se emplean para almacenar hidrógeno a niveles moderados de presión. Estos depósitos están diseñados para soportar presiones de hasta 350 bar y se fabrican principalmente con materiales ligeros como el aluminio o el acero de baja aleación. Estos materiales son resistentes y duraderos, lo que permite un almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno. Además, los depósitos de baja presión son más económicos que los depósitos de alta presión y son ideales para aplicaciones en las que se requiere un almacenamiento de bajo volumen de hidrógeno (Figura 3-6). Sin embargo, es importante tener en cuenta que los depósitos de baja presión tienen una capacidad limitada y pueden requerir rellenado más frecuentemente que los depósitos de alta presión.

3.3.2.2 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido media presión

Son una opción intermedia entre los depósitos de baja presión y los de alta presión. Están diseñados para soportar presiones de entre 350 bar y 700 bar y se fabrican principalmente con acero de alta resistencia. Los depósitos de media presión son ideales para aplicaciones en las que se requiere un almacenamiento de mayor volumen de hidrógeno que los depósitos de baja presión, pero menor que los depósitos de alta presión (Figura 3-6). Además, los depósitos de media presión son más eficientes en términos de costo que los depósitos de alta presión y ofrecen una buena relación costo-beneficio. Se debe considerar que los depósitos de media presión requieren una mayor precaución y mantenimiento que los depósitos de baja presión.

3.3.2.3 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido alta presión

Son una solución avanzada para el almacenamiento del hidrógeno comprimido. Estos depósitos están diseñados para soportar presiones de más de 700 bar y se fabrican principalmente con materiales compuestos, como la fibra de vidrio o el carbono, para lograr una mayor resistencia y un peso reducido. Los materiales compuestos son ligeros y resistentes (Figura 3-6). Además, los depósitos de alta presión son ideales para aplicaciones en las que se requiere un almacenamiento de grandes volúmenes de hidrógeno. Hay que tener en cuenta que son más costosos, requieren un mayor cuidado y mantenimiento que los depósitos de baja y media presión.

3.3.2.3 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido baja y media presión con refuerzo

Son depósitos diseñados para soportar presiones de hasta 700 bar y cuentan con una estructura reforzada para garantizar una mayor seguridad y durabilidad. La estructura reforzada puede incluir capas adicionales de material o un diseño más sólido para mejorar la resistencia del depósito (Figura 3-6). Además, los depósitos de baja y media presión con refuerzo son más resistentes a impactos y otros tipos de daño que los depósitos convencionales, lo que los hace más adecuados para aplicaciones en condiciones adversas. Sin embargo, estos depósitos de baja y media presión con refuerzo son más costosos que los depósitos convencionales y requieren un mayor mantenimiento.

3.3.2.4 Depósitos de almacenamiento hidrógeno comprimido alta presión con refuerzo

Se consigue un almacenamiento seguro de hidrógeno comprimido a presiones extremadamente altas. Estos depósitos están diseñados para soportar presiones de más de 700 bar y cuentan con una estructura reforzada para garantizar una mayor seguridad y durabilidad. La estructura reforzada puede incluir capas adicionales de material compuesto o un diseño más sólido para mejorar la resistencia del depósito (Figura 3-6). Los depósitos de alta presión con refuerzo se utilizan en aplicaciones especializadas, como el transporte de hidrógeno en vehículos de pila de combustible, que requieren un almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno comprimido a altas presiones.

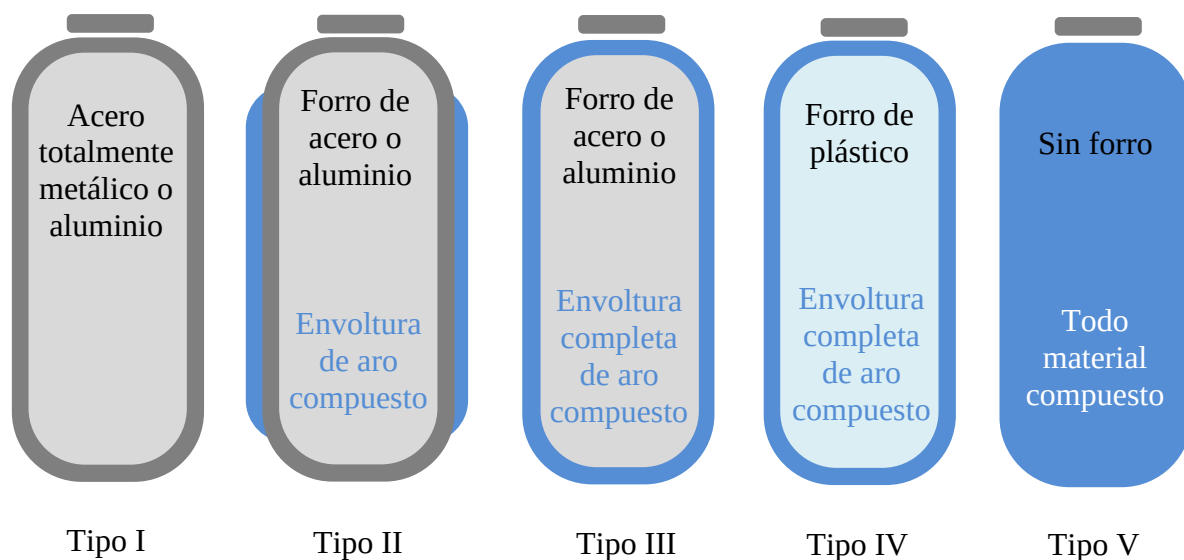


Figura 3-6 Tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido (adaptado de[51]).

De estos cinco tipos de depósitos de almacenamiento de hidrógeno comprimido, el tipo IV se considera que es el más adecuado para la propulsión de las lanchas de instrucción de 20,5 metros de eslora, debido a su capacidad de soportar presiones de hasta 700 bar y su estructura reforzada que garantiza una mayor seguridad y durabilidad. Además, su fabricación con materiales compuestos, como

la fibra de vidrio o la de carbono, permite lograr una mayor resistencia y un peso reducido, lo que es ideal para su uso en aplicaciones especializadas, como en este caso en la propulsión marítima.

3.3.3 Cálculo de volumen y masa total de hidrógeno necesario

El modelo de las lanchas de instrucción es perteneciente a la reconocida marca RODMAN, en concreto se trata del modelo comercial RODMAN 66 (Figura 3-7). Este modelo consta de una propulsión formada por dos ejes de 70 mm de diámetro, cada uno engrana con un motor de la marca Caterpillar modelo C18 a través de dos cajas reductoras de acoplamiento hidráulico.



Figura 3-7 Lancha de instrucción RODMAN 66 [52].

Las cajas reductoras son de la marca ZF 550A, con una reducción de 1971:1; entre el motor y la reductora lleva un acoplamiento elástico VULKAN L301S. Los ejes propulsores de 70 mm de diámetro atraviesan el casco a través de las bocinas, integradas al casco del barco mediante laminado y con sendos casquillos refrigerados por agua salada. Las hélices son de paso fijo, elaboradas de níquel-aluminio, de cinco palas.

Para el cálculo del volumen y la masa de hidrógeno necesario para obtener un rendimiento similar al ya proporcionado con el empleo de combustible diésel es necesario conocer las características de los motores Caterpillar C18 (Anexo III), entre los datos más destacables que necesitaremos para los cálculos son:

Velocidad 20 nudos

Consumo de combustible..... 111 l/h¹

Autonomía..... 300 MN²

Es necesario conocer tanto la densidad volumétrica del diésel y del hidrógeno, como la densidad energética.

	Densidad energética (MJ/kg)	Densidad volumétrica a 1 atm (MJ/l)
Diésel	43,10	35,86
Hidrógeno	120,00	4,80

¹ Consumo medio a una velocidad de 20 nudos y, por lo tanto 20 MN por hora.

² La autonomía es de 300 MN con ambos motores al 70% de su capacidad con una velocidad de crucero de 20 nudos.

Tabla 3-2 Comparación densidades diésel e hidrógeno.

A partir de la densidad volumétrica del diésel y del consumo de los motores CATERPILLAR C18 a 2100 rpm según ficha técnica [53]. Obteniendo de esta manera la energía consumida a un régimen de revoluciones de 2100 rpm, dando una velocidad de 20 nudos aproximadamente. Se debe tener en cuenta que el consumo está en litros a la hora, por lo que el resultado vendrá dado en Mega julios la hora o, lo que es lo mismo, en Mega Julios cada 40 km.

$$2 \times 111,10 \text{ l} \times 35,86 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 7968,09 \frac{\text{MJ}}{40,00 \text{ km}}$$

Una vez obtenido el valor de la energía consumida cada 40 km por ambos motores se calcula cuál es la energía consumida total para conseguir una autonomía de 300 MN (555,6 km), para ello se multiplica el consumo de energía cada 40 km por la distancia total que se quiere obtener.

$$7.968,09 \frac{\text{MJ}}{40,00 \text{ km}} \times 555,60 \text{ km} = 110.676,77 \text{ MJ}$$

Obtenida la energía que es consumida por ambos motores para los dos motores Caterpillar C18 y conseguir la autonomía deseada, se divide por la densidad energética del hidrógeno, calculando de esta manera la masa total de hidrógeno que será necesaria almacenar en kilogramos.

$$\frac{110676,77 \text{ MJ}}{120,00 \text{ MJ/kg}} = 922,30 \text{ kg de hidrógeno}$$

Teniendo en cuenta la baja densidad volumétrica del hidrógeno, se divide la masa total de hidrógeno entre su densidad a 700 bar (usando la densidad del hidrógeno a esa presión, calculada en la Figura 2-12) Dando como resultado el volumen de hidrógeno que será necesario almacenar.

$$\frac{922,30 \text{ kg}}{0,04 \text{ kg/l}} = 21448,84 \text{ l de hidrógeno}$$

Como se puede observar en los cálculos realizados, la masa de hidrógeno necesaria es relativamente menor que la masa de diésel necesaria, sin embargo, el volumen de hidrógeno es mucho mayor, por lo que supone un reto conseguir almacenar dicho volumen de hidrógeno en un espacio reducido como puede ser una lancha de instrucción. Es por ello necesario el empleo de numerosos tanques a presión de hidrógeno que permitan realizar un almacenamiento modulable, aprovechando al máximo el espacio existente.

3.4 Tipos de tanques de almacenamiento.

Para el diseño de los tanques a presión existen dos posibles diseños en función de la utilidad. Un tanque cilíndrico con cabezal esférico combina un cilindro y una forma esférica, lo que le da una capacidad de almacenamiento superior y una distribución uniforme de la presión a lo largo del tanque.

Este tipo de tanque se utiliza principalmente para su empleo en propulsión de vehículos terrestres, barcos o aviones (Figura 3-8). Para el cálculo del volumen del tanque cilíndrico con cabezal esférico se emplea la siguiente ecuación.

$$\text{Volúmen} = \pi \cdot r^2 \cdot L + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (1)$$

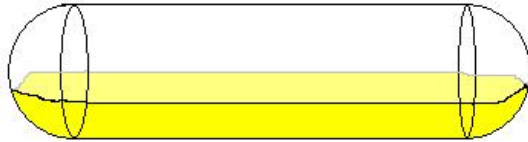


Figura 3-8 Volumen cilindro cabezal esférico.

Por otra parte, un tanque cilíndrico con cabezal elíptico (Figura 3-9). Estos tanques se utilizan principalmente para el transporte de gases y líquidos a presión y para optimizar el uso del espacio disponible durante el transporte. La ecuación que se emplea para el cálculo del volumen de este tipo de tanques es la siguiente

$$\text{Volúmen} = \frac{4\pi}{3} \times A \times B \times C \quad (2)$$

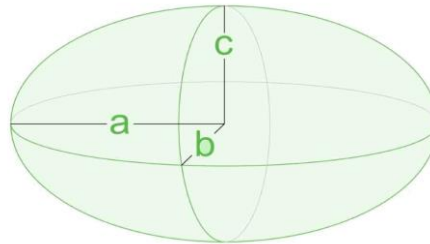


Figura 3-9 Semiejes de elipsoide [54].

donde A es el semieje X, B es el semieje Y y C es el semieje Z.

Para el diseño de los tanques a presión emplearemos los tanques cilíndricos de casquetes esféricos debido a las ventajas prestadas por este tipo de diseño y, además, es el empleado en medios de transporte como vehículos terrestres, barcos o aviones. La principal ventaja que tienen los casquetes esféricos respecto al de cabezal elíptico es que permite un reparto más homogéneo de la presión a lo largo de todo el tanque, permitiendo distribuir de mejor manera, aunque como luego se comprobará, la mayor presión será en las paredes del cilindro, comportándose con una presión menor en los casquetes.

3.5 Estudio tensional paredes del depósito

En el diseño de un depósito a presión, es fundamental llevar a cabo un estudio tensional exhaustivo para garantizar la seguridad y la eficiencia del equipo. En este estudio, se deben evaluar tanto las paredes del cilindro como los cabezales para determinar si pueden soportar las cargas y las tensiones a las que estarán sometidos.

El estudio tensional en las paredes del cilindro implica la evaluación de la deformación y la tensión en la superficie interior y exterior del cilindro (Figura 3-10). Estas tensiones pueden ser causadas por la presión interna, las cargas externas, el calor y la deformación térmica. Es importante diferenciar que el cálculo tensional se realiza de distinta manera, diferenciado en dos métodos en función de su espesor:

- Cilindros de pared gruesa: $\frac{D_e}{t} > 10.$ (3)

- Cilindros de pared delgada: $\frac{D_e}{t} < 10.$ (4)

En función de la relación entre el espesor y el diámetro exterior del cilindro se puede diferenciar entre estos dos métodos, en los que se principalmente se diferencian en que, en un cilindro con pared delgada, la tensión se distribuye de manera uniforme a lo largo de todo el espesor de la pared, pero esto no ocurre en un cilindro con pared gruesa, donde la distribución del esfuerzo es diferente.

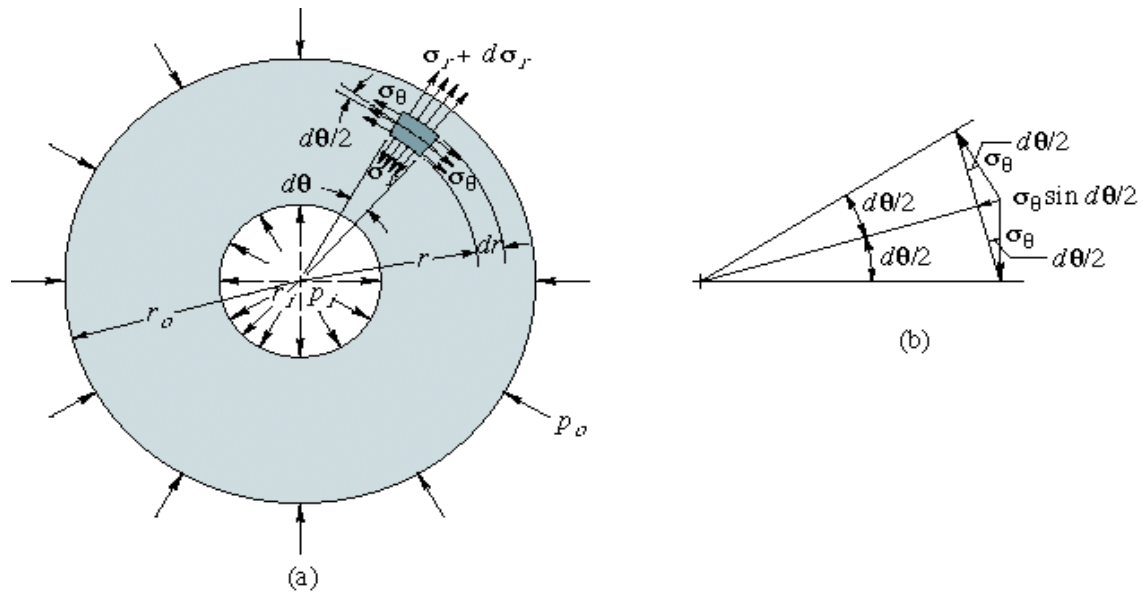


Figura 3-10 Esfuerzos que actúan en cilindros de pared gruesa [55].

Para el cálculo de tensiones en los cilindros de espesores gruesos los cálculos plantean una mayor complejidad, por lo que se fija un espesor que cumpla la relación diámetro exterior-espesor en un valor menor o igual a 10. Los esfuerzos participantes sobre un cilindro de pared gruesa requieren de un cálculo más complejo ya que las ecuaciones empleadas en este análisis se basan en las ecuaciones de Lamé, en las que se describen los esfuerzos radiales y tangenciales para los cilindros como se observa en la Figura 3-12.

Para el análisis tensional se empleará la opción del cilindro de pared delgada cuyo cálculo se realizará a partir de las ecuaciones expresadas a continuación (Figura 3-11). Estas tensiones se obtienen a partir de la ecuación de Laplace-Young en la que permite estimar la tensión circunferencial sobre un cilindro de pared delgada debida a una presión interna.

$$\Delta p = \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_o} \right) \quad (5)$$

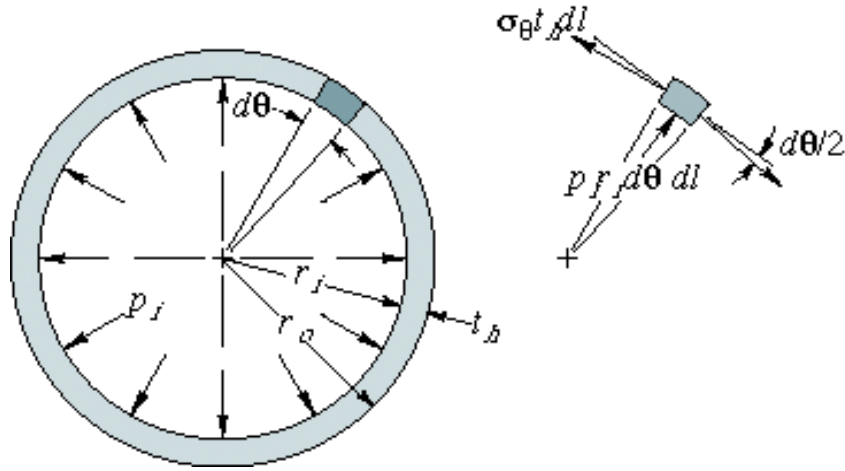


Figura 3-11 Presurización interna de un cilindro de pared delgada [55].

En el cálculo de los esfuerzos en un cilindro de pared delgada se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para la obtención de las tensiones, en este caso, al tratarse de paredes delgadas se realiza la suposición de que el radio interno y externo son el mismo, al contrario que en los cilindros de pared gruesa, en el que, tanto radio interno como externo, se utilizan de distinta forma para el cálculo de la tensión en él (Figura 3-12).

$$R_i = R_{prom} = R \quad (6)$$

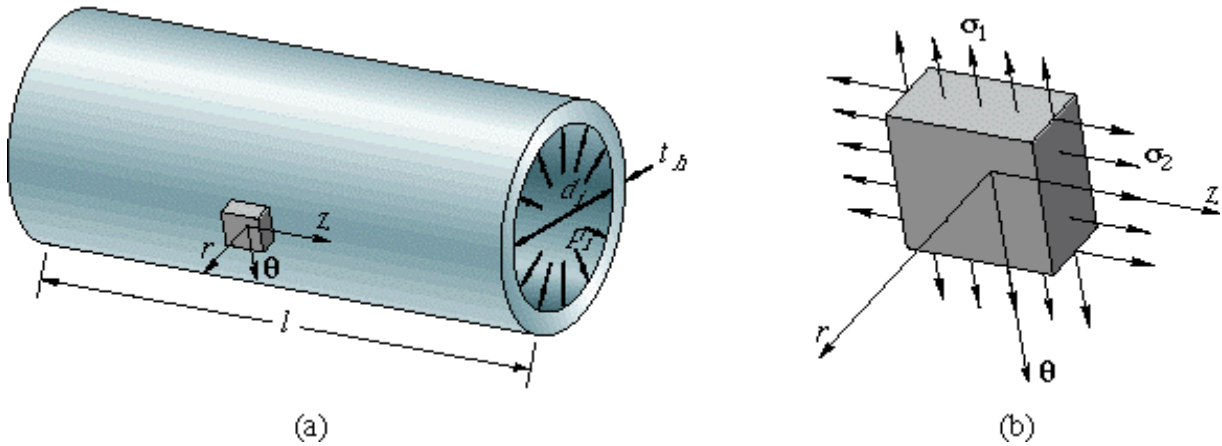


Figura 3-12 Estado tensional de un cilindro a presión [55].

El cálculo se realizará empleando la técnica de elementos finitos (FEM), donde los esfuerzos tensionales se pueden diferenciar en tres componentes en función del eje sobre el que se aplique como se puede observar en la Figura 3-12, donde se deben tener en cuenta algunas consideraciones como:

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = \sigma_{\theta prom} = \sigma_{\theta máx} \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \sigma_z \quad (8)$$

$$\sigma_r = 0^3 \quad (9)$$

Para calcular la tensión axial en la superficie interior del cilindro, se utiliza la siguiente ecuación

$$\sigma_z = \frac{P \times R}{2 \times t} \quad (10)$$

donde σ_z es la tensión en la superficie interior, P es la presión interna, R es el radio del cilindro y t es el espesor de la pared.

Para calcular la tensión circunferencial en la superficie del cilindro, se utiliza la siguiente ecuación

$$\sigma_\theta = \frac{P \times R}{t} \quad (11)$$

donde σ_θ es la tensión en la superficie exterior, R es el radio exterior del cilindro y t es el espesor de la pared.

Además de las tensiones internas y externas, también es importante considerar la deformación térmica debido a las variaciones de temperatura y el efecto de la dilatación térmica en las paredes del cilindro.

En cuanto a los cabezales, es necesario evaluar la tensión en la unión entre el cilindro y los cabezales, ya que esta es una zona crítica que puede estar sometida a una gran cantidad de cargas y tensiones. La ecuación para calcular la tensión en la unión es la siguiente

$$\sigma_j = \frac{P \times (R_o - R_i)}{2 \times t_j} \quad (12)$$

donde σ_j es la tensión en la unión, t_j es el espesor de la unión, R_o es el radio exterior del cilindro y R_i es el radio interior del cilindro.

Resto de términos son los mismos que en las ecuaciones anteriores.

Es importante destacar que los valores calculados en el estudio tensional deben compararse con los límites de tensión admisibles para el material del depósito a presión, para asegurarse de que el equipo se encuentra dentro de los límites de seguridad y está diseñado para funcionar de manera segura y eficaz.

El estudio tensional en un depósito a presión es fundamental para garantizar la seguridad y la eficiencia del equipo, y debe incluir la evaluación de las paredes del cilindro y los cabezales. En la evaluación de las paredes, se deben calcular las tensiones internas y externas y considerar la deformación térmica. En la evaluación de los cabezales, se debe calcular la tensión en la unión entre el cilindro y los cabezales. En todos los casos, los valores calculados deben compararse con los límites de tensión admisibles para el material para asegurarse de que el diseño cumple con los estándares de seguridad y que el depósito a presión funcionará de manera segura y eficaz.

³ *El valor de la tensión de superficie radial se considera de valor igual a 0 debido a que al realizarse los cálculos para un cilindro de pared delgada la diferencia entre radio interior y exterior es 0.

Se realiza el análisis de esfuerzos para un recipiente que consideramos isotrópico, es decir, un material o sistema que tiene propiedades físicas iguales en todas las direcciones (Figura 3-13). En el cálculo se podrá observar como el esfuerzo circunferencial será el doble en comparación con el esfuerzo axial. Se realizan los cálculos para una presión de 70 MPa (700 bar) y un diámetro de 500 mm, para ver los esfuerzos aproximados a los que se va a someter el depósito mediante su cálculo en un elemento finito, sin especificar el espesor para expresar el esfuerzo en función del espesor.

$$T_z = \sigma_z \times e = \frac{P \times R}{2 \times t} \times e = \frac{70 \text{ MPa} \times 250 \text{ mm}}{2} = 8750 \text{ N/mm} \quad (13)$$

$$T_\theta = \sigma_\theta \times e = \frac{P \times R}{t} \times e = \frac{70 \text{ MPa} \times 250 \text{ mm}}{1} = 17500 \text{ N/mm} \quad (14)$$

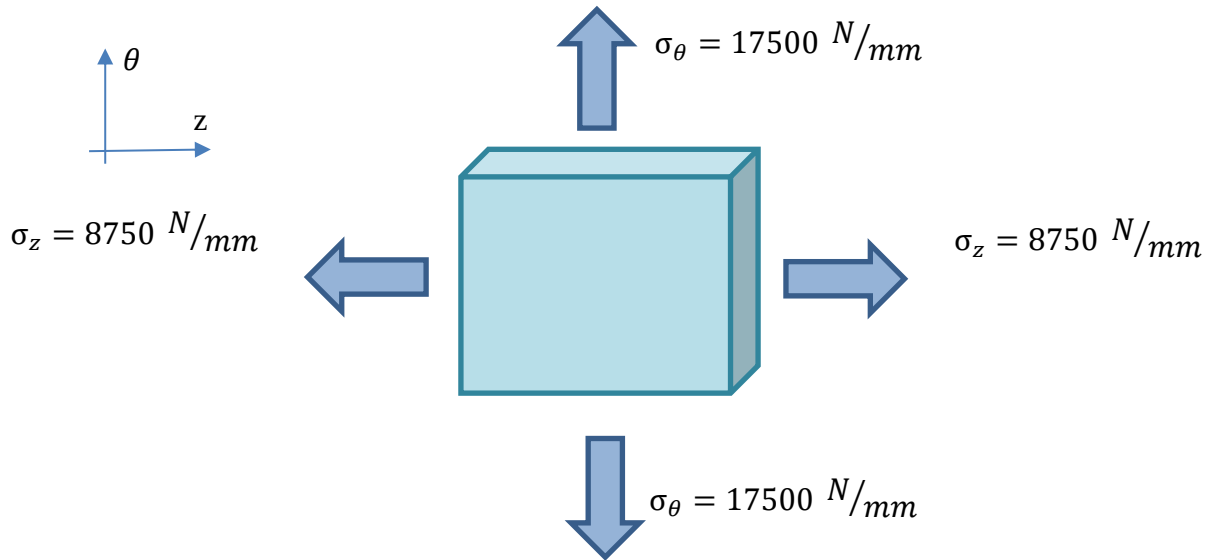


Figura 3-13 Esfuerzos en la pared interna del depósito.

3.6 Selección de los materiales

Para la selección de material se emplea la publicación de referencia para selección de materiales, ASME SEC. II PART A. El material idóneo para la fabricación del equipo a presión debe ser de un material resistente como el acero y que limite la permeabilidad del hidrógeno, mediante aleaciones de carbono y níquel.

El material SA-106 es empleado para tuberías de acero al carbono sin soldaduras para servicio a altas temperaturas. En esta publicación aparecen las especificaciones del material SA-106, el material será sometido a pruebas hidrostáticas, en caso de pasarlas debe aparecer las letras ``DH`` en la tubería, si el material cuenta con una muesca que supera el 12 % del espesor no será apta en la prueba hidrostática. Como alternativa a esta prueba hidrostática, si el fabricante así lo especifica, el cuerpo completo deberá someterse a una prueba eléctrica no destructiva, incluyendo las letras ``NDE`` permitiendo diferenciarlas de las tuberías con imperfecciones que produzcan resultados de la prueba iguales o mayores que las producidas según el estándar de calibración.

Se debe tener en cuenta que tubería de más de 10'' (250 mm) de diámetro exterior, el diámetro no puede exceder el 1 % por encima o por debajo del diámetro exterior especificado. Además, para tuberías de más de 10'' (250 mm) de diámetro interior no puede variar un 1 % por encima o por debajo del diámetro interior especificado.

La composición del material SA-106 viene dada en la siguiente tabla:

Composición %			
	Grado A	Grado B	Grado C
Carbono	0,25	0,30	0,35
Manganeso	0,27-0,93	0,29-1,06	0,29-1,06
Fósforo	0,035	0,035	0,035
Azufre	0,035	0,035	0,035
Silicio	0,10	0,10	0,10
Cromo	0,40	0,40	0,40
Cobre	0,40	0,40	0,40
Molibdeno	0,15	0,15	0,15
Níquel	0,40	0,40	0,40
Vanadio	0,08	0,08	0,08

Tabla 3-3 Composición SA 106 [56].

Otro posible material para la fabricación del depósito a presión se trata de acero inoxidable A312 TP316L, con una resistencia a la tracción de 485 MPa y un límite elástico de 170 MPa, características muy similares al acero al carbono A106 C (485 MPa y 275 MPa respectivamente) que convierte a este acero inoxidable como un posible candidato para su empleo en la fabricación del depósito. A continuación, se adjunta una tabla con la composición de dicho material.

Composición %	
Carbono	0,035
Manganeso	2,000
Fósforo	0,045
Azufre	0,030
Silicio	1,000
Cromo	16,000 -18,000
Molibdeno	2,000 -3,000
Níquel	10,000 -14,000

Tabla 3-4 Composición acero inoxidable A312 TP316L [57].

Este material como se puede observar emplea principalmente cromo y níquel que permite tener unas prestaciones muy similares al acero al carbono A106 C, que al igual que el mencionado, se obtiene en forma de tubos sin costuras permitiendo la homogeneidad de las paredes y reparto de la presión a lo largo del cilindro de manera mucho más homogénea, siendo ideal para el diseño de equipos de tal calibre en cuenta a soporte de presiones muy elevadas.

Sin embargo el material A312 TPL316L tiene un inconveniente que hace que tenga que descartarse de inicio y es que la fabricación de estas tuberías tienen unas relaciones “Schedule” la cual cubre unos diámetros de 1/8” a 30” los cuales son aceptables para el tipo de depósito que se quiere obtener, sin embargo, tiene unos espesores de SCH 10, SCH 40, SCH 80 para estos diámetros, siendo demasiados finos para la presión que deberán soportar en sus paredes internas, es por ello que el acero inoxidable A312 TPL316L queda descartado para el diseño del depósito.

3.6.1 Cálculo espesor del depósito

A la hora del diseño del depósito al igual que el material, es importante conocer el espesor del cilindro, esto va a determinar en primera instancia el tipo de depósito que se va a diseñar. Puede ser depósito de pared fina o de pared gruesa, se considera de pared fina en depósitos cuyo cociente entre el radio y el espesor sea menor de 10, es decir, para un radio de 200 mm el espesor no puede ser mayor a 20 mm. En el caso estudiado, al tratarse de unas presiones muy altas (700 bares), se necesitarán realizar los cálculos empleados para depósitos de pared gruesa.

La principal diferencia entre un cilindro a presión de pared fina y uno de pared gruesa difieren en el espesor de la pared, y por lo tanto, en su capacidad para resistir la presión interna. Un cilindro a presión de pared fina tendrá un espesor de pared más delgado, lo que resultará en un peso más ligero y un costo de producción más bajo. Sin embargo, también tendrá una capacidad de resistencia a la presión interna más limitada, lo que lo hace más propenso a fallar en caso de un aumento de presión.

Por otro lado, un cilindro a presión de pared gruesa tendrá un espesor de pared más grueso, lo que resultará en un peso más pesado y un costo de producción más alto. Sin embargo, también tendrá una capacidad de resistencia a la presión interna más alta, lo que lo hace más seguro en caso de un aumento de presión.

Para el cálculo del espesor se emplea la ecuación obtenida en la normativa ASME VIII DIV 1, en el apartado UG-27 (espesor de la carcasa por presión interna) [58]. En ella se especifican dos ecuaciones para el cálculo de los esfuerzos circunferenciales (1) y esfuerzos longitudinales (2). Una vez se calcule el espesor (t), se deberá tener en cuenta la corrosión sumándola al espesor final (3)

$$t = \frac{P \times R}{SE - 0,6P} \quad (15)$$

$$t = \frac{P \times R}{SE + 0,4P} \quad (16)$$

$$t_m = t + c \quad (17)$$

donde, P es la presión interna de diseño (en PSI), R es el radio interior del cilindro (en pulgadas), S es el esfuerzo máximo admisible (en PSI), E es la eficiencia de la junta y c es la tolerancia por corrosión.

El cálculo del espesor de los cabezales y secciones también debe ser calculado, aunque por norma general el espesor obtenido en los cabezales será menor que en la carcasa, la cual será la que determinará el espesor final del depósito. La ecuación para el cálculo del espesor en los cabezales se obtiene, al igual que en el caso anterior, de la normativa ASME VII DIV , en concreto en el apartado UG-23 (cabezales y secciones, presión en el lado) [58]. Una vez obtenido el espesor (t), también se debe tener en cuenta la tolerancia por corrosión mediante la siguiente ecuación

$$t_c = \frac{P \times D}{2SE - 0,2P} \quad (18)$$

$$t_m = t + c \quad (19)$$

donde, P es la presión interna de diseño (en PSI), D es el diámetro interior del cilindro (en pulgadas), S es el esfuerzo máximo admisible (en PSI), E es la eficiencia de la junta y c es la tolerancia por corrosión.

Para el caso que se va a plantear hay varias incógnitas que se pueden obtener con el planteamiento inicial, el cual es la obtención del espesor de un depósito a presión. Es importante tener en cuenta que, tanto el diámetro exterior de la tubería como los espesores que se obtengan no serán los empleados en el diseño final del producto, debido a que ambos parámetros se encuentran normalizados. Las tablas NPS (Nominal Pipe Size) y SCH (Schedule) relacionan los diámetros exteriores normalizados con los diferentes espesores disponibles. He de destacar que para un mismo NPS hay varios SCH disponibles, que van desde SCH 20 a SCH 160 (incluso SCH XXS para algunos NPS muy concretos).

En el caso del material con el que se pretende realizar el depósito (SA-106 C), existe una tabla específica para este material la cual aparece en el Anexo III. Para ello se ha elaborado una tabla comparativa en las que se ha calculado el espesor del material para el espesor de la carcasa por presión interna mediante la ecuación (15) y (16), escogiendo como espesor final el mayor espesor obtenido de ambas ecuaciones y sumándole al espesor escogido, la tolerancia por corrosión de la ecuación (17).

Para los cálculos realizados se cuenta con una serie de parámetros fijos que no varían en función del diámetro como son:

- S : Esfuerzo máximo admisible del SA-106 C a 20°C es 20000 psi.
- E : eficiencia de la junta es 1, viene establecido en la Tabla A3- 5 Tablas UW 12 ASME VIII: Eficiencias máximas permisibles para juntas soldadas con gas y arco [58].
- c : Tolerancia a la corrosión 0,0591" (1,5 mm) mínima tolerancia permitida para equipos a presión según UG-25 de la normativa ASME VIII [58].

Las variables que se van a estudiar para la obtención de la forma más viable de almacenaje van a ser la presión interna de diseño y el radio interior del cilindro.

- P : Presión interna de diseño, se van a estudiar diferentes presiones de almacenamiento desde 200 bar a 700 bar.
- R_i : Radio interior del cilindro, se escogerá en función del diámetro exterior normalizado (NPS) y el espesor del tubo (SCH), para los espesores se utilizará SCH 160 o, en el caso de que ese diámetro tenga, SCH XXS.

Para ello se elabora la siguiente tabla donde aparecen reflejados los espesores permitidos en función del diámetro exterior.

Øe mm	Øe in	tn mm	tn in
60,30	2,37	11,07	0,43
73,00	2,87	9,52	0,37
88,90	3,50	15,24	0,60
101,60	4,00	NO HAY	NO HAY
114,30	4,50	13,49	0,53
141,30	5,56	15,88	0,62
168,30	6,62	18,26	0,71
219,10	8,62	23,01	0,90
273,00	10,74	28,58	1,12
323,85	12,75	33,34	1,31
355,60	14,00	35,70	1,40
406,40	16,00	40,50	1,59
457,20	18,00	45,20	1,78
508,00	20,00	50,00	1,96

Tabla 3-5 Relación entre Øe y tn.

Una vez conocidos los diámetros exteriores y los espesores permitidos para dichos diámetros, obtenemos el radio interior del cilindro en pulgadas usando las siguientes ecuaciones

$$\text{Øi} = \text{Øe} - 2 \times \text{tn} \quad (20)$$

$$Ri = \frac{\text{Øi}}{2} \quad (21)$$

donde Øi es el diámetro interior y Øe es el diámetro exterior, tn es el espesor nominal y Ri es el radio interior del cilindro.

Obtenidos los radios interiores en pulgadas que se pueden emplear, se realiza el cálculo del espesor final (t_m) en función de las diferentes presiones (en psi) que se van a estudiar y dichos radios interiores. Se consigue obtener la tabla del Anexo III, se analizan los espesores obtenidos, marcando en rojo aquellos espesores los cuales sean superiores al espesor permitido para cada diámetro y presión, por lo tanto, no son válidos ya el espesor de fabricación será menor que el requerido y no cumpliría las especificaciones.

Analizando los datos obtenidos, se llega a la conclusión que con acero al carbono SA-106 C no se puede conseguir unas presiones de almacenamiento tan elevadas como se querían obtener. Siendo la máxima presión de almacenamiento 500 bar cuando la tubería tenga un diámetro interior de 58,42 mm, al ser la sección tan pequeña queda descartada esta opción ya que el volumen de almacenamiento sería muy inferior a escoger un diámetro mayor pero una presión inferior.

La segunda opción sería disminuir la presión de almacenamiento a 300 bar y aumentar el diámetro interior, siendo la opción más adecuada. El diámetro interior que cumple con estas especificaciones es 8,498" (215,84 mm), siendo este diámetro el elegido para el diseño del depósito a una presión de 300 bar, un espesor de 1,125" (28,58 mm).

Se deben realizar los mismos cálculos análogamente para los cabezales, a pesar de que el espesor requerido en ellos va a ser menor, debido a que la presión se va a repartir sobre la superficie curvada de forma más repartida. Para el cálculo de los cabezales se ha empleado la ecuación (18) donde los parámetros necesarios para el cálculo en los lados cóncavos son los mismos que para el cálculo del espesor en la carcasa cilíndrica, exceptuando que, en vez de utilizarse el radio interior, se empleará el diámetro interior.

Al igual que para el cálculo del espesor de la carcasa cilíndrica, se obtiene la tabla del Anexo III, en la que se relacionan los diferentes diámetros interiores con las diferentes presiones en las que se estudia el posible diseño del depósito, marcando las casillas en rojo de aquellas que no cumplan con el espesor requerido, como ya se ha realizado el cálculo en la carcasa cilíndrica se sabe que la presión máxima no puede ser mayor a 300 bar, realizado los cálculos se obtiene que para cualquier diámetro de los empleados para el diseño del depósito pueden ser empleados para trabajar a 300 bar. Al ser válido para cualquier diámetro, se escoge el espesor más restrictivo que será el obtenido en la carcasa cilíndrica como era lo esperado.

3.6.2 Soldadura del depósito.

En todos los fondos se realiza la transición de una figura bombeada a una cilíndrica, que es la cubierta; esta línea de transición, denominada justamente línea de tangencia, está sometida a grandes tensiones axiales que se traducen en fuertes tensiones locales, y éste es el punto más débil del recipiente; por esta razón no es aconsejable realizar la soldadura de unión fondo-cubierta a lo largo de esta línea (Figura 3-14). Para evitar esta coincidencia, los fondos bombeados se construyen con una parte cilíndrica, denominada pestaña o faldilla, cuya altura mínima h varía según la Norma o Código de cálculo.

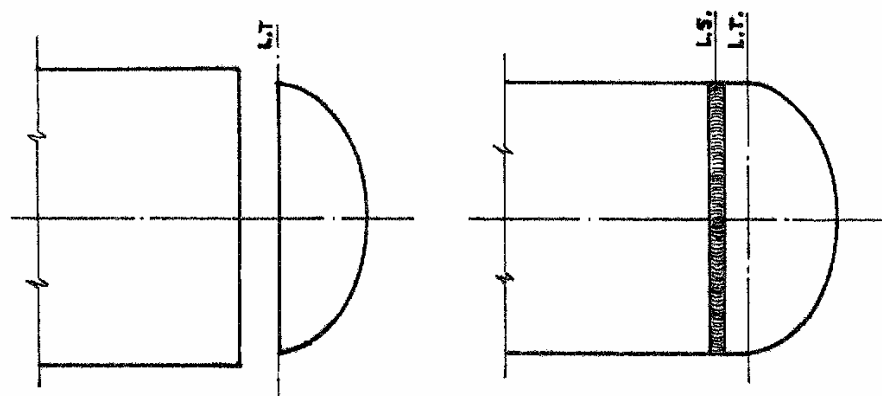


Figura 3-14 Línea de soldadura con respecto a línea de tangencia en depósitos cilíndricos [59].

En cuanto a las conexiones, salvo en casos excepcionales, las conexiones se realizan embridadas, ya que permiten su montaje y desmontaje sin tener que realizar ningún corte ni soldadura. Solamente en casos de fluidos extremadamente tóxicos, o altamente explosivos en contacto con el aire, se realizan las conexiones soldadas. Las diversas partes que conforman la conexión embridada son las siguientes:

- Tubuladura.
- Placas de refuerzo.
- Brida.
- Pernos y turcas.

Los dispositivos de purga de presión deben ajustarse para saltar a una presión que no sobrepase la presión máxima permisible de carga.

Para las uniones soldadas, se utilizarán materiales de aporte compatibles con el material a soldar y se ejecutarán conforme a procedimientos homologados. Los soldadores también estarán homologados conforme los procedimientos anteriores.

Los tipos de soldadura utilizados para la mayoría de las juntas perimetrales y longitudinales en los recipientes a presión se muestran en la siguiente figura:

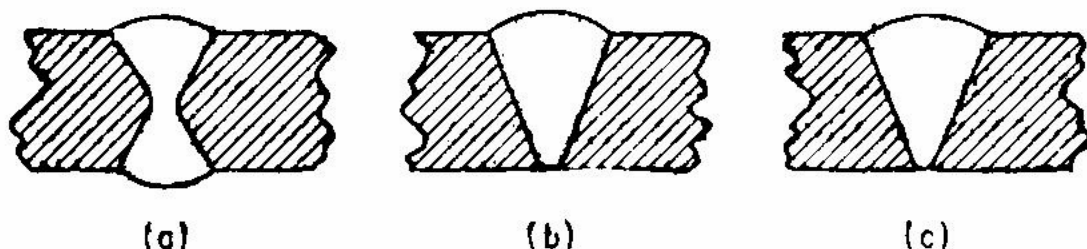


Figura 3-15 Tipos de soldadura ASME VIII Div 1: a) Junta por ensamble de soldadura doble, picada antes de soldar el segundo lado. b) Junta por ensamble de soldadura simple, con banda de respaldo que puede o no retirarse. c) Junta por ensamble de soldadura simple, sin banda de respaldo (que sólo se permite para algunas soldaduras perimetrales) [58].

La eficiencia de soldadura es la relación entre el esfuerzo permisible en la soldadura y el esfuerzo permisible para la placa adyacente. Depende no solo del tipo de soldadura, sino del grado de examen radiográfico. En la siguiente tabla se muestran las eficiencias máximas permisibles de juntas para juntas soldadas con gas y con arco.

Descripción de la junta	Grado de examen		
	Radiografía completa	Examen por puntos	No examinada por puntos
Juntas por ensamble con soldadura doble o con medios que permitan obtener la misma calidad de metal soldado a ambos lados de la junta.	1.00	0.85	0.70
Junta por ensamble de soldadura simple, con banda de respaldo en su lugar.	0.90	0.80	0.65
Junta por ensamble de soldadura simple, sin banda de respaldo. Sólo se permite para algunas juntas perimetrales.			0.60

Tabla 3-6 Resumen eficiencias máximas permisibles para juntas soldadas con gas y arco [58].

Para garantizar una mayor seguridad, equipan válvulas de sobrepresión, aviso en caso de fuga del hidrógeno y una estructura de tres capas: una de acero, una intermedia de polímero y la tercera de plástico reforzado con fibra de carbono (minimizar la posibilidad de difusión del hidrógeno en la estructura del acero) (Figura 3-16).



Figura 3-16 Válvula de sobrepresión [60].

3.7 Empleo de materiales compuestos

Un material compuesto está formado por dos o más componentes distintos que se combinan para formar una estructura con propiedades únicas. Estos componentes pueden ser de diferentes tipos, como fibras, partículas o láminas; y pueden estar unidos mediante un adhesivo o una matriz. Los materiales compuestos comunes incluyen polímeros reforzados con fibra, laminados de vidrio, materiales compuestos de metal y cerámica, entre otros.

3.7.1 *Análisis micromecánico, modelo de Chamis*

Para aprovechar al máximo las propiedades de los materiales compuestos, es necesario tener una comprensión detallada de las propiedades de los materiales compuestos y cómo se ven afectadas por los procesos de fabricación y la geometría del componente. Para ello, se utilizan modelos micromecánicos, como el modelo de Chamis, que permiten estimar las propiedades de los materiales compuestos en función de su microestructura y los procesos de fabricación utilizados para producirlos. Estos modelos se basan en la teoría de la mecánica de materiales y utilizan ecuaciones matemáticas para describir la respuesta mecánica del material en función de sus propiedades constitutivas.

Para obtener las propiedades de la lámina de material compuesto que se van a emplear se recurrirá al modelo micromecánico de Chamis para estimar las propiedades de una lámina a partir de las propiedades tanto de la matriz como de la fibra de refuerzo y la cantidad de fibras. Este modelo permite estimar tanto las propiedades elásticas como las propiedades resistentes de la lámina de material compuesto.

El modelo de Chamis es un modelo micromecánico que utiliza una combinación de análisis probabilístico para predecir las propiedades de los materiales compuestos en función de las características de la microestructura del material, como la orientación de las fibras y la distribución de estas. Este modelo también tiene en cuenta la variabilidad en las propiedades de los materiales compuestos debido a la naturaleza heterogénea de estos materiales.

A continuación, se establecen las constantes elásticas de la lámina de material compuesto.

$$E_x = E_{Lf} \times V_f + E_m \times (1 - V_f) \quad (22)$$

$$E_y = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \times \left(1 - \frac{E_m}{E_{Tf}}\right)} \quad (23)$$

$$E_z = E_y \quad (24)$$

$$G_{xy} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \times \left(1 - \frac{G_m}{G_{LTf}}\right)} \quad (25)$$

$$G_{xz} = G_{xy} \quad (26)$$

$$G_{yz} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \times \left(1 - \frac{G_m}{G_{TTf}}\right)} \quad (27)$$

$$\nu_{xy} = \nu_{LTf} \times V_f + \nu_m \times (1 - V_f) \quad (28)$$

$$\nu_{xz} = \nu_{xy} \quad (29)$$

$$\text{En materiales transversalmente isotrópicos se cumple: } G_{yz} = \frac{E_y}{2 \times (1 + \nu_{yz})} \quad (30)$$

Una vez expresadas las constantes elásticas, se deberán obtener las constantes resistentes a partir de las siguientes ecuaciones de análisis micromecánico mediante el modelo de Chamis.

$$X_t = V_f \times X_{tf} \quad (31)$$

$$Y_t = X_{tm} \times [1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \times \left(1 - \frac{E_m}{E_{Tf}}\right)] \quad (32)$$

$$X_c = V_f \times X_{cf} \quad (33)$$

$$Y_c = X_{cm} \times [1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \times \left(1 - \frac{E_m}{E_{Tf}}\right)] \quad (34)$$

$$S_{xy} = S_m \times [1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \times \left(1 - \frac{G_m}{G_{LTf}}\right)] \quad (35)$$

A continuación, se adjunta una tabla con cada una de las propiedades y subíndices de las ecuaciones expresadas.

Propiedad	Subíndice
E= Módulo de elasticidad	L= Longitudinal
G= Módulo de cortadura	T= Transversal
ν = Módulo de Poisson	LT= Longitudinal-Transversal (xy)
X= Tensión de rotura	TT= Transversal-Transversal (yz)
S= Tensión de rotura a cortadura	t= Tracción
ρ = Densidad	c= Compresión
V= Fracción en volumen de fibras	f= Fibra
	m= Matriz

Tabla 3-7 Propiedades y subíndices de modelo de Chamis.

3.7.2 Matriz epoxi

La base para la elaboración del material compuesto será una matriz epoxi, la cual proporciona una serie de propiedades beneficiosas, como alta resistencia mecánica, rigidez, durabilidad, resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, así como una buena adherencia entre las fibras y la matriz. Además, la resina epoxi tiene una alta capacidad de adhesión a diferentes tipos de materiales, lo que la hace muy útil en aplicaciones que requieren un alto nivel de unión y adherencia. Hay que destacar que existen dos tipos de resinas epoxis.

- TGMDA (dianilina tetraglicidil metileno): Presenta un elevado módulo de elasticidad, una baja deformación a rotura y se puede emplear a elevadas temperaturas.
- DGEBA (diglicidil eter de bisfenol A): Destaca por presentar una menor absorción de agua, una mayor deformación a rotura y menores propiedades mecánicas que las presentadas por la resina epoxi TGMDA.
- Fenolformaldehido epoxi novolaca: la cual presenta una menor deformación a rotura.

Para la realización del material compuesto se empleará una matriz epoxi del tipo TGMDA, debido a que sus propiedades son las más adecuadas para el caso en el que se requiere su empleo. Se pueden diferenciar dos tipos de resina epoxi TGMDA, ya que puede combinarse con fibra de vidrio o carbono, en el caso estudiado se escogerá la matriz epoxi TGMDA ya que es la empleada con materiales con elevado módulo elástico como la fibra de carbono, mientras que la matriz epoxi DGEBA se emplea con materiales que estarán sometidos a menores esfuerzos, para la obtención del laminado de material compuesto se empleará fibra de carbono debido a sus mejores propiedades mecánicas. En la Tabla 3-8 se muestran algunas de las propiedades mecánicas de la matriz epoxi TGMDA.

MATRIZ EPOXI TGMDA	
ρ (g/cm ³)	1,20
E_m (MPa)	3500
ν_m (adimensional)	0,35
G_m (MPa)	1296,30
X_{tm} (MPa)	55,00
X_{cm} (MPa)	103,00
S_m (MPa)	55,00
ν_f (adimensional)	0,60

Tabla 3-8 Propiedades mecánicas matriz epoxi TGMDA [61].

3.7.3 Fibra de carbono

La fibra de carbono es un material compuesto utilizado en la fabricación de piezas estructurales de alta resistencia y bajo peso. La fibra de carbono se fabrica a partir de filamentos de carbono entrelazados, lo que le confiere una gran rigidez y resistencia mecánica, se emplea comúnmente con las resinas epoxi.

La fibra de carbono se clasifica en función de su resistencia y rigidez. Los tipos más comunes de fibra de carbono son la fibra de carbono de módulo alto (HR) y de módulo intermedio (MR).

Para la elección de la fibra de carbono se empleará fibra de carbono de alto módulo y alta resistencia, típicamente empleada en la fabricación de láminas de materiales compuestos junto con matriz epoxi. Se empleará la fibra de carbono M40J fabricada por la empresa americana TORAY siendo una de las más empleadas, cuyas principales propiedades mecánicas se recogen en la Tabla 3-9.

FIBRA DE CARBONO M40J	
ρ (g/cm ³)	1,77
E_{Lf} (MPa)	377143,22
E_{Tf} (MPa)	62053,00
ν_{LTf} (adimensional)	0,20
ν_{TTf} (adimensional)	0,25
G_{LTf} (MPa)	75842,00
G_{TTf} (MPa)	48263,00
X_{tf} (MPa)	2500,00
X_{cf} (MPa)	1500,00

Tabla 3-9 Propiedades mecánicas M40J [62].

La fibra de carbono de alto módulo tiene una alta rigidez y resistencia, mientras que la fibra de carbono de módulo intermedio tiene una rigidez y resistencia intermedia. La fibra de carbono combinada con una matriz epoxi tiene varias propiedades únicas, como su alta resistencia específica, su bajo peso, su alta rigidez y resistencia a la tracción, y su capacidad para resistir altas cargas y esfuerzos. Además, también es resistente a la corrosión y a los agentes químicos, lo que la hace ideal para aplicaciones en entornos hostiles.

3.7.4 Obtención propiedades laminado fibra de carbono-epoxi 60 %

Una vez obtenidas las propiedades mecánicas de la matriz y de la fibra, con las ecuaciones de análisis micromecánico de Chamis se obtendrán los parámetros equivalentes a las propiedades mecánicas de las láminas de material compuesto formadas por matriz epoxi con una composición de fibra de carbono al 60 %. En la Tabla 3-10 se muestran las propiedades mecánicas de material.

**LAMINADO MATERIAL COMPUESTO
FIBRA DE CARBONO-EPOXI 60 %**

E_x (MPa)	227685,93
E_y (MPa)	13006,65
E_z (MPa)	13006,65
ν_{xy} (adimensional)	0,26
ν_{xz} (adimensional)	0,26
ν_{yz} (adimensional)	0,24
G_{xy} (MPa)	5431,95
G_{xz} (MPa)	5265,04
G_{yz} (MPa)	5265,04
X_t (MPa)	1500,00
Y_t (MPa)	45,94
X_c (MPa)	900,00
Y_c (MPa)	86,03
SC	45,56
ρ (g/cm ³)	1,50

Tabla 3-10 Propiedades mecánicas laminado fibra de carbono 60 %.

Para el cálculo de la densidad del material compuesto se empleará la regla de las mezclas, la cual se obtendrá a partir de las densidades de cada compuesto obtenidas de las tablas anteriores. Para el cálculo del volumen de fibras empleado se empleará la siguiente ecuación. Dónde ν_{fibras} es la fracción de volumen de las fibras en el cilindro, en este caso es del 60 % (0,6).

$$V_{fibras} = \pi \times R^2 \times h \times v_{fibras} \quad (36)$$

Para el cálculo de volumen de epoxi, una vez obtenido el volumen del cilindro y el volumen de fibras, la diferencia entre ambas será el volumen de epoxi.

$$V_{epoxi} = V_{cilindro} - V_{fibras} \quad (37)$$

Una vez obtenidos los volúmenes del cilindro, de la fibra de carbono y de la matriz epoxi, se procede a aplicar la regla de las mezclas, para obtener la densidad del material compuesto.

$$\rho_{cilindro} = \rho_{epoxi} \times \frac{V_{epoxi}}{V_{cilindro}} + \rho_{fibras} \times \frac{V_{fibras}}{V_{cilindro}} = 1,498 \text{ g/cm}^3 \quad (38)$$

Por lo tanto, la densidad del cilindro con cabezal esférico (se estima un radio de 200 mm y altura de 2 metros) es de 1,498 g/cm³, resultado que se obtiene aplicando la regla de las mezclas. Una vez tenemos todas las propiedades mecánicas y la densidad del material compuesto, se procede a introducir estos datos en el programa eLamX2 (Expandable Laminate Explorer) (Figura 3-17).

Edit	
General Properties	
Name	LAMINADO FIBRA DE CARBONO 60%
Density	1.6513E-9
Stiffness Properties	
E	227685.9
E _⊥	13006.6
ν _⊥	0.260
G _⊥	5432.0
hygrothermal Properties	
Strength Properties	
X _t	1500.0
X _c	900.0
Y _t	45.9
Y _c	86.0
SC	45.6
Additional Properties	
Name A name for the Material	
OK	

Figura 3-17 Propiedades fibra de carbono-epoxi 60 % con ELAMX2.

Se trata de un software que emplea la teoría clásica de laminado para estimar las deformaciones del material compuesto bajo la acción de un determinado estado tensional. Se permite a su vez representar gráficamente las deformaciones del laminado, así como identificar en que lámina se produce el fallo y los niveles de tensión que se producen.

3.7.5 Teoría clásica de laminado

En la teoría clásica de laminado el laminado está formado por capas unidireccionales que se apilan para formar la estructura laminada como es el caso que se está estudiando. Cada una de estas capas se caracterizan por sus propiedades mecánicas y geométricas tanto de la fibra como de la matriz, módulo de tracción (E_f , E_m), módulo de cortadura (G_f , G_m) y módulo de Poisson (ν_f , ν_m) tanto de la matriz como de la fibra. Además, cada una de las láminas tendrá una tipología en relación con la fibra, es decir, se tendrá una determinada cantidad de fibras en cada una de las láminas y un ángulo de orientación distinto de la fibra que conforman las láminas (Figura 3-18).

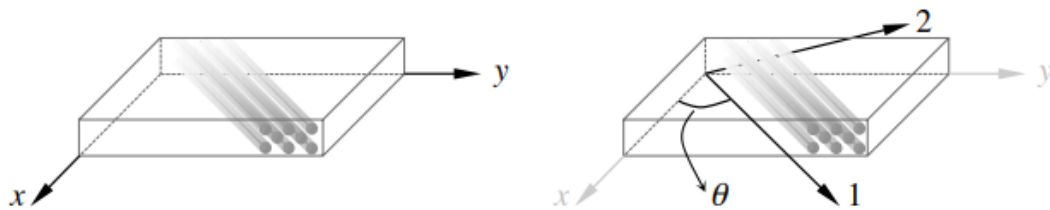


Figura 3-18 Sistema de coordenadas global y local.

Para cada orientación de cada una de las láminas se empleará un sistema de coordenadas local referido al sistema de coordenadas global que se mantendrá fijo como se puede apreciar en la Figura 3-18. Se parte de un material compuesto formado por diferentes capas/láminas orientadas en distintos ángulos, este material es sometido a unas fuerzas designadas como N_x y N_y , al mismo tiempo el material se puede someter a momentos en el eje x y en el eje y (Figura 3-19).

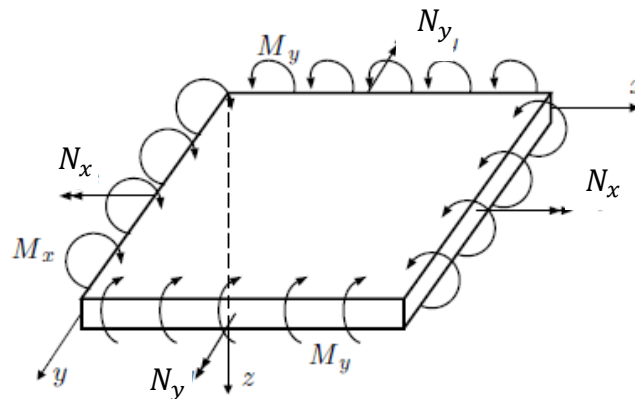


Figura 3-19 Esfuerzos y momentos sobre un laminado [63].

Se debe tener en cuenta que el material está formado por una estructura laminar, donde cada lámina viene designada por la nomenclatura de la Figura 3-20. La posición de cada una de las láminas viene determinada por la altura, de esta manera el espesor de cada una de las láminas se puede obtener a partir de la siguiente expresión.

$$e_i = h_i - h_{i-1} \quad (39)$$

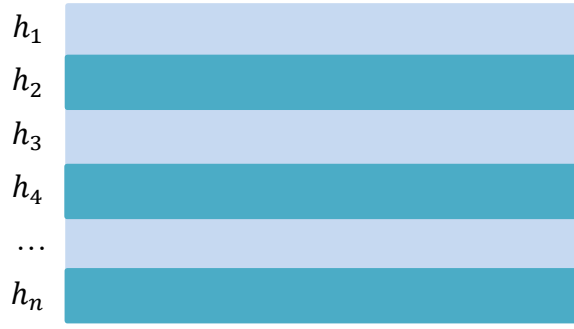


Figura 3-20 Nomenclatura laminado material compuesto.

Se parte de la geometría del compuesto, disponiendo de la información de cada una de las capas. Se comienza el análisis de tensiones y deformaciones, donde se considera un elemento diferencial en la dirección del eje z y una tensión aplicada sobre dicho elemento diferencial aplicada en el eje x (Figura 3-21).

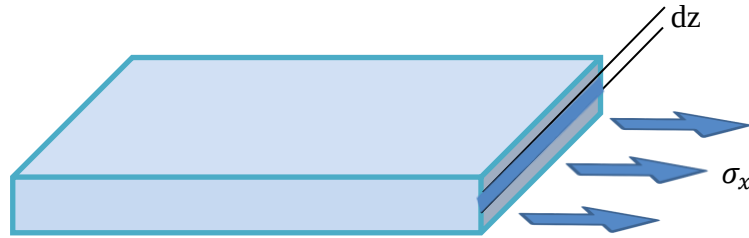


Figura 3-21 Esfuerzo longitudinal en una lámina.

$$N_x = \int \sigma_x \cdot dz \quad [N] = \int [\sigma] \cdot dz \quad (40)$$

$$[M] = \int [\sigma] \cdot z \cdot dz \quad (41)$$

Como se puede observar, la fuerza total va a resultar de la integral de la tensión en el eje x por el diferencial en el eje z , se expresa también de forma matricial como se indica. De igual manera se puede estimar la matriz total de momentos que actúan sobre el material compuesto mediante la integral del producto de la matriz de tensiones obtenida multiplicada por z .

Para el análisis de las deformaciones en un material a una determinada altura z consta de dos componentes, una de ellas plana ε (estiramiento o compresión) y otra es la curvatura c que depende del equilibrio de las láminas y depende la altura z . Se representa de la siguiente manera.

$$\varepsilon(z) = \varepsilon + z \cdot c \quad (42)$$

Por otro lado, en el análisis del comportamiento de láminas se ha visto que la ley de Hooke establece que la tensión es igual a la matriz de rigidez global $\bar{Q}$, teniendo en cuenta que la deformación consta de dos componentes. Teniendo en cuenta que la matriz de rigidez global $\bar{Q}$ es igual a la inversa de flexibilidad global o bien resultado del producto de la matriz de transformación de deformaciones por la matriz Q de rigidez local por la inversa de la transformación de tensiones.

$$\sigma(z) = [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon] + [\bar{Q}] \cdot z \cdot [c] \quad (43)$$

$$[\bar{Q}] = [T_\varepsilon] \cdot [Q] \cdot [T_\sigma]^{-1} \quad (44)$$

Teniendo en cuenta todas las consideraciones, se puede llevar a cabo el análisis de fuerzas y deformaciones. Así, las fuerzas totales que actúan sobre el material compuesto $[N]_T$ van a resultar del sumatorio entre el número total de capas y las fuerzas que actúan en cada una de las capas, es decir matriz $[N]_i$. Se debe tener en cuenta que la tensión a una altura z es igual al expresada anteriormente. El análisis de fuerzas viene dado por:

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{I_T} [N]_i = \sum_{i=1}^{I_T} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma(z)]_i \cdot dz \quad (45)$$

Simplificando la expresión global podemos decir que la expresión general de las fuerzas totales que soporta un material compuesto es expresada de la siguiente manera, donde se denomina a las matrices A y B de la siguiente forma:

$$[N]_T = [A] \cdot [\varepsilon] + [B] \cdot [c] \quad (46)$$

$$[A] = \sum_{i=1}^{I_T} [\bar{Q}]_i \cdot (h_i - h_{i-1}) \quad (47)$$

$$[B] = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{I_T} [\bar{Q}]_i \cdot (h_i^2 - h_{i-1}^2) \quad (48)$$

De la misma manera podemos llevar a cabo un análisis de los momentos, pues el momento total que actúa sobre el material compuesto es el sumatorio de todos los momentos que actúan sobre cada una de las capas. Donde el momento total se obtiene de la siguiente forma:

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{I_T} [M]_i = \sum_{i=1}^{I_T} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma(z)] \cdot z \cdot dz \quad (49)$$

Considerando la expresión de la matriz de tensiones, se expresa la ecuación anterior de forma desglosada en función de las matrices B y D.

$$[M]_T = [B] \cdot [\varepsilon] + [D] \cdot [c] \quad (50)$$

$$[B] = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{I_T} [\bar{Q}]_i \cdot (h_i^2 - h_{i-1}^2) \quad (51)$$

$$[D] = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{I_T} [\bar{Q}]_i \cdot (h_i^3 - h_{i-1}^3) \quad (52)$$

Una vez obtenidas las expresiones paramétricas, se expresan de forma matricial con una matriz de vector columna con los esfuerzos y momentos igualadas al producto de la matriz vector columna de deformaciones y curvaturas con la matriz ABBD.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon \\ c \end{bmatrix} \quad (53)$$

La matriz ABBD se emplea para calcular las deformaciones y esfuerzos a lo largo de cualquier dirección en el laminado, en función de las deformaciones y esfuerzos aplicados en la dirección principal del material. También se utiliza para la relación entre la fuerza y el desplazamiento, ya que esta matriz incluye la información sobre las propiedades elásticas del material y su geometría.

La teoría clásica de laminado es una herramienta útil para predecir el comportamiento de los materiales compuestos laminados y se basa en la combinación de las propiedades elásticas de las capas individuales y su orientación dentro del laminado. La matriz ABBD es un componente clave de esta teoría y permite la relación entre las deformaciones y esfuerzos en cualquier dirección dentro del laminado. La matriz ABD también se utiliza para la relación entre la fuerza y el desplazamiento.

3.7.5.1 Criterios de fallo de la teoría clásica de laminado.

La teoría clásica de laminado es utilizada para analizar y diseñar estructuras laminadas compuestas. Algunos de los criterios de fallo utilizados en la teoría clásica de laminado incluyen:

- Criterio de Tsai-Hill: Se basa en la teoría de la máxima tensión de Von Mises y utiliza una combinación lineal de las tensiones en la dirección longitudinal y transversal del laminado.
- Criterio de Tsai-Wu: También se basa en la teoría de la máxima tensión de Von Mises y utiliza una combinación no lineal de las tensiones en la dirección longitudinal y transversal del laminado.
- Criterio de Hashin: Utiliza la teoría de la fuerza de la matriz y considera la tensión de la matriz y la tensión de las fibras para predecir el fallo del laminado.
- Criterio de Puck: Este criterio de fallo se basa en la teoría de la energía de deformación y utiliza la energía de deformación específica del laminado para predecir el fallo.

3.7.5.2 Criterio de fallo Tsai Hill.

El criterio de fallo de Tsai-Hill es un método utilizado en la mecánica de materiales para determinar el punto de fallo de un material compuesto, que está formado por múltiples capas de diferentes materiales

dispuestos en una dirección específica. Dicho criterio se basa en la teoría de la máxima tensión y se utiliza para calcular la tensión máxima que puede soportar un material compuesto antes de sufrir una falla.

Establece que el material compuesto fallará cuando la combinación lineal de las tensiones principales supere un valor crítico conocido como la tensión de fallo. Esta se determina mediante una ecuación que tiene en cuenta las propiedades elásticas y de resistencia a la tracción de los materiales que componen el material compuesto.

Una vez que se tienen los valores de resistencia del material compuesto, es necesario calcular los factores de Tsai-Hill, los cuales son funciones de los valores de resistencia y del estado de esfuerzos. Los factores de Tsai-Hill se calculan mediante la siguiente ecuación

$$F = \frac{1}{\sqrt{(\sigma_1/\sigma_{T1})^2 - (\sigma_1/\sigma_{T1}) \cdot (\sigma_2/\sigma_{T2}) + (\sigma_2/\sigma_{T2})^2 + (\tau_{12}/\tau_{T12})^2}} \quad (54)$$

donde F es el factor de seguridad de Tsai-Hill, σ_1 y σ_2 son las tensiones principales que actúan en dos direcciones perpendiculares en un plano, τ_{12} es la tensión de corte que actúa en el plano y σ_{T1} , σ_{T2} y τ_{T12} son las resistencias máximas del material a tracción.

3.7.6 Laminado isotrópico

El laminado isotrópico en materiales compuestos es aquel en el que todas las capas de la lámina tienen las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones. Esto significa que la resistencia y rigidez del material no varían según la dirección en la que se aplique la fuerza. Para lograr este tipo de laminado, se deben utilizar fibras que tengan una distribución uniforme en todas las direcciones, lo que se logra mediante técnicas especiales de fabricación. Debido a su homogeneidad, los laminados isotrópicos son ideales para aplicaciones en las que se requiere una resistencia y rigidez uniformes en todas las direcciones, como en la fabricación de piezas estructurales de alta presión, es por ello por lo que se empleará un laminado isotrópico con una orientación de las láminas de $[0,45,-45,90]$ (Figura 3-22).

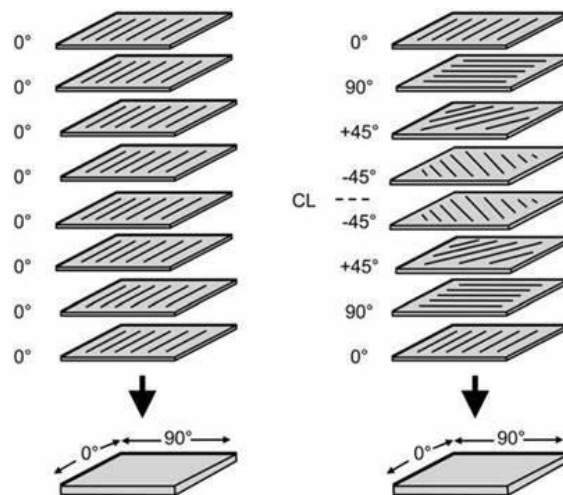


Figura 3-22 Laminado unidireccional e isotrópico [64].

Empleando el programa de análisis ELAMX2 se pretende obtener el comportamiento mecánico de una lámina obtenida a partir de los materiales escogidos en las Secciones 3.7.2 y 3.7.3. Para ello, se crean los materiales con las propiedades mecánicas reflejadas en ellos, a partir de la creación de la fibra y de la matriz se obtiene el material compuesto, obtenido mediante el modelo de Chamis donde se establecen sus propiedades como aparece en la Tabla 3-10.

A continuación, una vez creado el material compuesto se establecen los esfuerzos a los que estará sometido el material compuesto obtenidos en la Sección 3.5 reflejándose en el programa como en la Figura 3-23.

Force Calculation		nm _{mech.}
☒ n_x	=	8750.0
☒ n_y	=	17500.0
☒ n_{xy}	=	0.0
☒ m_x	=	0.0
☒ m_y	=	0.0
☒ m_{xy}	=	0.0

Figura 3-23 Esfuerzos a los que se somete el material compuesto.

Establecidos los esfuerzos tensionales axial y longitudinal, se procede a poner tantas láminas de material compuesto como sea necesario para soportar los esfuerzos tensionales, consiguiendo de esta manera el número de capas/láminas mínimo, así como el espesor mínimo requerido para soportar dichos esfuerzos.

Se consigue obtener un laminado isotrópico compuesto por un total de 272 capas/láminas de un espesor de 0,2 mm de espesor cada una consiguiendo un espesor total de 54,4 mm siendo similar al obtenido para materiales anteriormente usados como acero al carbono SA 106C, pero con mejores propiedades, permitiendo diseños de depósitos con un diámetro mayor y un mayor volumen de almacenamiento a posteriori.

En la Figura 3-24 representa la variación y el valor de algunos módulos en función del ángulo, la geometría de esta representación es representativa de la isotropía del laminado, como se puede observar permanece constante los valores de las constantes independientemente de la orientación de la lámina al tratarse de un laminado simétrico, si se hubiese escogido un laminado no simétricos estas constantes variarían y serían de distinto valor en función de su ángulo de orientación, teniendo de esta forma un comportamiento anisotrópico. Estas constantes se refieren a:

- A11: Módulo longitudinal.
- A22: Módulo transversal.
- A66: Módulo cortante.
- A12: Módulo de Poisson.

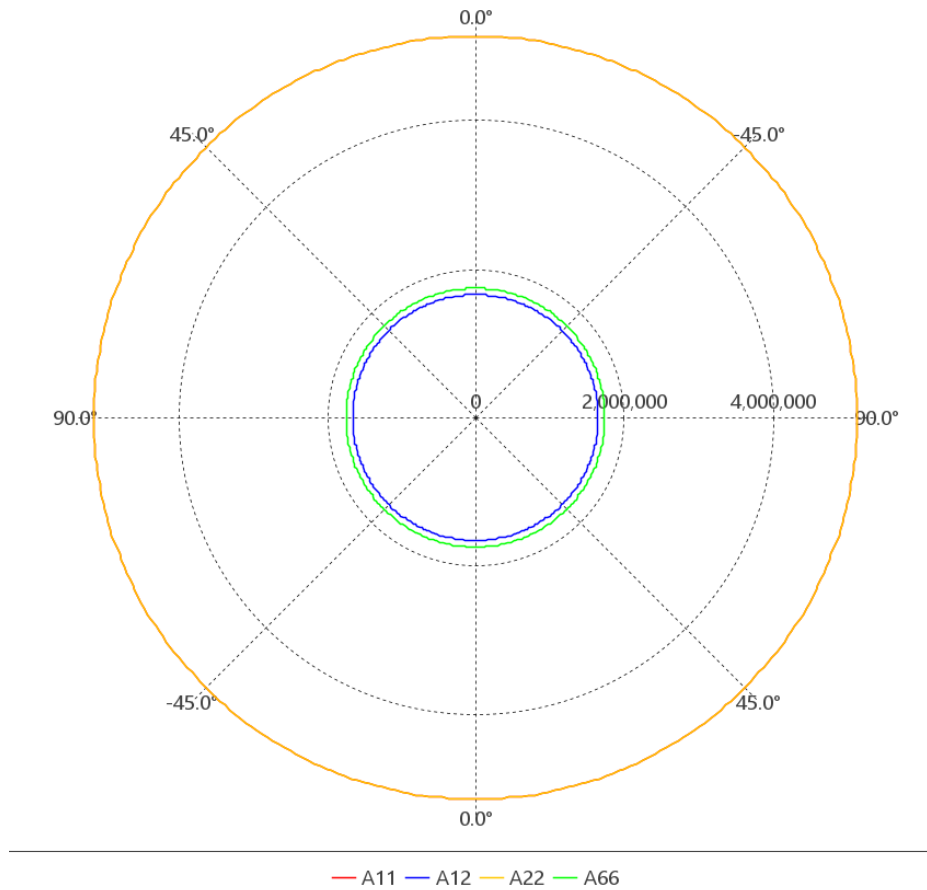


Figura 3-24 Representación gráfico polar laminado isotrópico.

Una vez obtenido el diagrama polar, haber establecido los esfuerzos y momentos a los que están sometidas las láminas del material compuesto, mediante la teoría clásica del laminado se obtiene la matriz ABBD explicada en la Sección 3.7.5 (Figura 3-25). Aparece representada de color rojo la matriz A, de verde las matrices B y de azul la matriz D, destacar que el valor de la matriz B es igual a 0 en todas las orientaciones de la fibra ya que se trata un laminado simétrico lo que facilita los cálculos.

ABD-Matrix								
5124725.5	1650573.9	0.0	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	-0.0
1650573.9	5124725.5	0.0	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	-0.0
0.0	0.0	1737075.8	-0.0	-0.0	0.0	-0.0	-0.0	0.0
0.0	0.0	-0.0	2005051043.1	281493126.5	28411671.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	-0.0	281493126.5	773721066.3	28411671.0	0.0	0.0	0.0
-0.0	-0.0	0.0	28411671.0	28411671.0	302825649.4	0.0	0.0	0.0

Figura 3-25 Matriz de esfuerzos y deformaciones laminado isotrópico.

Por último, se observan las tensiones que soportará cada lámina según su orientación, se pueden observar los coeficientes de seguridad según su orientación y se puede observar como las láminas orientadas a 0° son las que están sometidas a un mayor esfuerzo transversal y, por lo tanto, las fibras que

menos coeficiente de seguridad tienen, condicionando el número total de láminas empleadas para que sean capaces de soportarse estos esfuerzos (Figura 3-26).

Layer information in local UD coordinate system									
☒ show stresses ☐ show strains									
No.	Name	Angle	$z_{m,i}$	z_i	$\sigma_{ }$	$\sigma_{\perp}$	$\tau_{ \perp}$	Failure Criteria	$R_{F_{min}}$
1	New Layer	0.0	27.1	27.2	166.732	44.242	0.0	Tsai-Hill	1.033
				27.0	166.732	44.242	0.0	Tsai-Hill	1.033
2	New Layer	45.0	26.9	27.0	450.14	32.396	13.219	Tsai-Hill	1.226
				26.8	450.14	32.396	13.219	Tsai-Hill	1.226
3	New Layer	-45.0	26.7	26.8	450.14	32.396	-13.219	Tsai-Hill	1.226
				26.6	450.14	32.396	-13.219	Tsai-Hill	1.226
4	New Layer	90.0	26.5	26.6	733.548	20.55	-0.0	Tsai-Hill	1.52
				26.4	733.548	20.55	-0.0	Tsai-Hill	1.52

Figura 3-26 Tensiones laminado isotrópico según su orientación.

3.7.7 Laminado optimizado con programa ELAMX2

El software empleado presenta una función que permite realizar los cálculos realizados con anterioridad de manera optimizada, permitiendo obtener con el menor número de capas/láminas y con la orientación de las fibras de la manera óptima que permita repartir los esfuerzos de la manera más equitativa posible, haciendo que independientemente de la orientación de las fibras, estos soportes esfuerzos iguales o similares.

Para este caso se establecen los esfuerzos axiales y longitudinales calculados en la Sección 3.5, y se ponen de condiciones que el laminado sea simétrico y permita un paso de 5° de orientación entre las fibras, con estos datos el programa optimiza los cálculos y estudia que orientación de fibras es óptima y permite alcanzar la presión de diseño con el menor número de capas (Figura 3-27).

Figura 3-27 Datos previos de laminado optimizado.

A partir de los datos previos introducidos para la optimización del laminado, se deben introducir dos conceptos, el primero son los valores de los esfuerzos axiales y circunferenciales que empleamos para los cálculos, y el segundo, se especifica que es para un equipo a presión, dónde se ponen los valores del radio interno (se estima un radio de 250 mm) y la presión que va a soportar el equipo (70MPa).

El resultado obtenido consta de un total de 38 capas/láminas de un espesor de 1 mm, este espesor se escoge ya que el programa SOLIDWORKS solo permite diseñar materiales compuestos con un máximo de 50 capas. Permitiendo reducir de esta manera el espesor a 38 mm consiguiendo una gran optimización de material y de espesor. A continuación, se establece su respectivo diagrama polar (Figura 3-28) que permite ver el valor de las constantes según el ángulo de orientación.

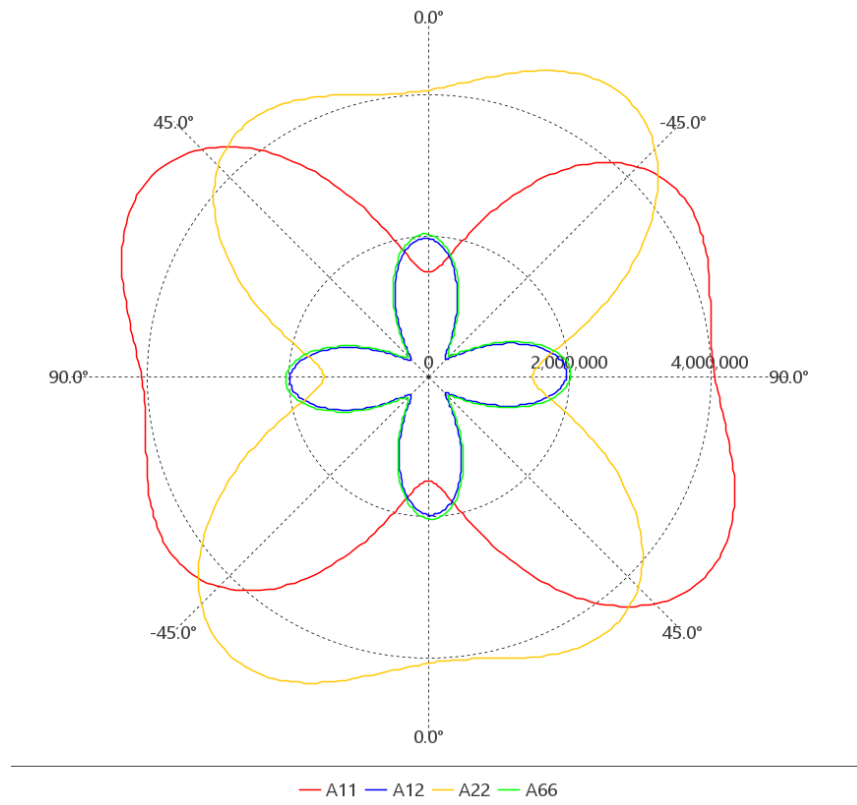


Figura 3-28 Representación gráfico polar laminado anisotrópico.

En la representación polar del laminado anisotrópico optimizado se permite observar las diferencias con respecto al laminado isotrópico, adquiere en cierta manera una forma simétrica en ambos módulos, longitudinal y transversal. En la Figura 3-30 se pueden observar las orientaciones de las diez primeras capas, así como los valores de las tensiones en cada lámina y el coeficiente de seguridad.

Observando con más detenimiento la Figura 3-28, se puede apreciar como los esfuerzos obtenidos, a diferencia del laminado isotrópico, están repartidos de una manera más similar, soportando tensiones muy similares y optimizando de esta manera, tener que estar condicionado el material compuesto por una determinada orientación de fibra que tenga un coeficiente de seguridad menor, en este caso, al estar mucho más optimizado y equilibrado, se consigue que los coeficientes de seguridad sean muy parejos independientemente de su orientación.

De igual manera que en el laminado isotrópico, obtenido el diagrama polar, se han establecido los esfuerzos-momentos a los que se somete y el número de capas utilizadas. Se obtiene la matriz *ABBD* explicada en la Sección 3.7.5 con los valores de la matriz de *A* en rojo, las matrices *B* en verde y en azul la matriz *D* (Figura 3-29).

ABD-Matrix								
1482812.8	1957514.6	4270.9	0.0	-0.0	0.0	A	B	D
1957514.6	4067649.8	169182.6	-0.0	-0.0	0.0			
4270.9	169182.6	2017938.8	0.0	0.0	-0.0			
0.0	-0.0	0.0	182163547.3	236833102.9	39714173.4	B	D	
-0.0	-0.0	0.0	236833102.9	483184435.9	107073464.0			
0.0	0.0	-0.0	39714173.4	107073464.0	244104139.2			

Figura 3-29 Matriz de esfuerzos y deformaciones laminado optimizado.

Una vez obtenido el diagrama polar, haber establecido los esfuerzos y momentos a los que están sometidas las láminas del material compuesto, mediante la teoría clásica del laminado se obtiene la matriz ABBD explicada en la Sección 3.7.5. Aparece representada de color rojo la matriz A, de verde las matrices B y de azul la matriz D, destacar que el valor de la matriz B es igual a 0 en todas las orientaciones de la fibra ya que se trata un laminado simétrico lo que facilita los cálculos.

No.	...	Angle	$z_{m,i}$	z_i	$\sigma_{ }$	$\sigma_{\perp}$	$\tau_{ \perp}$	Failure C...	RF_{min}
1		-50.0	18.5	19.0	641.074	34.088	-17.724	Tsai-Hill	1.069
				18.0	641.074	34.088	-17.724	Tsai-Hill	1.069
2		55.0	17.5	18.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
				17.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
3		55.0	16.5	17.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
				16.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
4		55.0	15.5	16.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
				15.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
5		55.0	14.5	15.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
				14.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
6		55.0	13.5	14.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
				13.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
7		-50.0	12.5	13.0	641.074	34.088	-17.724	Tsai-Hill	1.069
				12.0	641.074	34.088	-17.724	Tsai-Hill	1.069
8		-55.0	11.5	12.0	705.451	31.397	-16.596	Tsai-Hill	1.11
				11.0	705.451	31.397	-16.596	Tsai-Hill	1.11
9		55.0	10.5	11.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
				10.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
10		55.0	9.5	10.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064
				9.0	633.435	34.407	17.819	Tsai-Hill	1.064

Figura 3-30 Tensiones laminado anisotrópico según su orientación.

Una vez ya ha sido realizado el laminado optimizado con el programa ELAMX2, se ha conseguido optimizar el número de capas necesarias para la fabricación del depósito en función de una orientación más optima y, además, reducir el espesor de las paredes del tanque (Figura 3-30). Por último, el software ELAMX2 permite obtener las constantes ingenieriles del material compuesto diseñado siendo su valor las reflejadas en la Tabla 3-11.

LAMINADO OPTIMIZADO ANISOTRÓPICO

E_x (MPa)	39021,40
E_y (MPa)	107043,40
E_z (MPa)	107043,40
ν_{xy} (adimensional)	0,48
ν_{xz} (adimensional)	0,18
G_{xy} (MPa)	53103,70

Tabla 3-11 Constantes ingenieriles de laminado anisotrópico.

4 DISEÑO Y MODELADO DEL DEPÓSITO

4.1 Introducción

Se realiza el diseño y modelado de depósitos de hidrógeno a presión utilizando dos materiales diferentes. En concreto, se diseñarán dos depósitos, uno de acero-carbono SA 106 C y otro de material compuesto de fibra de carbono-epoxi al 60 %. Ambos depósitos se someterán a un análisis de esfuerzos para determinar su capacidad para almacenar hidrógeno a alta presión de forma segura y eficiente. Se tendrán en cuenta factores como la resistencia mecánica, la rigidez, la durabilidad y la estabilidad térmica para garantizar que ambos diseños sean adecuados para su uso en aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno a alta presión. Se tiene como objetivo contribuir al desarrollo de tecnologías de almacenamiento de hidrógeno que sean seguras, eficientes y sostenibles.

4.2 Diseño del depósito

4.2.1 Diseño depósito de acero-carbono SA 106 C

El diseño de un depósito a presión con acero carbono A106 grado C utilizando el programa Autodesk Inventor es un proceso que involucra la creación de un modelo en 3D del depósito, con una representación detallada de sus características geométricas y materiales. A su vez, se pueden utilizar herramientas para especificar las propiedades del material, como la densidad, la resistencia a la tracción, límite elástico, esfuerzo máximo admisible, así como también definir las condiciones de carga y presión. Además, el programa permite realizar simulaciones para evaluar la seguridad del diseño y asegurarse de que cumpla con los estándares y regulaciones de seguridad requeridos. La combinación de herramientas de modelado, simulación y análisis de Inventor permite al crear un diseño de alta calidad y confiabilidad para un depósito a presión con acero al carbono A106 grado C (Figura 4-1).

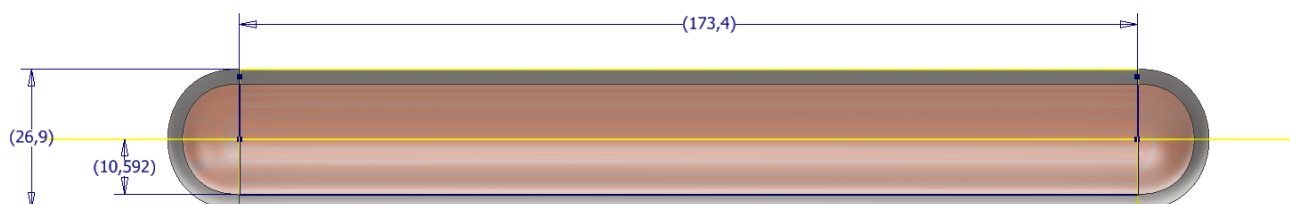


Figura 4-1 Dimensiones calculadas para depósito acero-carbono SA 106 Grado C.

Para el diseño inicial del depósito se establece el radio interior calculado para el acero al carbono A106-C y se establece una longitud del total de 2 metros, ya que el espacio en las lanchas de instrucción

RODMAN 66 se encuentra muy ajustado, teniendo una altura disponible de 2,02 metros, un ancho de 1,18 metros y 2,03 metros de fondo. Además, se aplica sobre el cilindro una superficie de contorno que permite crear una superficie 3D dentro de un contorno cerrado especificado (Figura 4-2). De igual manera se realiza este proceso para los cabezales esféricos, obteniendo la superficie de contorno del depósito.

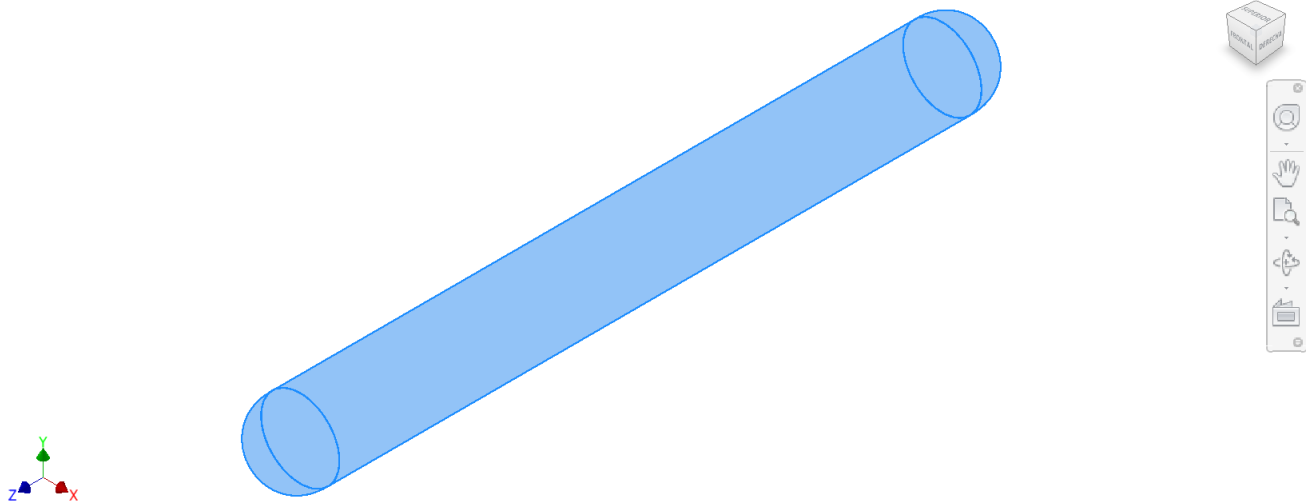


Figura 4-2 Superficie de contorno del depósito.

El proceso de diseño de una tubería con acero al carbono A106 grado C incluye la identificación y definición de la superficie de contorno que se desea alcanzar. Una vez establecida la superficie de contorno, es necesario aplicar un engrosado en la tubería con un espesor calculado previamente (en este caso, SCH 160). Este engrosado es necesario para aumentar la resistencia y robustez de la tubería, y se aplica hacia el exterior de esta para no interferir en el diámetro interior previamente definido (Figura 4-3). Además, al aplicar el engrosado hacia el exterior se garantiza que la superficie de contorno siga siendo la del diámetro interior, sin alterar las características originales de la tubería. Es importante tener en cuenta que el engrosado no solo afecta al diámetro exterior, sino que también afecta al peso y al volumen de la tubería.

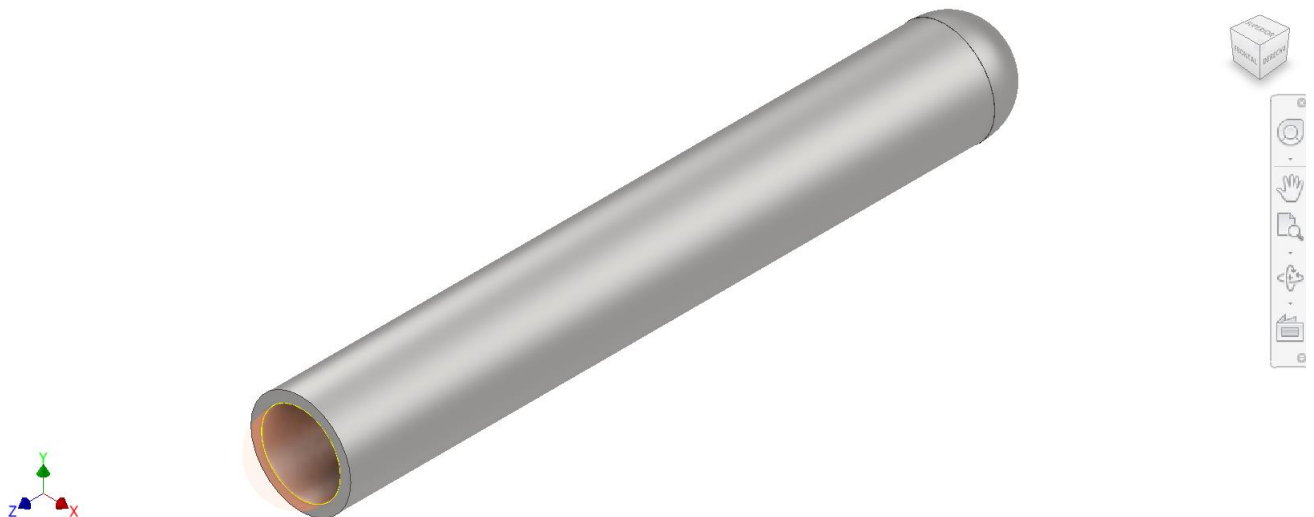


Figura 4-3 Engrosado de la superficie de contorno.

Conociendo la forma y el diseño del depósito, se diseñan los soportes de los depósitos que serán empleados para su estiba posterior en las lanchas de instrucción y servirán de fijaciones para el posterior análisis de esfuerzos y deformaciones del depósito. Su diseño es el de Figura 4-4.

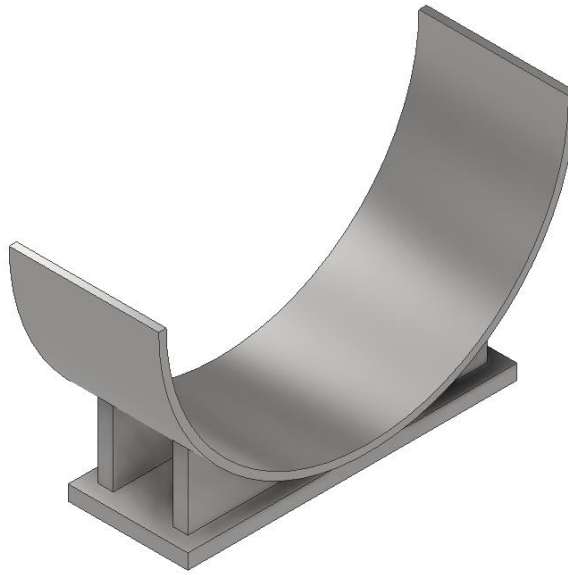


Figura 4-4 Diseño soporte depósito SA 106 C.

4.2.2 Diseño depósito material compuesto fibra de carbono-epoxi

En el diseño del depósito a presión de material compuesto fibra de carbono-epoxi al 60 % se emplea, a diferencia del modelo acero-carbono, el programa SOLIDWORKS. El cambio de programa de un modelo a otro es debido a que Autodesk Inventor no permite empleo de material compuesto para el diseño del depósito.

Es a partir de SOLIDWORKS donde comienza el diseño del depósito a partir de los datos obtenidos en la Sección 3.7.4. Mediante el programa ELAMX2. Es muy útil para agilizar el diseño del depósito, permitiendo un diseño óptimo con una orientación de láminas que permita un reparto equitativo de los esfuerzos a los que se somete. Se combinan herramientas para diseño, modelado, simulación y análisis que permite realizar un estudio del comportamiento del depósito sometido a los esfuerzos especificados.

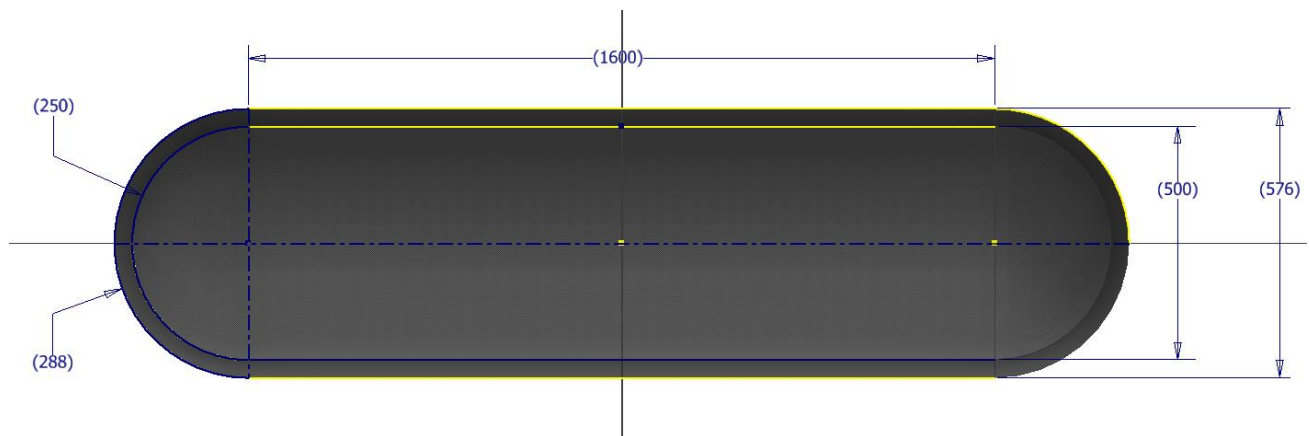


Figura 4-5 Dimensiones calculadas para depósito material compuesto fibra de carbono-epoxi al 60 %.

Se diseña el depósito con un radio interior de 250 milímetros y una longitud de 2 metros, debido a la limitación de espacio que supone su diseño para las embarcaciones RODMAN 66 (Figura 4-6 y Figura 4-7). Obteniéndose el siguiente diseño.

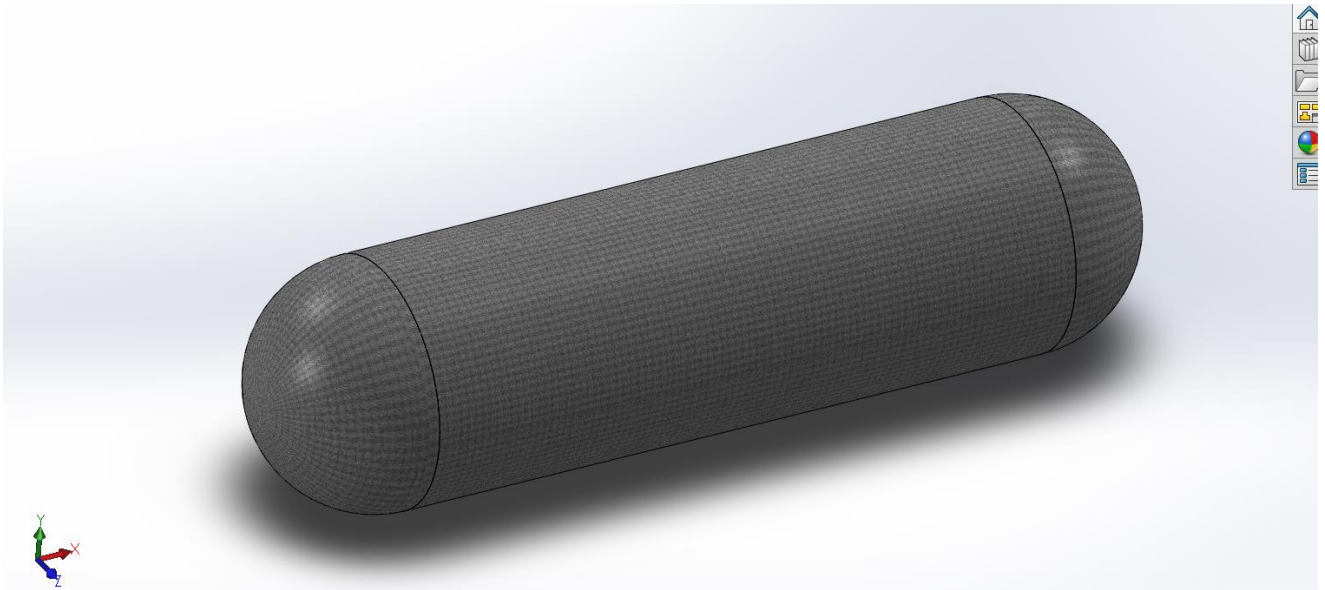


Figura 4-6 Perspectiva modelado depósito material compuesto.

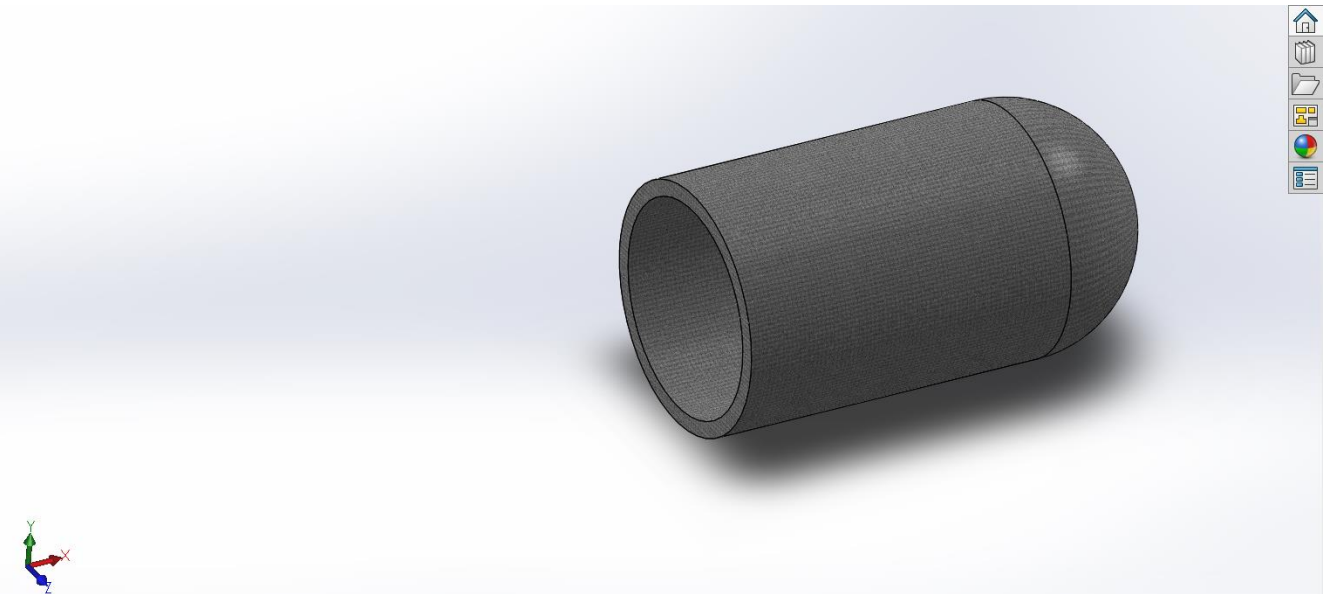


Figura 4-7 Perspectiva depósito material compuesto con corte transversal.

Finalmente, únicamente quedaría el diseño de los soportes del depósito y el ensamblaje de estos, los soportes son necesarios para el posterior análisis de esfuerzos que se realiza en la Sección 4.3.2 . Los dos soportes empleados tienen el siguiente modelado (Figura 4-8).



Figura 4-8 Perspectiva soporte del depósito-

Ya realizado tanto el modelado del depósito como de los dos soportes, se procede al ensamblaje de estos de tal manera que permita posteriormente pasar al análisis de esfuerzos (Figura 4-9). Finalmente, el ensamblaje quedaría de la siguiente manera.

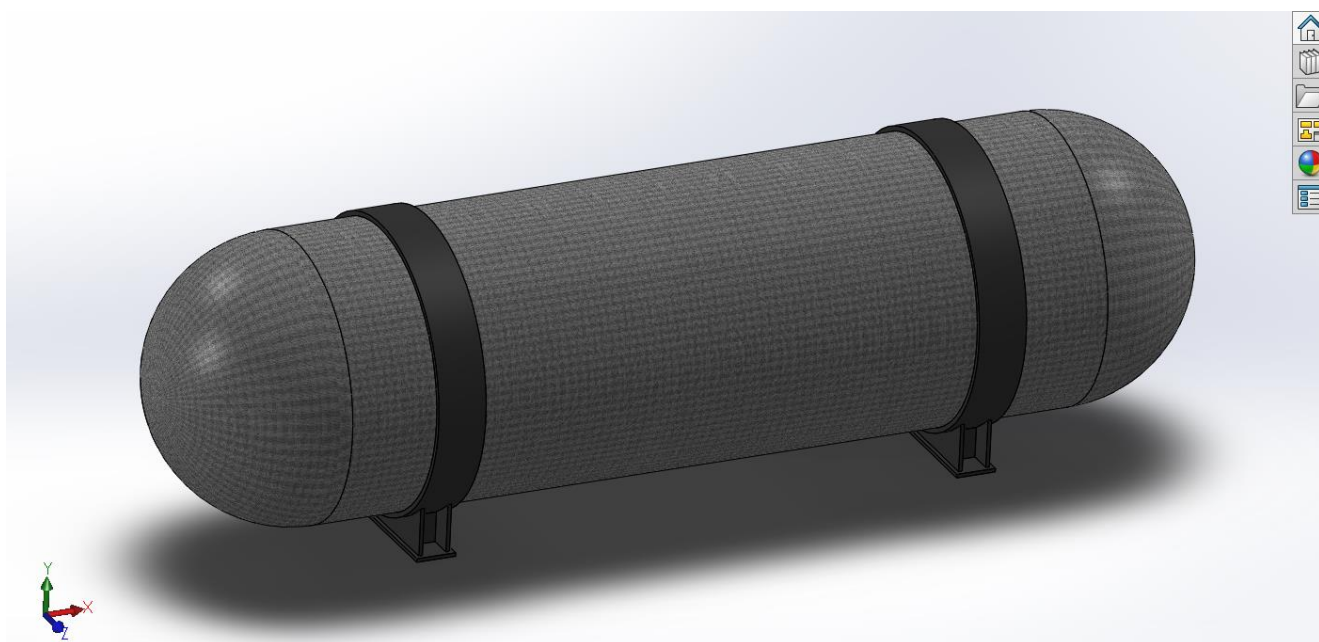


Figura 4-9 Perspectiva ensamblaje depósito de material compuesto.

4.3 Simulación mediante FEM

4.3.1 Análisis en acero-carbono SA 106 C

Una vez completado el proceso de engrosado en la carcasa cilíndrica y en los cabezales esféricos del depósito, se lleva a cabo un análisis de tensiones para evaluar la seguridad y confiabilidad del diseño. Para realizar este análisis, se requieren dos operaciones previas (Figura 4-10). La primera consiste en establecer una restricción fija en el depósito, lo cual se logra mediante el uso de los dos soportes diseñados previos al ensamblaje colocándoles las restricciones fijas. Estos soportes no serán considerados en la simulación de la presión dentro del depósito como se verá en la simulación.



Figura 4-10 Restricción y presión aplicadas sobre el depósito.

La segunda operación implica establecer la presión interior en el depósito en un valor de 30 MPa como aparece en la Figura 4-10. Una vez establecidos estos puntos, se puede llevar a cabo el análisis de tensiones, utilizando herramientas de simulación y análisis para evaluar la distribución de tensiones y deformaciones en el depósito bajo diferentes condiciones de presión. El resultado de este análisis proporcionará información valiosa sobre la seguridad y confiabilidad del diseño, realizar ajustes necesarios para garantizar la integridad estructural del depósito a presión.

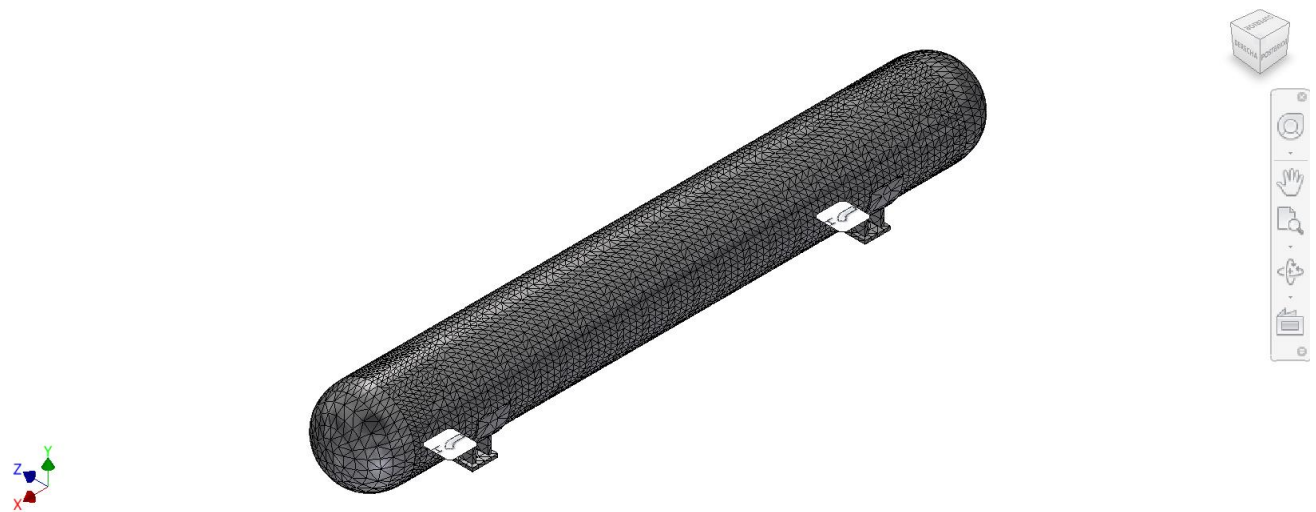


Figura 4-11 Definición de mallado de 2cm.

Finalmente, se realiza el mallado del depósito creando tres mallas locales, siendo la malla local del cilindro de 2 cm, la malla de los cabezales de 4 cm y la malla de los soportes de 5 cm. La malla será más precisa en las paredes del cilindro debido a que es la parte del depósito que estará sometida a mayores esfuerzos, como se puede ver en la Figura 4-12. En los cabezales la presión tiene mejor comportamiento debido a la curvatura de esta y los soportes no estarán sometidos a presión debido a que únicamente se emplean como elemento de sujeción. Definida la malla se procede a la simulación de esfuerzos donde se obtienen, entre otras, la tensión de Von Mises y el coeficiente de seguridad (Figura 4-12).

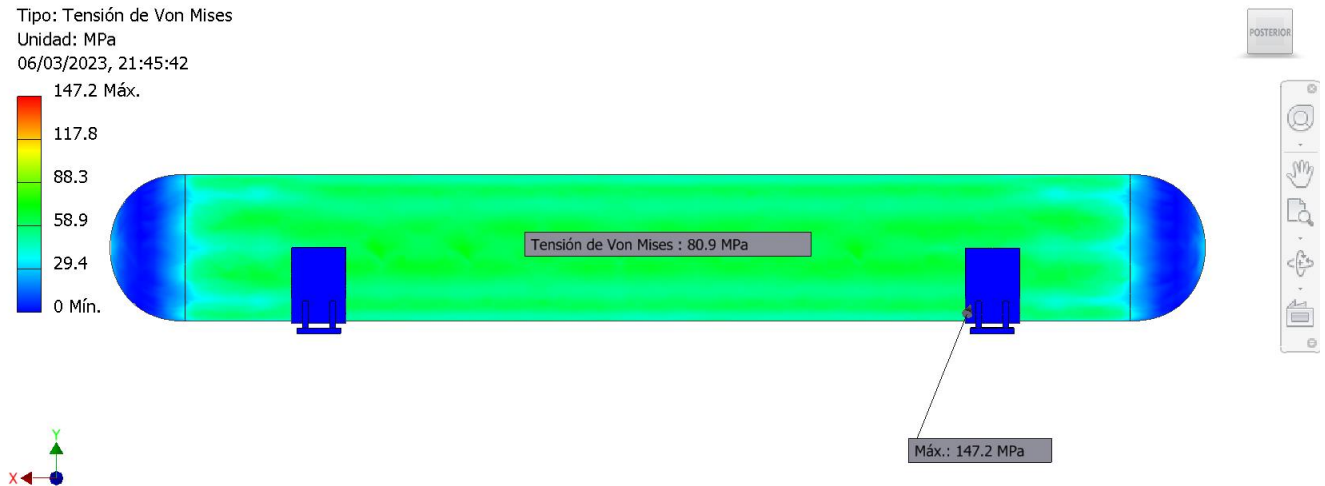


Figura 4-12 Máxima tensión de Von Mises depósito SA 106 C.

En cuanto a la máxima tensión aparece en el punto indicado en Figura 4-12 con un valor de 150 MPa, este valor es producido en los apoyos de los soportes con el depósito, siendo la parte del depósito sometida a mayores esfuerzos. En la Figura 4-13 se puede observar el coeficiente de seguridad las paredes del cilindro, teniendo un coeficiente de seguridad superior a 3 en toda la pared del cilindro. Y de un coeficiente de seguridad de 2 en el apoyo de los soportes, aunque no serán los soportes empleados finalmente para la disposición de los depósitos en el compartimento de combustible de la embarcación.



Figura 4-13 Coeficiente seguridad depósito SA 106 C.

4.3.2 *Análisis en material compuesto fibra carbono-epoxi 60 %*

Para el análisis del depósito es necesario establecer previamente variables como las propiedades del material. Donde se especificará que se trata de un modelo ortotrópico elástico lineal y que el criterio de fallo vendrá determinado por la máxima tensión de Von Mises (Figura 4-14). Se introducirán todos los datos obtenidos en la Tabla 3-10..

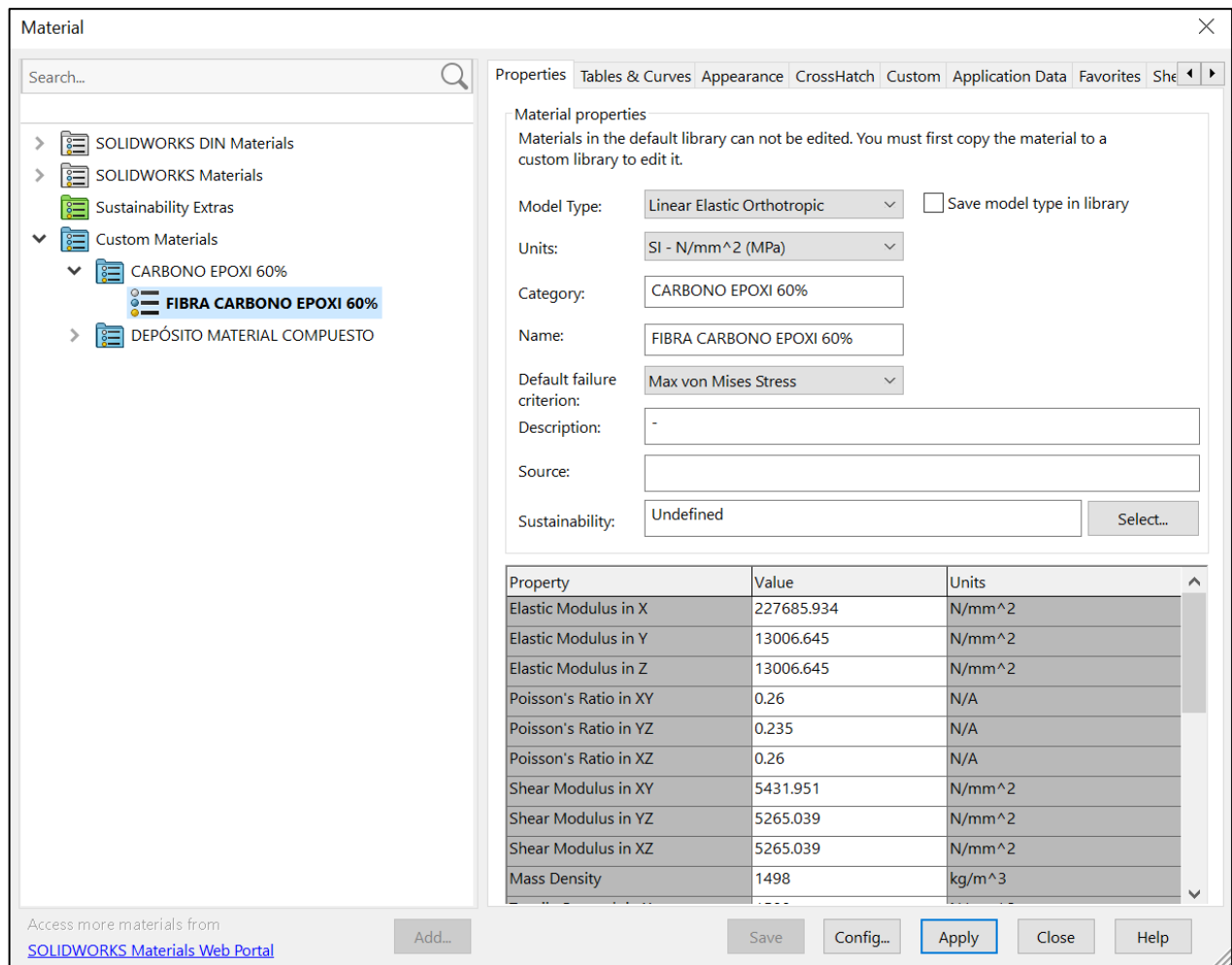


Figura 4-14 Definición propiedades mecánicas material compuesto.

Ya establecidas las propiedades mecánicas del material compuesto, se procede a definir cada una de las láminas y se les asigna el material, el espesor y la orientación correspondiente de cada una de ellas. Para ello se selecciona la opción “Shell Definition” que permite añadir las características mencionadas. El laminado tiene una secuencia $[-50/55_5/-50/-55/55_3/-55_2/55/-55_3/55/-50]_S$ donde los subíndices son el número de láminas con misma orientación (Figura 4-15).

En la ventana que aparece en la Figura 4-15 se selecciona la orientación, espesor y material de las primeras 19 láminas y al seleccionar la opción “Symetric” se aplica la simetría sobre las 19 capas, obteniendo las 38 capas finales y con la condición de que sea un laminado simétrico. Otras condiciones establecidas son que el material sea el mismo para todas las láminas, en este caso “Fibra carbono-epoxi 60 %”, y que el ángulo 0° sea de referencia para la orientación de las láminas ya que de forma predeterminada escoge la orientación de la primera lámina como referencia para el resto.

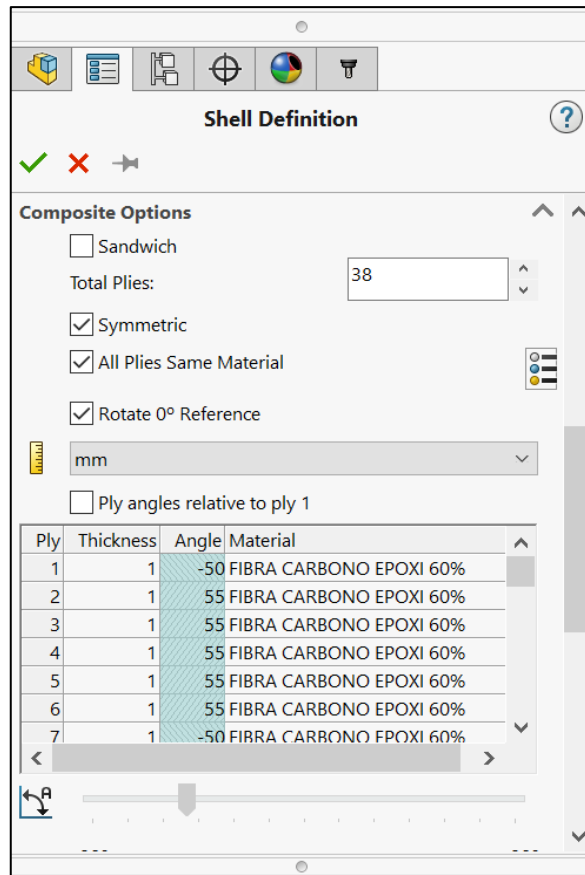


Figura 4-15 Definición del laminado del material compuesto.

Además, se deberá aclarar la equidistancia del espesor total desde la superficie de referencia (Figura 4-16).

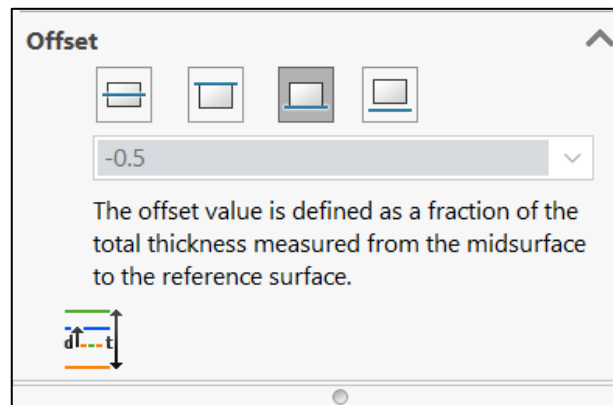


Figura 4-16 Definición de equidistancia del material compuesto.

Ya introducidos los datos y condiciones necesarias para la definición de cada una de las capas, se puede observar cómo quedaría depósito, donde a la izquierda es la superficie sobre la que se van a analizar los comportamientos y esfuerzos, y a la derecha la forma real del depósito junto con sus soportes como se observa en la Figura 4-17.

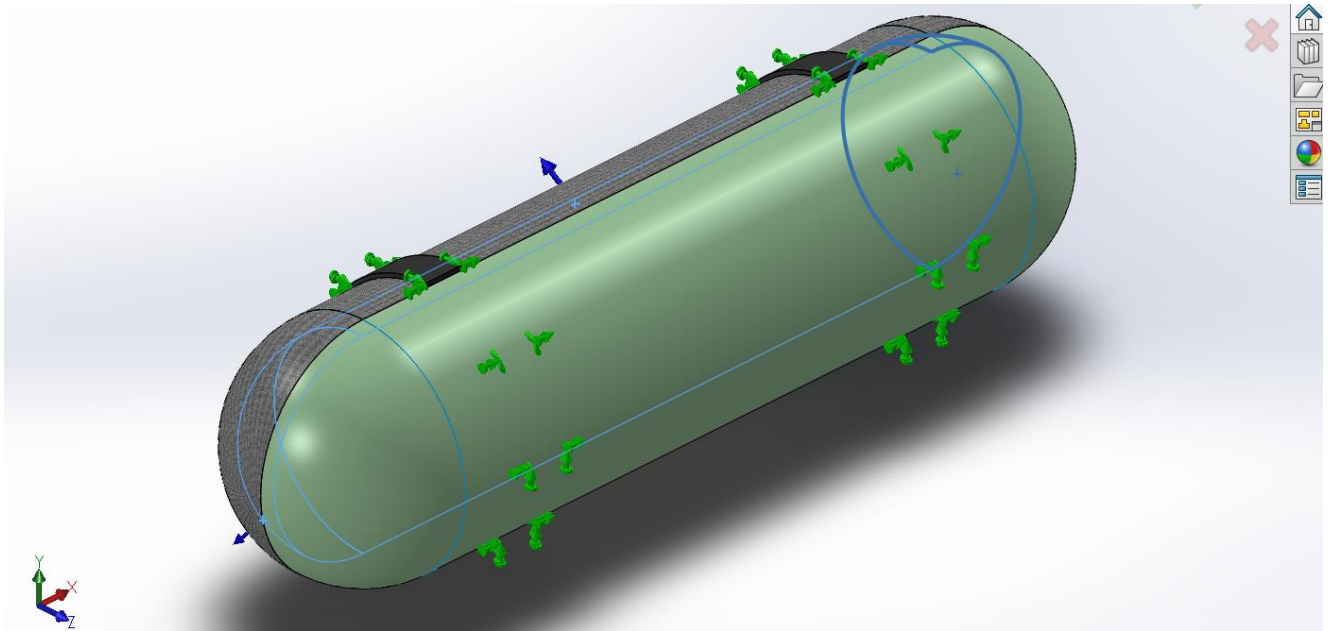


Figura 4-17 Representación gráfica de las capas a analizar con SOLIDWORKS.

Ya definida la superficie que será la estudiada ante la aplicación de esfuerzos y deformaciones, se comenzará con la simulación. Para ello se creará un estudio donde se deberán especificar las cargas a las que se somete el depósito, así como las restricciones fijas en los soportes necesarias para realizar el análisis.

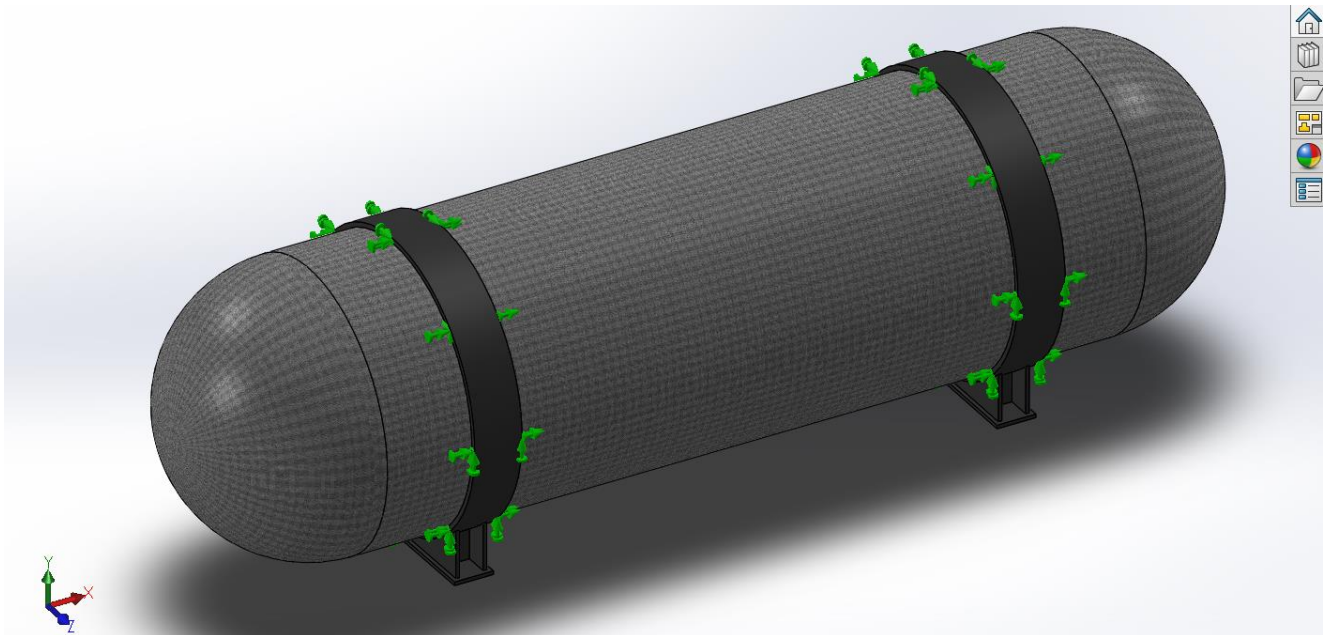


Figura 4-18 Asignación restricciones fijas depósito.

Establecidas las restricciones fijas en los soportes, se procede a definir los esfuerzos en las paredes internas del depósito dándoles un valor de 70 MPa. Quedando la distribución de las fuerzas como en la Figura 4-19.

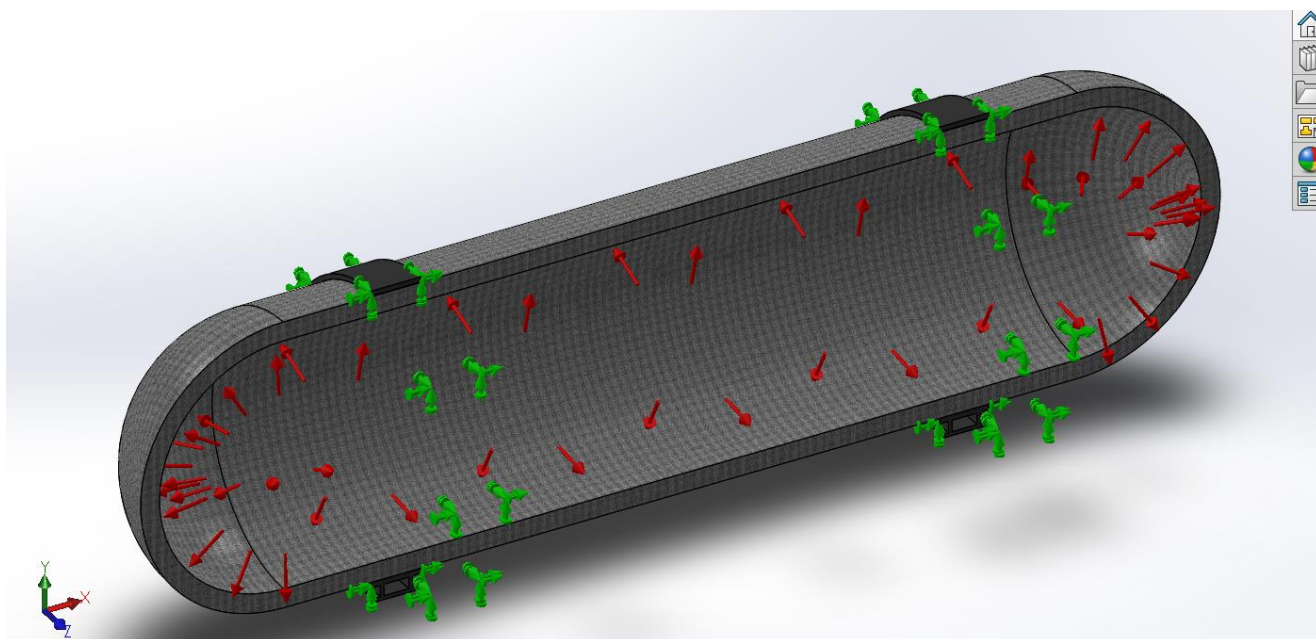


Figura 4-19 definición de esfuerzos y presión en depósito.

El último paso previo a la simulación de esfuerzos y deformaciones es definir el mallado, en este caso se define el mallado interior ya que será el que esté sometido a una mayor presión y pueda sufrir una mayor deformación (Figura 4-20). Una vez aplicado el mallado, el depósito quedaría de la siguiente manera:

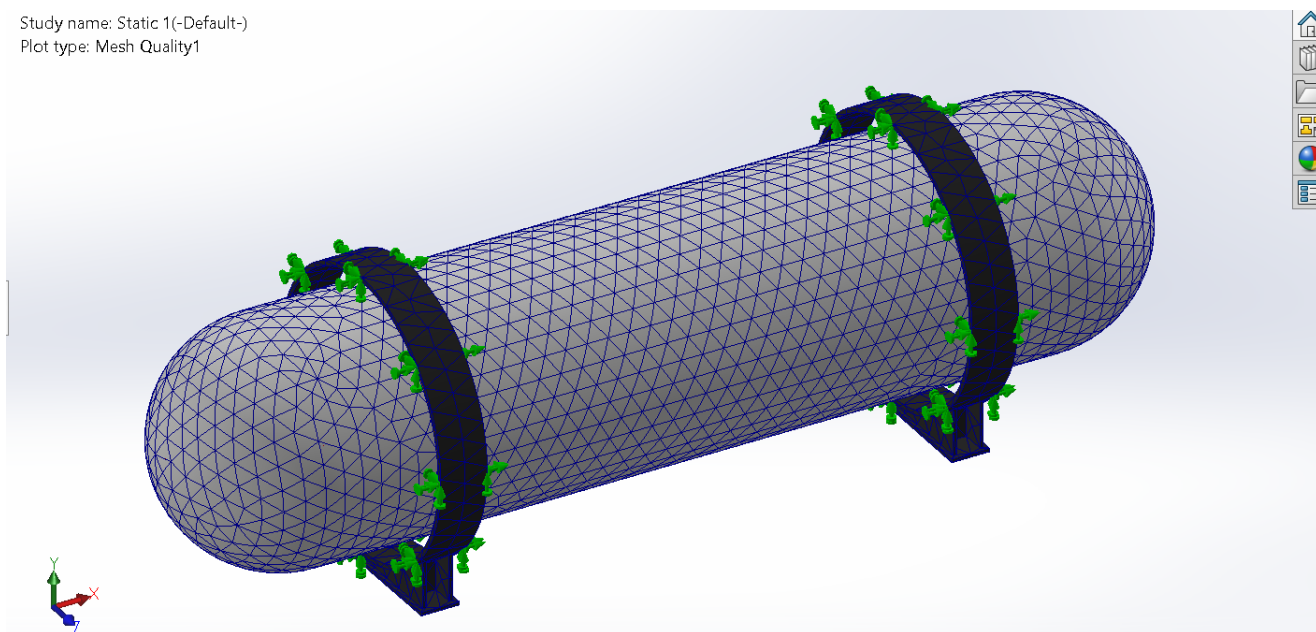


Figura 4-20 Definición mallado del depósito.

Se procede finalmente a la simulación de la superficie generada con el fin de observar el comportamiento del depósito ante unos esfuerzos tan elevados. Se realizará un estudio de la tensión de Von Mises para una única capa y otro para las 38 capas apiladas, pudiendo diferenciar el comportamiento del material compuesto y donde se encuentran las tensiones máximas para cada caso (Figura 4-21).

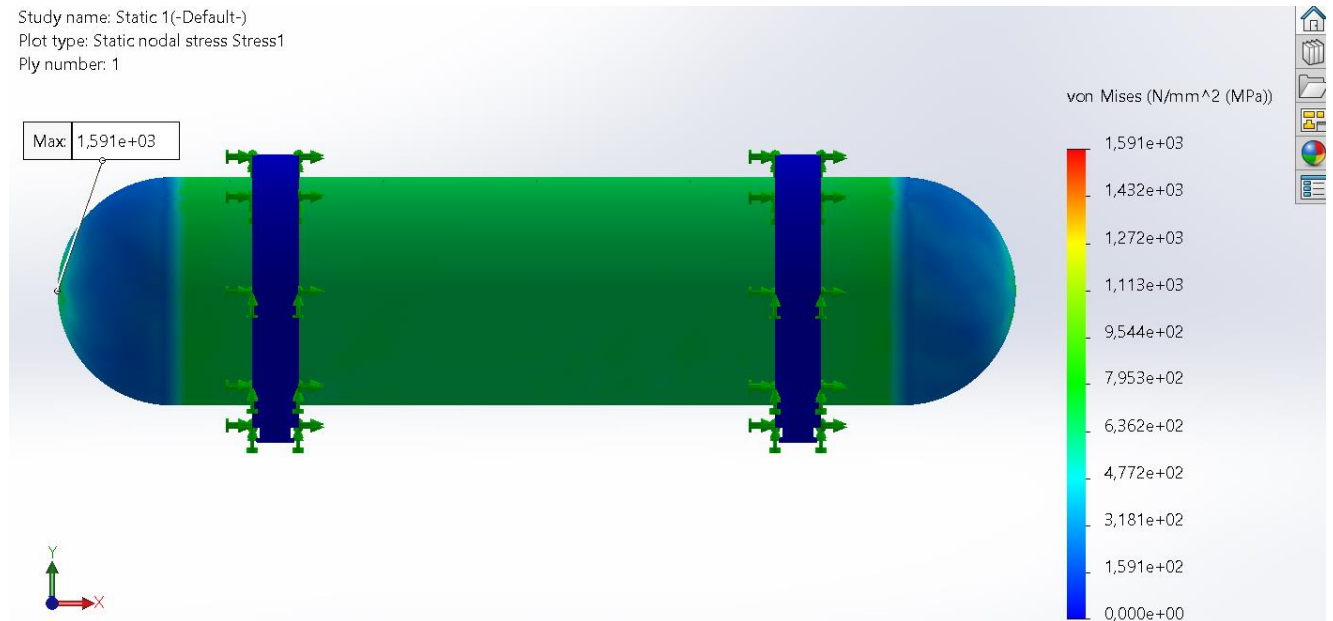


Figura 4-21 Tensión Von Mises 1 lámina.

En el caso del análisis para una única capa se puede observar que los valores obtenidos se corresponden a los valores estimados mediante en el programa eLamX2 en la Figura 3-30. Donde la tensión está entre 600 y 800 MPa en la parte cilíndrica debido a su mayor homogeneidad, siendo en el centro de la elipse la zona con mayores esfuerzos teniendo un esfuerzo máximo de 1591 MPa en el punto indicado como se puede apreciar en la Figura 4-22.

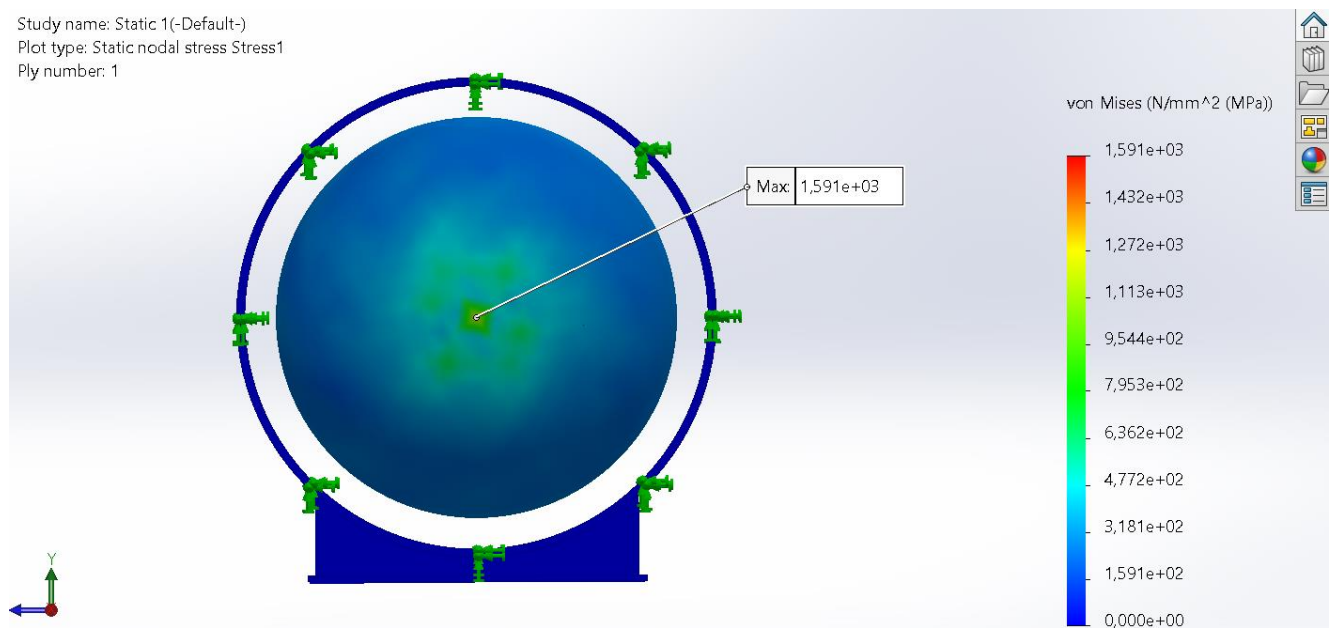


Figura 4-23

Figura 4-22 Punto máxima tensión en 1 lámina.

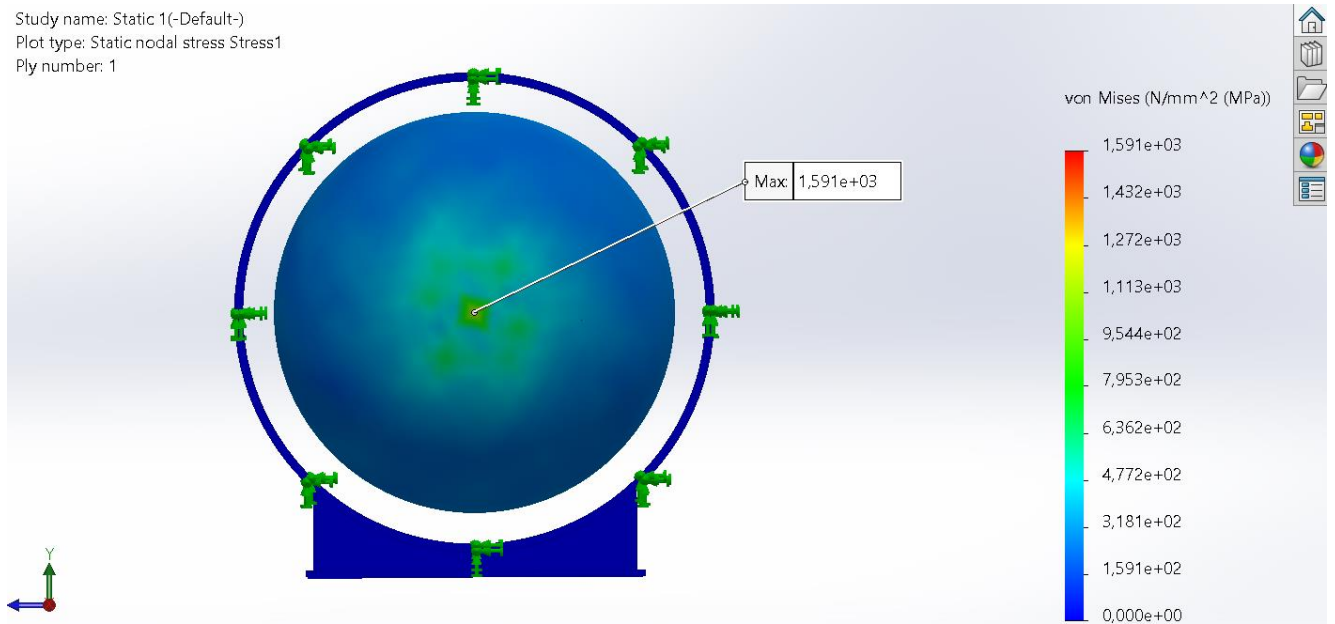


Figura 4-23 Tensión máxima Von Mises 1 lámina.

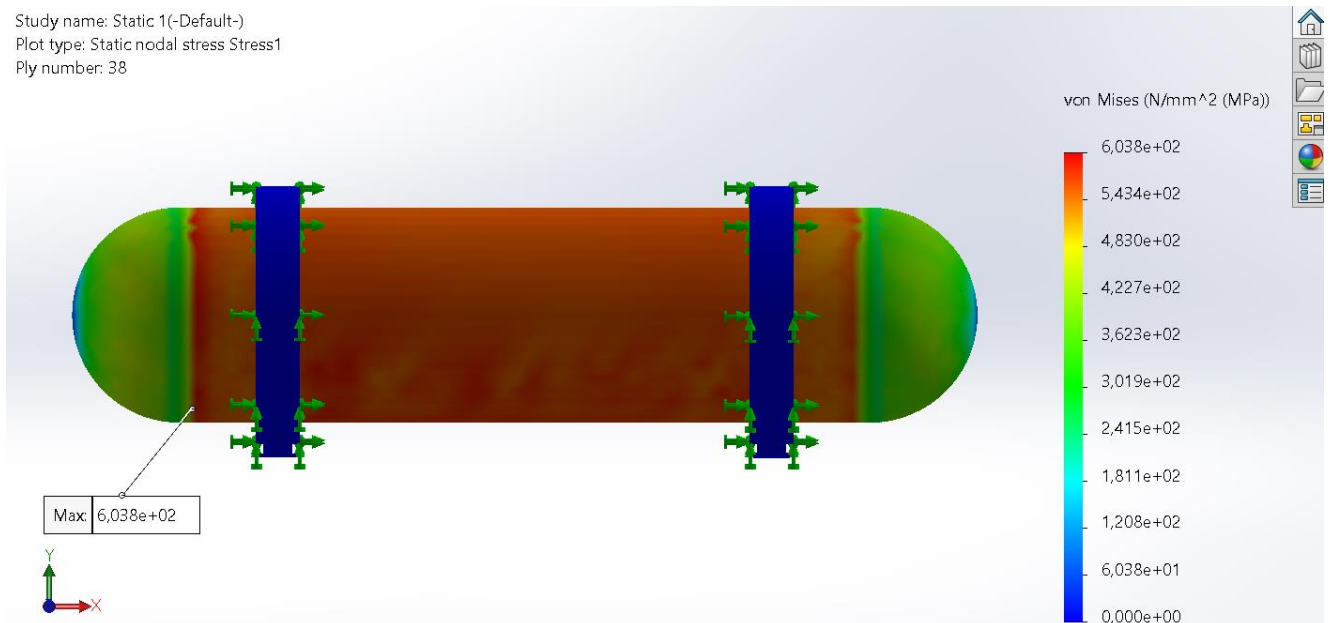


Figura 4-24 Tensión Von Mises 38 láminas.

Para el análisis del depósito sometido al mismo esfuerzo, pero configurando el programa para que se tenga en cuenta las 38 láminas, se puede apreciar que el depósito de forma general tiene un mejor comportamiento, sin embargo, la tensión máxima se desplaza al centro del elipsoide llegando a superar al caso anterior, esto es debido a que la orientación optimizada mediante el programa eLamX2 no está diseñado para el comportamiento en zonas con esta geometría. En la Figura 4-24 se puede apreciar el punto de tensión máxima de Von Mises. También se observa una gran mejora en el comportamiento de las láminas en el cabezal debido a que las fuerzas quedan más distribuidas debido a la curvatura de esta.

Study name: Static 1(-Default-)
 Plot type: Static nodal stress Stress1
 Ply number: 38

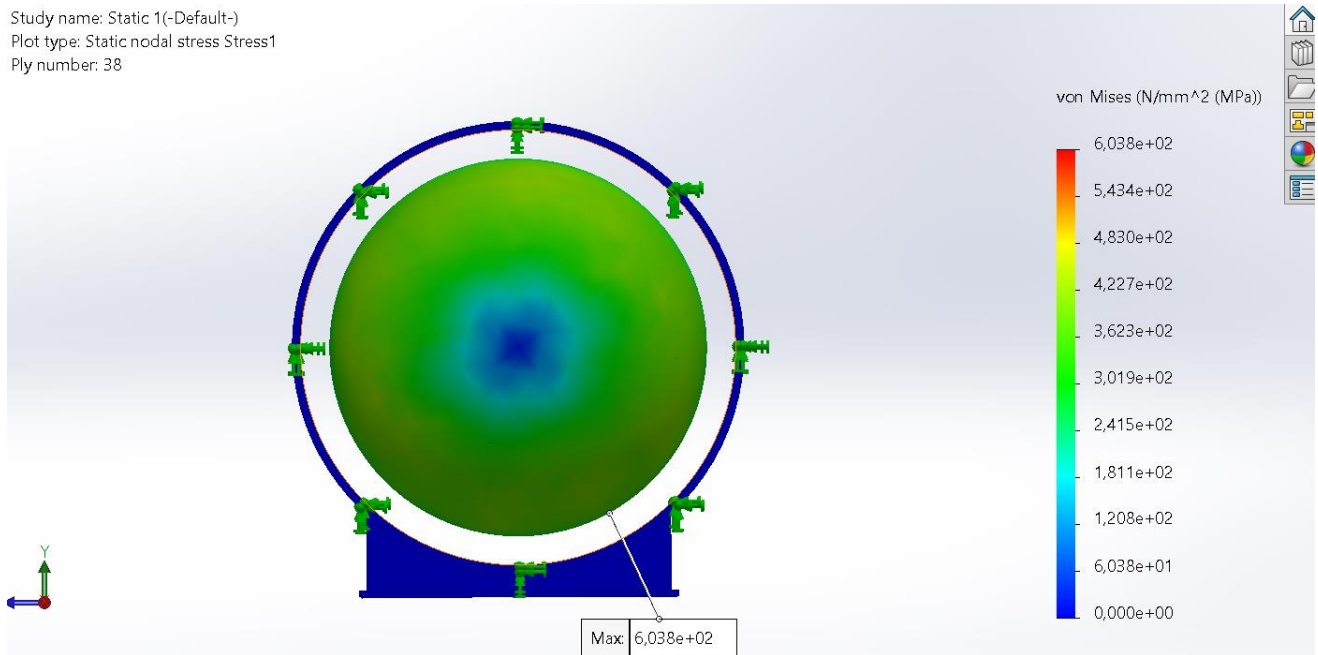


Figura 4-25 Tensión máxima Von Mises 38 láminas.

Se calcula el coeficiente de seguridad que se obtiene dividiendo la tensión de ruptura del laminado (X_t) con la tensión máxima obtenida del análisis del depósito. El coeficiente de seguridad del depósito es:

$$c = \frac{X_t}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{1500 \text{ MPa}}{603,80 \text{ MPa}} = 2,48 \quad (55)$$

Una vez establecido el coeficiente de seguridad, para verificar la seguridad del diseño del depósito se debe tener en cuenta la norma ISO/TS 15869:2009, la cual contempla los ensayos de seguridad que deben cumplir cualquier tipo de recipiente sometido a presión. Los ensayos a los que debe someterse son:

- Ensayo de ruptura: La presión de explosión del tanque $\geq 2 \cdot$ Presión de trabajo.
- Ensayo de ciclos de presión ambiental: Los tanques de combustible deben resistir al menos 11,250 ciclos de llenado (15 años).
- Ensayo de penetración: El tanque no debe romperse cuando una bala perforante o un impacto con un diámetro de 7.62 mm o más penetre completamente en su pared.
- Fuga antes de rotura: El tanque de combustible deberá fallar por fuga o excediendo el número de ciclos de llenado.
- Ensayo de fogata, el tanque de combustible debe ventilar a través de la válvula de alivio de presión que no cierre; no debe fallar cuando se expone a un fuego grande y controlado de duración de 20 minutos.

Se simula un ensayo de ruptura en el cual se establece la presión de ruptura como el doble de la presión de trabajo para lo que está diseñado el depósito. Se procede a la simulación dónde se aplica el nuevo valor de presión.

$$P_{ruptura} = P_{trabajo} \cdot 2 = 700 \text{ MPa} \cdot 2 = 1400 \text{ MPa} \quad (56)$$

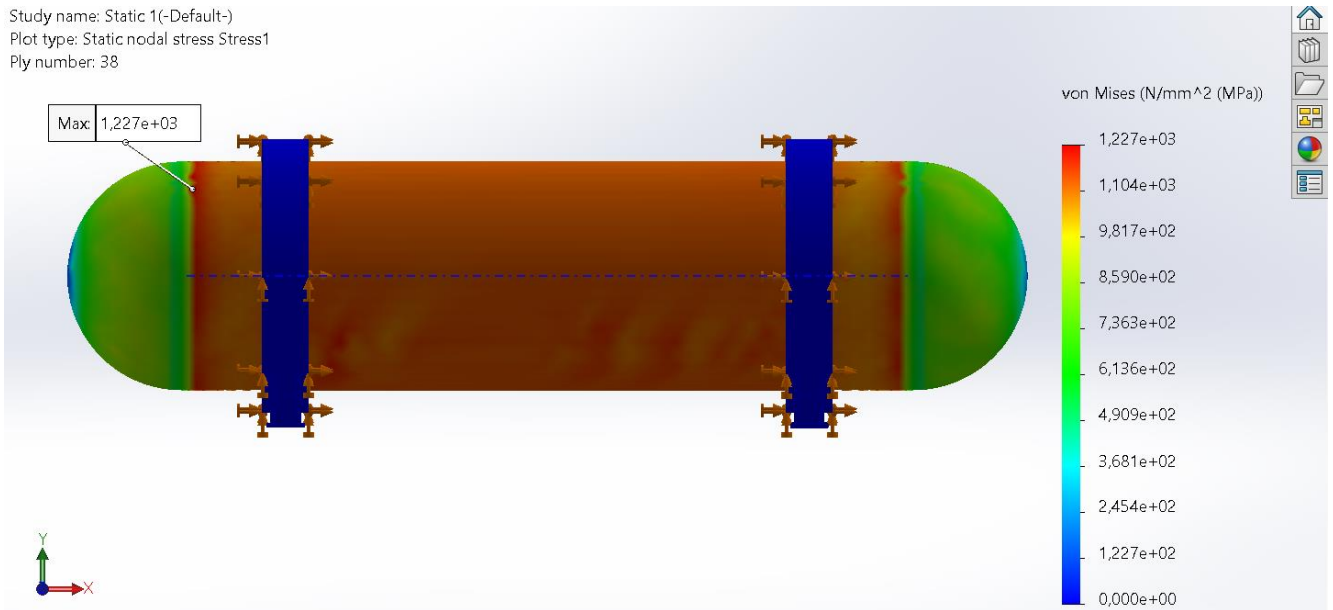


Figura 4-26 Ensayo ruptura 1400 MPa.

El resultado obtenido en el ensayo de ruptura a 1400 MPa (Figura 4-26) se observa que el punto de tensión máxima se encuentra en una zona similar al ensayo a 700 MPa, sin embargo, se obtiene una tensión máxima de 1227 MPa. Una vez conocido el esfuerzo máximo del ensayo de ruptura, se compara con la tensión máxima de rotura del material compuesto (X_t) de 1500 MPa.

$$c = \frac{X_t}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{1500 \text{ MPa}}{1227 \text{ MPa}} = 1,22 \quad (57)$$

Como el cociente entre ambos es mayor que 1, entonces el depósito cumple con las especificaciones de seguridad para depósitos sometidos a presión.

5 ADAPTACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

5.1 Diseño de modularidad del sistema de almacenamiento

Una vez se ha realizado el diseño y modelado de los depósitos, se han analizado el comportamiento de estos ante los esfuerzos sometidos y sus coeficientes de seguridad, se procede a realizar el diseño de la disposición de los depósitos en las lanchas de instrucción.

En primer lugar, se deben conocer las dimensiones del compartimento donde se distribuirán los depósitos, este compartimento será donde están situados los dos tanques de combustible que presentan las siguientes dimensiones (Figura 5-1).

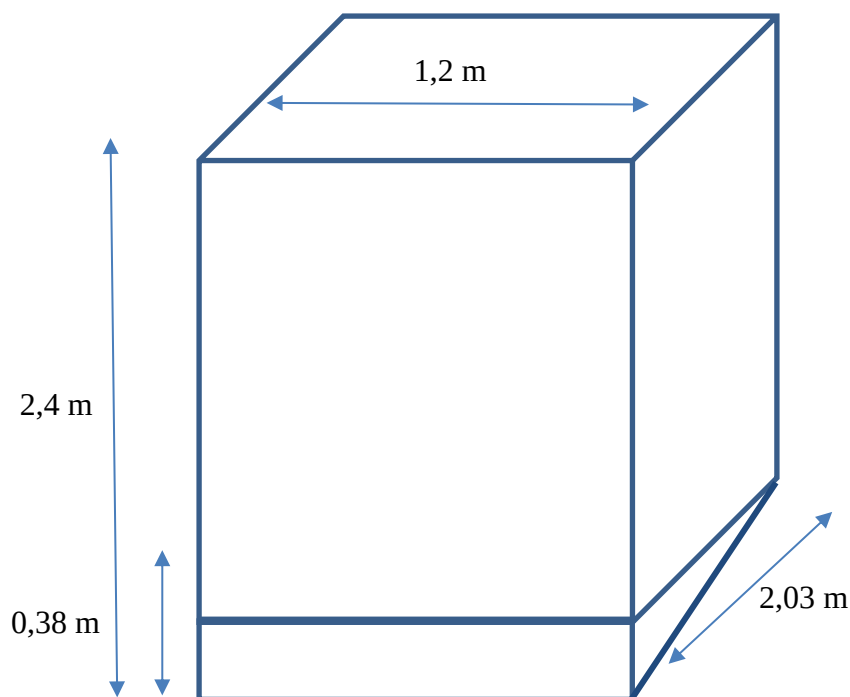


Figura 5-1 Dimensiones del tanque de combustible de la lancha de instrucción.

El compartimento cuenta con una sentina de 0,38 cm de profundidad y con una inclinación que impedirá su uso para la modulación de los depósitos, es por ello, que no se empleará la sentina para la distribución de los depósitos. Por lo tanto, el espacio útil para almacenamiento sería el cubo superior con las dimensiones especificadas en la Figura 5-1.

La idea es conseguir un almacenamiento similar al de otros medios de transporte de gran tonelaje como un autobús como se puede observar en la Figura 5-2, donde el objetivo es el máximo aprovechamiento del espacio disponible de los dos depósitos de combustible con el objetivo de conseguir el mayor volumen de almacenamiento de hidrógeno disponible.



Figura 5-2 Disposición modurable depósitos hidrógeno [65].

El siguiente paso será determinar la plataforma donde se quieren disponer los depósitos de hidrógeno y la posible adaptación de espacios alternativos a los depósitos de combustible que permita un mayor almacenamiento y un máximo aprovechamiento del espacio disponible en las lanchas de instrucción. A continuación, se muestran los planos de la plataforma donde se adaptarán los depósitos y las principales dimensiones de la embarcación.

CARACTERÍSTICAS LANCHAS RODMAN 66

<i>Eslora total (m)</i>	20,50
<i>Eslora del casco (m)</i>	20,00
<i>Manga del casco (m)</i>	4,90
<i>Puntal (m)</i>	2,56
<i>Calado en rosca (m)</i>	0,90
Desplazamiento en rosca (Tn)	29,50

Tabla 5-1 Características RODMAN 66.

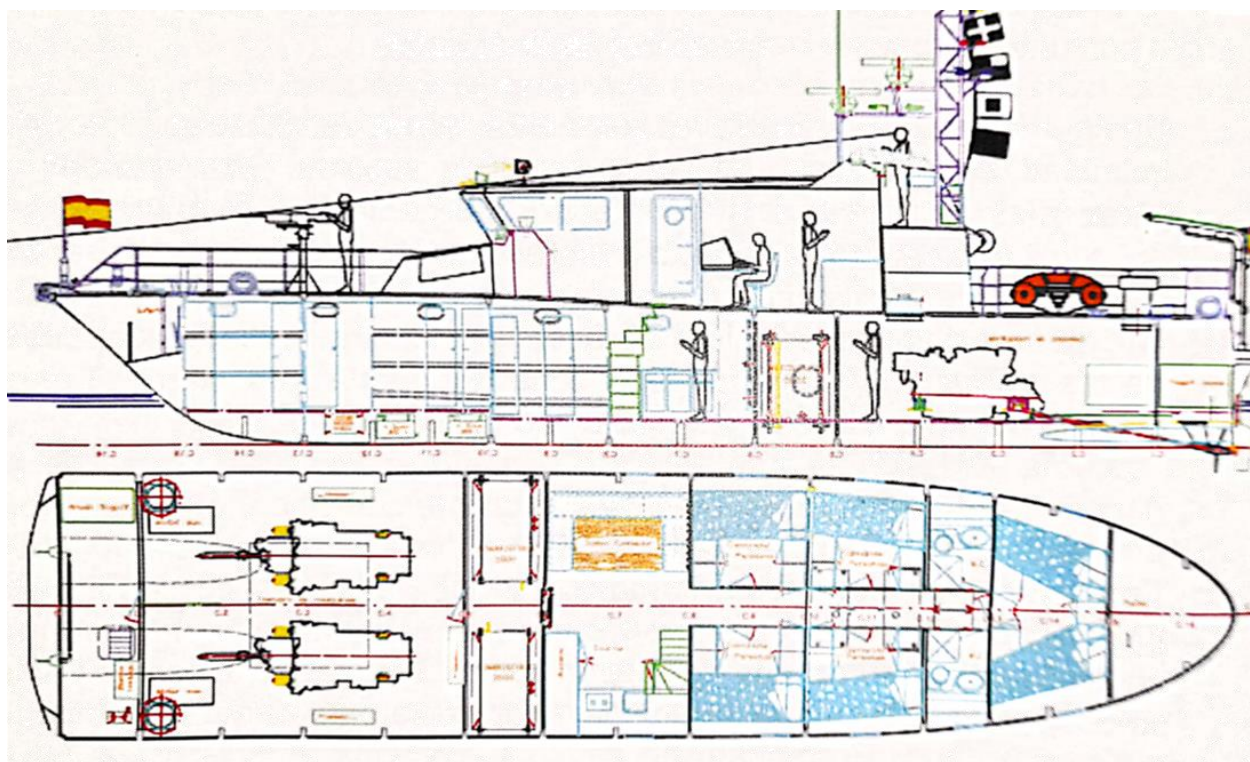


Figura 5-3 Planta y perfil embarcación RODMAN 66.

Teniendo en cuenta la geometría de la plataforma, así como el tonelaje y sus dimensiones, se realiza un diseño básico con las dimensiones especificadas mediante el programa Autodesk Inventor. Donde se divide en compartimentos de acuerdo con los planos de la Figura 5-3. Este modelo servirá de base para la adaptación de los módulos de depósitos de hidrógeno en las lanchas de instrucción, el modelo de los compartimentos quedaría de la siguiente manera.

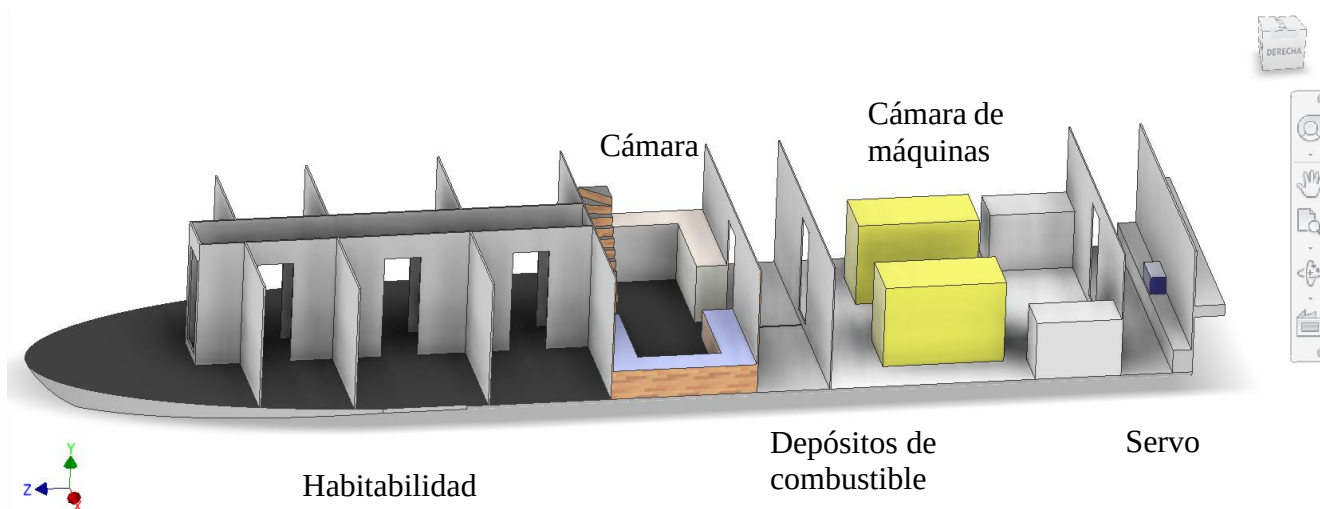


Figura 5-4 Compartimentación de la lancha de instrucción.

5.1.1 Compartimentación depósitos acero-carbono

En cuanto a la disposición de los depósitos de acero-carbono SA 106 C en el compartimento de los tanques de combustible se requiere un soporte modular para conseguir la adaptación de los depósitos en este espacio teniendo un máximo aprovechamiento del compartimento. La ventaja de estos depósitos, en comparación con los depósitos de material compuesto, es el menor tamaño que presentan y su mejor adaptabilidad a espacios confinados.

Para el soporte de todos los depósitos dispuestos se emplearán 4 soportes, dos en cada banda. El diseño del soporte modular será fabricado de acero y presenta el siguiente diseño.

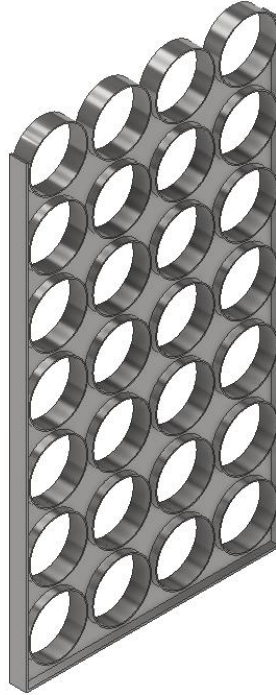


Figura 5-5 Soporte modular depósitos acero-carbono.

En cuanto a las propiedades físicas, las podemos obtener directamente a través de la función iProperties del programa Autodesk Inventor, donde se obtienen valores como la masa del soporte, su volumen, centro de gravedad y densidad del material entre otras variables,

iProperties de SOPORTE MULTIPLE DEPOSITO ACERO C...

General Resumen Proyecto Estado Personalizadas Guardar **Propiedades físicas**

Sólidos
La pieza Actualizar

Material
Acero Portapapeles

Densidad 7,850 g/cm³ Precisión solicitada Baja

Propiedades generales

		Centro de gravedad*	
Masa	179,889 kg	X	0,000 m (Error rel)
Área	6,583 m ² (Error)	Y	1,048 m (Error rel)
Volumen	0,023 m ³	Z	-0,000 m (Error rel)

Propiedades de Inercia*

Principal Global Centro de gravedad

Momentos principales

I1	105,279 kg m ²	I2	27,681 kg m ²	I3	77,716 kg m ²
----	---------------------------	----	--------------------------	----	--------------------------

Rotación a principal

Rx	0,00 gr (Error rel)	Ry	0,00 gr (Error rel)	Rz	0,00 gr (Error rel)
----	---------------------	----	---------------------	----	---------------------

*Los valores no reflejan la masa o el volumen anulados por el usuario

Aceptar Cancelar Aplicar

Figura 5-6 Propiedades físicas del soporte modular de los depósitos de acero-carbono.

Ya realizado el diseño del soporte modular que permite la adaptabilidad de los depósitos de acero-carbono al compartimento de almacenamiento de combustible de las lanchas de instrucción, se procede a la disposición de los depósitos en la plataforma, permitiendo tener una visión global de la disposición final de estos. A continuación, se muestra la disposición desde planta, perfil y otra imagen de perspectiva (Figura 5-7).

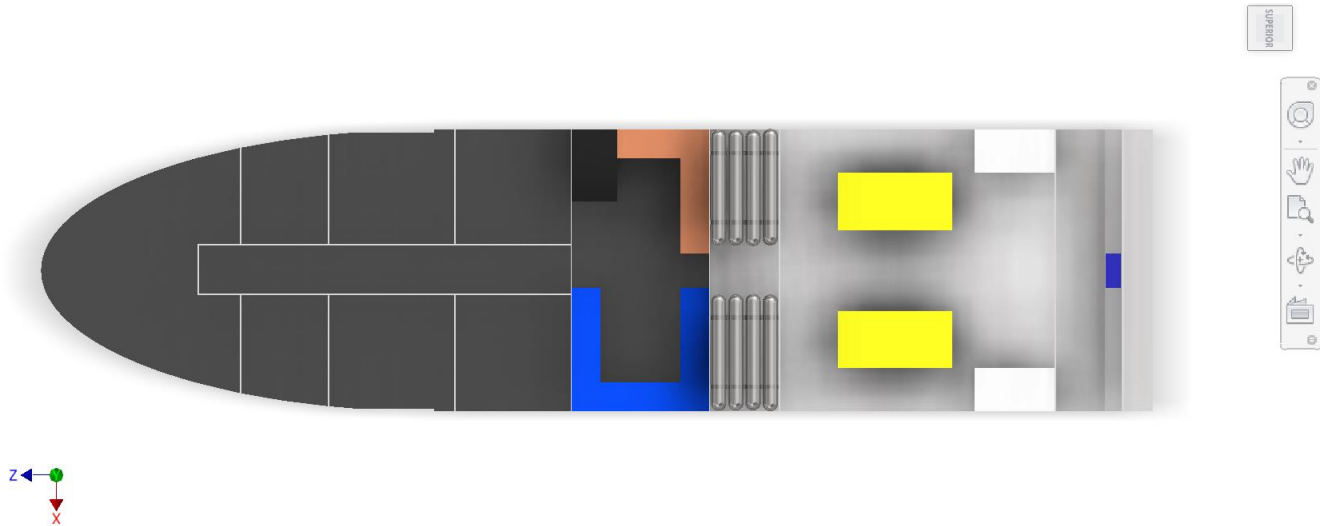


Figura 5-7 Planta distribución depósitos acero-carbono.

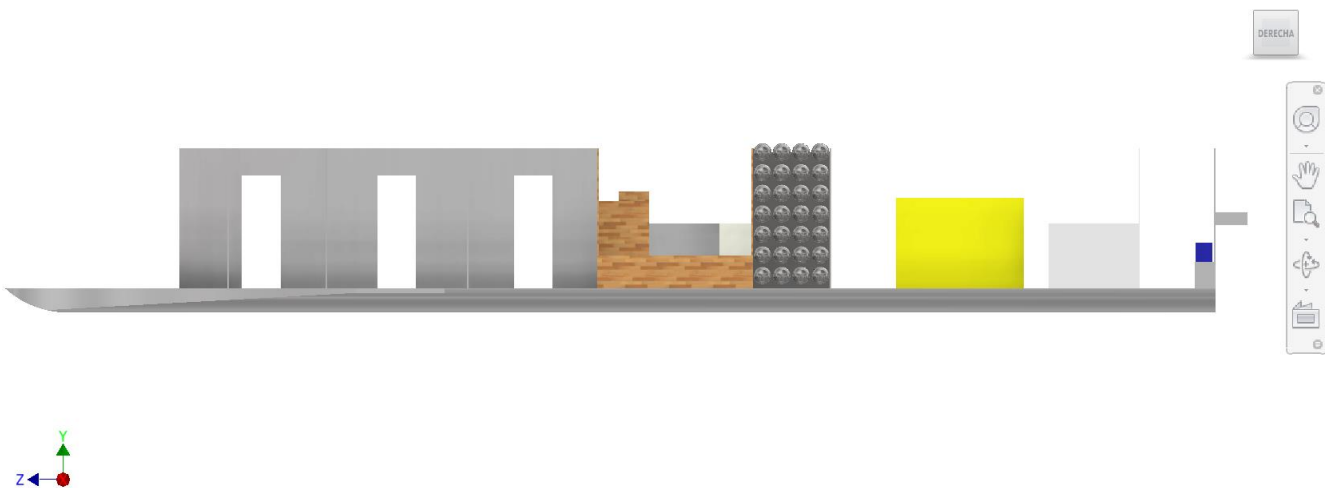


Figura 5-8 Perfil distribución depósitos acero-carbono.

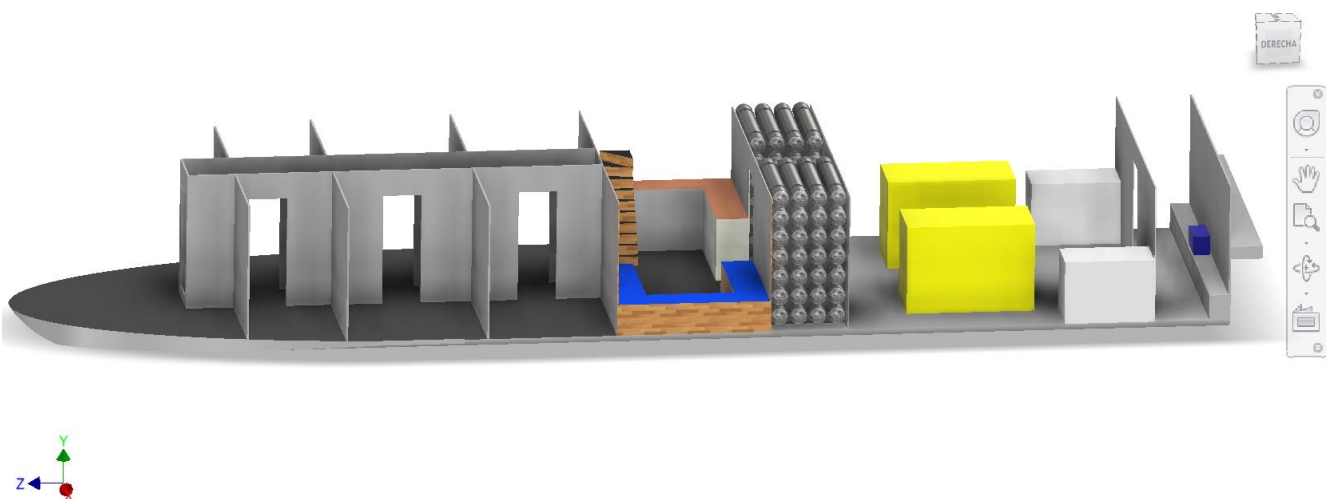


Figura 5-9 Perspectiva distribución depósitos acero-carbono.

Una vez obtenida la disposición final de los depósitos se consigue un almacenamiento total de 56 depósitos, se procede a calcular el volumen de hidrógeno almacenado por cada depósito, así como el volumen total de hidrógeno almacenado que será empleado para la propulsión de las embarcaciones RODMAN 66.

Para el cálculo de volumen de hidrógeno almacenado por el depósito se empleará la ecuación de la Sección 3.4.

$$\text{Volumen 1 depósito} = 249,44 \text{ l}$$

Una vez se ha calculado el volumen de hidrógeno almacenado, se obtiene el volumen total de hidrógeno necesario para propulsar las lanchas de instrucción.

$$\text{Volumen 12 depósitos} = 249,44 \text{ l} \cdot 56 = 13968,64 \text{ l}$$

Debido al buen aprovechamiento del espacio disponible y al ser depósitos de tamaño reducido se consigue un alto volumen de almacenamiento. Se obtiene el peso del depósito de igual manera que con el caso del soporte modular, es decir, empleando la función iProperties.

Figura 5-10 Propiedades físicas depósito acero-carbono.

Ya especificado el peso del depósito se procede al cálculo del peso total de los 56 depósitos, así como el peso teniendo en cuenta el uso de los 4 soportes mencionados anteriormente.

Finalmente se calculará el peso de cada uno de los depósitos, así como el peso total de los 12 depósitos para tener una estimación de la adición de peso que supondría a las lanchas de instrucción, sin tener en cuenta el peso de los soportes, así como el del propio hidrógeno.

Calculado el peso de cada uno de los depósitos se obtiene el peso resultante de colocar 12 depósitos en las lanchas de instrucción. Además, se deberá tener en cuenta el peso de los soportes, el cual se sumará al peso total de los depósitos.

$$\text{Peso 56 depósitos} = 337,15 \text{ Kg} \cdot 56 = 18880,46 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso total} = 18880,46 + 179,89 \cdot 4 = 19600,02 \text{ Kg}$$

Obtenido el valor del peso total al que estará sometida la lancha de instrucción, así como el volumen de hidrógeno que se ha almacenado en estos depósitos, se finaliza calculando el valor de la autonomía teórica que se conseguiría con dicho volumen. Para ello se calculará la masa total de hidrógeno almacenada en los depósitos a partir de la densidad del hidrógeno a 300 bar como aparece en la Figura 2-12. Una vez se conozca la masa total de hidrógeno, se calculará la energía total disponible mediante la densidad energética del hidrógeno.

$$13968,64 \text{ l} \cdot \frac{0,02 \text{ Kg}}{1 \text{ l}} = 321,28 \text{ Kg de hidrógeno}$$

$$321,28 \text{ Kg} \cdot \frac{120,00 \text{ MJ}}{1 \text{ Kg}} = 38553,60 \text{ MJ}$$

Conociendo la energía total almacenada en los depósitos, finalmente se calcula la autonomía conociendo la energía consumida por los dos motores cada 20 MN (40 km).

$$38553,60 \text{ MJ} \cdot \frac{40,00 \text{ km}}{7.968,09 \text{ MJ}} = 193,54 \text{ km de autonomia.}$$

5.1.2 Compartimentación depósitos materiales compuestos

Para la disposición de los depósitos a presión de fibra de carbono-epoxi 60 % en el compartimento usado para los tanques de combustible es necesario el diseño de un soporte diseñado específicamente para dicho espacio. Esto se debe al que el espacio disponible es muy limitado y, a diferencia de los depósitos de acero carbono, resulta más difícil modular un espacio al ser depósitos de una mayor envergadura.

Para soportar los tanques que serán almacenados de manera horizontal, se emplearán dos soportes por cada tanque de combustible, es decir, 4 soportes en total. El diseño de estos soportes permite el máximo aprovechamiento del espacio y tiene el siguiente diseño.

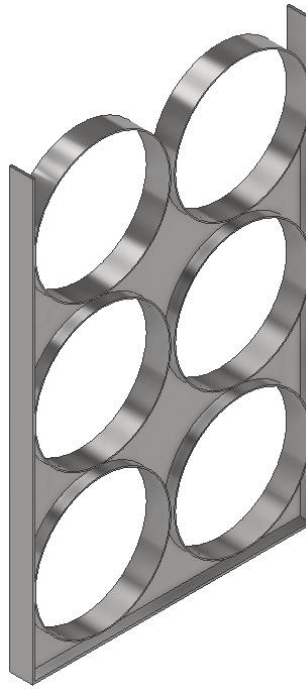


Figura 5-11 Soporte modular depósitos material compuesto.

Las propiedades físicas vienen definidas en la pestaña iProperties de Autodesk Inventor, en la que se proporciona la densidad del material, la masa y el volumen total del soporte modular, así como otros parámetros como el centro de gravedad.

iProperties de SOPORTE MULTIPLE DEPOSITO MCOMPU...

General Resumen Proyecto Estado Personalizadas Guardar **Propiedades físicas**

Sólidos
La pieza Actualizar

Material
Acero Portapapeles

Densidad 7,850 g/cm³ Precisión solicitada Alta

Propiedades generales

Masa **121,507 kg** Centro de gravedad*
 Área 4,192 m² (Error rel) X 0,000 m (Error rel)
 Volumen 0,015 m³ Y 0,818 m (Error rel)
 Z 0,000 m (Error rel)

Propiedades de inercia*

Principal Global Centro de gravedad

Momentos principales
 I1 60,108 kg m² I2 22,194 kg m² I3 38,050 kg m²
 Rotación a principal
 Rx 0,00 gr (Error rel) Ry 0,00 gr (Error rel) Rz 0,00 gr (Error rel)

*Los valores no reflejan la masa o el volumen anulados por el usuario

Aceptar Cancelar Aplicar

Figura 5-12 Propiedades físicas soporte modular depósitos material compuesto.

Una vez diseñada la plataforma dónde se dispondrán los depósitos a presión y se ha diseñado un soporte específico para dicho comportamiento, se procede a la disposición final de los depósitos a presión en la lancha de instrucción (Figura 5-13). Una vez obtenida la disposición final se calculará el peso que supondría el uso de este tipo de depósitos y el rendimiento que aportaría en cuanto a autonomía.

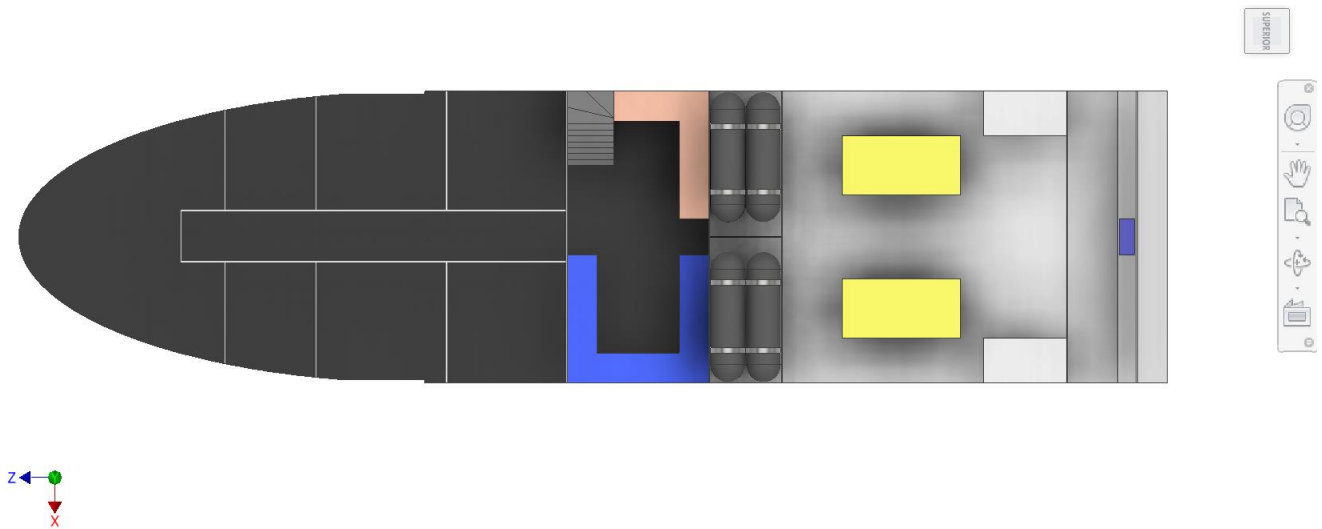


Figura 5-13 Planta distribución depósitos material compuesto.

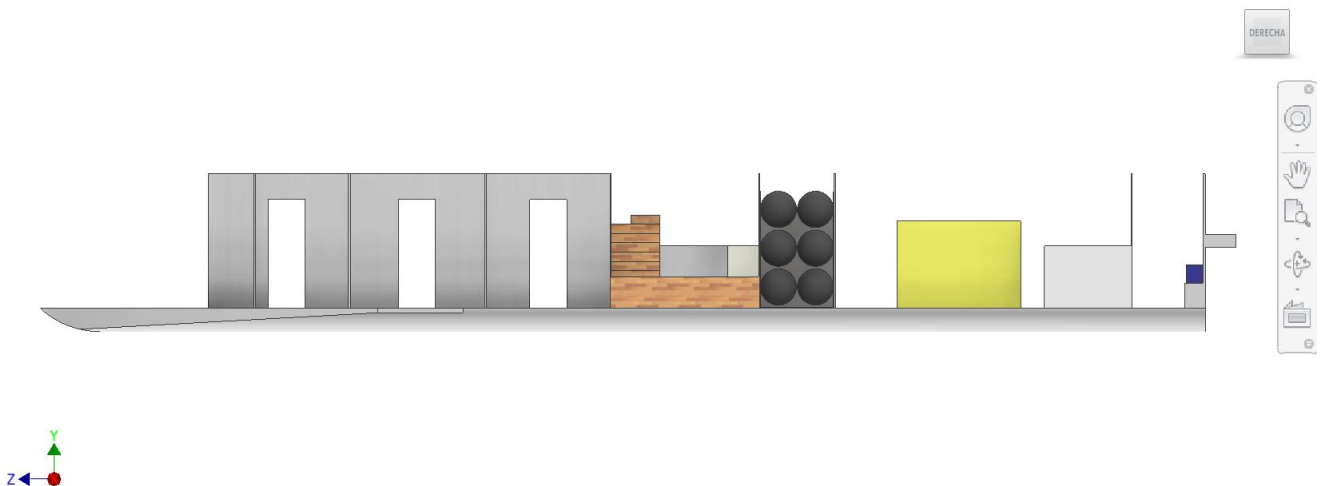


Figura 5-14 Perfil distribución depósitos de material compuesto.

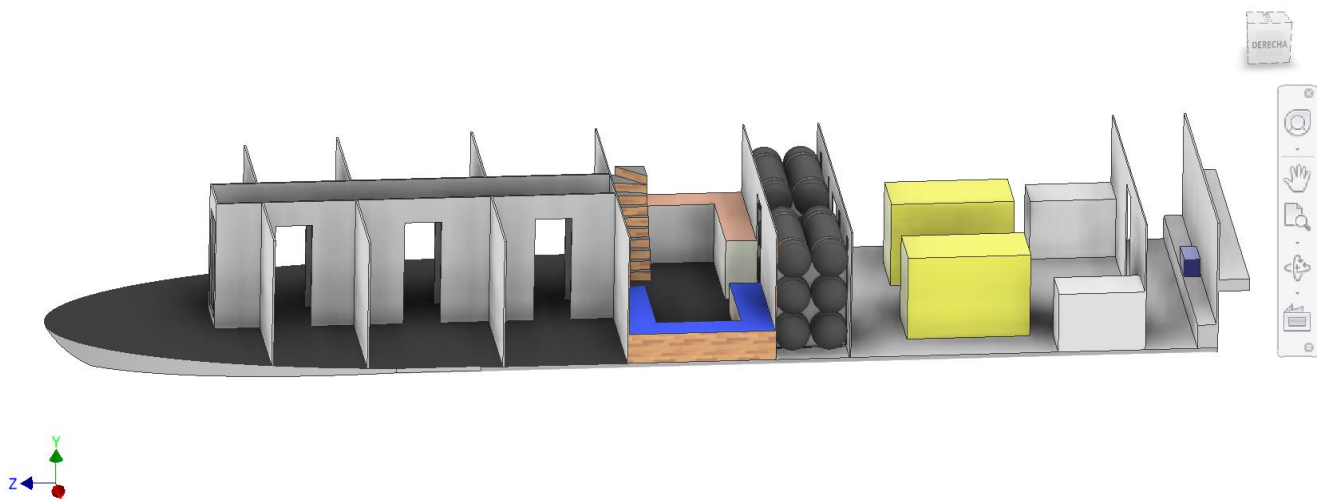


Figura 5-15 Perspectiva distribución depósitos de material compuesto.

Viendo la disposición de los depósitos, permite un almacenamiento total de 12 depósitos, es el momento de ver el volumen de hidrógeno total que se almacena y a cuanta autonomía se corresponde. Así como el peso que supondría la disposición de estos 12 depósitos.

El volumen de hidrógeno almacenado se calcula con la formula expresada en la Sección 3.4 dónde:

$$\text{Volumen 1 depósito} = 379,61 \text{ l}$$

A continuación, una vez se conoce el volumen de hidrógeno almacenado, se calcula el volumen total de hidrógeno del que se dispondrá para la propulsión de la lancha de instrucción.

$$\text{Volumen 12 depósitos} = 379,61 \text{ l} \cdot 12 = 4555,32 \text{ l}$$

Finalmente se calculará el peso de cada uno de los depósitos, así como el peso total de los 12 depósitos para tener una estimación de la adición de peso que supondría a las lanchas de instrucción, sin tener en cuenta el peso de los soportes, así como el del propio hidrógeno. Para ello, el cálculo deberá realizarse de manera manual al haber sido diseñado a través de SOLIDWORKS y no permitirse calcular de forma automática la masa del depósito.

$$(V_{\text{ext}} - V_{\text{int}}) \cdot \rho_{\text{carbono-epoxi } 60 \%} = 516,98 - 379,61 = 137,37 \text{ l} \quad (58)$$

$$137,37 \text{ dm}^3 \cdot \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ dm}^3} = 137370,00 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso 1 depósito} = 137370,00 \text{ cm}^3 \cdot 1,50 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 205780,26 \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 205,78 \text{ Kg}$$

Calculado el peso de cada uno de los depósitos se obtiene el peso resultante de colocar 12 depósitos en las lanchas de instrucción. Además, se deberá tener en cuenta el peso de los soportes, el cual se sumará al peso total de los depósitos.

$$\text{Peso 12 depósitos} = 205,78 \text{ Kg} \cdot 12 = 2469,39 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso total} = 2469,39 + 121,51 \cdot 4 = 2955,418 \text{ Kg}$$

Ya calculado el volumen total de hidrógeno, se obtiene la autonomía de la lancha de instrucción con 12 depósitos de hidrógeno teniendo en cuenta los cálculos realizados en la Sección 3.3.3. donde se calcula la masa de hidrógeno presente en el volumen total de hidrógeno almacenado, empleando la densidad del hidrógeno a 700 bar, cuya densidad es obtenida de la Figura 2-12. Una vez se sabe la masa de hidrógeno almacenada se obtiene la energía total disponible a partir de su densidad energética.

$$4555,32 \text{ L} \cdot \frac{0,04 \text{ Kg}}{1 \text{ L}} = 195,88 \text{ Kg de hidrógeno}$$

$$195,88 \text{ Kg} \cdot \frac{120,00 \text{ MJ}}{1 \text{ Kg}} = 23505,60 \text{ MJ}$$

Sabiendo la energía almacenada disponible se comprueba la autonomía de la que se dispondría sabiendo el consumo energético de los dos motores cada 40 km.

$$23505,60 \text{ MJ} \cdot \frac{40,00 \text{ km}}{7.968,09 \text{ MJ}} = 118,00 \text{ km de autonomía.}$$

5.2 Ampliación del modelo propuesto

Una vez se han presentado las dos alternativas posibles para el diseño de los depósitos en función del material empleado y de las ventajas y limitaciones que presentan cada uno de estos, se pretende conseguir mejorar el rendimiento presentado en cuanto a autonomía. Para ello la ampliación del modelo de depósitos de acero-carbono resulta difícil de mejorar, debido a que la autonomía prestada es superior al modelo de depósito de material compuesto, sin embargo, el peso que supondría la adición de más depósitos de acero-carbono elevaría en exceso el peso neto de la lancha de instrucción por lo que se propone dejar el modelo presentado sin ningún tipo de ampliación, debido principalmente al factor limitante del peso.

En el caso de los depósitos de fibra de carbono-epoxi al 60 %, al presentar un peso en conjunto mucho más reducido, se plantea la opción de adición de más depósitos de este tipo con la finalidad de aumentar la autonomía y conseguir las prestaciones dadas por los depósitos de acero-carbono pero con peso mucho más reducido.

Finalmente, después de un estudio de los posibles compartimentos a utilizar como espacios de almacenamiento de los depósitos se decide emplear el compartimento de servo, así como los espacios superiores a los diésel generadores representados en el modelo de color blanco en la sala de máquinas. Es importante destacar que se ha optado por no emplear otros compartimentos como los de habitabilidad para no reducir ni modificar las prestaciones iniciales de la lancha de instrucción.

Se consigue una ampliación en cuanto a espacio útil de manera que se consigue añadir 8 depósitos, contando la plataforma con un total de 20 depósitos tras la optimización. La disposición de los depósitos quedaría de la siguiente forma:

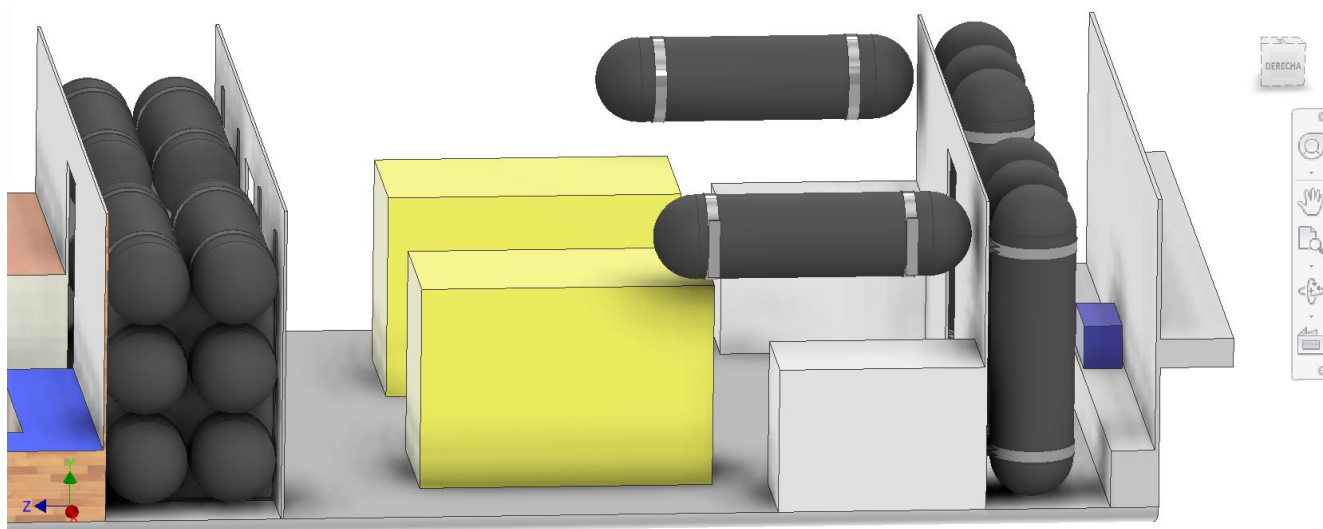


Figura 5-16 Vista en los compartimentos de los nuevos depósitos.

Se emplean los soportes de la Figura 5-11, se emplean dos soportes por cada depósito añadido. El peso de cada uno de los soportes viene determinado en la pestaña iProperties de Autodesk Inventor,

que deberá ser tenido en cuenta para el posterior cálculo del peso añadido. Además, vienen otras propiedades como el área, el volumen ocupado o el centro de gravedad del soporte.

The image shows a software dialog box titled "iProperties de SOPORTE DEPÓSITO M COMPUESTO.ipt ([Principal])". It has several tabs: "General", "Resumen", "Proyecto", "Estado", "Personalizadas", "Guardar", and "Propiedades físicas". The "Propiedades físicas" tab is active. It contains sections for "Sólidos", "Material", "Densidad", "Precisión solicitada", "Propiedades generales", and "Propiedades de inercia". In the "Propiedades generales" section, the "Masa" field is highlighted with a red rectangle and shows the value "9,382 kg". Other fields in this section include "Área" (4372,990 cm^2), "Volumen" (1195,174 cm^3), and "Centro de gravedad*" (X: 0,000 cm, Y: -12,585 cm, Z: 0,000 cm). The "Propiedades de inercia*" section has three sub-tabs: "Principal", "Global", and "Centro de gravedad". The "Principal" sub-tab is active, showing "Momentos principales" (I1: 7620,047 kg cm, I2: 2906,601 kg cm, I3: 4810,531 kg cm) and "Rotación a principal" (Rx: 0,00 gr, Ry: 0,00 gr, Rz: 0,00 gr). At the bottom, there are buttons for "Aceptar", "Cancelar", and "Aplicar".

Figura 5-17 Propiedades generales soporte depósito.

Ya conocida la adaptación modular de los depósitos y la optimización del espacio sin modificar las prestaciones iniciales de las lanchas de instrucción, se comprobará el volumen total de hidrógeno almacenado, así como la masa total que supondría esta adición de depósitos. Primero se obtendrá el volumen total a partir del volumen almacenado en un depósito especificado en la Sección 5.1.2.

$$\text{Volumen 20 depósitos} = 379,61 \text{ l} \cdot 20 = 7592,20 \text{ l de hidrógeno}$$

Al igual que en el caso anterior, se calcula el peso que supondría añadir 8 depósitos iniciales, quedando el peso añadido con el siguiente valor:

$$\text{Peso 8 depósitos añadidos} = 205,78 \text{ Kg} \cdot 8 = 1646,24 \text{ Kg}$$

A continuación, se calculará el peso total teniendo en cuenta los soportes añadidos, quedando como peso total, conformado por 20 depósitos con sus respectivos soportes, el siguiente:

$$\text{Peso total} = 2955,42 \text{ Kg} + 1646,24 \text{ Kg} + 16 \cdot 9,38 \text{ Kg} = 4751,77 \text{ Kg}$$

Este valor sigue siendo muy razonable en comparación con los depósitos de acero-carbono, consiguiendo una optimización del espacio disponible, así como un incremento en la autonomía de la embarcación gracias a la adición de 8 depósitos extra. Es el momento de comprobar cuál es el incremento de autonomía que esta adicción, calculando a partir del volumen de hidrógeno almacenado, la masa de este teniendo en cuenta su densidad a 700 bar según la Figura 2-12 y la energía disponible en ese hidrógeno almacenado.

$$7592,20 \text{ l} \cdot \frac{0,04 \text{ Kg}}{1 \text{ l}} = 349,24 \text{ Kg de hidrógeno}$$

$$349,24 \text{ Kg} \cdot \frac{120,00 \text{ MJ}}{1 \text{ Kg}} = 41908,80 \text{ MJ}$$

Conociendo la energía consumida cada 20 millas náuticas (40 km) y la energía almacenada disponible, se calcula la autonomía máxima:

$$41908,8 \text{ MJ} \cdot \frac{40,00 \text{ km}}{7968,09 \text{ MJ}} = 210,38 \text{ km de autonomía.}$$

Por último, una vez se ha calculado el peso total de cada uno de los depósitos, así como la autonomía prestada por cada uno de ellos, se llega a la conclusión de que es más viable el empleo de depósitos de material compuesto debido a su mejor autonomía y menor peso. A pesar de que el espacio utilizado es mayor en el caso de los depósitos de material compuesto, se sigue consiguiendo un peso mucho más reducido que con los depósitos de acero-carbono.

COMPARACIÓN DEPÓSITOS

	SA-106 GRADO C	FIBRA CARBONO-EPOXI AL 60 %
Masa total	19600,02 kg	4751,77 kg
Autonomía	193,51 km	210,38 km

Tabla 5-2 Comparación depósitos.

Una vez se comparan las variables más relevantes de ambos depósitos, se decide emplear depósitos de fibra de carbono-epoxi al 60 %, debido a un menor peso añadido a las lanchas de instrucción y una autonomía ligeramente superior. La disposición final de estos depósitos quedaría como en la Figura 5-18.

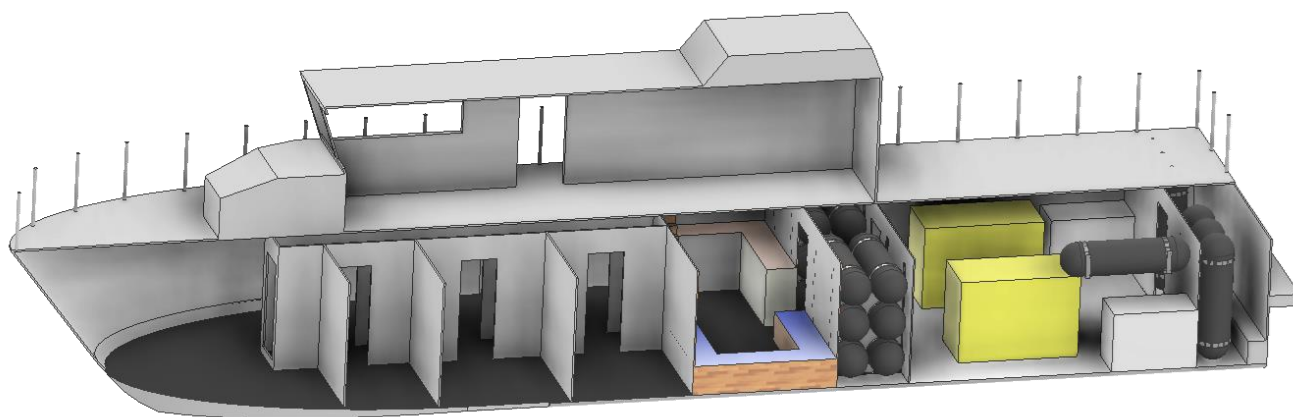


Figura 5-18 Resultado de disposición final depósitos.

6 ESTUDIO ECONÓMICO.

6.1 Costes fabricación acero carbono SA 106 C

Para el estudio económico se ha realizado una estimación de presupuesto lo más cercana a la realidad, se han tenido en cuenta los presupuestos de cada partida, dando en algunos casos un valor aproximado de €/h de trabajo realizado por personal y de €/unidad reflejando unos valores muy cercanos a la realidad. El presupuesto para la fabricación de los depósitos de acero-carbono SA 106 Gr C se han dividido principalmente en las siguientes partidas: Oficina técnica, materiales, fabricación, pruebas, montaje y control de plataforma.

Para el presupuesto requerido para la oficina técnica se han tenido en cuenta las horas invertidas en el diseño y condiciones iniciales del depósito, de cálculos, de planos y de fabricación. Y el coste de factores como la emisión del proyecto, así como una copia para el colegio de ingenieros, el visado del colegio de ingenieros con su aprobación, por último, la emisión de documentos necesarios para el marcado CE para indicar que el equipo cumple los requisitos establecidos.

PARTIDA 1		Oficina técnica		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
100	Diseño, cálculos, planos y fabricación (h)	40	45	1800,00 €
101	Emisión del proyecto	1	450	450,00 €
102	Copia proyecto Colegio de Ingenieros	1	100	100,00 €
103	Visado Colegio de Ingenieros	1	250	250,00 €
104	Emisión documentación técnica marcado CE	1	1200	1200,00 €

Tabla 6-1 Partida 1: Oficina técnica.

Una vez se tienen en cuenta los presupuestos derivados de la partida de la oficina técnica, la siguiente partida sería los materiales necesarios para la fabricación de los 56 depósitos. Hay que destacar que la longitud de los tubos Schedule está estandarizada para su transporte y es de 12 metros, el precio de cada tubo se estima por el precio de la tonelada de acero-carbono. En cuanto a los cabezales esféricos no

existe una estandarización concreta como sucede con los tubos, pero se puede estimar de igual manera en función del precio de la tonelada de acero-carbono.

En el apartado de materiales de soldadura requeridos para la fabricación de los depósitos, se necesitan unos electrodos del tipo E7016 específicos para altas presiones que serán los usados para la soldadura SMAW. Para la soldadura GTAW se emplearán varillas ER70S6 para altas presiones y de gas protector se usarán botellones de argón y dióxido de carbono.

Otros elementos necesarios para la fabricación del depósito son la boquilla roscada, el regulador de salida al motor que pase la presión de 300 bar a 0,5 bar y, por último, los tubos que conectarán todos los depósitos entre sí.

PARTIDA 2		Materiales: 2 x(4x7) = 56 depósitos de 2 metros 160 Ø 8"		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
200	Tubería 12 m A106 gr C SCH 160 Ø 8" 145 kg/m	10	2485	24850,00 €
201	Cabezales A106 Gr C SCH 160 Ø 8" 65 Kg/R	112	85	9520,00 €
Soldadura				
202	Electrodos E7016 Caja ESAB (20 uds)	100	220	22000,00 €
203	Varilla GTAW ER70S6 (Caja)	100	120	12000,00 €
204	Botella gas AR+CO2	4	125	500,00 €
205	Boquilla rosca M60 Ø 0,5"	56	38	2128,00 €
206	Regulador 300 bar a 0,5 bar	56	220	12320,00 €
207	Tubos conectores de depósitos R 1/8" (m)	45	34	1530,00 €
208	Soporte acero 4x7	4	520	2080,00 €

Tabla 6-2 Partida 2: Materiales.

Establecido el coste de los materiales empleados, es necesario conocer el presupuesto del personal requerido en la fabricación de los depósitos, para ello se establece una tercera partida donde se tiene en cuenta la participación del tubero para ajuste y alineación de los depósitos previo a la soldadura de estos. Además, se tiene en cuenta el trabajo realizado por el soldador, especificando la longitud y espesor de la soldadura para los dos cabezales esféricos para cada depósito.

PARTIDA 3		Fabricación: 2 x(4x7) = 56 depósitos de 2 metros 160 Ø 8"		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
300	Tubero (2 h/equipo)	56	90	5040,00 €
301	Soldador (equipo L=1350 mm, T=28,58 mm) con WPS (16 h/ equipo)	56	720	40320,00 €

Tabla 6-3 Partida 3: Fabricación.

Conocido el presupuesto aproximado de la fabricación de los depósitos, se establece una cuarta partida destinada al coste de los ensayos a los que debe someterse el depósito para su posterior homologación. En cuanto a los ensayos no destructivos se harían radiografías de las soldaduras con 3 películas por cada soldadura al haberse establecido en la Tabla 3-6 una eficiencia de junta del 100 %, también se realizará un ensayo de líquidos penetrantes y de partículas magnéticas en el perímetro de las dos soldaduras realizadas por depósito (3m aprox.).

Por último, se calcula el presupuesto de homologar las soldaduras y las boquillas mediante la inspección de 4 soldadores. Además, se realizaría una prueba hidrostática con un coeficiente de seguridad de 1,5 y un control de calidad necesarios para la obtención del marcado CE.

PARTIDA 4		PRUEBAS 2 x(4x7) = 56 depósitos de 2 metros 160 Ø 8"		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
Ensayos no destructivos				
400	Radiografías Vacupac D4 (3/equipo)	336	144	8064,00 €
401	Líquidos penetrantes/Partículas magnéticas (m)	168	36	2016,00 €
Homologaciones				
402	Procedimientos WPS juntas circulares GTAW+SMAW ASME IX	1	1200	1200,00 €
403	Procedimientos boquilla CUP GTAW ASME IX	1	1200	1200,00 €
404	4 soldadores WPQ ASME IX"	4	120	480,00 €
Pruebas marcado CE				
406	Pruebas de presión a 450 bar (30 min/equipo)	56	45	2520,00 €
407	Control de calidad (equipo)	56	45	2520,00 €

Tabla 6-4 Partida 4: Pruebas.

Finalmente, se añadirá el presupuesto del montaje de los depósitos y la instalación de los indicadores necesarios en el puente de gobierno, así como el transporte. Es obligatorio obtener un certificado ATEX al tratarse de un espacio confinado y ser un combustible inflamable.

PARTIDA 5		Transporte y montaje		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
500	Transporte	1	200	200,00 €
501	Montaje (h)	120	45	5400,00 €

Tabla 6-5 Partida 5: Montaje.

PARTIDA 6		Control de plataforma		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
600	Certificado ATEX	1	2050	2050,00 €
601	Instalación en puente de gobierno (h)	12	45	540,00 €

Tabla 6-6 Partida 6: Control de plataforma.

El presupuesto final de los para los depósitos de acero carbono sería el siguiente, al cual, se deberá sumar el 21 % de IVA al valor final, quedando un presupuesto final de:

PRESUPUESTO FINAL	
Total, sin IVA	162 278,00 €
Total, con IVA	196 356,38 €

Tabla 6-7: Presupuesto final

6.2 Costes fabricación material compuesto

En cuanto al estudio económico realizado, se han dividido en seis partidas en función de los diferentes costes a tener en cuenta, como son: oficina técnica, materiales, fabricación, pruebas, montaje y control de plataforma.

La primera partida tiene en cuenta los costes de la oficina técnica, dentro de la cual se incluyen aspectos como el diseño, los cálculos, los planos, la emisión del proyecto, así como una copia para el Colegio de ingenieros y el visado de la misma, además de la emisión de la documentación necesaria para la obtención del marcado CE, requisito obligatorio para equipos sometidos a presión.

PARTIDA 1		Oficina técnica		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
100	Diseño, cálculos, planos y fabricación (h)	40	45	1800,00 €
101	Emisión del proyecto	1	450	450,00 €
102	Copia proyecto Colegio de Ingenieros	1	100	100,00 €
103	Visado Colegio de Ingenieros	1	250	250,00 €
104	Emisión documentación técnica marcado CE	1	1200	1200,00 €

Tabla 6-8 Partida 1: Oficina técnica.

Una vez estimados los costes derivados de una Oficina técnica, se estima una segunda partida en la que tienen en cuenta los costes de los materiales empleados. Hay que destacar que se fabricarán un total de 25 depósitos, debido a los 5 ensayos destructivos que deberán realizarse. En primer lugar, se calcula el coste de la matriz epoxi para la fabricación de los 25 depósitos, así como el coste de las 19 láminas de fibra de carbono M40J simétricas (38 capas por depósito). Ya calculados los costes de los materiales necesarios para la fabricación de los depósitos, se añaden los cálculos correspondientes a las boquillas, a los reguladores de presión de 700 bar a 0,5 bar de salida al motor de combustión y los tubos que conectan entre sí los 20 depósitos.

Por último, se añade el coste de los soportes diseñados para cada una de las disposiciones de los depósitos, estarán fabricados en acero estructural y el precio se estima en función del peso de cada uno de estos.

PARTIDA 2		Materiales: 25 depósitos		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
200	Matriz epoxi (kg/ud)	205,78	1,55	7973,98 €
201	Fibra carbono M40J lámina deposito (0,5 hora = 75 €/lámina)	19	75	18750,00 €
202	Boquilla rosca M60 Ø 0,5"	25	38	950,00 €
203	Regulador 700 bar a 0,5 bar	25	220	5500,00 €
204	Tubos conectores de depósitos R 1/8" (m)	45	34	1530,00 €
205	Soporte 3x2	4	450	1800,00 €
206	Soporte 3x1	2	320	640,00 €
207	Soporte 1x1	2	150	300,00 €

Tabla 6-9 Partida 2: Materiales.

Ya establecido el coste de los materiales empleados, es necesario tener en cuenta el coste de fabricación de los depósitos, de tal manera que se establece una tercera partida en la que, aunque la mayor parte de los costes de fabricación están incluidos en la partida dos de materiales, se deben tener en cuenta los costes de ajuste de alineación y la boquilla de los 25 depósitos y el proceso de compactación liner-epoxi para cada capa de cada depósito.

PARTIDA 3		Fabricación: 25 depósitos		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
Incluido en partida de materiales				
300	Ajuste de alineación y boquilla (2 h/equipo)	25	90	2250,00 €
301	Compactación lamina fibra-epoxi (0,2 hora = 30€ lámina)	19	75	18750,00 €

Tabla 6-10 Partida 3: Fabricación.

Calculado el presupuesto derivado de la fabricación de los depósitos, se debe tener en cuenta una cuarta partida en la que se reflejen los ensayos destructivos necesarios para la verificación de seguridad del depósito según la norma ISO/TS 15869:2009. Además del cumplimiento de esta norma, deberá conseguir el marcado CE mediante el ensayo no destructivo especificado en la Tabla 6-11.

Para la obtención de la homologación ISO/TS 15869:2009 destacan 5 ensayos destructivos, es por ello necesario tener en cuenta la fabricación de 5 depósitos con el propósito de su empleo en estos ensayos para obtener la homologación.

PARTIDA 4		PRUEBAS 5 depósitos		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
Homologación ISO/TS 15869:2009				
400	Ensayo de ruptura	1	300	300,00 €
401	Ensayo de ciclos de presión ambiental	1	6200	6200,00 €
402	Ensayo de penetración	1	1000	1000,00 €
403	Fuga antes de rotura	1	650	650,00 €
404	Ensayo de fogata	1	1200	1200,00 €
Prueba equipos a presión marcado CE				
405	Pruebas de presión a 450 bar (30 min/equipo)	20	45	900,00 €
406	Control calidad (equipo)	20	45	900,00 €

Tabla 6-11 Partida 4: Pruebas.

Finalmente, hay que destacar dos partidas independientes, la primera en la que se establecen los costes asociados al transporte y montaje de los depósitos y soportes, y la segunda relacionada con la obtención de certificado ATEX y la instalación de los elementos de control de los depósitos en el puente de gobierno de las lanchas de instrucción. Hay que destacar que es obligatorio obtener el certificado ATEX al tratarse de un espacio confinado y ser un combustible inflamable.

PARTIDA 5		Transporte y montaje		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
500	Transporte	1	200	200,00 €
501	Montaje	120 h	45	5400,00 €

Tabla 6-12 Partida 5: Transporte y montaje.

PARTIDA 6		Control de plataforma		
Código artículo	Descripción	Cantidad	€/ud	Total
600	Certificado ATEX	1	2050	2050,00 €
601	Instalación en puente de gobierno (h)	12	45	540,00 €

Tabla 6-13 Partida 6: Control de plataforma.

Se obtiene el presupuesto final en función de las seis partidas establecidas, así como el 21 % de IVA.

PRESUPUESTO FINAL

Total, sin IVA	77 083,98 €
Total, con IVA	93 271,61 €

Tabla 6-14 Presupuesto final.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 Conclusiones

Como resultado del estudio de posibles materiales para su empleo en el depósito de almacenamiento de H_2 se obtienen dos materiales con las mejores propiedades mecánicas y, a partir de los cuáles, se lleva a cabo las configuraciones de los depósitos de H_2 en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar:

1. La primera opción consiste en una configuración modular de 56 depósitos de acero-carbono SA 106 grado C, dispuestos en el compartimento de combustible de la embarcación.
2. La segunda opción consiste en una configuración modular de 12 depósitos de material compuesto de fibra de carbono-epoxi al 60 %, esta opción al tener una menor limitación por su peso se amplía su disposición consiguiendo un total de 20 depósitos.

El diseño de los depósitos de almacenamiento se ha realizado teniendo en consideración factores limitantes como el espacio disponible en las lanchas de instrucción, poder garantizar la seguridad de los depósitos o el empleo de un material que permite obtener en mejor balance entre el coste, el peso y la autonomía de estas.

La elección del material del depósito viene determinada por los siguientes tres aspectos, los cuáles se consideran más relevantes para la elección de que material y diseño de depósito se escoge.

- **Peso:** Es un factor determinante debido a que la plataforma donde se van a instalar los depósitos consta de un desplazamiento en rosca de 29,5 tn, el empleo de los depósitos de acero-carbono supondría una adición de peso de 19,6 tn lo que resulta una adición de peso del 66,21 %. Es por ello por lo que en este aspecto los depósitos de material compuesto tienen como aspecto positivo un peso adicional de 4,71 tn (15,97 % del total).
- **Ubicación:** En cuanto a la disposición utilizada para los depósitos, se emplea para ambos casos el compartimento de combustible de las lanchas de instrucción, sin embargo, para los depósitos de material compuesto es necesario una ampliación de compartimentos utilizados (cámara de máquinas y servo) para conseguir una autonomía similar a la entregada por los depósitos de acero carbono.
- **Coste:** En cuanto al presupuesto estimado para las dos configuraciones de depósitos, existe una gran diferencia en cuanto al coste de diseño, fabricación e instalación de ambos. Siendo más viable económicamente los depósitos de material compuesto.

Pese al obtener unos valores óptimos en cuanto peso, ubicación y coste, es importante saber que para ninguno de los dos tipos de depósitos se consigue una autonomía similar a la propulsión ya prestada por las lanchas de instrucción, siendo de 700 km frente a los 210 km de los depósitos de fibra de carbono-

epoxi al 60 %. En este aspecto se refleja que actualmente no existen medios y capacidades que permitan conseguir una autonomía similar a la prestada por los combustibles fósiles.

Por último, se llega a la conclusión de que el uso de depósitos de fibra de carbono-epoxi al 60 % es viable económicamente y en cuanto a resistencia mecánica, siendo completamente útil para las salidas diarias de los alumnos de la Escuela Naval Militar.

7.2 Líneas futuras

Debido a la complejidad que supone la adaptación de la propulsión a hidrógeno de las lanchas de instrucción, el Trabajo de Fin de Grado se limita al estudio de viabilidad de la adaptación de este tipo de embarcaciones a este novedoso método de propulsión, en función de diversos factores como materiales empleados, coste de fabricación y peso añadido entre otros. Es por ello que esta estimación realizada puede servir como base para futuros proyectos hasta conseguir el desarrollo completo del mismo. Se podrían las líneas futuras en los siguientes proyectos.

- Sistema de propulsión y gobierno: Una vez se haya obtenido el diseño de los depósitos, el número de depósitos a emplear y el material óptimo para la relación peso-coste, se propone un proyecto para el estudio y diseño de adaptación de estos depósitos a los motores con los cálculos correspondientes para garantizar el correcto funcionamiento de estos, así como ser capaces de alimentar a su vez a los diésels generadores. Además, se diseñarán los indicadores necesarios y su disposición en el puente de gobierno para tener el control de su correcto funcionamiento, ya sea de manera analógica o digital.
- Estudio de la permeabilidad del hidrógeno de la solución adoptada: Es necesario buscar un material que limite en mayor medida la permeabilidad del hidrógeno, al ser un átomo tan pequeño materiales como el acero-carbono o fibra de carbono-epoxi al 60 % no impiden en su totalidad la impermeabilidad del depósito. Se deberá estudiar las pérdidas de hidrógeno producidas, así como la mejor combinación de materiales o la creación de un material compuesto para disminuir estas pérdidas además del material seleccionado para cumplir los requisitos de presión establecidos anteriormente.
- Estudio de la redistribución de espacios en la lancha de instrucción para aumentar la autonomía: Conseguir una optimización en el empleo de los espacios disponibles en las lanchas, al ser tan limitado se puede buscar alternativas como su almacenamiento en el exterior, haciendo un estudio del depósito frente agentes atmosférico y permitiendo una autonomía equiparable a la ya obtenida con gasoil.
- Extender este estudio a otras plataformas militares: Se propone realizar un estudio a largo plazo del posible empleo de este tipo de combustibles en plataformas e instalaciones militares, tanto en la Armada como en el resto de los ejércitos. Principalmente podría emplearse como propulsión en submarinos no tripulados, con el empleo de pilas de combustible, consiguiendo energía eléctrica a partir de hidrógeno.

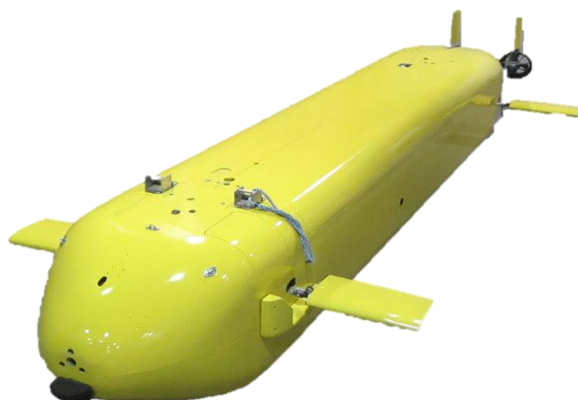


Figura 7-1 Submarino no tripulado de hidrógeno de General Motors para la marina estadounidense.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. E. Castells y L. J. de Gracia, *El hidrogeno y las pilas de combustible: Tratamiento y valorizacion energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [2] «DF y el hidrógeno verde, soluciones y oportunidades – Duro Felguera». <https://www.durofelguera.com/df-y-el-hidrogeno-verde-soluciones-y-oportunidades/> (accedido 23 de enero de 2023).
- [2] «New Horizons For Hydrogen». Accedido: 27 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36178.pdf#page=4>
- [4] C. Fúnez Guerra y L. Reyes-Bozo, *El hidrógeno como vector energético*. Universidad Autónoma de Chile, 2019. Accedido: 27 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uaautonoma.cl>
- [5] *Del remo a la vela | J. M^a Martinez-Hidalgo*. Accedido: 23 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.libreriadesnivel.com/libros/del-remo-a-la-vela/9788426116727/>
- [6] «Sistema de propulsion - Química y la construcción naval clasica». <https://sites.google.com/site/quimicaylaconstruccionnaval1/sistema-de-propulsion> (accedido 23 de enero de 2023).
- [7] T. a babor, «Evolución histórica de la vela», *Todo a babor*, 29 de septiembre de 2005. <https://www.todoababor.es/historia/evolucion-historica-de-la-vela/> (accedido 24 de enero de 2023).
- [8] «Boat remains and maritime trade in the Persian Gulf during the sixth and fifth millennia BC (Robert Carter) - Academia.edu», 19 de julio de 2011. https://web.archive.org/web/20110719134434/http://oxfordbrookes.academia.edu/RobertCarter/Papers/85521/Boat_remains_and_maritime_trade_in_the_Persian_Gulf_during_the_sixth_and_fifth_millennia_BC (accedido 24 de enero de 2023).
- [9] R. Kipping y P. R. y Tudury, *Elementos de construccion de velas: Hauptbd*. Imp. de T.Fortanet, 1860.
- [10] N. García Tapia y J. Carrillo Castillo, *Tecnología e imperio: ingenios y leyendas del siglo de oro : Turriano, Lastanosa, Herrera, Ayanz*. 2002. Accedido: 27 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=114426>
- [11] Civilización, «las virtudes detrás de la edad moderna: LA MAQUINA A VAPOR (1712)», *las virtudes detrás de la edad moderna*, 14 de julio de 2014.

- <http://grupocivilizacion13.blogspot.com/2014/07/la-maquina-vapor.html> (accedido 27 de enero de 2023).
- [12] P. K. Nag, *Power Plant Engineering*. Tata Mcgraw-Hill Publishing Company Limited, 2002.
- [13] *MAQUINAS, UNA HISTORIA ILUSTRADA - SIGVARD STRANDH - 9788486115203*. Accedido: 27 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.agapea.com/libros/Maquinas-una-historia-ilustrada-9788486115203-i.htm>
- [14] «Wayback Machine», 5 de octubre de 2014. <https://web.archive.org/web/20141005221247/http://services.eng.uts.edu.au/~johnd/ICEngines/HISTORY%20OF%20THE%20OTTO.pdf> (accedido 27 de enero de 2023).
- [15] «Inventos de la Revolución Industrial timeline.», *Timetoast timelines*. <https://www.timetoast.com/timelines/inventos-de-la-revolucion-industrial-24af1cfd-88ab-40ee-b6f5-e72700e39066> (accedido 27 de enero de 2023).
- [16] H. I. H. Saravanamuttoo, G. F. C. Rogers, y H. Cohen, *Gas Turbine Theory*. Pearson Education, 2001.
- [17] Rfdarsie, «History in Photos: Alfred Palmer», *History in Photos*, 19 de septiembre de 2013. <http://historyinphotos.blogspot.com/2013/09/alfred-palmer.html> (accedido 1 de febrero de 2023).
- [18] G. B. BORJA, *Motores de reacción y turbinas de gas. 2.ª edición*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2018.
- [19] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, y A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. 2004, p. 396. doi: 10.1201/9781420037739.
- [20] «Los submarinos y Arquímedes – ESO es Ciencia». <https://esoesciencia.isdata.es/ciencias-naturales/el-mundo-material/los-submarinos-y-arquimedes/> (accedido 1 de febrero de 2023).
- [21] «aspectos actuales de la propulsión naval nuclear», *studylib.es*. <https://studylib.es/doc/5417201/aspectos-actuales-de-la-propulsión-naval-nuclear> (accedido 30 de enero de 2023).
- [22] «Powering the Navy», *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/nnsa/missions/powering-navy> (accedido 30 de enero de 2023).
- [23] «GALLERY | EB Landing». <https://eblanding.com/gallery/> (accedido 1 de febrero de 2023).
- [24] *Nuclear Submarine Decommissioning and Related Problems*. Accedido: 30 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-1758-3>
- [25] «Así es el nuevo Toyota Mirai: ya estamos más cerca del coche de hidrógeno», *El Español*, 8 de diciembre de 2020. https://www.elespanol.com/motor/20201208/nuevo-toyota-mirai-cerca-coche-hidrogeno/541725826_3.html (accedido 1 de febrero de 2023).
- [26] D. J. Housel, *Revolución Industrial (Industrial Revolution)*. Teacher Created Materials, 2015.
- [27] F. Serratos, *El capitaloceno: Una historia radical de la crisis climática*. UNAM, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, 2021.
- [28] M. B. Perdices y M. del R. H. Celemín, *Fuentes de energía para el futuro*. Ministerio de Educación, 2008.
- [29] «La eolípila, primera máquina de vapor de la Historia - Naturgy». https://www.naturgy.com/la_eolipila_primera_maquina_de_vapor_de_la_historia_ (accedido 31 de enero de 2023).

- [30] BBVA, «Cuál es el origen y la historia del petróleo», *BBVA NOTICIAS*. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/cual-es-el-origen-la-historia-y-el-impacto-del-petroleo-en-el-medioambiente/> (accedido 31 de enero de 2023).
- [31] E. B. Brucart, *El Gas Natural*. Reverte, 1982.
- [32] C. Azzaro-Pantel, *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*. Academic Press, 2018.
- [33] O. Santiago, «3 métodos para el almacenamiento de hidrógeno», *Apilados*, 1 de mayo de 2016. <https://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/> (accedido 26 de enero de 2023).
- [34] «Técnicas de producción del Hidrogeno y rendimientos», *studylib.es*. <https://studylib.es/doc/6031844/técnicas-de-producción-del-hidrogeno-y-rendimientos> (accedido 31 de enero de 2023).
- [35] M. Hirscher, *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage*. John Wiley & Sons, 2010.
- [36] T. Wallner *et al.*, «Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, n.º 24, pp. 7607-7618, dic. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.08.067.
- [37] «BMW Hydrogen 7», *Autopista*. https://www.autopista.es/noticias-motor/bmw-hydrogen-7_91390_102.html (accedido 1 de febrero de 2023).
- [38] «Elegir el mejor método de almacenamiento de hidrógeno». <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-almacenamiento-hidrogeno-cicenergigune> (accedido 1 de febrero de 2023).
- [39] O. Santiago, «Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques», *Apilados*, 22 de octubre de 2017. <https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [40] I. G. Zuriaga, «104 ECONOMÍA ARAGONESA | JULIO 202».
- [41] «FRAGE DES MONATS FEBRUAR - Energie · Gebäude · Umwelt - FH Münster». https://www.fh-muenster.de/egu/fue/fue_gebiete/sektorenkopplung/hymat/FRAGEDESMONATSFEB.php (accedido 8 de marzo de 2023).
- [42] C. Ramírez Sánchez-Maroto, «Estrategia Española del Hidrógeno», *Actual. Juríd. Ambient.*, n.º 114 (Julio), pp. 81-98, 2021.
- [43] «GREEN HYSLAND», *Centro Nacional de Hidrógeno*. <https://www.cnh2.es/cnh2/green-hysland/> (accedido 8 de marzo de 2023).
- [44] veintiunoaguila, «Repsol joins H24All consortium to develop cutting-edge renewable hydrogen technology», *Hydrogen Central*, 1 de febrero de 2021. <https://hydrogen-central.com/repsol-h24all-cutting-edge-renewable-hydrogen-technology/> (accedido 8 de marzo de 2023).
- [45] «Inventor Webinars 1 Autodesk». <https://www.autodesk.com/campaigns/designandmfg/webinars/inventor> (accedido 3 de marzo de 2023).
- [46] «Startseite», *TU Dresden*. https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilr/lft/elamx2/startseite?set_language=en (accedido 3 de marzo de 2023).

- [47] «The Partner Update - Spring 2015». <https://www.solidworks.com/sw/products/partner-update-spring-2015.htm> (accedido 3 de marzo de 2023).
- [48] A. G. García-Conde, «Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno».
- [49] gasworld, «HyGear expands hydrogen trailer fleet», *gasworld*, 5 de julio de 2019. <https://www.gasworld.com/story/hygear-expands-hydrogen-trailer-fleet/> (accedido 26 de enero de 2023).
- [50] R. A. Miller, «Building A Biogas Highway In The U.S.», *BioCycle*, 28 de marzo de 2014. <https://www.biocycle.net/building-a-biogas-highway-in-the-u-s/> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [51] «Composites end markets: Pressure vessels (2023)». <https://www.compositesworld.com/articles/composites-end-markets-pressure-vessels-2023> (accedido 3 de febrero de 2023).
- [52] «Rodman 66», *Rodman*. <https://rodman.es/en/producto/professional-nautical/patrol-boats/rodman-66/> (accedido 5 de marzo de 2023).
- [53] «C18 Motores diésel industriales | Cat | Caterpillar», https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18375224.html. https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18375224.html (accedido 6 de febrero de 2023).
- [54] «Programa para calcular el Área de Superficie de Elipsoide – Barcelona Geeks». <https://barcelonageeks.com/programa-para-calcular-el-area-de-superficie-del-elipsoide/> (accedido 8 de febrero de 2023).
- [55] vangie, «Chapter 10: Tensiones y deformaciones en cilindros», *SlideServe*, 20 de octubre de 2012. <https://www.slideserve.com/vangie/chapter-10-tensiones-y-deformaciones-en-cilindros> (accedido 13 de febrero de 2023).
- [56] pipesfactory, «ASTM A106/ASME SA106 “Grade C” Carbon Steel Pipes & Tube Specifications», 6 de noviembre de 2018. <https://www.steelpipesfactory.com/material-grades-standards/astm-a106-asme-sa106-grade-c/> (accedido 13 de febrero de 2023).
- [57] pipesfactory, «ASTM A312/ASME SA312 TP316L Stainless Steel Pipes & Tube Specifications», 18 de noviembre de 2018. <https://www.steelpipesfactory.com/material-grades-standards/astm-a312-asme-sa312-tp316l/> (accedido 13 de febrero de 2023).
- [58] *ASME 2015 BPVC VIII Div 1*. Accedido: 25 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/ASME2015BPVCVIIDiv1>
- [59] «Fondos y cabezales de recipientes en la industria petroquímica», *Fondos y cabezales de recipientes en la industria petroquímica*. <https://inevid.blogspot.com/2014/07/Fondos-y-cabezales-de-recipientes-en-la-industria-petroquimica.html> (accedido 7 de marzo de 2023).
- [60] «DV B, DV S, DV R - Válvula de alivio de presión de alta presión by KRACHT GmbH | DirectIndustry». <https://www.directindustry.es/prod/kracht-gmbh/product-33579-1720584.html> (accedido 7 de marzo de 2023).
- [61] S. García-Castillo, «Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto», 2007.
- [62] «M40J-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf». Accedido: 17 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/M40J-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf>

- [63] «presentacion Castillo Sebastián - Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos.pptx».
<https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Friunet.upv.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10251%2F72577%2Fpresentacion%2520Castillo%2520Sebasti%25C3%25A1n%2520-%2520An%25C3%25A1lisis%2520de%2520criterios%2520de%2520fallo%2520para%2520materiales%2520compuestos.pptx%3Fsequence%3D2&wdOrigin=BROWSELINK> (accedido 24 de febrero de 2023).
- [64] Bedar Rauf, «Composite materials 1», 11:53:50 UTC. Accedido: 22 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/Bedar1988/composite-materials-1>
- [65] R. Dey y A. Zanoto, «Regulations, Codes and Standards FOR FIRST RESPONDERS».

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

La implementación de depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno para la propulsión de motores térmicos tiene implicaciones sociales significativas. En primer lugar, el uso de hidrógeno como combustible alternativo podría reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que podría disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, mejorando así la calidad del aire y reduciendo los impactos negativos en la salud humana. Además, la implementación de esta tecnología podría impulsar la creación de empleos en la industria de energías limpias, lo que podría tener un efecto positivo en la economía y en la sociedad en general.

En cuanto a las implicaciones económicas e industriales que repercuten en este trabajo, se trata de una tecnología que podría generar nuevas oportunidades de negocio para las empresas que se dedican a la fabricación y distribución de componentes de hidrógeno y sistemas de propulsión de motores térmicos. Además, el uso de hidrógeno como combustible alternativo podría contribuir a la reducción de los costes de combustible para los usuarios finales, especialmente en el sector del transporte marítimo. Sin embargo, también existen riesgos asociados a la implementación de esta tecnología, incluyendo la necesidad de inversión en infraestructuras de hidrógeno, que podrían representar una barrera para la adopción generalizada de esta tecnología.

El empleo de hidrógeno como combustible puede tener importantes implicaciones ambientales. Principalmente porque el hidrógeno es un combustible limpio que no produce emisiones. Además, el uso de hidrógeno producido a partir de fuentes renovables puede reducir la huella de carbono de las empresas y contribuir a la lucha contra el cambio climático. Por otro lado, es importante tener en cuenta los riesgos ambientales asociados con el almacenamiento y manejo de hidrógeno, como posibles fugas o escapes.

Finalmente, este combustible puede acarrear problemas futuros en cuanto a la salud y seguridad de las personas. Es necesario tener en cuenta los riesgos asociados con la manipulación y almacenamiento de hidrógeno, que puede ser inflamable y explosivo, siendo necesario obtener el certificado ATEX. Además, es importante asegurar que los depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno cumplan con los estándares de seguridad establecidos por las normativas nacionales e internacionales, como la ASME VIII Div 1 y la ISO/TS 15869:2009 entre otras, para garantizar la seguridad de su funcionamiento y el personal que los maneja.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El diseño de los depósitos de almacenamiento de hidrógeno para su utilización en la propulsión de una embarcación es un proceso técnico que se enfoca en la creación de soluciones eficientes y seguras para el almacenamiento y transporte de este combustible. Aunque es importante considerar la seguridad y el impacto ambiental en el diseño de estos depósitos, no se requiere de una reflexión ética y social en este proceso.

En primer lugar, la reflexión ética y social se enfoca en la evaluación de las implicaciones morales y sociales de una acción o decisión. En el caso del diseño de depósitos de almacenamiento de hidrógeno para su uso en la propulsión de una embarcación, no se está tomando una decisión que afecte directamente a la sociedad o a la moralidad. Se trata de un proceso técnico que busca garantizar la eficiencia y seguridad en el uso del hidrógeno como combustible.

Además, el diseño de estos depósitos se realiza siguiendo estrictas normas y regulaciones técnicas que garantizan la seguridad y la eficiencia en su uso. Estas normas y regulaciones son establecidas por organismos especializados en el campo de la ingeniería y la seguridad.

ANEXO III: CÁLCULOS ESPESOR, DIÁMETRO Y PESO DEPÓSITO.

FICHA TÉCNICA MOTOR CATERPILLAR C18

Potencia máxima	597 kW
Par máximo	3710 N·m 1300 rpm
Velocidad nominal	1800-2000
Potencia mínima	20000429 kW
Emisiones	Stage V de la Unión Europea
Configuración del motor	6 cilindros en línea
Calibre	145 mm
Carrera	183 mm
Cilindrada	18,1 l
Relación de compresión	16:0:1
Aspiración	Posenfriamiento turboalimentado
Sistema de combustión	Inyección directa
Rotación desde el extremo volante	Hacia la izquierda
Longitud	1438 mm
Ancho	1132 mm
Altura	1356 mm
Peso neto seco	1717 kg

Tabla A3- 1 Ficha técnica motor Caterpillar C18 [53].

ESTIMACIÓN VOLUMEN DE LOS DEPÓSITOS PREVIO AL CÁLCULO

RADIO	LONGITUD								
(dm)	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1,4	103,86	110,01	116,17	122,33	128,49	134,64	140,80	146,96	153,12
1,6	137,79	145,84	153,88	161,92	169,96	178,01	186,05	194,09	202,13
1,8	177,11	187,29	197,47	207,65	217,83	228,00	238,18	248,36	258,54
2,0	222,01	234,57	247,14	259,70	272,27	284,84	297,40	309,97	322,54
2,2	272,68	287,89	303,09	318,30	333,50	348,71	363,91	379,12	394,32
2,4	329,34	347,44	365,53	383,63	401,72	419,82	437,91	456,01	474,10
2,6	392,18	413,42	434,65	455,89	477,13	498,37	519,60	540,84	562,08
2,8	461,40	486,03	510,66	535,29	559,92	584,55	609,18	633,81	658,44
3,0	537,21	565,49	593,76	622,04	650,31	678,58	706,86	735,13	763,41
3,2	619,81	651,98	684,15	716,32	748,49	780,66	812,83	845,00	877,17
3,4	709,39	745,71	782,02	818,34	854,66	890,97	927,29	963,61	999,92
3,6	806,16	846,87	887,59	928,30	969,02	1009,73	1050,45	1091,16	1131,88
3,8	910,32	955,68	1001,05	1046,41	1091,77	1137,14	1182,50	1227,87	1273,23
4,0	1022,06	1072,33	1122,60	1172,86	1223,13	1273,39	1323,66	1373,92	1424,19

Tabla A3- 2 Estimación volumen de los depósitos previo al cálculo.

MATERIALES ACERO-CARBONO SEGÚN 'S'.

MATERIAL	S, psi a 20°
A-106 A	15000
A-106 B	17100
A-106 C	20000

Tabla A3- 3 Acero-carbono según esfuerzo máximo admisible.

PRESIONES DE TRABAJO

Bar	Psi
200	2900,76
300	4351,14
400	5801,52
500	7251,9
600	8702,28
700	10152,66

Tabla A3- 4 Presiones de trabajo.

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full [Note (1)]	(b) Spot [Note (2)]	(c) None
(1)	Butt joints as attained by double-welding or by other means that will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-35. Welds using metal backing strips that remain in place are excluded.	None	A, B, C, and D	1.00	0.85	0.70
(2)	Single-welded butt joint with backing strip other than those included under (1)	(a) None except as in (b) below	A, B, C, and D	0.90	0.80	0.65
		(b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-13(b)(4) and Figure UW-13.1, sketch (i)	A, B, and C	0.90	0.80	0.65
(3)	Single-welded butt joint without use of backing strip	Circumferential butt joints only, not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) thick and not over 24 in. (600 mm) outside diameter	A, B, and C	NA	NA	0.60
(4)	Double full fillet lap joint	(a) Longitudinal joints not over $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) thick	A	NA	NA	0.55
		(b) Circumferential joints not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) thick	B and C [Note (3)]	NA	NA	0.55
(5)	Single full fillet lap joints with plug welds conforming to UW-17	(a) Circumferential joints [Note (4)] for attachment of heads not over 24 in. (600 mm) outside diameter to shells not over $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) thick	B	NA	NA	0.50
		(b) Circumferential joints for the attachment to shells of jackets not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) in nominal thickness where the distance from the center of the plug weld to the edge of the plate is not less than $1\frac{1}{2}$ times the diameter of the hole for the plug.	C	NA	NA	0.50
(6)	Single full fillet lap joints without plug welds	(a) For the attachment of heads convex to pressure to shells not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) required thickness, only with use of fillet weld on inside of shell; or	A and B	NA	NA	0.45
		(b) for attachment of heads having pressure on either side, to shells not over 24 in. (600 mm) inside diameter and not over $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) required thickness with fillet weld on outside of head flange only	A and B	NA	NA	0.45
(7)	Corner joints, full penetration, partial penetration, and/or fillet welded	As limited by Figure UW-13.2 and Figure UW-16.1	C and D [Note (5)]	NA	NA	NA
(8)	Angle joints	Design per U-2(g) for Category B and C joints	B, C, and D	NA	NA	NA

GENERAL NOTE: $E = 1.00$ for butt joints in compression.

NOTES:

(1) See UW-12(a) and UW-51.

(2) See UW-12(b) and UW-52.

(3) For Type No. 4 Category C joint, limitation not applicable for bolted flange connections.

Tabla A3- 5 Tablas UW 12 ASME VIII: Eficiencias máximas permisibles para juntas soldadas con gas y arco [58].

TOLERANCIAS PERMITIDAS

mm	in
1,000	0,039
1,500	0,059
2,000	0,079
3,000	0,118

Tabla A3- 6 Tolerancias permitidas.

RECIPIENTES DE PRESIÓN 6-101

Tabla 6-56. Fórmulas de diseño de recipientes para presión interna

Descripción	Fórmulas		Observaciones
Concha cilíndrica	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$	El esfuerzo perimetral (juntas longitudinales) cuando t no sobrepasa $0.5R$ o P no es mayor que $0.385SE$
Concha esférica	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$	Cuando t no sobrepasa $0.356R$ o P no es mayor que $0.665SE$
Cabeza hemisférica	$t = \frac{PL}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{L + 0.2t}$	Cuando t no sobrepasan $0.356L$ o P es mayor que $0.665SE$. L = radio interno.
Cabeza elipsoidal (semielipsoidal)	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$	Para cabezas semielipsoidales en las que $h = D/4$
	$t = \frac{PDK}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{SEt}{DK + 0.2t}$	Para valores de D/h de 2 a 6. $K = \frac{1}{6} \times [2 + (D/2h)^2]$
Cabeza toriesférica (de plato esférico)	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$	Para cabezas A.S.M.E. estándar en las que el radio mínimo de la articulación = 6% del radio interno de corona, pero no es menor que $3r$. L no debe ser de más que $D + 2r$.
	$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	Para valores de L/r de 1 a $16 \frac{1}{2}$. $M = \frac{1}{4}(3 + \sqrt{L/r})$. r debe ser al menos de $3r$ y $0.06 \times (D + 2r)$. L no debe sobrepasar $D + 2r$.
Cabeza cónica sin articulación de transición	$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (SE - 0.6P)}$	$P = \frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha}$	Se puede necesitar un anillo de refuerzo. Véanse los párrafos del Código UA5 (b) y (c). Aplicable para $\alpha \leq 30^\circ$.

Nomenclatura:

t = espesor de concha o cabeza, en pulg
 P = presión, en lb/pulg²
 S = esfuerzo permisible en lb/pulg²
 E = eficiencia conjunta, adimensional
 R = radio interno, en pulg
 D = diámetro interno de faldón de cabeza o longitud interna del eje mayor de una cabeza elipsoidal, en pulg
 h = profundidad interna de una cabeza elipsoidal, en pulg
 r = radio interno de charnela o articulación de una cabeza toriesférica, en pulg
 L = radio interno de cabeza hemisférica o radio de corona interna de una cabeza toriesférica, en pulg

Tabla A3- 7 Ecuaciones de diseño de recipientes para presión interna [58]

CÓDIGO ASME DE RECIPIENTES A PRESIÓN				Fecha:	feb-23
SECCIÓN VIII: REGLAS PARA CONSTRUCCIÓN DE RECIPIENTES A PRESIÓN - DIV. 1				Por:	A.E.
HOJA DE CÁLCULO				Rev.	A
UG-27: ESPESOR DE LA CARCASA POR PRESIÓN INTERNA				PESO DEL RECIPIENTE	
P: presión interna de diseño, psi	4351.14			ρ_{ac} : peso específico del acero, kg/m ³	7850
R: radio interior del cilindro, in	4.249			ρ_w : densidad del agua, kg/m ³	1000
S: esfuerzo máximo admisible, psi	20000			L: longitud tangente-tangente, m	1.734
E: eficiencia de la junta	1			D_i : diámetro interior, m	0.21584
c= tolerancia por corrosión	0.0591			W_H : peso de un cabezal, kg	7.8
$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$ (1) $t = \frac{PR}{SE + 0.4P}$ (2)				t_c : espesor comercial, m	0.02858
(c) Carcasa cilíndrica			$t_m = t + c$	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (MAWP)	
(1) esfuerzos circunferenciales (juntas longitudinales)	$t =$	1.063	$t =$	1.063	
(2) esfuerzos longitudinales (juntas circunferenciales)	$t =$	0.443	$t_m =$	1.122	
UG-32: CABEZALES Y SECCIONES, PRESIÓN EN EL LADO CÓNCAVO				PESO VACÍO	
P: presión interna de diseño, psi	4351.14		0.502	$W_B = 1.2 \rho_{ac} \frac{\pi}{4} L [(D_i + 2t)^2 - D_i^2] + 2W_H$	374.07
D: diámetro interior, pulg	8.498			PESO LLENO DE AGUA	
S: esfuerzo máximo admisible, psi	20000			peso del agua: $W_w = \rho_w \frac{\pi}{4} D_i^2 L$	63.45
E: eficiencia de la junta	1			peso total (kg) $W_F = W_B + W_w$	437.51
c= tolerancia por corrosión	0.0591				
$t_c = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$					
(c) carcasa cilíndrica					
(1) cabezales elipsoidales, con $t/L \geq 0.002$	$t =$	0.945	$t_m =$	1.004	

Figura A3- 1 Hoja de cálculo de recipientes a presión.

DIÁMETROS Y ESPESORES NORMALIZADOS

Øe mm	Øe in	tn mm (Sch 160 Y XXS)	tn in (Sch 160 Y XXS)
60,30	2,37	11,07	0,44
73,00	2,87	9,52	0,37
88,90	3,50	15,24	0,60
101,60	4,00	NO HAY	NO HAY
114,30	4,50	13,49	0,53
141,30	5,56	15,88	0,63
168,30	6,63	18,26	0,72
219,10	8,63	23,01	0,91
273,00	10,75	28,58	1,13
323,85	12,75	33,34	1,31
355,60	14,00	35,70	1,41
406,40	16,00	40,50	1,59
457,20	18,00	45,20	1,78
508,00	20,00	50,00	1,97

Tabla A3- 8 Diámetros y espesores normalizados.

CÁLCULO DE DIÁMETRO INTERIOR

Øi mm	Øi in	Ri in
38,16	1,502	0,751
53,96	2,124	1,062
58,42	2,300	1,150
NO HAY	NO HAY	NO HAY
87,32	3,438	1,719
109,54	4,313	2,156
131,78	5,188	2,594
173,08	6,814	3,407
215,84	8,498	4,249
257,17	10,125	5,062
284,2	11,189	5,594
325,4	12,811	6,406
366,8	14,441	7,220
408	16,063	8,031

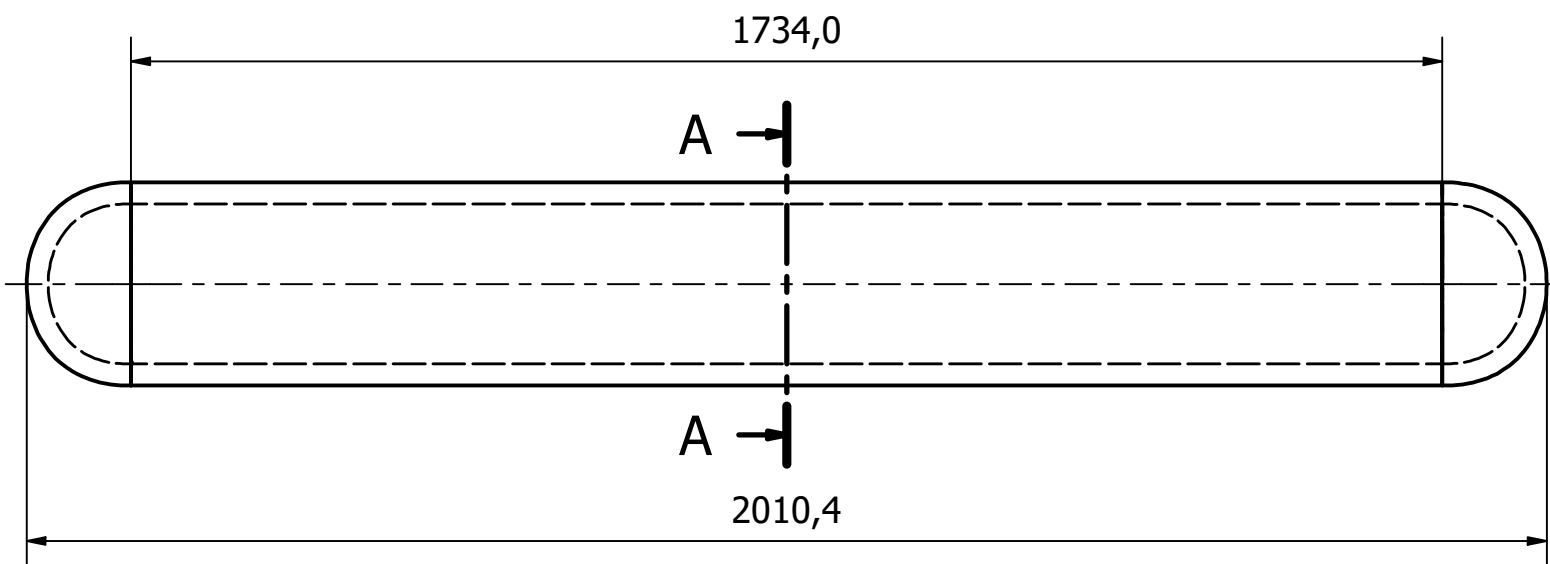
Tabla A3- 9 Cálculo de diámetro interior.

VOLÚMENES TANQUE CILÍNDRICO CON CABEZAL ESFÉRICA

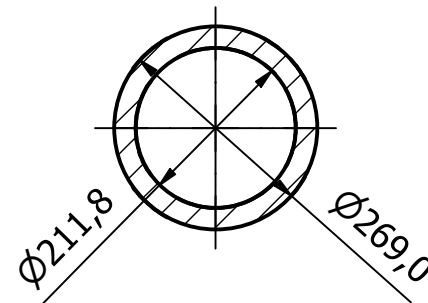
Øi	PRESIÓN (BAR)					
(in)	700	600	500	400	300	200
1,502	0,607	0,501	0,407	0,323	0,247	0,178
2,124	0,834	0,685	0,551	0,432	0,325	0,228
2,300	0,898	0,736	0,592	0,463	0,347	0,242
2,718	NO HAY	NO HAY	NO HAY	NO HAY	NO HAY	NO HAY
3,438	1,313	1,071	0,856	0,663	0,489	0,332
4,313	1,633	1,329	1,058	0,816	0,599	0,402
5,188	1,952	1,587	1,261	0,970	0,708	0,471
6,814	2,546	2,065	1,638	1,256	0,912	0,600
8,498	3,160	2,561	2,028	1,551	1,122	0,734
10,125	3,754	3,040	2,405	1,837	1,326	0,863
11,189	4,143	3,353	2,652	2,024	1,459	0,948
12,811	4,735	3,831	3,028	2,309	1,662	1,077
14,441	5,330	4,311	3,405	2,595	1,866	1,206
16,063	5,922	4,788	3,781	2,880	2,069	1,335

Tabla A3- 10 Relación de espesor SA-106 C en función de presión y Øi in.

ANEXO IV: PLANOS



A-A (1 : 10)



Dibujado	24/03/2023		Nombre	Iván Méndez Díaz			CUD - ENM	
Unidades	mm		Grupo	1	Nº	1		
Escala	Formato		Depósito acero-carbono SA 106 grado C				Lámina	1
1:10	A4						Nº	

D

C

B

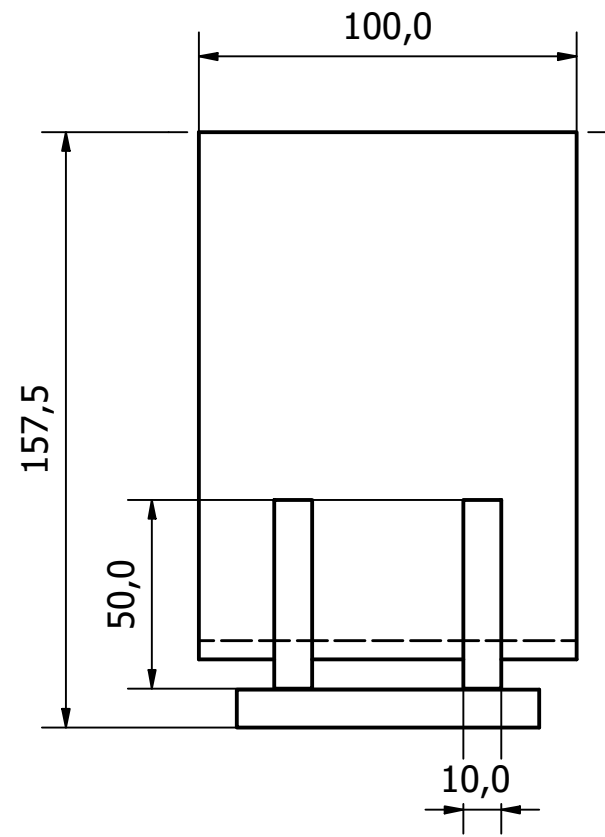
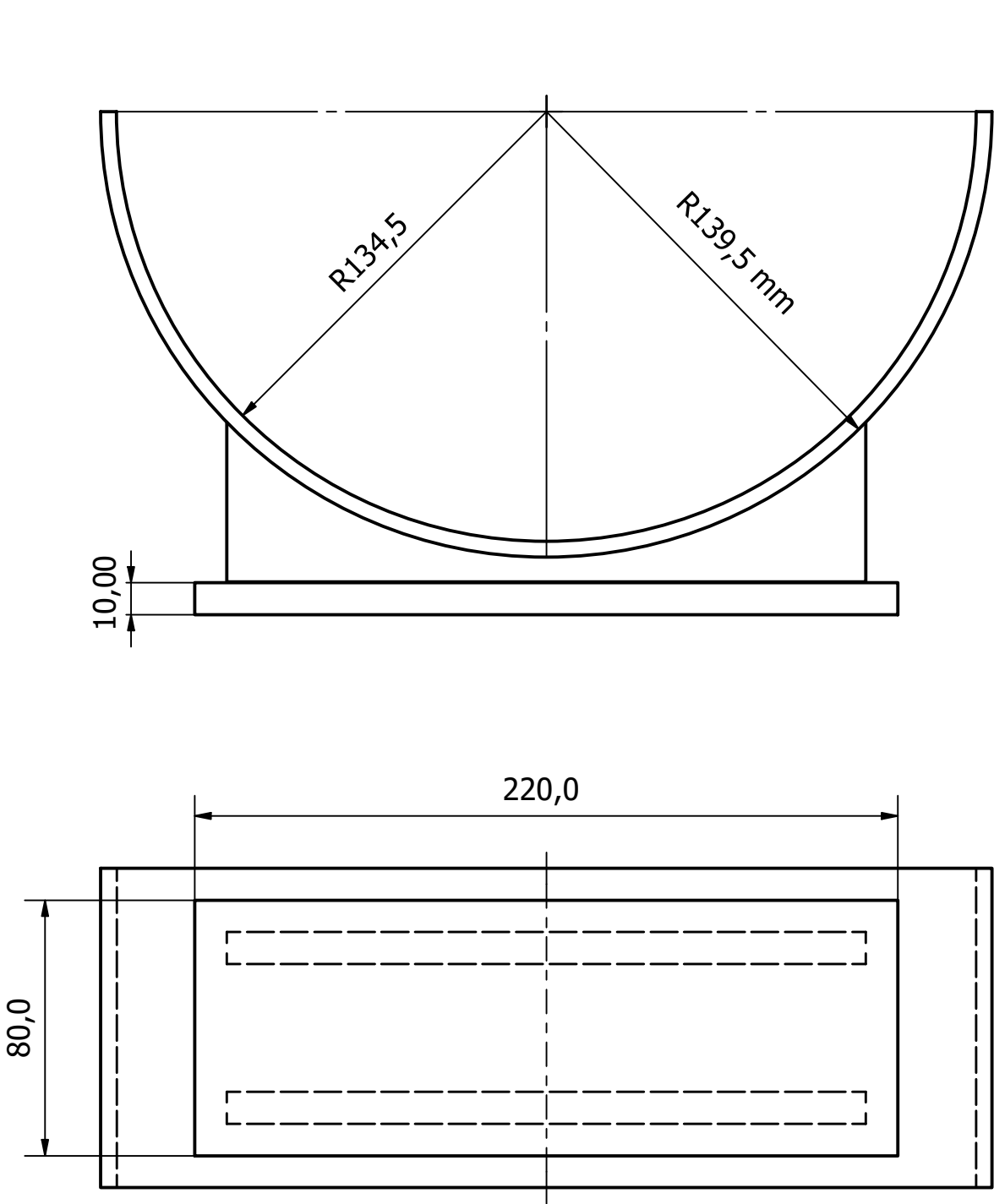
A

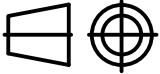
D

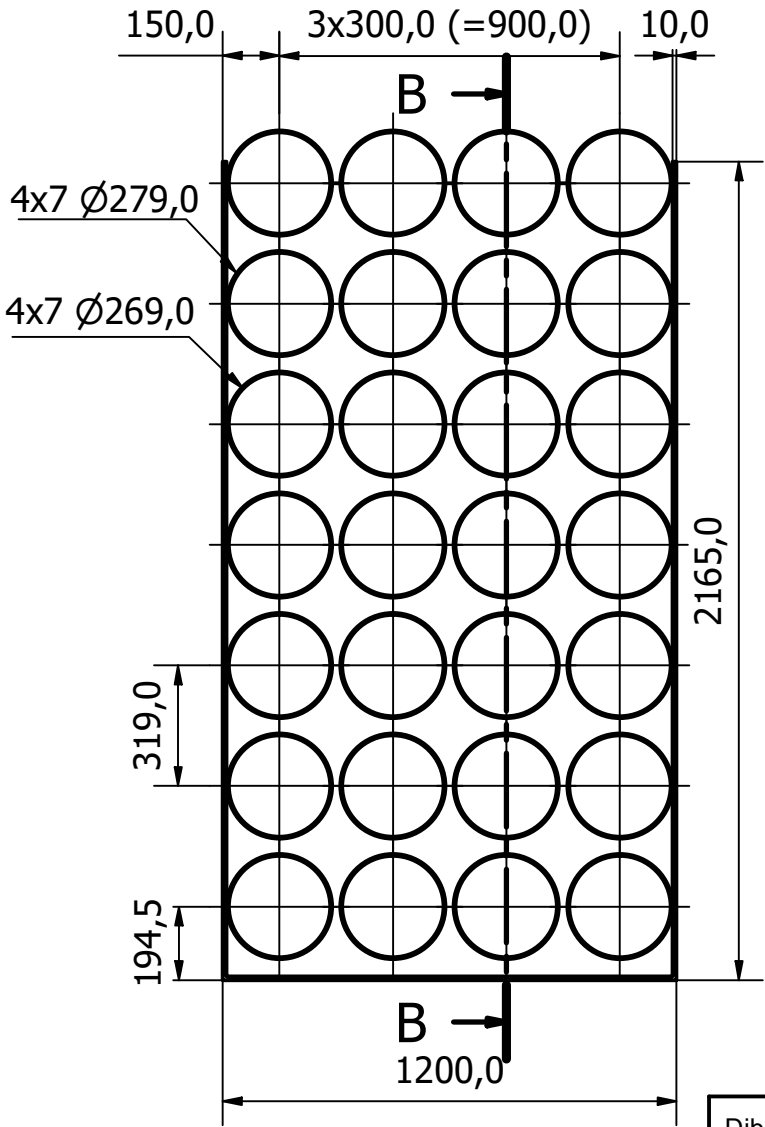
C

B

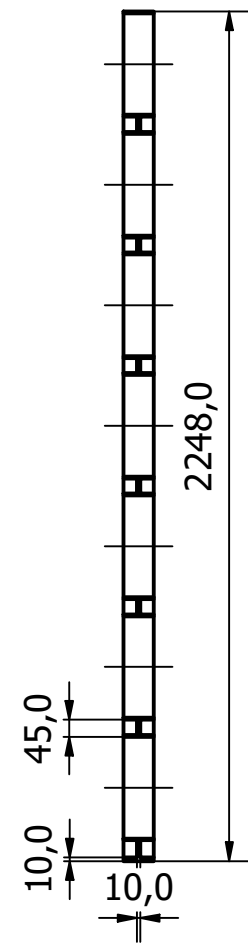
A



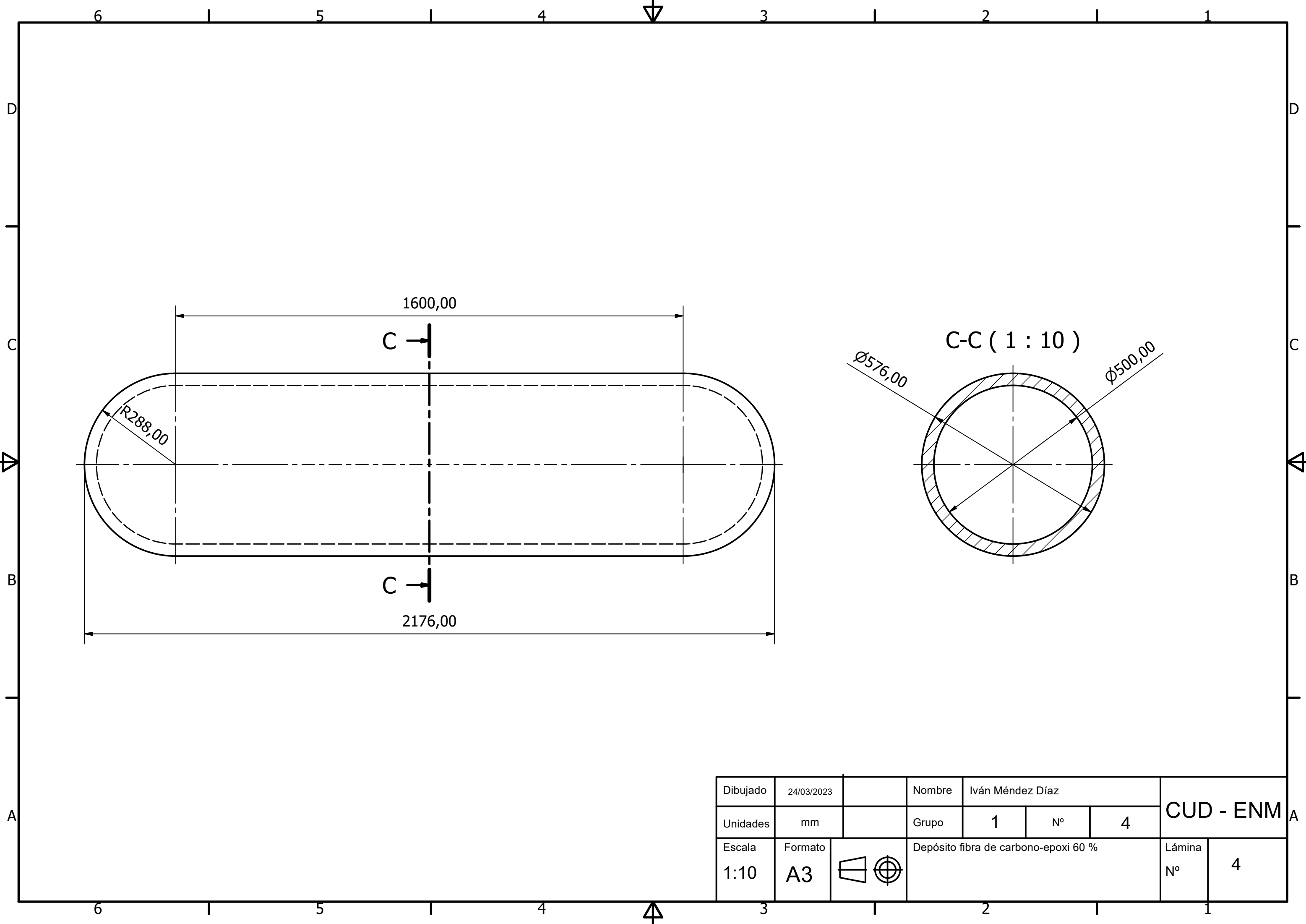
Dibujado	24/03/2023		Nombre	Iván Méndez Díaz			CUD - ENM
Unidades	mm		Grupo	1	Nº	2	
Escala	Formato		Soporte depósito acero-carbono SA 106 grado C				Lámina
1:2	A3						Nº 2



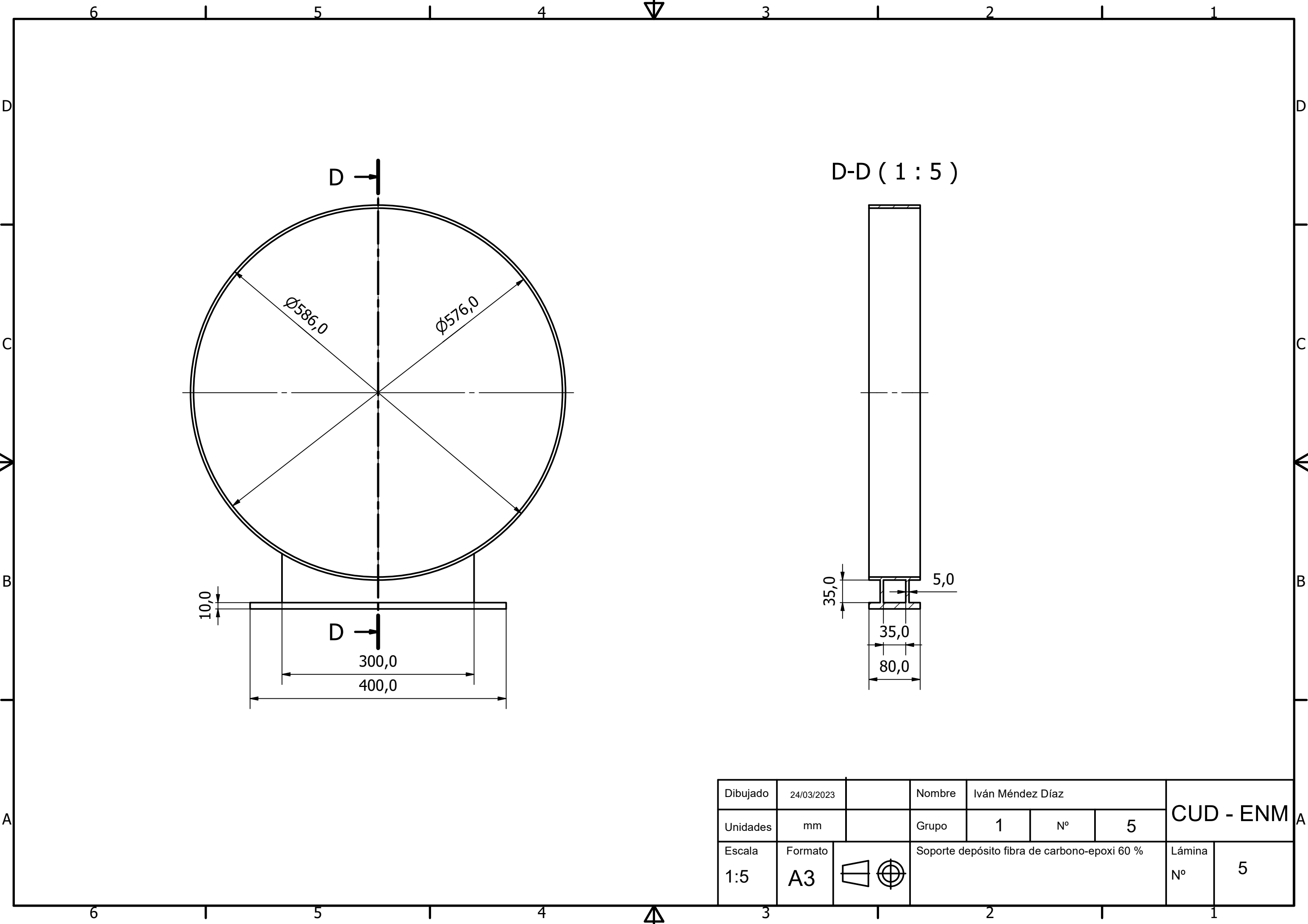
B-B (1 : 20)



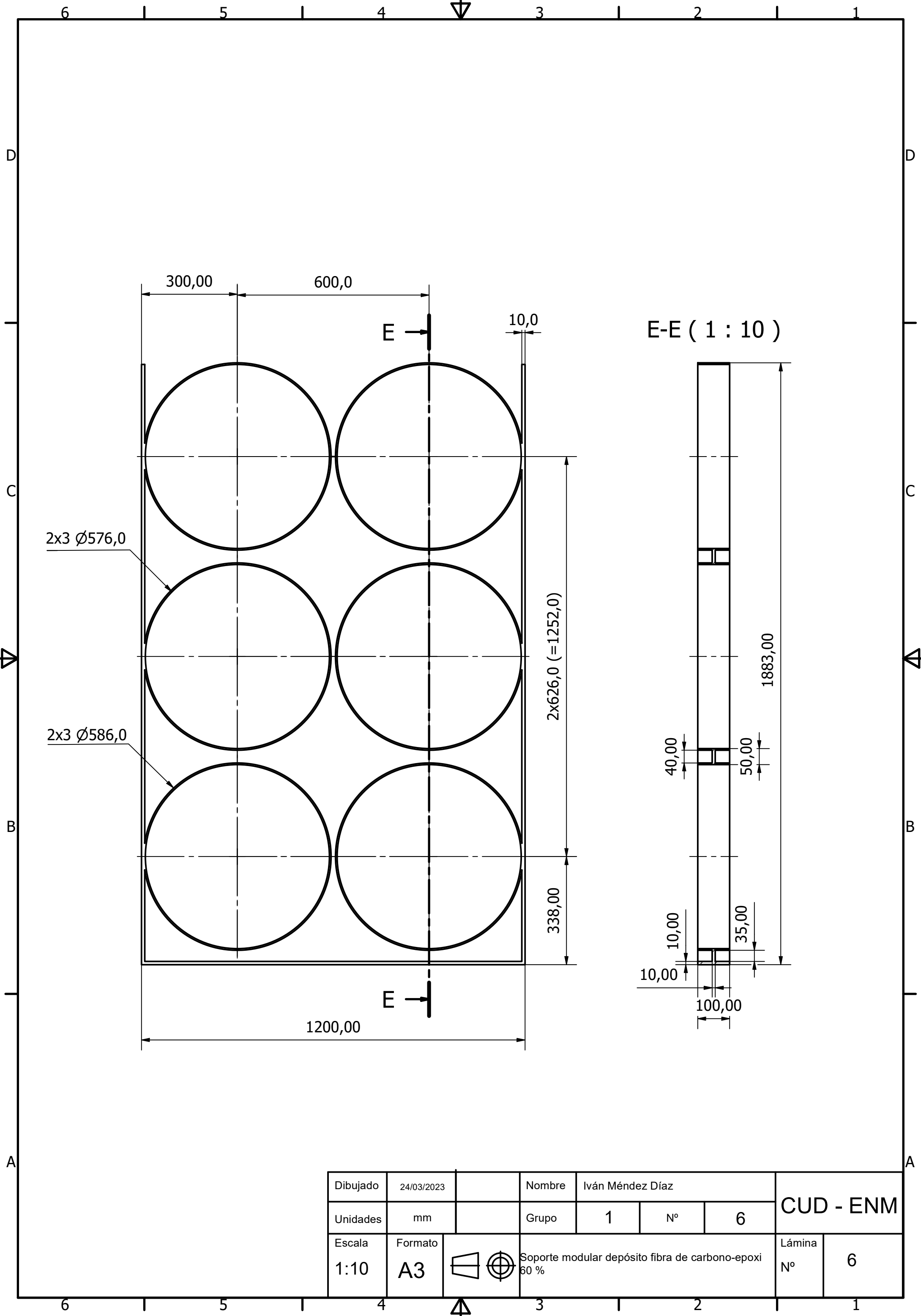
Dibujado	24/03/2023		Nombre	Iván Méndez Díaz			CUD - ENM	
Unidades	mm		Grupo	1	Nº	3		
Escala	Formato		Soporte modular depósito acero-carbono SA 106 gr. A101 Ca				Nº	3
1:20	A4							



Dibujado	24/03/2023		Nombre	Iván Méndez Díaz			CUD - ENM
Unidades	mm		Grupo	1	Nº	4	
Escala	Formato		Depósito fibra de carbono-epoxi 60 %				Lámina
1:10	A3						Nº 4



Dibujado	24/03/2023		Nombre	Iván Méndez Díaz			CUD - ENM
Unidades	mm		Grupo	1	Nº	5	
Escala	Formato		Soporte depósito fibra de carbono-epoxi 60 %				Lámina
1:5	A3						Nº
							5



Dibujado	24/03/2023		Nombre	Iván Méndez Díaz			CUD - ENM	
Unidades	mm		Grupo	1	Nº	6		
Escala	Formato			Soporte modular depósito fibra de carbono-epoxi 60 %			Lámina	6
1:10	A3						Nº	