



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Diseño y cálculo de un depósito de almacenamiento de hidrógeno para un vehículo industrial

MEMORIA PRESENTADA POR:

Ismael Grueso Garrido

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

DIRIGIDO POR:

Rafael Antonio Balart Gimeno

Juan Ivorra Martínez

Convocatoria de defensa: Septiembre 2020

"Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la que el carbón no es capaz [...] El agua será el carbón del futuro"

Julio Verne, "La isla misteriosa" (1874)

RESUMEN.

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO PARA VEHÍCULOS INDUSTRIALES”

Con este TFG se pretende hacer extensivo el uso de las tecnologías de combustibles limpios derivados del empleo de células de hidrógeno, al sector de los vehículos industriales. El TFG plantea el diseño de un depósito para almacenamiento de hidrógeno a alta presión, que cumpla con la normativa aplicable, y sea la base para la alimentación de células de combustible para el funcionamiento de vehículos industriales. EL TFG se aborda desde diversos puntos de vista ligados a la Ingeniería Mecánica, tales como el diseño y optimización, selección de materiales, fabricación, análisis de las prestaciones mecánicas, cumplimiento de normativa, etc. Además, se contempla la realización de un estudio previo sobre fabricación, en función de los materiales y geometrías definidas y el estudio de costes asociado.

PALABRAS CLAVE

Recipiente a presión, Sistema de almacenamiento, Pila de combustible, Hidrógeno, Vehículo industrial, Camión, Optimización laminado, Análisis elementos finitos, Análisis dinámico, material compuesto, fibra de carbono.

SUMMARY.

"DESIGN AND CALCULATION OF A HYDROGEN PRESSURE VESSEL FOR INDUSTRIAL VEHICLES"

This TFG aims to extend the use of clean fuel technologies derived from the use of hydrogen cells to the industrial vehicle sector. The TFG proposes the design of high-pressure hydrogen vessel, which complies with the applicable regulations, and the sea as the basis for the supply of fuel cells for the operation of industrial vehicles. The TFG is directed from various points of view linked to Mechanical Engineering, stories such as design and optimization, selection of materials, manufacturing, analysis of mechanical performance, compliance with regulations, etc. In addition, a preliminary study on manufacturing is contemplated, based on the materials and geometries defined and the study of associated costs.

KEYWORDS

Pressure vessel, Storage system, Fuel Cell, Hydrogen, Industrial Vehicle, Truck, Laminate optimization, Finite element analysis, Dynamic Analysis, Composite Material, Carbon fiber.

ÍNDICE

RESUMEN	I
SUMMARY.....	III
ÍNDICE.....	V
LISTADO DE FIGURAS.....	IX
LISTADO DE TABLAS.....	XI
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTADO DE LA TÉCNICA.....	3
1.1.1. El hidrógeno y sus propiedades.....	3
1.1.2. Producción de hidrógeno.....	5
1.1.3. Almacenamiento de hidrógeno	9
1.1.3.1. Almacenamiento de hidrógeno comprimido.....	9
1.1.3.2. Almacenamiento de hidrógeno líquido	12
1.1.3.3. Almacenamiento en hidruros metálicos.....	13
1.2. PILAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO.....	14
1.3. VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO	16
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO	21
2.1.1. Objetivo general.....	21
2.1.2. Objetivos particulares.....	21
2.2. JUSTIFICACIÓN DEL TFG.....	21
3. DISEÑO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	23
3.1. CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO	25
3.2. ANÁLISIS DINÁMICO VEHÍCULO.....	28
3.2.1. Fuerza por resistencia aerodinámica.....	28
3.2.2. Fuerza por resistencia a la rodadura	29
3.2.3. Fuerza por resistencia gravitatoria.....	30
3.2.4. Fuerza total resistente	31
3.2.5. Aceleración y fuerza de inercia.....	31
3.2.6. Cálculo potencia máxima.....	32
3.3. CONDICIONES DE TRABAJO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	33
3.4. DISEÑO EQUIPOS DEL SISTEMA.....	36

3.4.1.	Sistema motriz	36
3.4.2.	Celdas de combustible	38
3.4.3.	Batería recuperación de energía	40
3.4.4.	Sistema de regulación y abastecimiento	41
3.5.	DISEÑO DEPÓSITO EN SOLIDWORKS	42
3.5.1.	Cálculo del volumen necesario	42
3.5.2.	Diseño prototipo inicial.....	43
3.5.3.	Diseño prototipo final	45
3.5.4.	Diseño anclajes del depósito	49
3.5.5.	Diseño tapa protectora	51
3.6.	ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE LOS ESTADOS TENSIONALES	52
4.	SELECCIÓN DE MATERIALES	55
4.1.	ANÁLISIS EN ACERO Y ALUMINIO	57
4.2.	ANÁLISIS MATERIALES COMPUESTOS	58
4.2.1.	Análisis micromecánico, Modelo de Chamis	59
4.2.2.	Teoría clásica de laminación de placas	63
4.2.3.	Cálculo del ángulo mágico	67
4.2.4.	Optimización y cálculo del laminado mediante el software eLamX ² ...	68
4.2.4.1.	Laminado Isotrópico	70
4.2.4.2.	Laminado con ángulo mágico	72
4.2.4.3.	Laminado optimizado mediante software.....	74
5.	SIMULACIÓN MEDIANTE FEA	79
5.1.	ANÁLISIS ESTÁTICO MATERIALES COMPUESTOS.....	81
5.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO ACERO Y ALUMINIO.....	92
6.	FABRICACIÓN	97
6.1.	LINER INTERIOR DE HDPE	99
6.2.	CUERPO EN MATERIAL COMPUESTO	100
7.	ESTUDIO ECONÓMICO	101
7.1.	COSTES DE FABRICACIÓN LINER HDPE	103
7.2.	COSTES DE FABRICACIÓN MATERIAL COMPUESTO.....	105
7.3.	VIABILIDAD ECONÓMICA.....	108
8.	APÉNDICES	111
I.	BIBLIOGRAFÍA	112
II.	NORMATIVA	114
III.	PLANOS.....	115

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Demanda global de hidrógeno 1975-2018 en MT, IEA.....	5
Figura 2: Fuentes de producción global de hidrógeno	6
Figura 3: Consumo global de hidrógeno.....	6
Figura 4: Consumo de hidrógeno en la Industria Química	7
Figura 5: Planta de producción de hidrógeno en Alemania	8
Figura 6: Densidad hidrógeno en función de la presión de almacenamiento.....	9
Figura 7: Energía mínima necesaria para comprimir hidrógeno en función de la presión.....	10
Figura 8: Partes de un depósito Tipo IV utilizado en automoción.....	11
Figura 9: Estructura y composición de los tipos de depósitos utilizados para el almacenamiento de hidrógeno a presión.	12
Figura 10: Reacción química en una pila de hidrógeno.....	15
Figura 11: Componentes principales en un vehículo que funciona mediante pila de hidrógeno.	16
Figura 12: Camión a pila de hidrógeno, Nikola Tre	17
Figura 13: Emisiones de CO2 originadas por el transporte en la UE	18
Figura 14: Dimensiones cabeza tractora (sin carga).....	26
Figura 15: Semirremolque de lona DSV de 3 ejes	27
Figura 16: Descomposición de las fuerzas en el plano inclinado.....	30
Figura 17: Ciclo de conducción a velocidad constante que realiza el camión.....	33
Figura 18: Motor eléctrico Borg Warner HVH 410-075 Dual Stack modificado por Cascadian Motion	36
Figura 19: Curvas características motor HVH 410-075 Dual Stack. Potencia (a) y Par (b).....	37
Figura 20: Celda de hidrógeno Hydrogenics HyPM-HD 180	38
Figura 21: Batería HV, montada en los vehículos híbridos de Toyota	40
Figura 22: Sistema de almacenamiento de hidrógeno típico, con los elementos de regulación.	41
Figura 23: Disposición elementos en un camión Scania® a pila de hidrógeno	43
Figura 24: Deformaciones (a) Tensiones (b) en un depósito cilíndrico-rectangular	44
Figura 25: Depósito forma cilíndrico-rectangular.....	44
Figura 26: Dibujo en el plano del croquis del depósito cilíndrico.....	45
Figura 27: Forma inicial del depósito de hidrógeno, tras la operación de revolución.	46
Figura 28: Posición de la superficie de sujeción del depósito.	47
Figura 29: Diseño final depósito de hidrógeno forma cilíndrica	47
Figura 30: Base del anclaje para el depósito.	49
Figura 31: Diseño del anclaje para el sistema de almacenamiento.....	50
Figura 32: Anclaje del depósito tras realizar los agujeros de sujeción y de rebaja de peso.....	50
Figura 33: Diseño inicial tapa protectora del depósito.	51
Figura 34: Diseño final tapa protectora del depósito.....	51
Figura 35: Diagrama solido libre de un depósito cilíndrico sometido a tensión longitudinal	52
Figura 36: Diagrama solido libre sección sometida a tensión circunferencial	53
Figura 37: Estado tensional superficie de un recipiente a presión de pared delgada.....	54
Figura 38: Estado tensional depósito de Hidrógeno sometido a una presión interna de 100 MPa.....	54
Figura 39: Niveles de análisis material compuesto	59
Figura 40: Estado tensional de una lamina.....	60
Figura 41: Estado tensional lámina de material compuesto, con las fibras orientadas en un ángulo θ	62
Figura 42: Lamina de material compuesto de un determinado espesor h.....	63
Figura 43: Sección vertical laminado compuesto	63
Figura 44: Distribución de tensiones y deformaciones de un laminado simétrico (Arriba) y de un laminado asimétrico (Abajo)	64

Figura 45: Estado tensional de un laminado de material compuesto.	64
Figura 46: Definición de momentos en un estado tensional de un laminado.....	65
Figura 47: Estado tensional de un laminado orientado un determinado ángulo α	67
Figura 48: Cálculo material compuesto mediante el software eLamX.	70
Figura 49: Polar chart laminado [0,45,-45,90]s	71
Figura 50: Matriz de esfuerzos-deformaciones, y tensiones alcanzadas en las direcciones del laminado	72
Figura 51: Tensiones soportadas por las 10 primeras capas del laminado	73
Figura 52: Grafico polar del laminado [55,-55]s	73
Figura 53: Modulo de optimización del programa eLamX	74
Figura 54: Tensiones en el laminado optimizado.	75
Figura 55: Grafica polar del laminado optimizado.	76
Figura 56: Matriz ABD representado con la letra (a) y su inversa representada con la letra (b)	77
Figura 57: Definición características material compuesto en Solid Works	81
Figura 58: Pestaña definición de laminado en SolidWorks	82
Figura 59: Definición de la superficie de referencia para el laminado	82
Figura 60: Representación de las sujeciones en el apartado de simulación de SolidWorks	83
Figura 61: Representación presión interna en el depósito.	83
Figura 62: Mallado del depósito de almacenamiento de hidrógeno en SolidWorks	84
Figura 63: Tensiones en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 100 MPa	85
Figura 64: Desplazamientos depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 100 MPa.....	86
Figura 65: Tensiones en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 70 MPa	88
Figura 66: Desplazamientos en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 70 MPa	89
Figura 67: Tensiones en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 157.5 MPa	90
Figura 68: Desplazamientos en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 157.5 MPa .	91
Figura 69: Tensiones obtenidas para acero aleado SJ 275 de 36 mm de espesor y 100 MPa	93
Figura 70: Desplazamientos obtenidos para acero SJ275 y 36 mm de espesor y 100 MPa	94
Figura 71: Tensiones obtenidas para aluminio 7050 y 36 mm de espesor y 100 MPa.....	95
Figura 72: Desplazamientos obtenidos para aluminio 7050 y 36 mm de espesor y 100 MPa	96
Figura 73: Secuencia de moldeo por inyección soplado para la fabricación de recipientes de PE	99
Figura 74: Proceso de conformado de materiales compuestos mediante el bobinado filamentos.....	100
Figura 75: Cálculo coste fabricación liner en Ces-EduPack.....	103
Figura 76: Introducción del material compuesto en la base de datos de CES EduPack	105
Figura 77: Cálculo de costes fabricación de material compuesto	106
Figura 78: Grafica punto de equilibrio y beneficio por unidades vendidas	109

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Características del Hidrógeno. (*Concentración de H ₂ en aire).....	3
Tabla 2: Comparación de tipos de combustible	4
Tabla 3: Características técnicas camión articulado, con carga	25
Tabla 4: Dimensiones cabeza tractora, sin carga	26
Tabla 5: Dimensiones y capacidad del semirremolque	27
Tabla 6: Masa de hidrógeno necesaria según la autonomía del vehículo.	35
Tabla 7: Características Técnicas de la celda de combustible HyPM-HD 180.....	39
Tabla 8: Características Técnicas batería HV de Ion de Litio de Panasonic	40
Tabla 9: Volumen de H ₂ a 1 000 bares en función de la autonomía del vehículo.	42
Tabla 10: Dimensiones del croquis del depósito de almacenamiento	48
Tabla 11: Propiedades mecánicas del acero y aluminio	57
Tabla 12: Propiedades y características mecánicas del Epoxi	68
Tabla 13: Propiedades y características mecánicas Fibra de Carbono High Module	69
Tabla 14: Propiedades y características mecánicas material compuesto	69
Tabla 15: Constantes ingenieriles del laminado optimizado mediante el software eLamX	77
Tabla 16: Costo fabricación liner interior en HDPE	104
Tabla 17: Costes de maquinaria y producción Liner en HDPE	104
Tabla 18: Coste fabricación material compuesto depósito almacenamiento de hidrógeno.....	106
Tabla 19: Costo maquinaria fabricación material compuesto depósito almacenamiento de hidrógeno	107
Tabla 20: Costes variables de fabricación del depósito de almacenamiento de hidrógeno	108
Tabla 21: Costos fijos fabricación depósito H ₂	108
Tabla 22: Evolución costos e ingresos producción depósitos de almacenamiento hidrógeno	110
Tabla 23: Presupuesto depósito de hidrógeno.....	110

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

○ ACRÓNIMOS Y SIGLAS

<i>CEPE</i>	Comisión económica para Europa de las Naciones Unidas.
<i>DGT</i>	Dirección General de Tráfico.
<i>DLP</i>	Dispositivo limitador de presión.
<i>GLP</i>	Gas licuado del petróleo.
<i>HV</i>	Hydrogen Vehicle.
<i>M.M.A</i>	Masa Máxima Autorizada.
<i>PMTP</i>	Presión máxima de trabajo permitida.
<i>PNT</i>	Presión nominal de trabajo.
<i>SAHC</i>	Sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido.
<i>TES</i>	Transport Group Strategy.
<i>TIR</i>	Transport International Routier.
<i>UE</i>	Unión Europea

○ LETRAS GRIEGAS

ν	Coefficiente de Poisson.
ρ	Densidad.
γ_m	Coefficiente de las masas rotativas.
α	Ángulo de pendiente.
θ	Ángulo de laminado.
σ	Tensión en MPa.
τ	Tensión de cortadura MPa.
ϵ	Vector de deformaciones.
γ	Vector de curvaturas.
π	Número Pi.

○ SUBÍNDICES

<i>c</i>	Esfuerzo de compresión.
<i>F</i>	Referido a la fibra en un material compuesto.
<i>L</i>	Referida a la dirección longitudinal.
<i>M</i>	Referida a la matriz en un material compuesto.
<i>T</i>	Referida a la dirección transversal
<i>t</i>	Esfuerzo de tracción.
<i>1</i>	Referido a la dirección transversal en el eje local.
<i>2</i>	Referido a la dirección transversal en el eje local.
<i>x</i>	Referido a la dirección sobre el eje longitudinal x.
<i>y</i>	Referido a la dirección sobre el eje transversal y.

○ MAYÚSCULAS

<i>Af</i>	Área frontal.
<i>Cx</i>	Coefficiente aerodinámico.

<i>E</i>	Modulo elástico.
<i>F_a</i>	Fuerza resistencia aerodinámica.
<i>F_g</i>	Fuerza resistencia gravitatoria.
<i>F_i</i>	Fuerza de inercia.
<i>f_r</i>	Coefficiente de rodadura.
<i>F_r</i>	Fuerza resistencia a la rodadura .
<i>G</i>	Módulo de cortadura.
<i>H₂</i>	Compuesto de hidrógeno.
<i>P</i>	Presión ejercida por un fluido.
<i>K</i>	Grados Kelvin.
<i>M</i>	Momentos ejercidos sobre un cuerpo (N·m)
<i>N</i>	Esfuerzos provocados por una tensión (N/mm).
<i>[Q]</i>	Matriz de rigideces
<i>S</i>	Tensión de rotura a cortadura.
<i>[S]</i>	Matriz de flexibilidad.
<i>[T]</i>	Matriz transformada.
<i>V</i>	Velocidad en m/s.
<i>V_c</i>	Volumen de un cilindro en m ³ .
<i>V_e</i>	Volumen de un esferoide en m ³ .
<i>W</i>	Trabajo realizado por un cuerpo.
<i>γ</i>	Tensión de rotura en el eje transversal.
<i>X</i>	Tensión de rotura.

○ **MINÚSCULAS**

<i>e</i>	Espesor.
<i>g</i>	Gravedad.
<i>k</i>	Vector de curvaturas
<i>h</i>	Altura del laminado.
<i>n</i>	Coefficiente de seguridad a la rotura.



INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

I. INTRODUCCIÓN

1.1. ESTADO DE LA TÉCNICA

1.1.1. El Hidrógeno y sus propiedades

El hidrógeno, el más sencillo de todos los elementos que forman la tabla periódica. Su átomo, formado por un protón y un electrón, y con la ausencia de neutrones hacen que el hidrógeno sea el elemento más ligero, hasta 15 veces más ligero que el aire.

El hidrógeno es elemento más abundante en el universo, se calcula que más del 75% del universo visible está compuesto por hidrógeno. Sin embargo, no se puede encontrar en estado libre en nuestro planeta, es tan ligero que escapa incluso a la gravedad de la Tierra ya que esta no es capaz de atraer una masa tan pequeña. En cambio, el hidrógeno puede encontrarse en la Tierra asociado con otros elementos, como por ejemplo para formar agua u otros compuestos químicos, o la materia orgánica esencial para la vida. Esto obliga a obtenerlo mediante otros procedimientos, y posteriormente almacenarlo, es ahí donde está el reto y donde más recursos se están invirtiendo hoy en día.

El hidrógeno es un vector energético, un combustible portador de energía, es decir no es un recurso natural como el petróleo o el gas natural, se debe producir, como ya se ha comentado anteriormente mediante diferentes procedimientos a partir de fuentes de energía, y este contendrá una cantidad de energía diferente una vez se ha producido.

Algunas de las propiedades del hidrógeno pueden observarse en la *Tabla 1*, el punto de ebullición es muy bajo de unos 20 K, (-252°C a 1 bar). El poder calorífico del hidrógeno es muy elevado si lo comparamos con otros combustibles como el Metano (55.53 kJ/g), sin embargo, al ser tan ligero y con una muy baja densidad, el poder calorífico del hidrógeno por unidad de volumen es extremadamente bajo frente a otros combustibles.

PROPIEDADES HIDRÓGENO	
Densidad	0.0899 kg/Nm ³ (gas)
	0.0708 kg/L (líquido)
Poder calorífico	Inferior: 119.83 kJ/g
	Superior: 141.86 kJ/g
Límite de inflamabilidad *	4.0 - 75.0 %
Límite de detonación *	18.3 - 59.0 %
Coeficiente de difusión	0.61 cm ² /s

Tabla 1: Características del Hidrógeno. (*Concentración de H₂ en aire)

Fuente: ARIEMA Energía y Medio Ambiente (www.ariema.com)

I. INTRODUCCIÓN

La energía de activación del hidrógeno es muy baja por lo que tiene una gran capacidad de inflamabilidad y detonación, por lo cualquier contacto con una superficie caliente, una pequeña chispa del choque de dos metales o incluso la energía estática puede hacer que prenda. Para poder ilustrar todas estas propiedades en la *Tabla 2* se muestran los datos de energía almacenada por unidad de masa y de volumen de algunos de los combustibles más utilizados en la actualidad.

ESTADO	COMBUSTIBLE	Energía Específica (kWh/kg)	Densidad de Energía (kWh/L)
Gas	H ₂ (700 bar, 25°C)	33.33	1.611
	H ₂ (1 bar, 25°C)	33.33	2.99·10 ⁻³
	Metano	11.39	9.97·10 ⁻³
	Gas Natural	≈13	≈9·10 ⁻³
	Etano	14.42	20.24·10 ⁻³
	Propano	12.88	25.89·10 ⁻³
	Butano	12.7	34.39·10 ⁻³
Líquido	H ₂ (1 bar, -252.8°C)	33.33	2.375
	Gasolina	≈12	≈9
	Benceno	11.75	10.33
	Etanol	8.251	6.51
	Metanol	5.47	4.44
	Amoníaco	5.706	3.41
Sólido	Carbón	8.717	≈ (15-20)
	Madera	4.756	≈ (2.8-5.6)

Tabla 2: Comparación de tipos de combustible

Para poder ilustrar estos resultados si se compara un depósito tradicional de gasolina de 50 litros (unos 48 kg), tendrían una cantidad de energía almacenada de 1580 MJ. Si ahora se intenta almacenar esa misma cantidad en hidrógeno a condiciones atmosféricas, haría falta un depósito de 158 m³ y tendría un peso de 13.2 kg.

Además, se deberá tener en cuenta que hay diferentes aceros que se vuelven frágiles cuando están en contacto con el hidrógeno durante un tiempo prolongado, y que es capaz de penetrar a través de fisuras, juntas e incluso diferentes materiales poliméricos debido a su baja densidad y ligereza.

1.1.2. Producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno por el hombre no es nueva, se conoce desde el siglo XIX llevado a cabo mediante el proceso de electrolisis. Este sencillo método es más que conocido y con él se consigue separar el hidrógeno del oxígeno a partir del agua, cuando esta es atravesada por una corriente eléctrica continua.

Sin embargo, para satisfacer la demanda de hidrógeno de toda una industria que demanda actualmente más de 70 millones de toneladas de hidrógeno puro, según la Agencia Internacional de la Energía, IAE por sus siglas en inglés (*Figura 1*). Mediante este método es impensable, ya que requieren grandes cantidades de electricidad. Por eso hoy en día la electrolisis supone solo un 4% de la cantidad de hidrógeno producida en todo el año a nivel global.

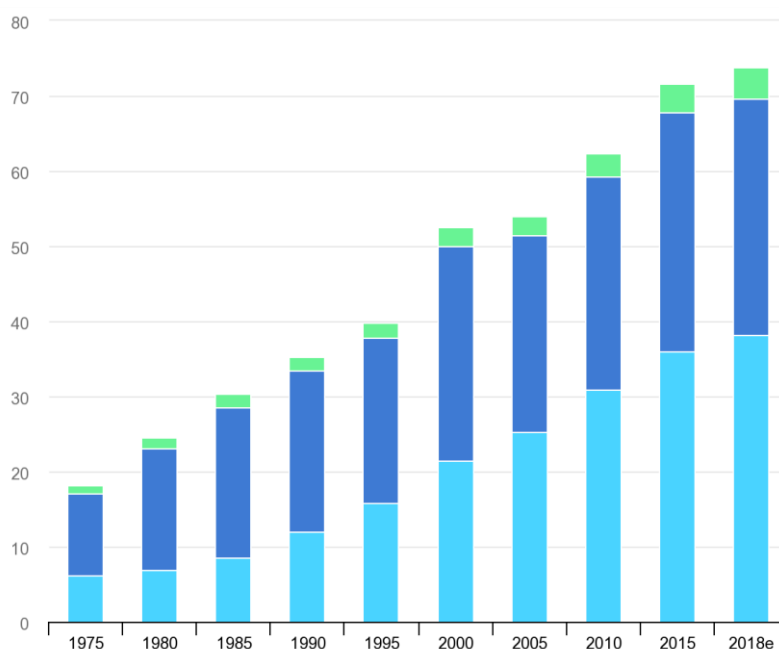


Figura 1: Demanda global de hidrógeno 1975-2018 en MT, IEA

Fuente: IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>

La producción de hidrógeno a partir de gas natural es hoy en día la opción más sencilla, rentable y menos contaminante a partir de la tecnología de la que se dispone actualmente. Este proceso consiste en romper las moléculas de gas natural (CH_4), mediante vapor de agua y en presencia de un catalizador. Este proceso representa un 48% aproximadamente de la producción anual global.

Otro método para la obtención de hidrógeno es calentando carbón a temperaturas superiores a 900°C , separando las moléculas de hidrógeno. Esta es la forma más antigua que se conoce de producción de hidrógeno y con el que se obtenía antiguamente el gas ciudad (60% H, 40% C). Este método de producción representa hoy en día un 18% de la producción mundial.

I. INTRODUCCIÓN

El resto de la producción de hidrógeno se debe al refinamiento de petróleo, hidrocarburos u otros derivados, para diferentes sectores de la industria química y petroquímica. En la *Figura 2* pueden observarse las diferentes fuentes de las que se obtiene el hidrógeno en la actualidad.

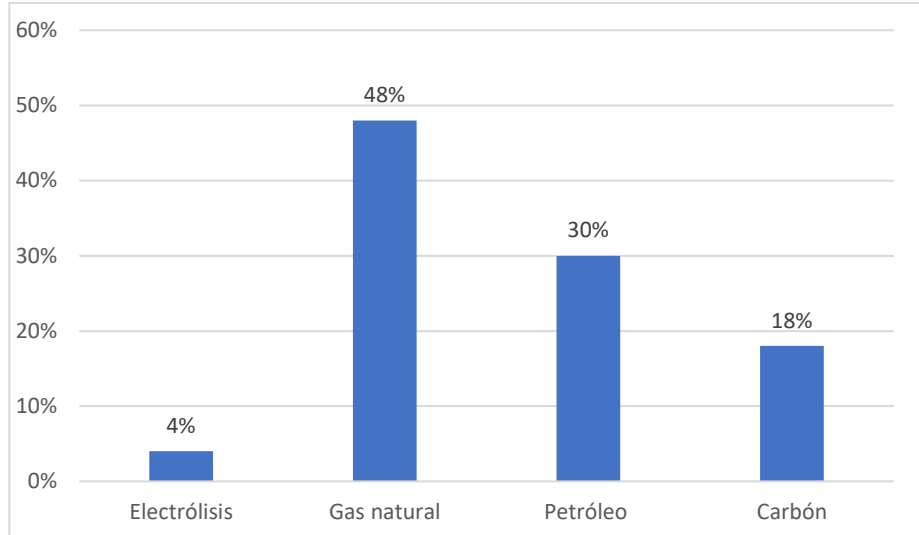


Figura 2: Fuentes de producción global de hidrógeno

Esta demanda de hidrógeno a nivel global se debe en gran medida en la industria química, para la producción de amoníaco para fertilizantes, metanol etc. También la industria petroquímica, que utiliza el hidrógeno como materia prima para productos derivados del petróleo, en refinerías o para reducir la cantidad de azufre en la gasolina o el gasóleo. Solo una pequeña parte se utiliza para producir energía, principalmente para el sector aeroespacial.

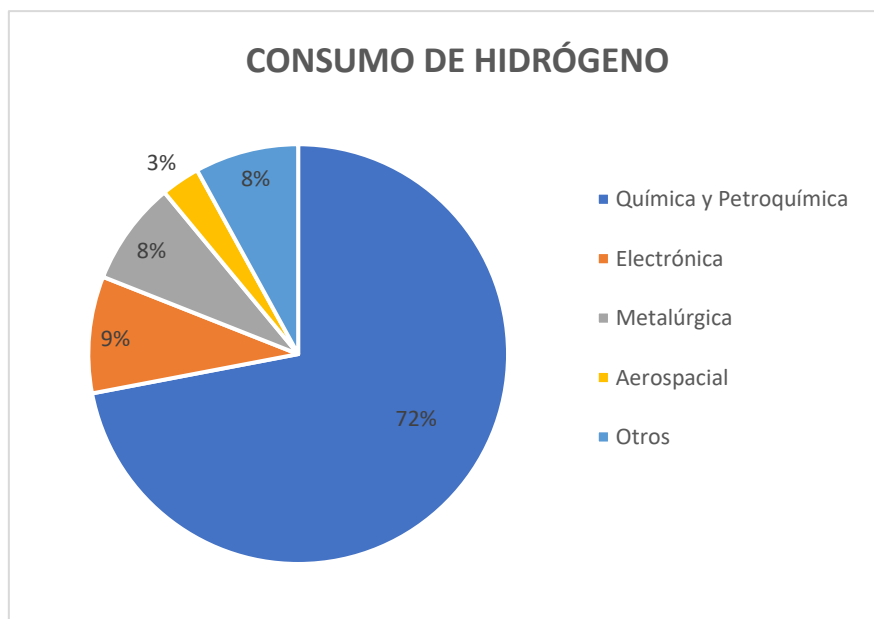


Figura 3: Consumo global de hidrógeno

I. INTRODUCCIÓN

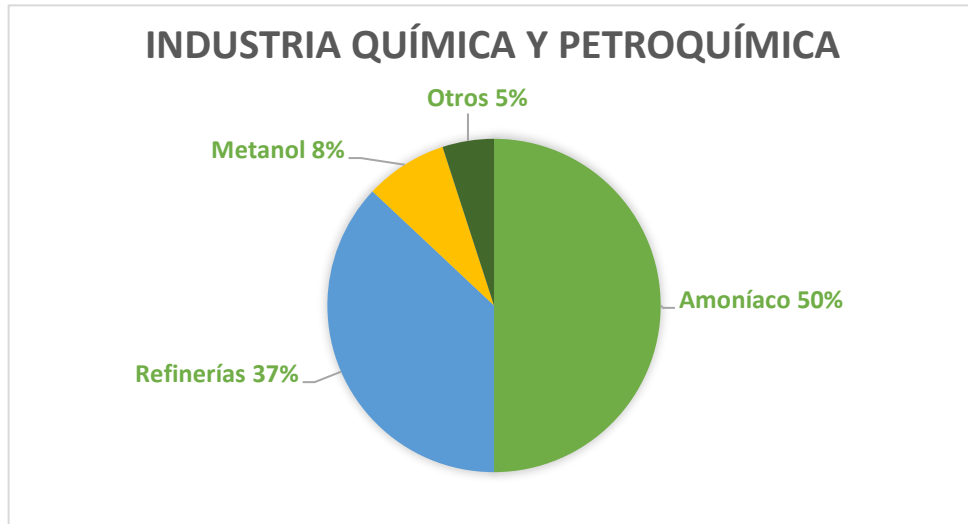


Figura 4: Consumo de hidrógeno en la Industria Química

Hoy en día existen numerosas investigaciones en el ámbito de la producción de hidrógeno como la gasificación de la biomasa, un proceso similar al de la obtención de hidrógeno a partir de gas natural o de la fotoelectrolisis, que consiste en sumergir una célula fotovoltaica en agua para realizar el proceso de electrolisis. También se ha investigado en métodos como la hidrólisis térmica mediante reactores de alta temperatura que consiguen separar el hidrógeno del oxígeno. Sin embargo, este tipo de métodos experimentales, aún no han sido implementados en la industria de la producción de hidrógeno.

Como se puede observar existen diferentes alternativas para la producción de hidrógeno en la actualidad, con más o menos emisiones contaminantes. Una producción de hidrógeno que incremente las emisiones de CO₂ será siempre una alternativa de transición poco limpia, sin embargo, en la actualidad sigue siendo la alternativa más viable tanto en costes energéticos como en costes económicos. Una producción de hidrógeno renovable se podrá llevar a cabo en lugares donde se disponga de una gran fuente de energías renovables. Actualmente resulta rentable producir hidrógeno sin embargo el coste de almacenamiento y transporte sigue siendo elevado debido a las características del hidrógeno.

En cuanto a las emisiones de CO₂ y el impacto medioambiental de un transporte a base de hidrógeno, se realizó un estudio por el grupo TES (*Transport Energy Strategy*) por la unión europea y con la ayuda de Daimler Chrysler, del que se concluyó lo siguiente:

- Si se obtiene el hidrógeno de combustibles fósiles como el reformado de gas natural, y es utilizado en pilas de combustible, se logra una reducción de emisiones contaminantes debido a la mayor eficiencia de la pila de combustible respecto a un motor de combustión interna alternativo.

I. INTRODUCCIÓN

- Si el hidrógeno es obtenido de fuentes renovables y se utiliza como combustible en motores de combustión interna alternativos, se reducirá drásticamente la emisiones contaminantes incluso más que en el caso anterior.
- Si se obtiene el hidrógeno a partir de fuentes renovables y además se emplea en pilas de combustible se logrará una reducción de hasta el 50% de la emisiones de CO₂ respecto de las anteriores.

De este análisis se puede concluir que el hidrógeno puede ser una alternativa a la movilidad y el transporte siempre y cuando teniendo en cuenta que la fuente de la que se obtiene este hidrógeno sea también una fuente limpia.

Estos datos también se deben contextualizar ya que la reducción de emisiones del último caso respecto del segundo conlleva una reducción que ya de por sí es pequeña por lo que el esfuerzo de investigación debería centrarse en la manera de producir un hidrógeno de manera eficiente.



Figura 5: Planta de producción de hidrógeno en Alemania

Fuente: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2007/08/Cuadernos-energias-renovables-para-todos-hidrogeno-y-pila-de-combustible-fenercom.pdf>

1.1.3. Almacenamiento de hidrógeno.

Debido a las propiedades características del hidrógeno, que se vieron en el apartado anterior, el almacenamiento de hidrógeno supone un reto para transportarlo a bordo de un automóvil, sobre todo si se quiere hacer de manera ligera, con un bajo coste, de manera segura y con una densidad energética aceptable.

El objetivo para aplicaciones de automoción es lograr almacenar en torno a 5 kg de hidrógeno que puede suponer en un vehículo impulsado mediante pila de combustible de alrededor de unos 500 km, dependiendo de distintos factores. En vehículos industriales esta cantidad puede llegar a multiplicarse por 10. Además, se debe conseguir una densidad entorno al 5% en peso y que la energía necesaria para almacenar el hidrógeno no sea excesivamente alta.

Actualmente existen diferentes alternativas para el almacenamiento de hidrógeno, las cuales se detallan a continuación.

1.1.3.1. Almacenamiento de hidrógeno comprimido.

El almacenamiento de hidrógeno a presión es la forma más habitual de almacenamiento, sin embargo, es la forma de almacenamiento con la que menos densidad energética se consigue, aunque el hidrógeno se encuentre a alta presión. La densidad energética depende linealmente de la presión a la que se encuentra el gas. En la *Figura 6*, se muestra la densidad del hidrógeno en función de la presión de almacenamiento a una temperatura de 0°C. De esta gráfica se puede deducir que, al final para presiones altas, aumentos progresivos de presión consiguen cada vez menores aumentos de densidad, por lo que esta tecnología al final tiene un límite.

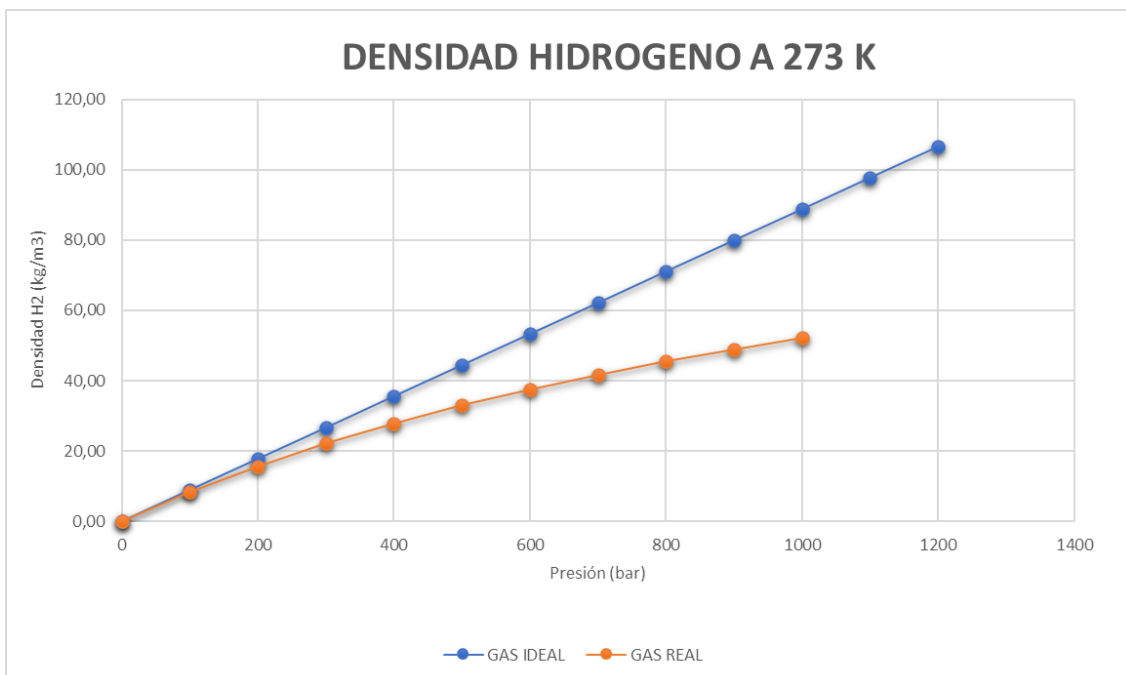


Figura 6: Densidad hidrógeno en función de la presión de almacenamiento.

I. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de hidrógeno a alta presión conlleva un coste de energía, este coste energético puede observarse en la *Figura 7*, de esta gráfica se deduce el mínimo coste de energía para comprimir el hidrógeno, respecto a la energía intrínseca del hidrógeno debido a la energía química, todo esto en porcentaje y representada en función de la presión de almacenamiento. Estos resultados están calculados para compresiones isotermas y reversibles por lo que los resultados de consumo de energía reales serán superiores. Como se puede deducir de la gráfica, esta no crece linealmente sino exponencialmente por lo que resultará siempre más interesante trabajar con presiones más altas.

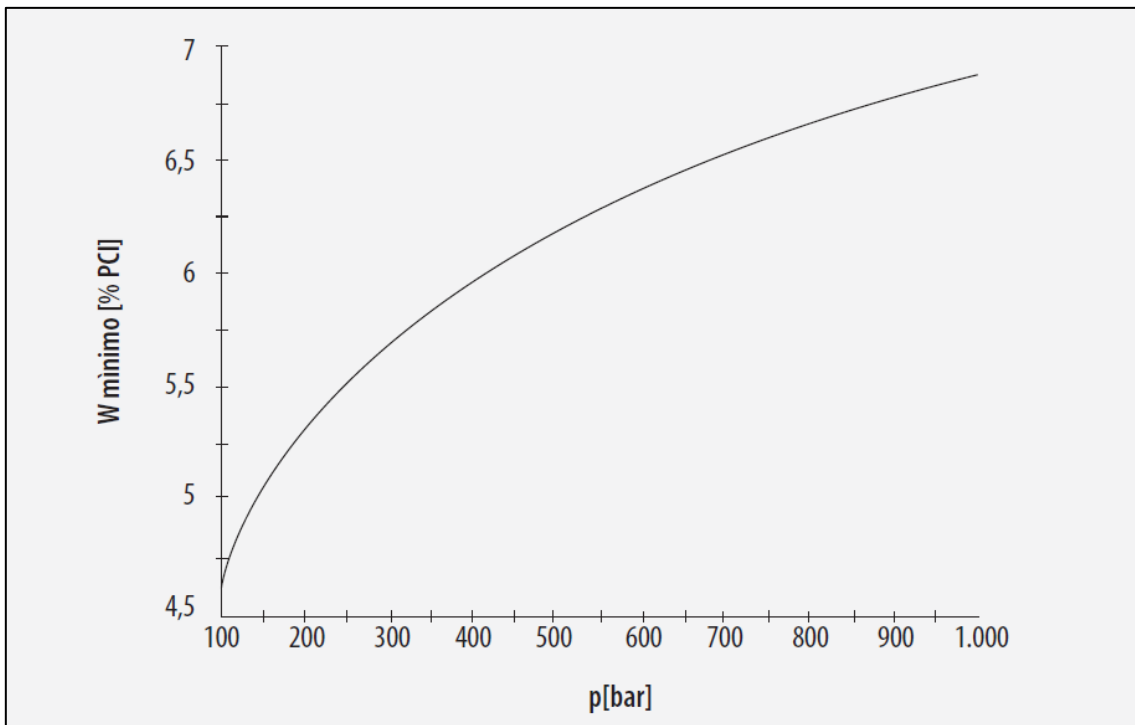


Figura 7: Energía mínima necesaria para comprimir hidrógeno en función de la presión.

Fuente: Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). El hidrógeno y la energía. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.

El almacenamiento tradicional que se lleva a cabo del hidrógeno a alta presión utiliza botellas de acero almacenado a una presión de 200 bares, utilizado en soldadura, para inertizar atmosferas, etc. También se han utilizado sistemas de almacenamiento desde proyectos automovilísticos de demostración como el de los autobuses de Madrid (Proyecto CUTE, 2003) que almacenan hidrógeno a 350 bares, hasta los últimos sistemas de almacenamiento para vehículos que son capaces de almacenar el hidrógeno hasta una presión de 700 bares.

Todos estos sistemas de almacenamiento utilizan diferentes tipos de materiales y tecnologías de fabricación, por lo que se pasará a detallar las diferentes características que tienen cada uno de los sistemas de almacenamiento a alta presión utilizados actualmente.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente para el almacenamiento de hidrógeno a presión se utilizan depósitos cilíndricos que dependiendo de la presión que son capaces de soportar, y los materiales utilizados se dividen en la siguiente clasificación:

- **TIPO I:** Se tratan de botellas cilíndricas fabricadas en acero. Se utilizan normalmente para procesos de soldadura y no superan los 200 bares. Este tipo de depósitos no es apto para aplicaciones automovilísticas debido a que son muy pesados.
- **TIPO II:** Este tipo de depósitos cilíndricos están fabricados de aluminio reforzado con materiales compuestos como fibra de vidrio o fibra de carbono, lo que los hace más ligeros que los anteriores alcanzado presiones superiores. Se utilizan normalmente en la industria automovilística para el almacenamiento de gas natural para vehículos que funcionan con gas natural, GLP o similares.
- **TIPO III:** Este tipo de cilindros, está formado por una capa metálica de pequeño espesor denominado liner, y recubierto por materiales compuestos, como fibra de carbono, fibra de vidrio etc. En este tipo de depósitos el material compuesto es el que soporta los esfuerzos mecánicos, mientras que el liner que suele ser aluminio evita la difusividad del hidrógeno, a través del material compuesto. Con este tipo de materiales se logra una reducción importante de peso y permite lograr presiones de almacenamiento de 700 bares e incluso más dependiendo de la aplicación.
- **TIPO IV:** A diferencia de los tipo III, el liner de este tipo de depósitos está fabricado en un material polimérico en vez de metal. Esto supone una pequeña reducción de peso respecto a los anteriores sin embargo la difusividad del hidrógeno a través del material polimérico es algo mayor, lo que puede suponer

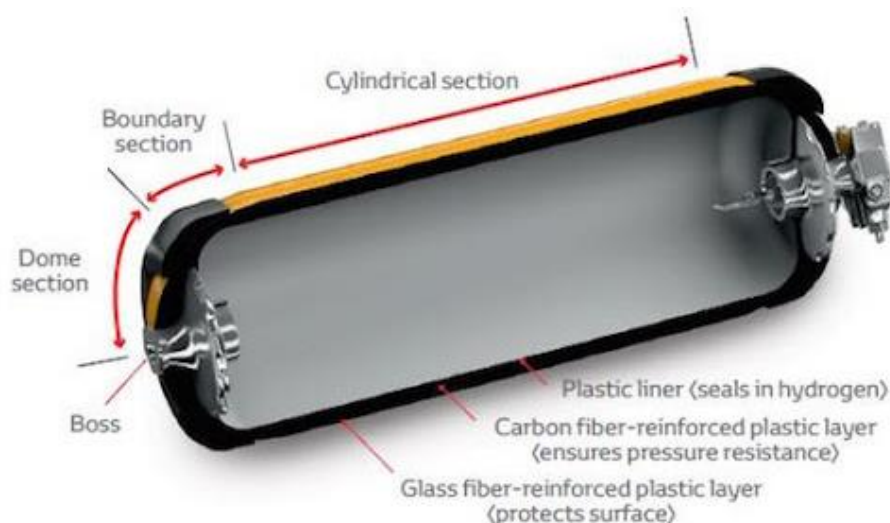


Figura 8: Partes de un depósito Tipo IV utilizado en automoción

Fuente: <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>

I. INTRODUCCIÓN

un problema de seguridad dependiendo de las aplicaciones. Las presiones de almacenamiento son exactamente las mismas a los de tipo III, sin embargo, los ciclos de carga y descarga que soportan son menores.

- **Tipo V:** En este tipo de depósitos se elimina completamente el liner interior, y se fabrica el depósito íntegramente en materiales compuestos. Mediante la utilización de materiales compuestos de alta densidad y matrices especiales, se consigue que la difusividad a través del material sea lo más baja posible, permitiendo eliminar el liner, y ahorrar algo de peso en el conjunto.

En la *Figura 9* se puede ver la comparativa entre los 5 tipos de depósitos a presión que se utilizan actualmente, para el almacenamiento de hidrógeno a presión.

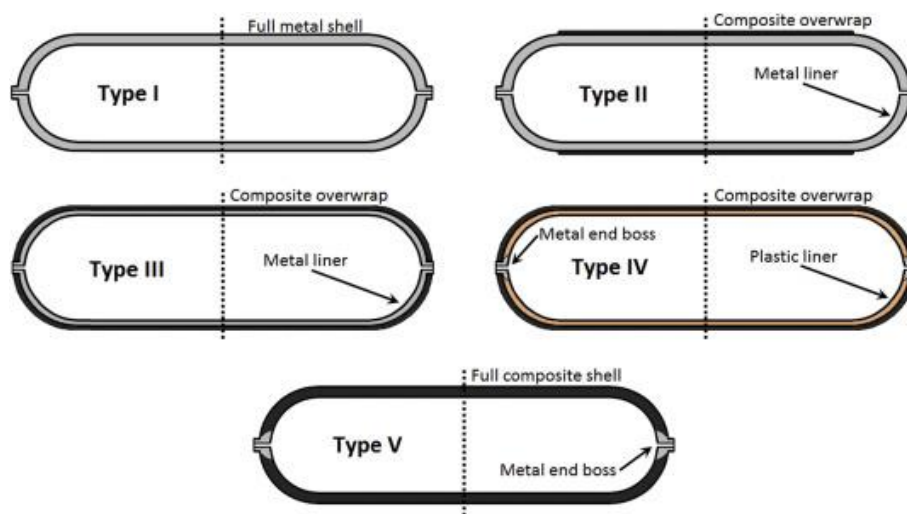


Figura 9: Estructura y composición de los tipos de depósitos utilizados para el almacenamiento de H₂ a presión.

Fuente: <https://www.compositesworld.com/articles/next-generation-pressure-vessels>

1.1.3.2. Almacenamiento hidrógeno líquido.

Otra manera de aumentar la densidad del hidrógeno es almacenarlo en estado líquido. En estado líquido el hidrógeno alcanza una densidad de 70.8 kg/m³ sin embargo para que el hidrógeno se encuentre en estado líquido hace falta enfriarlo hasta temperaturas criogénicas de hasta 20 K (-253°C), esta densidad es superior a la que se podría alcanzar mediante alta presión, (60.4 kg/m³ a 1000 bares), pero lejos de la densidad de otro tipo de combustibles como la gasolina (700 kg/m³).

La energía que se necesita para enfriarlo hasta tal temperatura supone una cantidad de entre el 30 y el 40%, de la energía que contendría el hidrógeno almacenado, además esta tecnología es bastante compleja por lo que actualmente está destinada al uso industrial y al transporte en grandes buques transoceánicos.

I. INTRODUCCIÓN

Existen muy pocas plantas para el almacenamiento de hidrógeno líquido y se hace en depósitos muy bien aislados térmicamente, ya que la dificultad no solo está en alcanzar temperaturas de alrededor de 20 K, también reside en mantener esas temperaturas criogénicas a lo largo del tiempo.

En el ámbito de la automoción, los depósitos empleados a bordo de vehículos almacenan el hidrógeno en una mezcla bifásica de líquido y gas a una presión entre 3 y 10 bares. Si la presión es demasiado baja el hidrógeno líquido se vaporiza mediante una resistencia, y si la presión es demasiado alta el hidrógeno gaseoso se libera al exterior, la liberación de hidrógeno se hace un ritmo muy lento, aproximadamente un 1% diario respecto de la capacidad del depósito.

El aislamiento utilizado en este tipo de tanques para mantener temperaturas criogénicas utiliza una combinación de capas en las que se intercala vacío con capas de materiales compuestos aislantes. Este aislamiento evita que la liberación de hidrógeno sea excesiva. La forma de estos depósitos suele ser cilíndrica, debido no solo a la distribución de los esfuerzos mecánicos, sino también debido a la superficie de intercambio de calor con el exterior. Suelen tener una relación entre el diámetro del depósito y la longitud muy cercana a uno. También se ha de tener en cuenta que muchos materiales fragilizan en atmósferas expuestas a hidrógeno a tan baja temperatura, por lo que supone un problema añadido a este tipo de tecnología de almacenamiento.

Este tipo de tecnología de almacenamiento en vehículos no está muy extendida debido a la complejidad del proceso y el gasto energético que conlleva almacenar hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas, por lo que supone un costo muy elevado. Únicamente se ha llevado a cabo en conceptos y prototipos como el caso de BMW, y en motores de combustión interna que funcionan con hidrógeno como combustible.

1.1.3.3. Almacenamiento en hidruros metálicos.

El almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros se realiza químicamente, mediante un proceso de carga del hidruro o de absorción, y un proceso de descarga o proceso de desorción del hidrógeno. El proceso de carga se lleva a cabo extrayendo el calor del hidruro, favoreciendo así que las partículas de hidrógeno se intercalen en la estructura del hidruro, en cambio en el proceso de descarga, la liberación del hidrógeno se realiza cuando se aporta calor al hidruro. Los hidruros de alta temperatura la descarga se realiza a temperaturas de entre 150 y 300°C, y los hidruros de baja temperatura la descarga se realiza entre 20 y 90°C. Las presiones utilizadas en este sistema de almacenamiento están en torno a 30 y 55 bares para la carga del hidrógeno, y entre 0.7 y 10 bares para la descarga del hidrógeno.

Los hidruros capaces de almacenar hidrógeno en su estructura molecular están formados por dos elementos un elemento A y un elemento B. El elemento A es normalmente un metal alcalino que tiende a formar una estructura estable, y el elemento B que suele ser un metal de transición, que forma hidruros inestables, y que

I. INTRODUCCIÓN

facilita la disociación de hidrógeno. Dependiendo de la composición de estos hidruros existen diferentes temperaturas de carga y descarga, y diferentes densidades de almacenamiento, que suelen ser superiores a las de los métodos de almacenamiento de hidrógeno líquido y a alta presión, se ha llegado a densidades de hasta 115 kg/m³.

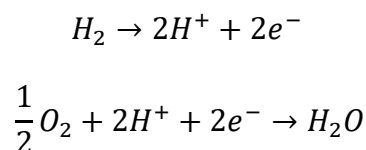
Este tipo de tecnología de almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros tiene un consumo energético entorno al 13% de la energía contenida en el hidrógeno por lo que se encuentra a la altura del almacenamiento de hidrógeno a alta presión, sin embargo, este tipo de sistemas se encuentra en una fase inicial de investigación, y los prototipos fabricados son muy pesados.

1.2. PILAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma la energía química de un combustible, en este caso el hidrógeno, en energía eléctrica. Esta transformación de energía no es una transformación termodinámica al igual que ocurre en los motores de combustión, por lo que no está sujeta a los límites del ciclo de Carnot.

El funcionamiento de una pila de hidrógeno es como el de cualquier otro pila de combustible. Hay dos electrodos separados por una membrana electrolítica, esta es un material que permite el paso de iones cargados. En el electrodo negativo o ánodo se produce la oxidación del combustible, en este caso del hidrógeno, y en el electrodo positivo o cátodo, se produce la reducción del oxígeno proveniente de la atmosfera. En el caso de las pilas de hidrógeno en vehículos, el hidrógeno es inyectado a presión a través de un circuito, y el oxígeno es captado del aire de la atmosfera, el resultado es una transformación química en la que el hidrógeno y el oxígeno se combinan para producir agua (H₂O) como producto de desecho.

La reacción química que tiene lugar en una pila de hidrógeno se muestra en la *Figura 10*. La reacción que tiene lugar en el ánodo tiene como producto iones de hidrógeno y electrones, estos pasan a través de la carga, que en este caso será un motor eléctrico hasta el cátodo donde se combinan en una reacción catódica con el oxígeno. Los iones de hidrógeno cargados positivamente atraviesan el electrolito, para producir agua. Estas pilas de combustible se asocian formando varias pilas que reciben el nombre de celda de combustible, utilizadas en automoción. La reacción química que se produce en la pila se muestra a continuación:



I. INTRODUCCIÓN

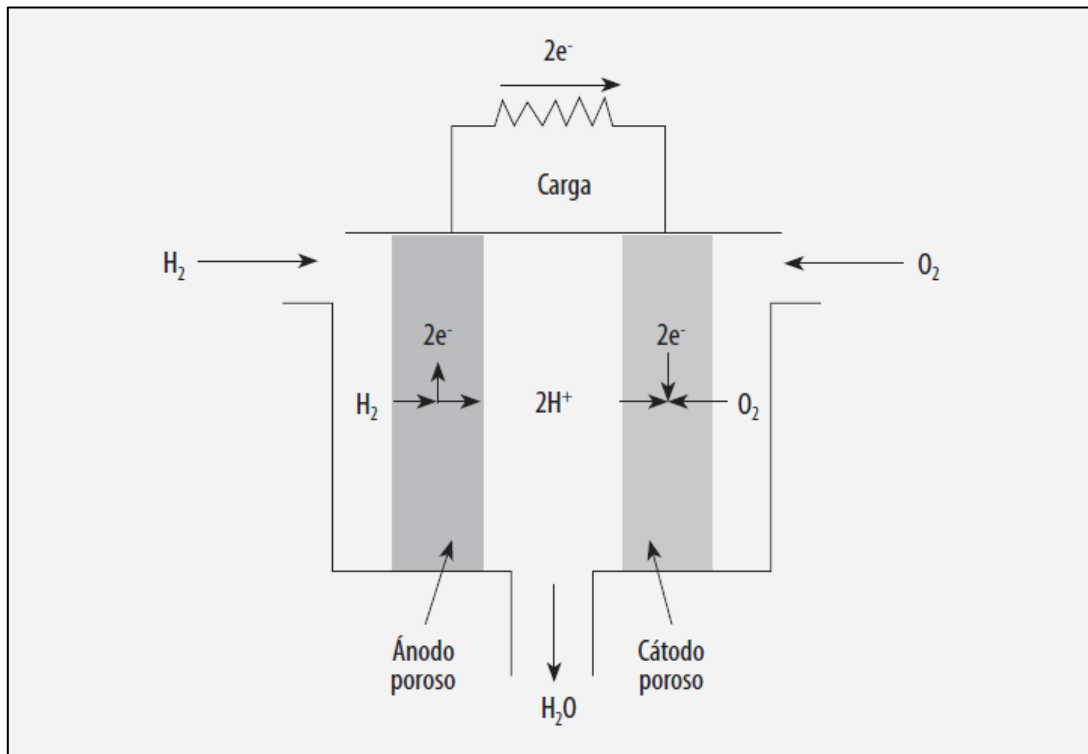


Figura 10: Reacción química en una pila de hidrógeno

Fuente: Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.

Existen diferentes tipos de pilas de combustible que funcionan con hidrógeno, el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo, pero pueden clasificarse atendiendo al tipo de electrolito que usan, la clasificación que suele utilizarse es la siguiente:

- Pilas de membrana de intercambio protónico (PEM).
- Pilas alcalinas (AFC).
- Pilas de ácido fosfórico (PAFC).
- Pilas de carbonatos fundidos (MCFC).
- Pilas de óxidos sólidos (SOFC).

En la industria de la automoción el tipo de pila de combustible a base de hidrógeno más utilizada y extendida, son las de tipo PEM por sus siglas en inglés Proton Exchange Membrane. Este tipo de pilas de combustible se caracteriza por que la membrana electrolítica es de un material polimérico normalmente de Nafion[®], un copolímero a base de tetrafluoretileno. Este tipo de pilas con membrana de polímero permite una temperatura de operación relativamente bajas de entre 60 y 90°C lo que permite que el vehículo arranque fácilmente y pueda responder de manera inmediata a las variaciones de carga demandadas por el usuario.

1.3. VEHICULOS DE HIDRÓGENO.

Los vehículos que funcionan mediante pila de hidrógeno requieren de diferentes elementos para poder operar de manera adecuada, manteniendo la seguridad y prestaciones necesarias para poder circular por carretera. Los elementos principales que componen cualquier vehículo de hidrógeno son (Figura 11):

- **Célula de combustible:** es la encargada de producir la energía, a través de la reacción química del H₂ con el aire, para impulsar el vehículo.
- **Depósito de hidrógeno:** lugar donde se almacena el hidrógeno necesario para hacer funcionar la celda de combustible. Suele ser almacenarlo a muy alta presión.
- **Batería:** se encarga de almacenar la energía eléctrica excedente de la regeneración del vehículo, para soltarla en momentos donde la conducción del vehículo lo requiera.
- **Motor eléctrico:** su función es impulsar al vehículo cuando por este pasa una determinada corriente eléctrica. Puede funcionar como generador para recargar la batería del vehículo.
- **Sistema de recarga:** es el sistema de abastecimiento de hidrógeno que permite la recarga de los depósitos del vehículo.

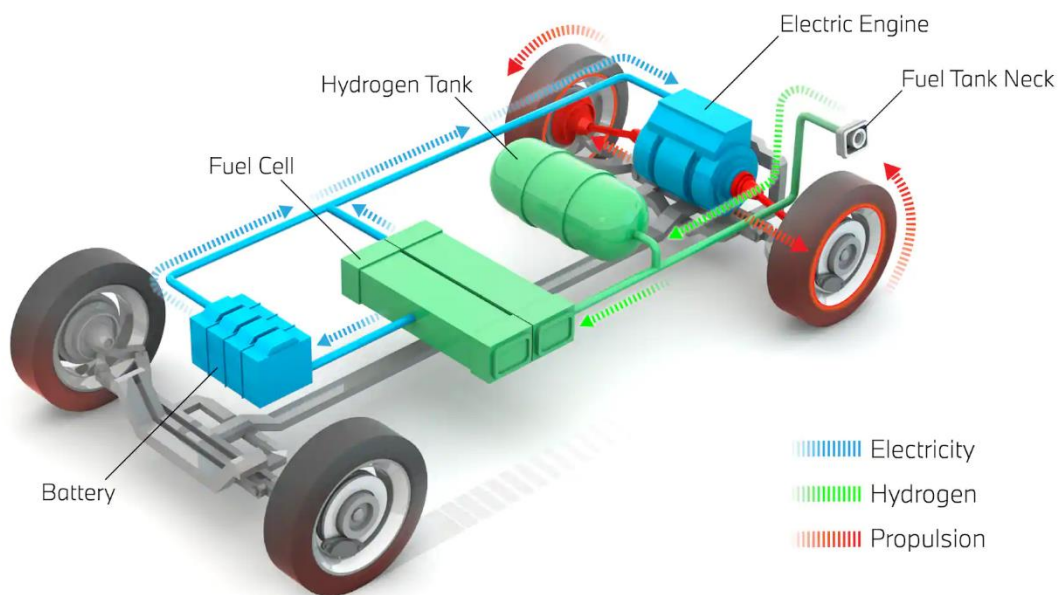


Figura 11: Componentes principales en un vehículo que funciona mediante pila de hidrógeno.

Fuente: <https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html>

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente todas las marcas importantes del mercado automovilístico han desarrollado un prototipo de vehículo que funciona mediante pila de hidrógeno, y en algunos casos como HYUNDAI, SCANIA, TOYOTA o IVECO en colaboración con NIKOLA MOTOR con su camión Nikola Tre (*Figura 12*), además de otras muchas marcas en Europa que están creando y desarrollando prototipos de camiones a base de pila de hidrógeno.



Figura 12: Camión a pila de hidrógeno, Nikola Tre

Fuente: Nikolamotor.com

El sector del transporte por carretera representa dos tercios de las emisiones de CO₂ en la UE¹ (*Figura 13*), según la agencia europea del medio ambiente y alrededor de un 38% de estas emisiones viene de vehículos pesados y transporté de mercancías. Es por este motivo que la apuesta por nuevas tecnologías por parte de las marcas automovilísticas está más que justificada. Es aquí donde la pila de combustible en vehículos pesados tiene un gran interés y donde pueden desempeñar un papel clave, dado que estos suelen operar en grandes flotas haciendo que la infraestructura sea rentable y mitigando el problema de suministro que existe en la actualidad.

El parque de camiones es de 6.5 millones en toda Europa, con un registro de 400 000 camiones anuales, y el 98.3% de todos estos camiones medianos y pesados se mueve mediante motores de combustión interna. Se prevé que el coste de adquisición de este tipo de vehículos pesados se reduzca, así como el suministro de hidrógeno para que en 2030 tal como comunica la Agencia Europea de Hidrógeno, los camiones impulsados por celdas de combustible de hidrógeno estén a la par de los camiones impulsados por motores de combustión interna. También se prevé que la demanda de hidrógeno para

¹ <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/transport-ghg-emissions>

I. INTRODUCCIÓN

este tipo de camiones sea bastante grande, de hasta 100 000 toneladas de hidrógeno por cada 10 000 unidades.

Los vehículos que funcionan con pila de hidrógeno tienen los mismos requisitos operativos que otras tecnologías de cero emisiones, como lo pueden ser los eléctricos, sin embargo, estos ofrecen una autonomía mucho mayor y tiempos de repostaje menores similares a los de vehículos con motores de combustión, por lo que lo hace ideal para el transporte de larga distancia y de más de 16 toneladas, además de para transporte de mercancías a nivel regional, como camiones frigoríficos, furgonetas, y también para el transporte de residuos como camiones de basura.

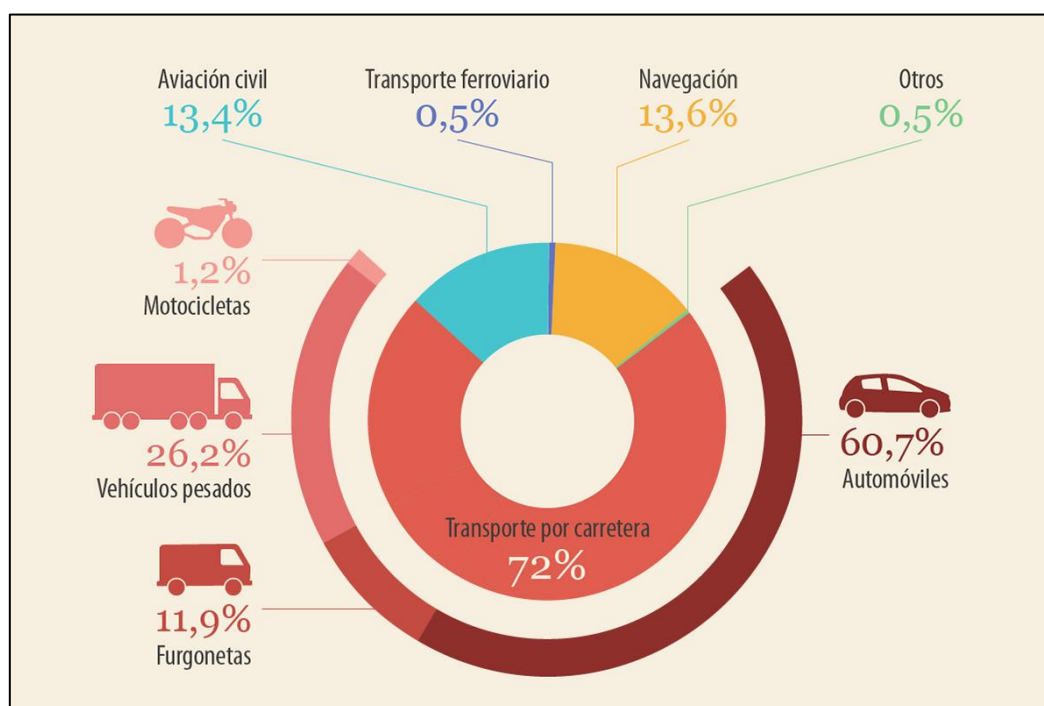


Figura 13: Emisiones de CO2 originadas por el transporte en la UE

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente

El problema para este tipo de tecnología es la infraestructura de suministro y reabastecimiento de combustible, lo que requiere de grandes inversiones y medidas tanto políticas como financieras para poder llegar a 2025 con un número de 100 hidrogenaras en Europa, y en 2030 superar las 10 000 para poder abastecer a este tipo de camiones, tal y como se estudió en el concilio del hidrógeno por parte de la unión Europea.²

Se deben adoptar medidas que consigan fomentar la compra de este tipo de vehículos, además de una planificación y colaboración para instalar estaciones de servicio aprovechando los recursos existentes, como la red de gas. Además de coordinarse tanto a nivel nacional como nivel europeo para poder garantizar que estas medidas reflejan la madurez y consolidación de esta tecnología.

² https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf, p 37

2.

OBJETIVOS

II. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1.1. Objetivo General

El objetivo de este trabajo fin de grado es diseñar un sistema de almacenamiento, más concretamente un depósito a presión de Tipo IV, que sea capaz de reunir las características técnicas para poder almacenar hidrógeno en una cantidad y densidad energética viables. Con el fin de poder abastecer a un vehículo pesado impulsado mediante pila de hidrógeno, en este caso, un tractocamión con semirremolque, para el transporte por carretera. El depósito deberá cumplir con los requisitos de seguridad y de la normativa vigente, consiguiendo unas prestaciones equivalentes a las alternativas que existen en el mercado.

2.1.2. Objetivos Particulares

Los objetivos secundarios del proyecto son:

- Autonomía objetivo de 1 000 km por depósito.
- Conseguir una PMTP de 1 000 bares de presión.
- Dimensionar los componentes principales del vehículo.
- Diseño anclajes y tapa protectora del depósito.
- Optimización del depósito en materiales compuestos.

2.2. JUSTIFICACIÓN DEL TFG

El calentamiento global, las emisiones contaminantes y la insostenibilidad del modelo energético actual basado en combustibles fósiles, ha llevado a la industria buscar distintas alternativas energéticas. El transporte por carretera de vehículos pesados representa un 26.2% del total de las emisiones de CO₂ producidas por el transporte de carretera y es por eso por lo que se está haciendo una gran labor por intentar reducir el número de emisiones en busca de una transición energética sostenible. Uno de los candidatos en primera línea de salida, como una alternativa a los combustibles fósiles es el hidrógeno, y es mediante la pila de combustible cuando este se vuelve muy interesante en aplicaciones automovilísticas, y sobre todo en el transporte de vehículos pesados por carretera, donde los problemas de suministro de esta nueva tecnología se mitigan debido a que estos suelen operar en grandes flotas.

El gran problema del hidrógeno son sus propiedades físicas. Su imposibilidad de encontrarlo aislado en la naturaleza y su baja densidad hacen que almacenarlo y

II. OBJETIVOS

transportarlo sea todo un reto de la ingeniería, y es aquí donde un sistema de almacenamiento bien optimizado toma gran importancia.

3.

DISEÑO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL VEHICULO

Para el diseño del sistema de almacenamiento y todos sus componentes, se deberán establecer unas condiciones e hipótesis de trabajo. Estas condiciones permitirán acotar los parámetros de diseño del proyecto.

Primero se establecerán las características que deberá tener el vehículo industrial, en este caso se trata de un tractocamión, con una configuración de ejes 4X2, donde la tracción del vehículo viene de las ruedas gemelas en el eje trasero. Además, la cabeza tractora equipa un semirremolque de 3 ejes, cuya carga dependerá del peso del vehículo, y de la masa máxima autorizada para trenes de carretera de 5 ejes, atendiendo al “Reglamento de vehículos pesados”³.

Las características técnicas del camión articulado aparecen en la *Tabla 3*, entre ellas aparece la velocidad y aceleración máximas con carga completa, las masas máximas autorizadas del vehículo, así como los neumáticos utilizados, el coeficiente aerodinámico y la relación de transmisión.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS CAMIÓN ARTICULADO	
Velocidad máxima	90 km/h
Aceleración máxima	1.38 m/s ²
Tiempo aceleración (0-90 km/h)	18.04 s
Masa máxima tractora	1 8000 kg
Masa máxima remolque	24 000 kg
M.M.A	40 000 kg
Peso carga	22 000 kg
Coficiente aerodinámico	0.65
Neumáticos	315/80/22.5
Relación de transmisión	6:1

Tabla 3: Características técnicas camión articulado, con carga

Las características técnicas del camión están en torno a valores similares de otros vehículos con características y dimensiones parecidas. La transmisión del vehículo es una transmisión directa de una sola marcha. La relación de reducción en el diferencial tiene un valor normalmente utilizado en vehículos de este tipo, equipado con motores eléctricos. El coeficiente aerodinámico estará en torno a 0.65 y 0.70, que es un valor

³ Reglamentación sobre vehículos pesados, prioritarios, especiales, de transporte de personas y mercancías y tramitación administrativa. (Dirección General de Tráfico, Ministerio del Interior, Edición 2015)

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

normalmente aceptado y que presentan la mayoría de los camiones que circulan por las carreteras de la UE.

Las dimensiones del vehículo motorizado, o tractocamión sin incluir la carga, están reflejadas en la *Figura 14* y la *Tabla 4* que se muestran a continuación. Toda estas medidas cumplen con las dimensiones máximas permitidas por el “Reglamento de vehículos pesados” de la DGT en España y la normativa de la UE. Se tratan de unas dimensiones estándar utilizadas en modelos de cabezas tractoras ya existentes en el mercado como la “Serie R” del fabricante sueco SCANIA.

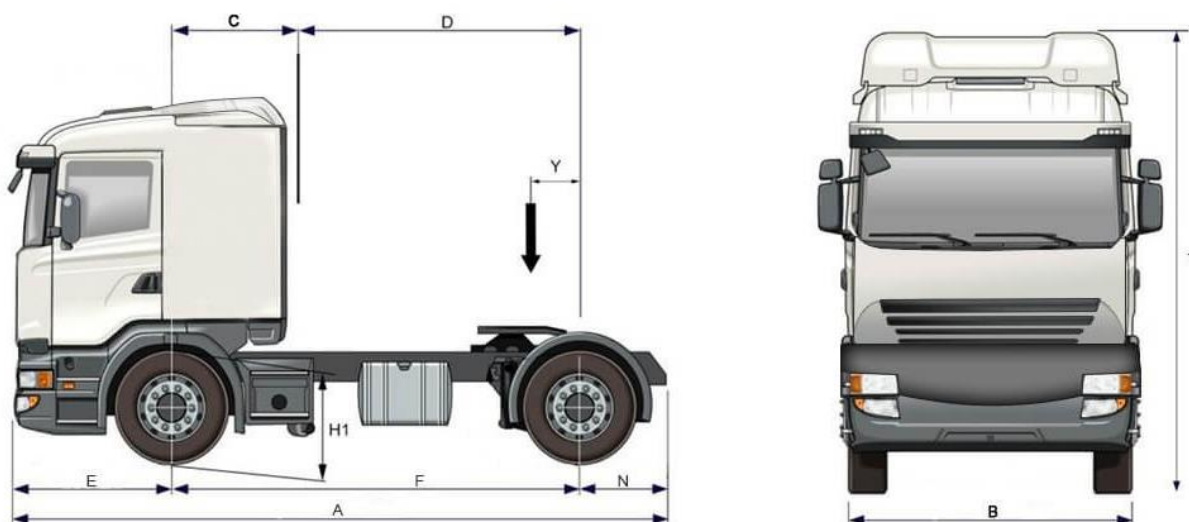


Figura 14: Dimensiones cabeza tractora (sin carga)

Fuente: <https://www.europa-camiones.com/ficha-tecnica-gama/scania-la4x2mna>

DIMENSIONES CABEZA TRACTORA	
A (Longitud total)	6 135 mm
B (ancho cabina)	2 495 mm
C (espacio cabina)	925mm
D (cabina al eje trasero)	2 975 mm
E (voladizo delantero)	1 460 mm
F (distancia entre ejes)	4 000 mm
N (voladizo trasero)	775 mm
T (altura total vacío)	3 934 mm
Y (avance fifth Wheel)	Min:150 mm, Max: 659 mm
H1 (Altura de chasis) vacío/en carga	1 017/966 mm
Área frontal 85%	8.34 m ²

Tabla 4: Dimensiones cabeza tractora, sin carga

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

Se ha elegido una configuración en la que la distancia entre ejes sea lo más larga posible, dentro de las configuraciones que existen en el mercado actualmente, ya que está junto con la altura a la que se encuentra el chasis respecto del suelo, serán las dimensiones que limitarán el diseño del sistema de almacenamiento. Además de poder maximizar el espacio disponible para otros elementos que deberá de equipar la cabeza tractora.

El semirremolque que equipará el tractocamión, será como ya se ha comentado anteriormente un semirremolque de 3 ejes. Se trata mas concretamente de un semirremolque de lona, que cumple con la normativa dentro del marco legal de la UE, y aprobado por la asociacion TIR. Las características técnicas del semirremolque asi como sus dimensiones estan reflejadas en la *Figura 15* y la *Tabla 5*.



Figura 15: Semirremolque de lona DSV de 3 ejes

Fuente: <https://www.es.dsv.com/road-transport/tipos-de-trailer-y-dimensiones/trailer-de-lona>

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Tara	7 200 kg
Capacidad de carga	32 300 kg
Longitud interior	13 620 mm
Anchura	2 480 mm
Altura	2 670 mm
Altura de apertura lateral	2 650 mm

Tabla 5: Dimensiones y capacidad del semirremolque

La carga máxima del semirremolque, vendrá establecida por la M.M.A para trenes de carretera de 5 ejes, que en este caso no deberá de superar las 40 Toneladas, sumando el peso de la cabeza tractora y el semirremolque incluida la carga. Por este motivo aunque la capacidad de carga del semirremolque sea superior, el peso del semirremolque mas la carga no debéra de superar las 22 Toneladas de peso.

Una vez ya se han establecidos las características técnicas del vehiculo se pasará a realizar un estudio dinámico del mismo.

3.2. ANÁLISIS DINÁMICO VEHICULO

Para poder diseñar correctamente el sistema de almacenamiento de hidrógeno que se quiere implementar, así como los elementos de propulsión mediante pila de hidrógeno, es necesario llevar a cabo un análisis dinámico del vehículo para determinar requerimientos, prestaciones y consumos que tendrá dicho vehículo. Para el análisis dinámico se tendrá en cuenta la M.M.A del vehículo y una velocidad de 25 m/s.

Se tendrán en cuenta las fuerzas que actúan en el vehículo en su dirección longitudinal, por lo que se excluyen tanto aceleraciones laterales como aceleraciones verticales. Se tendrá en cuenta el peso máximo autorizado para los cálculos que se vayan a realizar. Para calcular dichos parámetros se aplicará la segunda ley de Newton, donde:

$$\sum Fx = m \cdot a = \text{Fuerta tractora} - \text{Fuerzas resistentes}$$

Las fuerzas que actúan en el vehículo cuando este se encuentra en circulación y que se oponen al movimiento son tres:

- Resistencia aerodinámica
- Resistencia a la rodadura
- Resistencia gravitatoria

La fuerza resistente total será la suma de todas ellas, se procederá a continuación al cálculo de cada una de ellas.

3.2.1. Fuerza por resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica se debe al desplazamiento del vehículo a través de un fluido, que en este caso se trata del aire, y cuyo valor dependerá tanto del flujo externo como del flujo interno del vehículo. Esta fuerza es provocada por el rozamiento de las partículas del fluido contra la superficie del vehículo, y por los fenómenos de presión que se producen por el movimiento de este.

La fuerza debida a la resistencia aerodinámica se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot V^2$$

Donde:

- ρ → Densidad del aire a 1 atm y 25°C en kg/m³
- C_x → Coeficiente aerodinámico
- A_f → Área frontal del vehículo en m²
- V → Velocidad del vehículo en m/s

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

En este caso se considerará la fuerza por resistencia aerodinámica, a la velocidad máxima del vehículo, que será de 90 km/h. Sustituyendo los valores en la expresión anterior:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.65 \cdot 8.343 \text{ m}^2 \cdot (25 \text{ m/s})^2 = 2\,076 \text{ N}$$

3.2.2. Fuerza por resistencia a la rodadura

La fuerza debida a la rodadura es provocada por la deformación del neumático, cuando entra en contacto con la superficie rugosa del asfalto. Esta deformación es provocada por la carga vertical que actúa sobre el vehículo.

Esta fuerza se calcula a partir de unos coeficientes empíricos, que dependen del tipo de neumático que monta el vehículo, de la presión de inflado, del tipo de superficie por la que circula y el peso del propio vehículo. Sin embargo, todos estos parámetros pueden englobarse en uno solo, denominado “Coeficiente de resistencia a la rodadura (f_r)” que puede calcularse mediante la expresión siguiente:

$$f_r = 0.01 \cdot \left(1 + \frac{3.6 \cdot V}{160}\right)$$

Donde:

- $V \rightarrow$ Velocidad del vehículo en m/s

Una vez definido el valor del coeficiente de resistencia a la rodadura, la fuerza debida a la resistencia por rodadura vendrá definida por la expresión siguiente, donde esta es función del peso del vehículo y del coeficiente f_r .

$$F_r = m \cdot g \cdot f_r$$

Donde:

- $m \rightarrow$ Masa total del vehículo en kg
- $g \rightarrow$ Aceleración de la gravedad m/s^2

Sustituyendo el valor de la velocidad del vehículo, que se hará también para velocidad máxima, se obtiene un coeficiente de rodadura aproximado de:

$$f_r = 0.01 \cdot \left(1 + \frac{3.6 \cdot 25 \text{ m/s}}{160}\right) = 0.0156$$

Con el valor del coeficiente de rodadura, puede calcularse muy fácilmente la fuerza debida a este fenómeno sustituyendo en la expresión anterior, se hará para el valor máximo de masa del vehículo.

$$F_r = 40\,000 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.0156 = 6\,131.3 \text{ N}$$

3.2.3. Fuerza por resistencia gravitatoria

La fuerza gravitatoria se debe a la componente del peso del vehículo, que se opone al movimiento cuando este circula por una pendiente inclinada con un ángulo determinado. Esta va a ser función del peso del vehículo y del seno del ángulo que forma la superficie inclinada respecto de la horizontal. Si el ángulo es negativo dicha fuerza favorecerá el movimiento por lo que será una fuerza propulsora.

Si se descomponen dichas fuerzas en el plano tal y como se muestra en la *Figura 16*, el valor de la fuerza de resistencia debida a la gravedad puede expresarse como:

$$F_g = m \cdot g \cdot \text{sen } \alpha$$

Donde:

- $m \rightarrow$ Masa total del vehículo en kg
- $g \rightarrow$ Aceleración de la gravedad m/s^2
- $\alpha \rightarrow$ Ángulo que forma la superficie inclinada respecto de la horizontal.

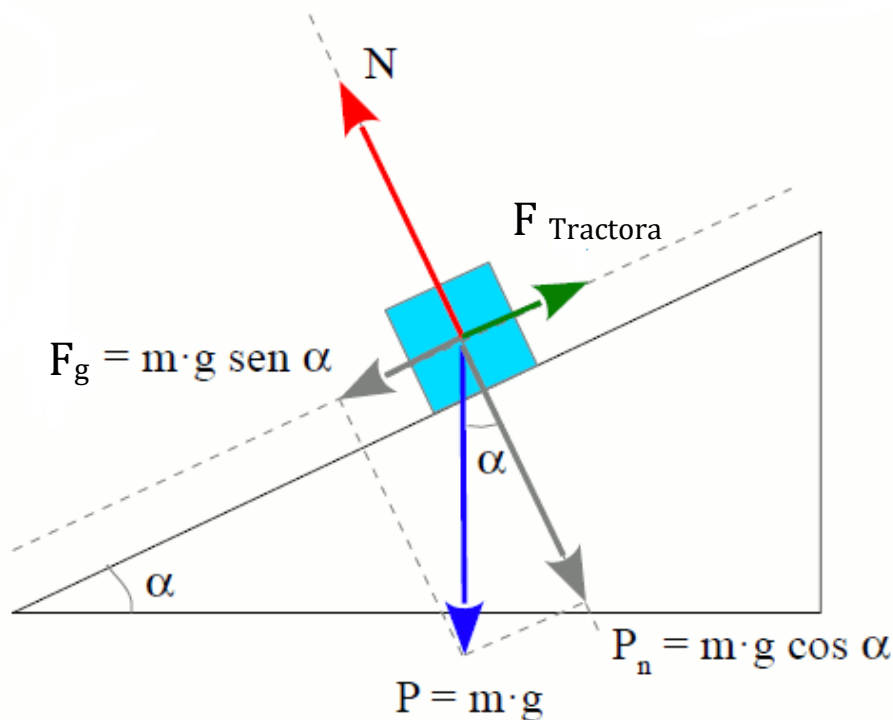


Figura 16: Descomposición de las fuerzas en el plano inclinado

Fuente: https://www.alonsoformula.com/FQESO/4_7__as_forzas.htm

Para el caso de estudio del sistema de almacenamiento a diseñar, se considerará una pendiente con un ángulo de inclinación de $\alpha = 0^\circ$, es decir el vehículo circulará por una superficie llana sin pendiente por lo que el valor de la fuerza debida a la gravedad será igual a 0.

El valor de α dependerá de la orografía y el lugar donde se desarrolle la hipótesis de trabajo. Normalmente en las carreteras nacionales y autovías la pendiente no supera el 17% (valores no superiores a $\alpha = 10^\circ$) y llegar hasta el 25% en grandes puertos de montaña.

Para el cálculo de la potencia máxima necesaria del vehículo, si se considerará una pendiente inclinada y el vehículo deberá de ser capaz de superarla con una velocidad y carga determinadas.

3.2.4. Fuerza total resistente

La fuerza total resistente del vehículo, como ya se explicó anteriormente, es la que se opone al avance del vehículo cuando este está en movimiento. La fuerza total resistente se compone de la suma de tres fuerzas, la fuerza por resistencia aerodinámica, fuerza por resistencia a la rodadura y la fuerza por resistencia gravitatoria.

Si se considera que el vehículo circula a una velocidad constante por una carretera lisa y sin pendiente, que serán las condiciones de trabajo teóricas del sistema de almacenamiento, la componente de resistencia gravitatoria será nula por lo que la fuerza total resultante será la suma de las otras dos. Si se suma el valor de estas fuerzas, la fuerza total resistente tendrá un valor de:

$$F_{resistente} = Fa + Fr + Fg = 2\,076\,N + 6\,131.3\,N + 0\,N = 8\,207.3\,N$$

Este valor de la fuerza resistente se utilizará más adelante para el cálculo del trabajo y consumo que tendrá el vehículo, para un correcto dimensionamiento del sistema de almacenamiento.

3.2.5. Aceleración y fuerza de inercia

La fuerza que se necesita para acelerar un vehículo y ponerlo en movimiento debe de vencer dos tipos de inercias, la inercia debida a la propia masa del vehículo y la inercia para hacer girar las masas rotativa. Esta fuerza de inercia se opondrá al inicio de movimiento del vehículo que tenderá a mantener su estado de reposo.

Esta fuerza aparecerá cuando el vehículo parta del reposo con aceleración máxima, y se mantendrá hasta que alcance una velocidad constante. En este caso se dará en los primeros metros de avance del vehículo hasta que alcance la velocidad de crucero.

Para el cálculo de esta fuerza se deberá tener en cuenta la masa del vehículo, para vencer la inercia debida a la masa de este, y el momento necesario para acelerar las masas rotativas del vehículo. Para calcular este fenómeno existe un factor denominado factor de masas equivalente (γ_m), que viene definido por una expresión empírica, la cual depende de la relación de transmisión del vehículo.

$$\gamma_m = 1.04 + 0.00025 \cdot i^2$$

Si se sustituye el valor de la relación de transmisión en la expresión anterior, el factor de masas equivalente será de:

$$\gamma_m = 1.04 + 0.0025 \cdot 6^2 = 1.13$$

La fuerza de inercia total que se opone al inicio del movimiento será el equivalente de multiplicar el factor de las masas rotativas, y la masa del vehículo por su aceleración máxima.

$$F_i = \gamma_m \cdot m \cdot a_{max} = 1.13 \cdot 40\,000 \text{ kg} \cdot 1.38 \text{ m/s}^2 = 62\,376 \text{ N}$$

Esta fuerza es la que deberá de vencer el vehículo para iniciar su movimiento, con aceleración máxima, y será la que proporcionará el motor del vehículo. Esta fuerza no se tendrá en cuenta para el cálculo de la potencia máxima del vehículo.

3.2.6. Cálculo potencia máxima

Para que el vehículo se mantenga en movimiento, las fuerzas tractoras deberán vencer a las fuerzas resistentes, que tenderán a frenarlo, y si son superiores acabarán por detenerlo por completo, tal y como se define en la 2ª Ley de Newton. Por tanto, para que el vehículo pueda circular a una velocidad constante, la cantidad de energía que deberá desarrollar el vehículo deberá de ser, al menos, igual a las fuerzas resistentes.

La rapidez con la que el vehículo realiza este trabajo cuando está en movimiento, se define como potencia y se puede calcular aplicando ecuaciones de física básica.

$$Pot = \text{Fuerzas total resistente} \cdot V$$

$$Pot = (F_a + F_r + F_g) \cdot V$$

Las fuerzas resistentes, como ya se ha visto anteriormente, son las que actúan cuando el vehículo está en movimiento. El caso de estudio que abarca el trabajo es en condiciones de velocidad y carga máxima, sin embargo, no se ha tenido en cuenta una pendiente máxima. La fuerza gravitatoria se ha considerado para una pendiente de $\alpha = 0^\circ$, por lo tanto, será nula. En este caso se establecerá una pendiente máxima que el vehículo deberá de ser capaz de superar a velocidad y carga máxima, y a partir de ahí se calculará la potencia necesaria.

En este caso se considerará una pendiente del 2%, o lo que es lo mismo una inclinación de 1.15° , y que deberá de ser capaz de subir con velocidad máxima y con la carga total del vehículo.

La potencia máxima del motor le permitirá circular a una velocidad constante, cuando sobre el actúan las fuerzas resistentes. Si la potencia es máxima la velocidad también

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

será la máxima que podrá alcanzar en dichas situaciones, aunque los camiones dentro de la unión europea están limitados a una velocidad máxima de 90 km/h.

Para obtener el valor de la potencia máxima únicamente se tendrá que sustituir los valores en la expresión anterior, ya que todas las fuerzas son conocidas.

$$\begin{aligned}Pot &= (2\,076\,N + 6\,131.3\,N + (40\,000\,kg \cdot 9.81\,m/s^2 \cdot \text{sen } 1.15^\circ)) \cdot 25\,m/s = \\ &= 402066,5\,W = 402.1\,KW = 540\,CV\end{aligned}$$

3.3. CONDICIONES DE TRABAJO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Para calcular la cantidad de hidrógeno que se tendrá que almacenar en sistema de almacenamiento se deberán de tener en cuenta unas bases de cálculo e hipótesis de trabajo. Como se adelantó, se deberá de realizar una simulación con el objetivo de poder recorrer una distancia de 1 000 km con el hidrógeno almacenado en un solo depósito, pudiendo añadir más si se desea aumentar la autonomía del vehículo.

Esta hipótesis de trabajo será un pequeño ciclo de conducción *Figura 17* donde el vehículo, circulará a velocidad constante de 90 km/h, con carga máxima durante 1 000 km.



Figura 17: Ciclo de conducción a velocidad constante que realiza el camión.

Las fuerzas que actuarán sobre el vehículo durante el recorrido, será la fuerza total resistente, calculada en el apartado 3.2.4, y el tiempo que invertirá en realizarlo será de 40 000 segundos, o lo que es lo mismo en torno a las 11 h.

Para calcular el trabajo realizado durante este periodo de tiempo únicamente habrá que multiplicar la fuerza resultante por el número de kilómetros que tiene el recorrido.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

$$\begin{aligned} \text{Trabajo realizado} \rightarrow W &= 8\,207.3\,N \cdot 10^6\,m = 8.21 \cdot 10^9\,J = \\ &= 8.21 \cdot 10^6\,kJ \end{aligned}$$

Una vez calculado el trabajo que deberá de realizar el vehículo por el mero hecho de mantenerse en movimiento, se puede calcular la energía en kWh, que ha consumido dicho vehículo en llevar a cabo los 1 000 km de recorrido.

$$\text{Energía consumida} \rightarrow E_c = W\,(kJ) \cdot 3\,600\,s = 2\,280\,kWh$$

Si ahora se expresa la energía consumida por km recorrido, se puede establecer una medida del consumo del vehículo. Este valor es independiente de los kilómetros recorridos, por tanto, será una relación directa entre la cantidad de hidrógeno necesaria y los kilómetros que se pueden realizar con dicha cantidad. Estos valores solo se cumplirán siempre y cuando las fuerzas resistentes no sean diferentes a las calculadas, y no cambien con el tiempo.

$$\text{Consumo vehiculo por km} \rightarrow G = 2\,280\,kWh \cdot \frac{1}{1\,000\,km} = 2.28\,kWh/km$$

Conocido el poder calorífico inferior del hidrógeno de aproximadamente 120 kJ/g, tal y como se mostró en la *Tabla 1*, se puede calcular la cantidad de hidrógeno necesaria para mantener el vehículo en movimiento, si bien no se ha tenido en cuenta el rendimiento de la celda de combustible en dicho proceso, se puede afirmar que la cantidad de hidrógeno por km es de:

$$\begin{aligned} \text{Masa de } H_2 \text{ por km} \rightarrow M &= \frac{W}{Cp_{(inferior)}} = \frac{8.21 \cdot 10^6\,kJ}{120\,kJ/g} \cdot \frac{1}{1\,000\,km} = \\ &= 68.4\,g/km \end{aligned}$$

Como se puede ver esta cantidad es muy pequeña comparado con otros combustibles, como la gasolina, el propano etc., esto es debido, como ya se vio anteriormente en el apartado 1.1.1, el hidrógeno tiene un alto poder calorífico, sin embargo, esta cantidad supone un volumen muy grande.

Si se establece una correlación entre la masa de hidrógeno y los kilómetros recorridos tal y como se muestra en al *Tabla 6*, se puede observar de manera directa la cantidad de hidrógeno que será necesario almacenar dependiendo de la autonomía que se desee. Por lo tanto, para una autonomía de 1 000 km que es el objetivo marcado se deberá de almacenar 68.4 kg aproximadamente.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

Autonomía del vehículo (km)	Cantidad de H₂ (kg)
100	6.8
200	13.7
300	20.5
400	27.4
500	34.2
600	41.0
700	47.9
800	54.7
900	61.6
1 000	68.4
1 100	75.2
1 200	82.1
1 300	88.9
1 400	95.8
1 500	102.6

Tabla 6: Masa de hidrógeno necesaria según la autonomía del vehículo.

3.4. DISEÑO EQUIPOS DEL SISTEMA

Un sistema de pila de combustible que opere con hidrógeno es un sistema complejo, y requiere de un gran número de componentes trabajando de manera adecuada para que el sistema funcione correctamente y que sea seguro, tal y como se mostró en el apartado 1.3. En este apartado se elegirán y dimensionarán los componentes principales de una instalación de pila de hidrógeno para un vehículo pesado.

3.4.1. Sistema Motriz

El sistema de propulsión del vehículo será el primer componente para dimensionar, ya que los demás elementos dependerán de las necesidades de este. En el apartado 3.2.6 se calculó la potencia máxima que deberá desarrollar el vehículo para que cumpla con las exigencias y prestaciones marcadas. Aunque el valor de potencia máxima que entregará el vehículo será en situaciones concretas, y no durante la mayor parte del tiempo, el sistema de propulsión se deberá dimensionar entorno a esta potencia máxima, de 402 kW.

Para elegir el sistema de propulsión, a parte de las características técnicas del mismo, se ha buscado unidades de potencia que se hayan utilizado con anterioridad en aplicaciones similares y que estén destinadas a vehículos de este tipo. Por este motivo la elección del motor eléctrico vendrá de la mano del proveedor estadounidense Borg Warner®, y la serie HVH de motores eléctricos destinados a la industria automotriz. Mas concretamente se ha elegido el motor HVH 410-075 DUAL STACK de Cascadian Motion, (Figura 18) un motor doble, robusto y potente destinado para aplicaciones pesadas.



Figura 18: Motor eléctrico Borg Warner HVH 410-075 Dual Stack modificado por Cascadian Motion

Fuente: <https://www.cascadiamotion.com/images/catalog/DataSheets/DS-410-075.pdf>

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

Es capaz de entregar un par de 2 000 Nm a 600 Amperios, y con un pico de potencia de 550 kW a 700V, con una eficiencia superior al 95%. Las revoluciones máximas a las que gira el motor son 6 000 rpm y el peso del conjunto es de 220 kg. Las curvas características del motor pueden observarse en la *Figura 19*.

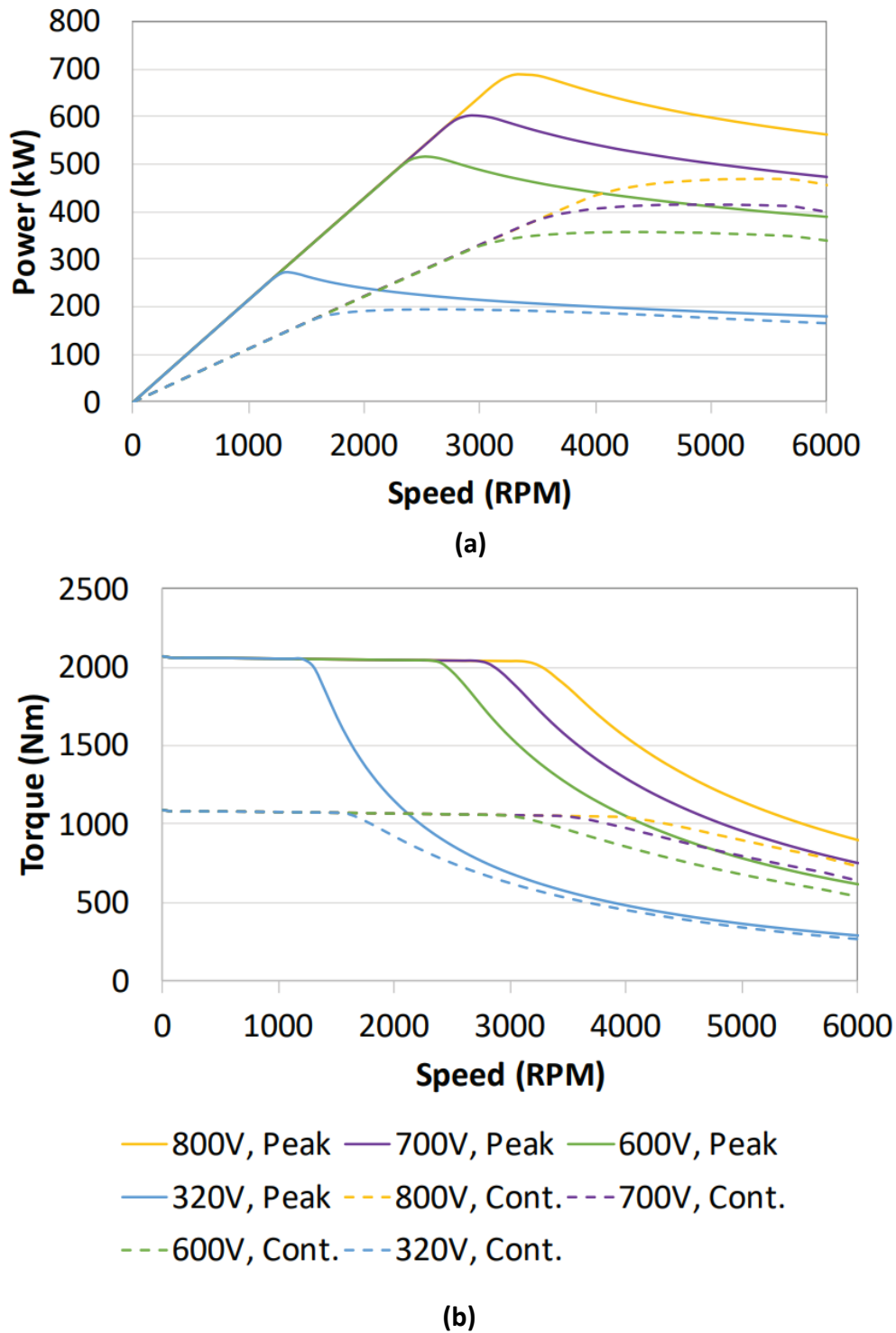


Figura 19: Curvas características motor HVH 410-075 Dual Stack. Curvas de potencia (a) y Curvas de par (b)

Fuente: <https://www.cascdiamotion.com/images/catalog/DataSheets/DS-410-075.pdf>

3.4.2. Celdas de Combustible

La celda de combustible es el elemento principal en un vehículo de hidrógeno, ya que es el lugar donde se produce la transformación de la energía que contiene el hidrógeno en energía eléctrica, a través de una reacción química.

El criterio de selección de la celda de combustible se basará en las características técnicas del vehículo y el motor eléctrico que monta. En este caso se ha optado por montar una célula de combustible del fabricante internacional Hydrogenics®. Mas concretamente el tipo de celda de combustible elegida será de tipo PEM, y el modelo HyPM-HD 180, *Figura 18*, siendo la que más se adapta a las necesidades del vehículo. Las características técnicas de la célula de hidrógeno se muestran en la *Tabla 7*.



Figura 20: Celda de hidrógeno Hydrogenics HyPM-HD 180

Fuente: <http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/HyPM-180-SpecSheet.pdf>

La potencia de la célula de combustible es de 198 kW, por lo tanto, hará falta conectar una segunda célula de combustible en paralelo para lograr la potencia de 400 kW aproximadamente, que se calcularon para la potencia máxima del vehículo.

Esta célula de combustible esta refrigerada por líquido y no requiere de humidificación de la membrana interior, además es capaz de trabajar a baja temperatura, incluso varios grados por debajo de cero, lo que permite arrancar en climas fríos. También presenta el marcado CE que permite instalar estos equipos para vehículos homologados.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

La tensión de salida de las celdas de combustible es a 360 V como máximo, por lo que para alimentar el motor será necesario un conversor DC/AC que permita alcanzar el voltaje adecuado para que el motor pueda cumplir con los requisitos establecidos, y trabajar en corriente alterna, para el correcto funcionamiento, además de gestionar la recarga de las baterías.

Technical Data	HyPM-HD 180
Continuous Power	198 kW
Operating Current	0 to 1 000 A
Operating Voltage	180 to 360 V
Peak Efficiency	55%
Response	<5s from off to idle <3s from idle to rated power
Fuel	Hydrogen > 99.8%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O or 60% ethylene glycol/DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +55° C operating -40 to +65° C storage (<2°C with automated freeze shutdown feature)
Communication Interface	CAN v2.0A (standard 11 bit)
Dimensions	1 582 x 1085 x 692 mm
Mass	720 kg
Volume	1 188 L
Expected lifetime	+10 000 hours

Tabla 7: Características Técnicas de la celda de combustible HyPM-HD 180

Fuente: <http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/HyPM-180-SpecSheet.pdf>

3.4.3. Batería de recuperación de energía

Una parte fundamental de un sistema que funcione con célula de hidrógeno es una batería de acumulación o de recuperación de energía. Si bien se puede regular la cantidad de hidrógeno que entra en la celda, existirán ciertos momentos donde haya un excedente de energía, o bien cuando el motor eléctrico se encuentre reteniendo el vehículo y convirtiéndose en generador, que es una práctica habitual en vehículos con motores eléctricos. Es ahí donde ese excedente de energía puede ser aprovechado y almacenado en la batería.

La batería de recuperación podrá liberar la energía eléctrica en momentos concretos donde sea necesario, para aumentar el voltaje y entregar así una potencia extra. Como por ejemplo en una pendiente pronunciada, en un adelantamiento, o en la puesta en movimiento del vehículo con una carga pesada.

El modelo elegido para esta aplicación será una batería utilizada en algunos vehículos híbridos de Toyota®, (Figura 21) y que ha sido más que utilizada y probada. La batería es de Ion de Litio y está fabricada por Panasonic®. Las características técnicas de la batería se muestran en la Tabla 8.

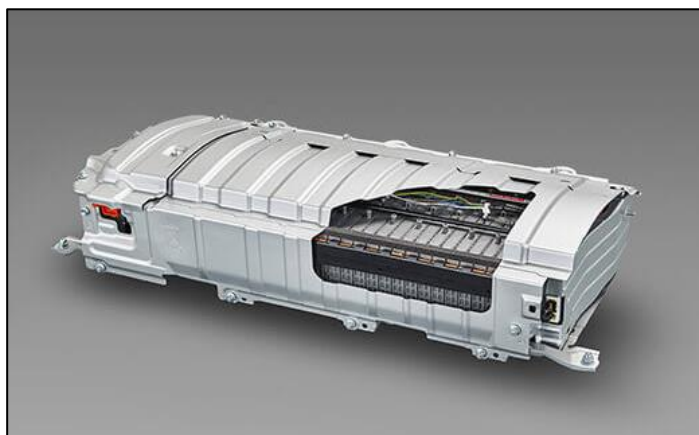


Figura 21: Batería HV, montada en los vehículos híbridos de Toyota

Fuente: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/2017/componentes-sistema-hibrido-toyota>

Número de celdas	240
Tensión de funcionamiento	288 V
Capacidad	6.50 A·h
Potencia específica	1 192 W/kg
Energía específica	41 W·h/kg
Dimensiones	552 x 382 x 96 mm
Masa	68 kg

Tabla 8: Características Técnicas batería HV de Ion de Litio de Panasonic

Fuente: CALLEJA RAMOS, E. (2018). Diseño de una pila de hidrógeno para su aplicación en automoción. TFM: Universidad de Valladolid.

3.4.4. Sistema de regulación y abastecimiento

Las celdas de hidrógeno suelen trabajar a una presión por encima de la atmosférica para optimizar el rendimiento, es por este motivo que es necesario instalar elementos reguladores de presión a la entrada de las pilas de combustible.

Para reducir la PNT de los depósitos, se instalará un dispositivo de regulación en dos etapas hasta la presión de trabajo de la pila de combustible, ya que una reducción muy grande en la presión puede provocar desplazamientos de flujo, que pueden llegar a dañar seriamente el sistema de almacenamiento o de alimentación de la pila. Además, se deberá instalar un compresor en la toma de admisión para igualar la presión en la pila ya que podrían producirse un intercambio en los flujos de la pila y dañar la membrana.

También se instalarán DLP y válvulas de descarga para que el sistema sea lo más seguro posible, ya que el hidrógeno es un gas altamente inflamable.

El sistema de almacenamiento de hidrógeno atendiendo al reglamento de homologación, deberá contar con (*Figura 22*):

- Un DLPT
- Una válvula de retención, que impida el flujo inverso
- Una válvula de bloqueo automático, para cortar el suministro de hidrógeno.

Estos dispositivos de cierre se instalarán directamente sobre cada recipiente o en el interior de estos. Además, se instalarán manómetros de presión y de temperatura, para poder monitorear estos parámetros en todo momento.

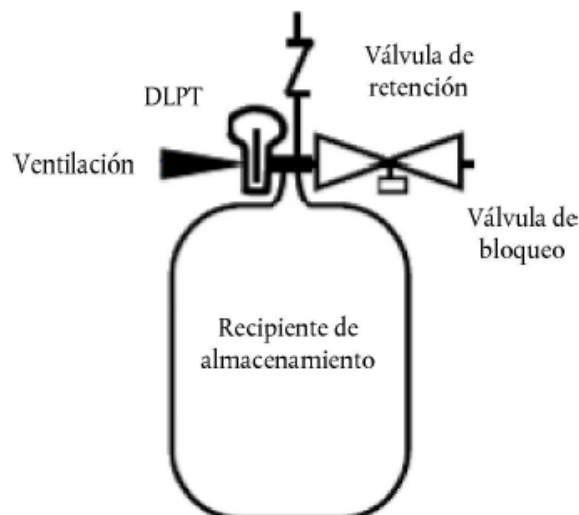


Figura 22: Sistema de almacenamiento de hidrógeno típico, con los elementos de regulación.

Fuente: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:42019X0795&from=ES>

3.5. DISEÑO DEPÓSITO EN SOLIDWORKS

Dado que la densidad del hidrógeno es muy baja, comparada con otros combustibles, almacenarlo resulta todo un reto. El volumen que ocupa, incluso a presiones elevadas, es muy grande en comparación con su masa. Es por esto por lo que la elección del lugar en el que instalar el depósito, es crucial en cuanto al desempeño y funcionamiento del vehículo.

3.5.1. Cálculo del volumen necesario

El volumen que ocupará la masa de hidrógeno variará según la presión a la que se quiera almacenar dicha cantidad tal y como se vio en el apartado 1.1.3.1, donde la densidad es función de la presión de almacenaje del recipiente. El reglamento n.º 134 de homologación⁴ especifica que la PNT máxima es de 700 bares, sin embargo, el depósito se diseñará para operar con una PMTP de 1 000 bares. La densidad del hidrógeno a 1 000 bares de presión y 273 K es de 52.18 kg/m³, si bien es cierto que este valor puede variar con la temperatura, este valor no diferirá mucho, y estará en torno a los 50 kg/m³.

Al igual que se hizo en el apartado anterior, con la cantidad de hidrógeno a almacenar según la autonomía que tendrá el vehículo, se puede hacer lo mismo, pero en este caso con el volumen que ocupará dicha masa a 1 000 bares de presión, tal y como se muestra en la *Tabla 9*. En esta tabla se puede observar que, para la autonomía objetivo de 1 000 km, se necesitará un volumen del recipiente de aproximadamente 1.31 m³, en las condiciones que se han expuesto anteriormente.

VOLUMEN DEPÓSITO (1000 bar y 273K)	
Autonomía (km)	Volumen H ₂ (m ³)
400	0.52
500	0.66
600	0.79
700	0.92
800	1.05
900	1.18
1 000	1.31
1 100	1.44
1 200	1.57
1 300	1.70
1 400	1.84
1 500	1.97

Tabla 9: Volumen de H₂ a 1 000 bares en función de la autonomía del vehículo.

⁴ ANEXO II Normativa: Reglamento n.º 134 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE). Disposiciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos de motor y sus componentes en relación con el rendimiento en cuanto a seguridad de los vehículos de hidrógeno [2019/795]

3.5.2. Diseño prototipo inicial.

Inicialmente, se optó por un diseño rectangular instalado en la parte trasera de la cabina, tal y como se muestra en la *Figura 23*. Este diseño ha sido propuesto por varios fabricantes, entre ellos SCANIA. Esta disposición suele ser habitual en camiones rígidos, o cabezas tractoras de 3 ejes con una distancia entre ejes muy larga, ya que el espacio entre la cabina y el remolque suele superior a la de sus equivalentes de 2 ejes.

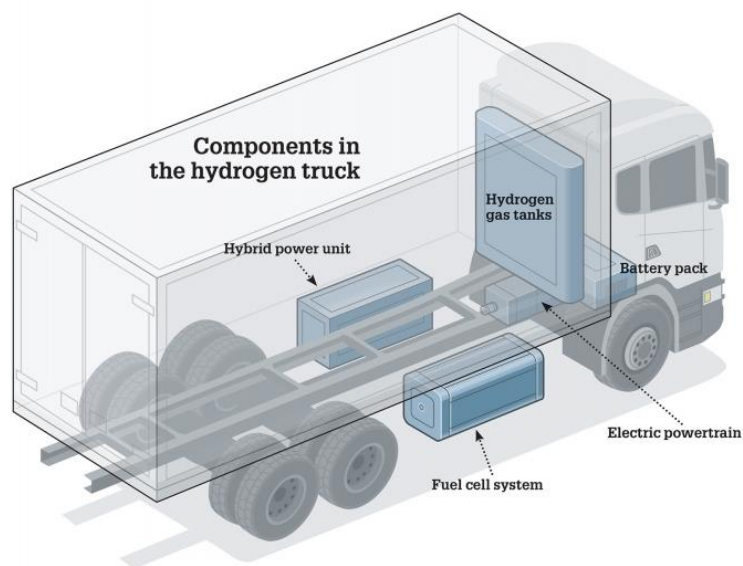


Figura 23: Disposición elementos en un camión Scania[®] a pila de hidrógeno

Fuente: <https://www.scania.com/es/es/home/experience-scania/news-and-events/News/archive/2017/07/Hidrógenocombustiblefuturo.html>

Este tipo de diseño, con los tanques de hidrógenos situados en la parte posterior de la cabina, permite liberar espacio en los laterales del vehículo, por lo tanto, habrá más espacio para otros componentes, como baterías, células de combustibles adicionales etc.

Sin embargo, instalar un depósito en la parte trasera de la cabina plantea ciertos inconvenientes. Además de dificultar las labores de mantenimiento, y de espacio reducido, las tensiones alcanzadas en un depósito de forma cilíndrico-rectangular, como el de la *Figura 24*, situado en la parte trasera, serían muy elevadas debidas a la alta presión de almacenamiento. Si bien es cierto que pueden situarse varios depósitos pequeños con forma cilíndrica en la parte trasera de la cabina que ocupen este espacio, sin embargo, esto requiere un desarrollo tecnológico mayor, y el volumen almacenado se reduciría.

Como se puede observar en la *Figura 25*, las tensiones y deformaciones de un depósito cilíndrico-rectangular son muy elevadas, lo que lo hace prácticamente inviable para este tipo de aplicaciones donde se almacena gas a muy alta presión.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

Las tensiones y deformación alcanzadas en este tipo de depósitos, con una forma más o menos rectangular, es excesivamente elevada, sobre todo en las paredes planas, incluso con espesores de pared de hasta 100 mm y presiones internas por debajo de 100 MPa, en este caso se analizó con una PNT de 700 bares y las tensiones superan claramente el límite elástico del material, que en este caso es una aleación de aluminio 7050. Un depósito con una pared plana en su diseño será siempre una forma poco óptima para diseñar recipientes de alta presión.

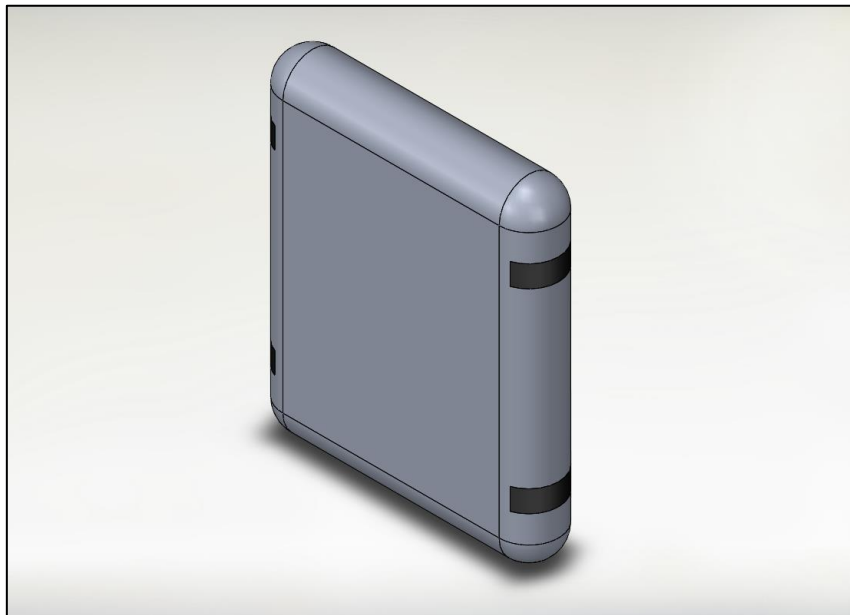


Figura 24: Depósito forma cilíndrico-rectangular

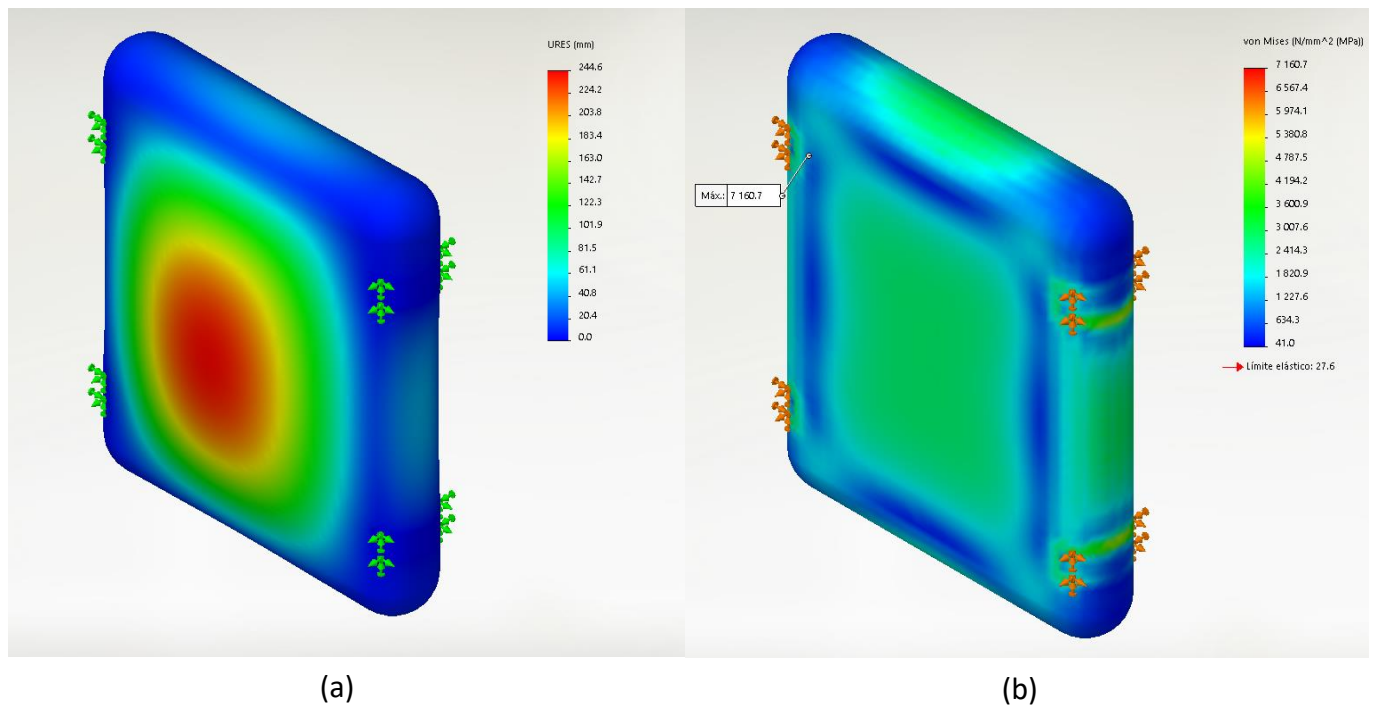


Figura 25: Deformaciones (a) Tensiones (b) en un depósito cilíndrico-rectangular

3.5.3. Diseño prototipo final

Aplicando la teoría matemática, una forma esférica será capaz de aguantar la presión interna del gas utilizando el mínimo material posible, sin embargo, un recipiente con forma esférica es muy difícil de fabricar.

Una forma cilíndrica es también una forma óptima para un recipiente a presión, además de ser mucho más fácil de fabricar e instalar dentro de un vehículo. Normalmente los depósitos utilizados en automoción tienen un diseño cilíndrico, y en los extremos o cabezas, están rematados con una forma de casquete hemisférico, o de semiesfera.

Teniendo esto en cuenta, se ha decidido diseñar un depósito en forma cilíndrica típico, cuyas cabezas serán en forma de esferoide, para tratar de optimizar la longitud del depósito y la fabricación de este, además de reducir las tensiones en las paredes.

El depósito irá instalado en el lateral del vehículo, entre los ejes de la cabeza tractora. Como ya se ha comentado anteriormente el factor más limitante en cuanto al diseño será la distancia entre ejes ya que esta permitirá un tamaño mayor o menor, dependiendo si la distancia es también mayor o menor respectivamente. Por tanto, también se verá influenciada la cantidad de hidrógeno que será capaz de almacenar.

Para realizar el diseño en el software CAD de modelado mecánico en 3D, se procedió a dibujar el croquis del depósito en el plano, como se muestra en la *Figura 26*, ajustándose lo máximo posible a las medidas de referencia del camión, tanto a la distancia entre ejes como a la altura del chasis respecto del suelo.

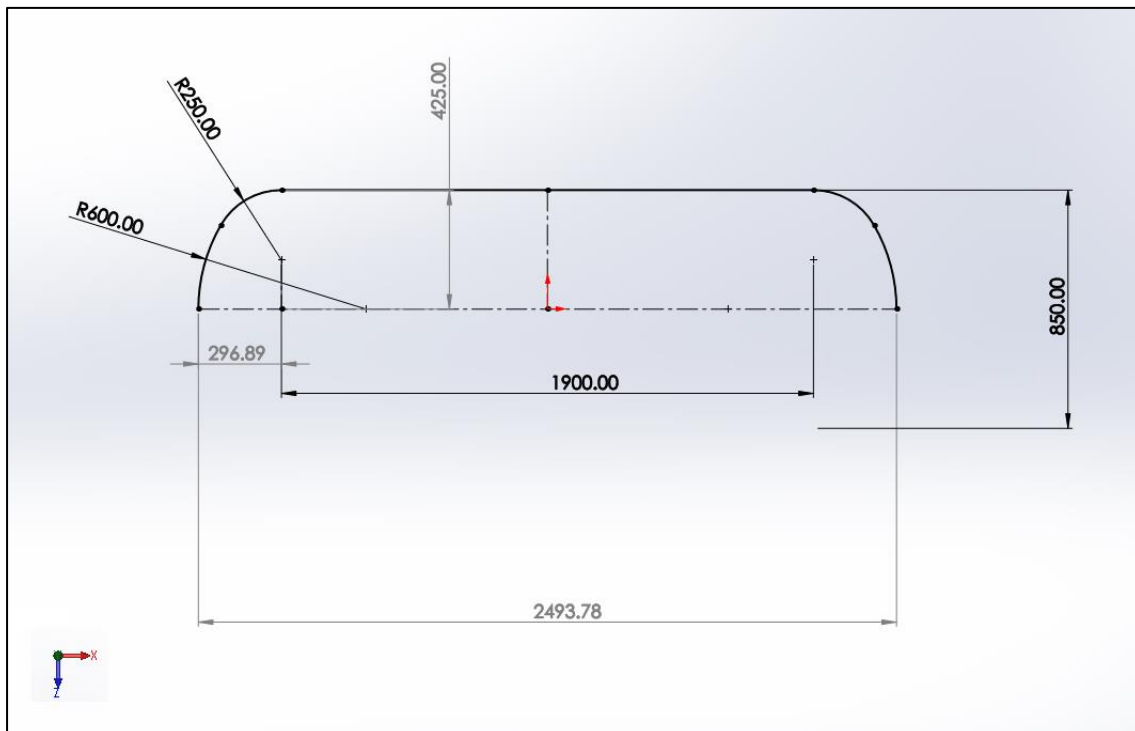


Figura 26: Dibujo en el plano del croquis del depósito cilíndrico.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

En la figura anterior se puede observar que el croquis solo representa la mitad del depósito visto desde la planta, este croquis representa la superficie interior del depósito sin tener en cuenta el espesor de pared, ya este dependerá del material. La longitud del depósito en el croquis es de 2 494 mm, sin contar con el espesor, por lo que se deja margen para los guardabarros del camión, la tapa protectora y el sistemas de recarga del depósito.

Una vez realizada la revolución del croquis, este tendrá el aspecto que se muestra en la *Figura 27*.

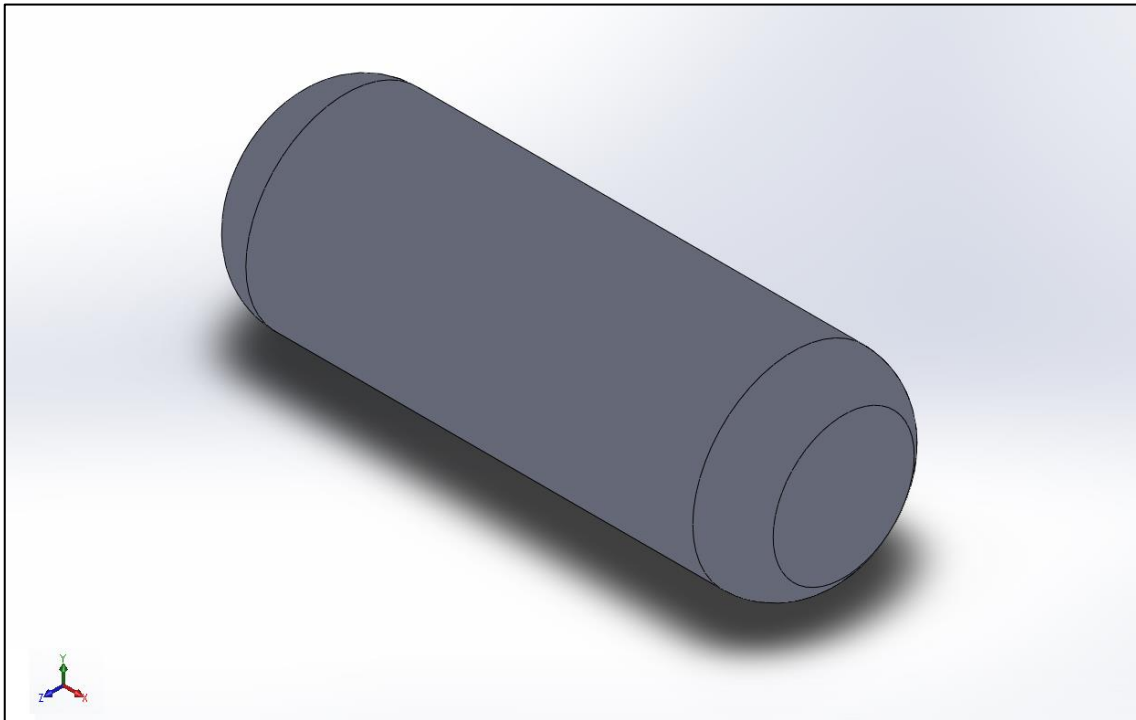


Figura 27: Forma inicial del depósito de hidrógeno, tras la operación de revolución.

Posteriormente, se dibujarán las líneas de partición que representarán la superficie de sujeción, donde irán los anclajes del depósito al vehículo. Esta sujeción se realizará mediante una abrazadera metálica que irá unida a unos soportes en el chasis del vehículo. Estas superficies permitirán calcular las tensiones y deformaciones en el programa de simulación, así como el dimensionamiento de la pared de este, la posición de los anclajes está representada en la *Figura 28*. Las superficie de partición quedan representas en un color distinto a la superficie del depósito.

Una vez dibujadas las superficies de sujeción el diseño del depósito estará acabado, *Figura 29*.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

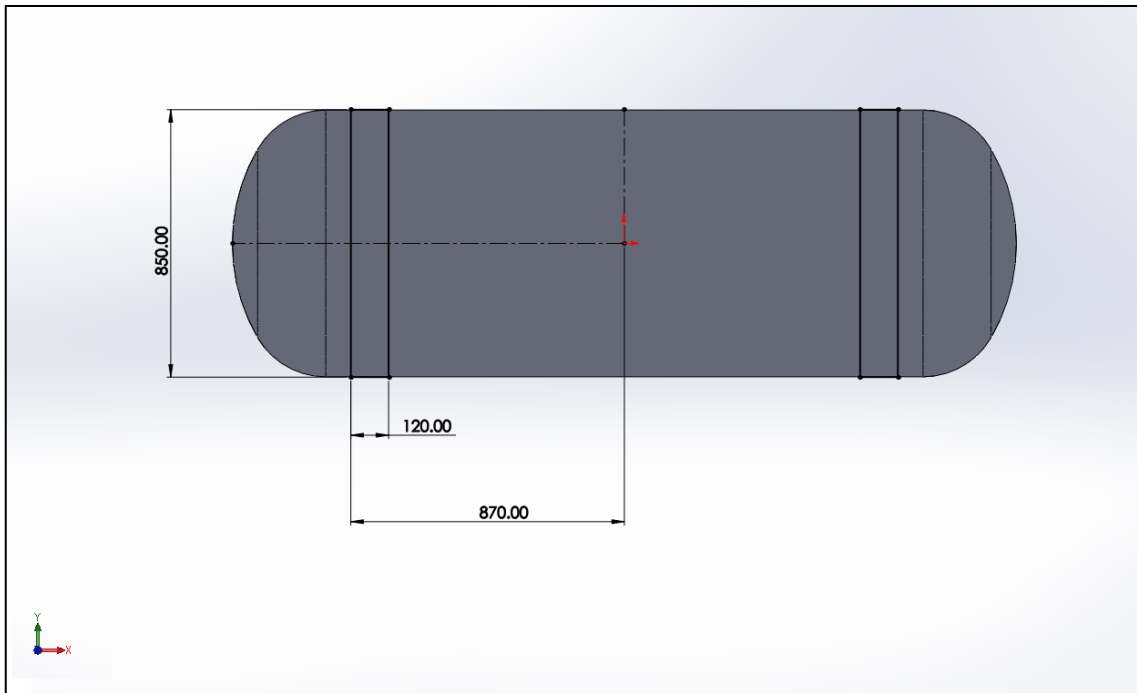


Figura 28: Posición de la superficie de sujeción del depósito.

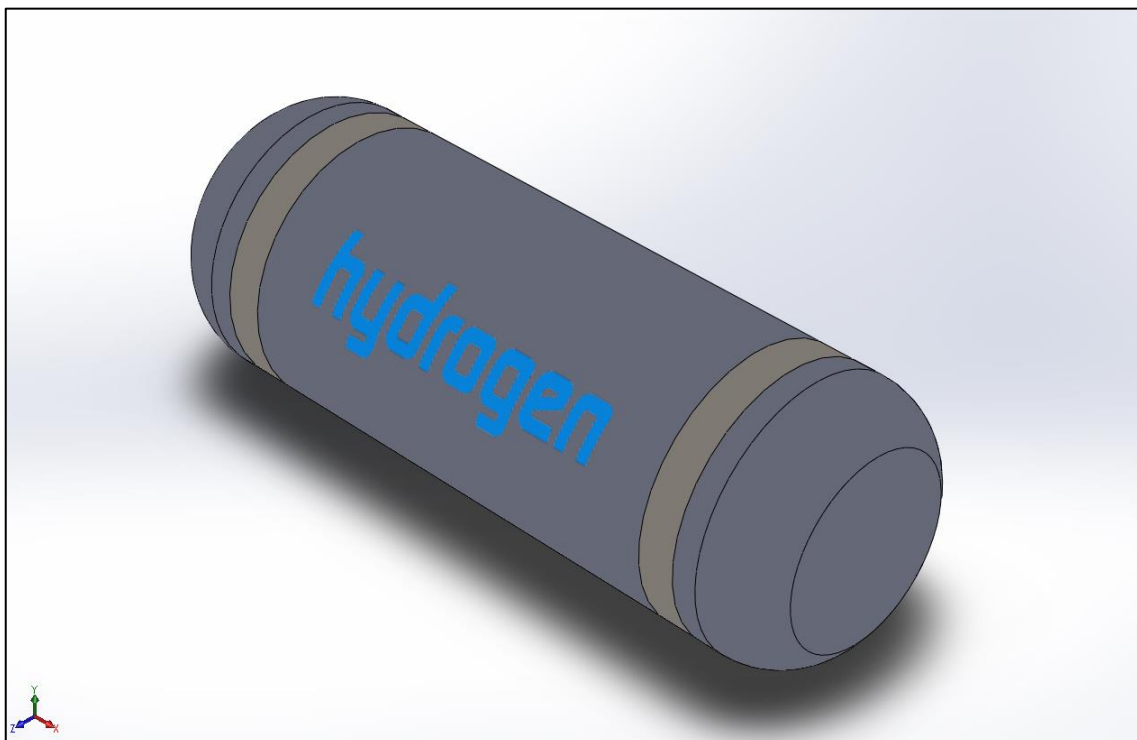


Figura 29: Diseño final depósito de hidrógeno forma cilíndrica

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para calcular el volumen del diseño únicamente se hará uso de ecuaciones básicas para el cálculo de volúmenes, como son la ecuación de volumen de un cilindro y la ecuación de volumen de un esferoide. Para ello se necesitarán las dimensiones que aparecen en la *Tabla 10*, la longitud entre centros del depósito, su diámetro y los semiejes de las cabezas del depósito con forma de semiesferoide.

DIMENSIONES CROQUIS	
Diámetro (D)	850 mm
Longitud entre centros (L)	1 900 mm
Semieje a	425 mm
Semieje b	296.89 mm

Tabla 10: Dimensiones del croquis del depósito de almacenamiento

El volumen del cilindro viene dado por la expresión que se muestra a continuación, sustituyendo valores, el volumen de la parte cilíndrica del depósito es de:

$$V_c = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L = \pi \cdot \frac{(890 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot (1900 \cdot 10^{-3}) = 1.10 \text{ m}^3$$

Para el cálculo del volumen de ambas cabezas del depósito, únicamente se tendrá que calcular el volumen de un esferoide de revolución de dos semiejes a y b. Ambas cabezas tienen la misma forma, es decir de un semiesferoide por lo que el volumen vendrá dado por la expresión:

$$V_e = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (425 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (296.89 \cdot 10^{-3}) = 0.23 \text{ m}^3$$

Si sumamos ambos volúmenes obtenemos un volumen total de:

$$V_{Total} = V_c + V_e = 1.10 \text{ m}^3 + 0.23 \text{ m}^3 = 1.33 \text{ m}^3$$

Como se puede observar este volumen está muy próximo al volumen de 1.31 m^3 , que es el objetivo para poder obtener una autonomía de 1 000 km aproximadamente, con una masa de 68.4 kg de hidrógeno, tal y como se ha calculado en el apartados anteriores.

Sin embargo, el diseño del depósito está muy ajustado a la forma del vehículo por lo que aumentar las dimensiones del depósito no es una opción, ya que esta está limitada por la distancia entre ejes y la altura del chasis respecto del suelo, por lo tanto, este volumen se tomará como válido ya que está muy próximo al teórico que se puso como objetivo.

3.5.4. Diseño de anclajes del depósito

Los anclajes permiten sujetar el sistema de almacenamiento al chasis del camión. Estos anclajes ofrecen una estructura sólida donde amarrar el depósito, como se comentó anteriormente, las sujeciones serán unas abrazaderas metálicas acopladas a estos anclajes y estos a su vez atornillados al chasis.

El diseño tendrá en forma de "C", y tendrá un espesor de 6 mm y con un ancho de 350 mm, al que irán unidas mediante soldadura dos nervios del mismo espesor, separados 200 mm entre sí, y que será donde irá apoyado el depósito *Figura 30*.

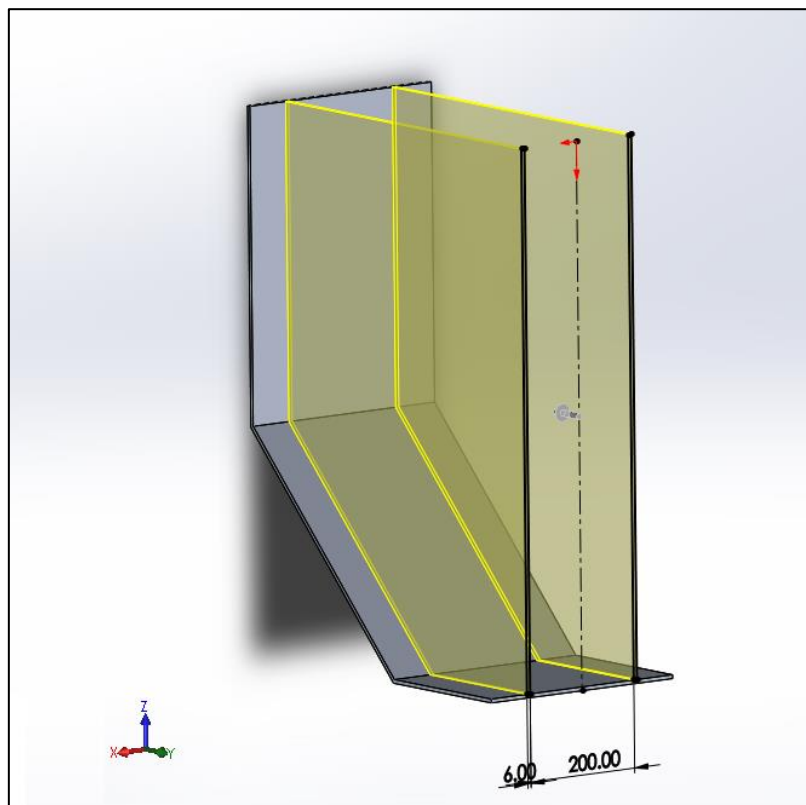


Figura 30: Base del anclaje para el depósito.

Una vez diseñada esta parte, se realizará un corte a los nervios con el diámetro del depósito y se realizarán agujeros para rebajar el peso de la estructura, para el montaje de las abrazaderas, y para los tornillos de unión al chasis, tal y como se puede observar en la *Figura 31*.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

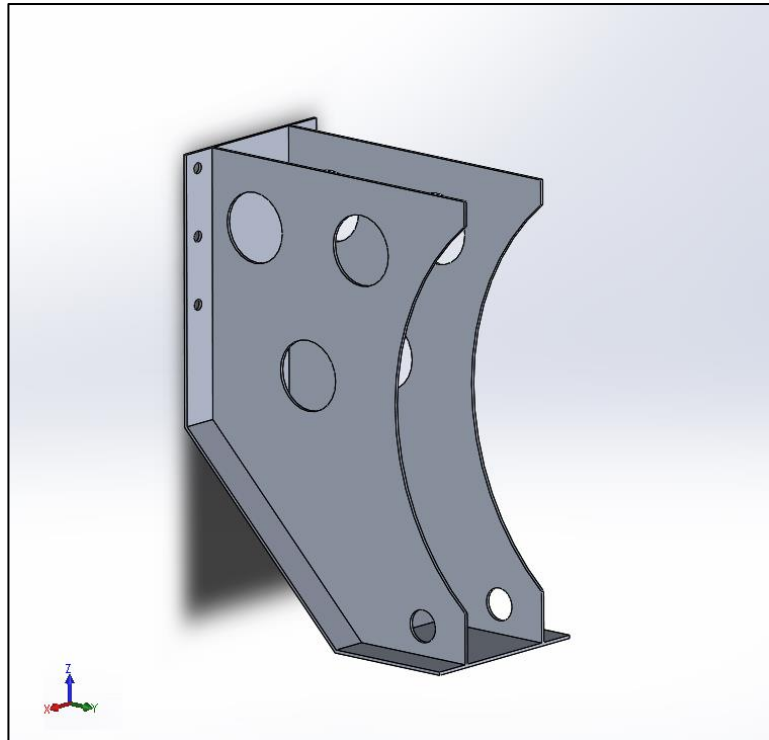


Figura 32: Anclaje del depósito tras realizar los agujeros de sujeción y de rebaja de peso

Una vez realizada esta operación se procederá a unir los dos nervios mediante una superficie curva, de 5 mm de espesor, y que aportará una superficie mayor de apoyo para el depósito. Después se aplicarán las operaciones de redondeo y achaflanado allí donde sea necesario, quedando el diseño del anclaje finalizado, *Figura 32*.

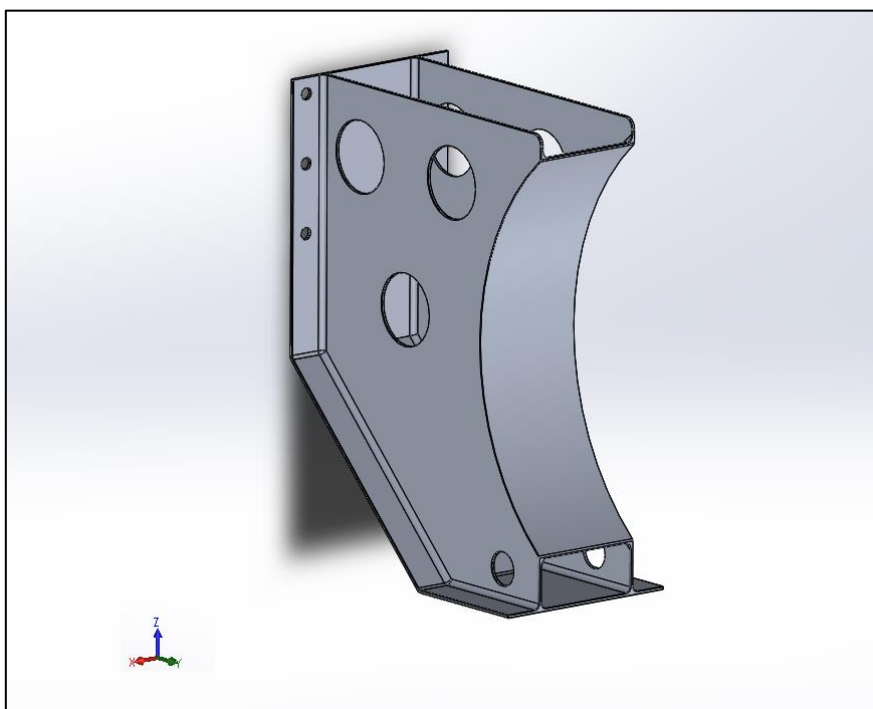


Figura 31: Diseño del anclaje para el sistema de almacenamiento

3.5.5. Diseño tapa protectora.

La tapa que irá montada en la cabeza del depósito, protegerá los sistemas de cierre del depósito y en ella irán instalados el sistema de recarga y los manómetros de indicación, tanto de temperatura como de presión. Para su diseño se realizará una operación de revolución, de 850 mm de diámetro y 450 mm de altura. Sobre esta revolución se hará una operación de corte sobre una cuerda de la circunferencia, para albergar el sistema de recarga y los manómetros. Posteriormente se realizará una operación de vaciado en el interior, para acomodar el depósito sobre la tapa. *Figura 33.*

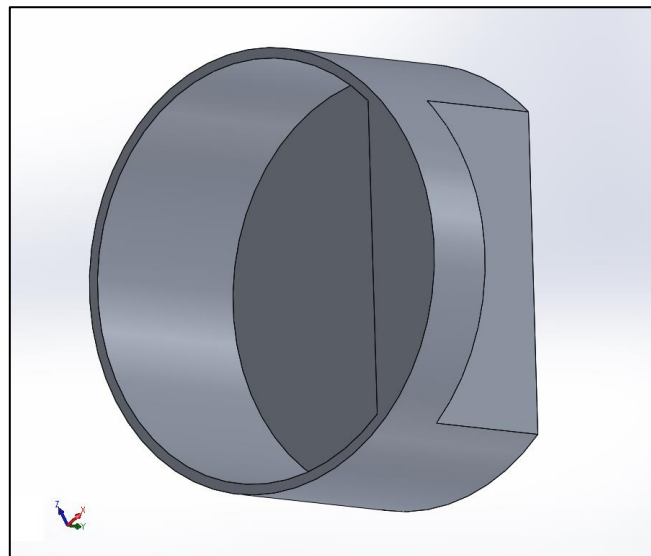


Figura 33: Diseño inicial tapa protectora del depósito.

Posteriormente se realizarán las operaciones de redondeo, para adaptarla a la cabeza del depósito, y se realizará un agujero para el sistema de recarga, se instalarán los manómetros y las pegatinas de advertencia, tal y como se ve en la *Figura 34.*

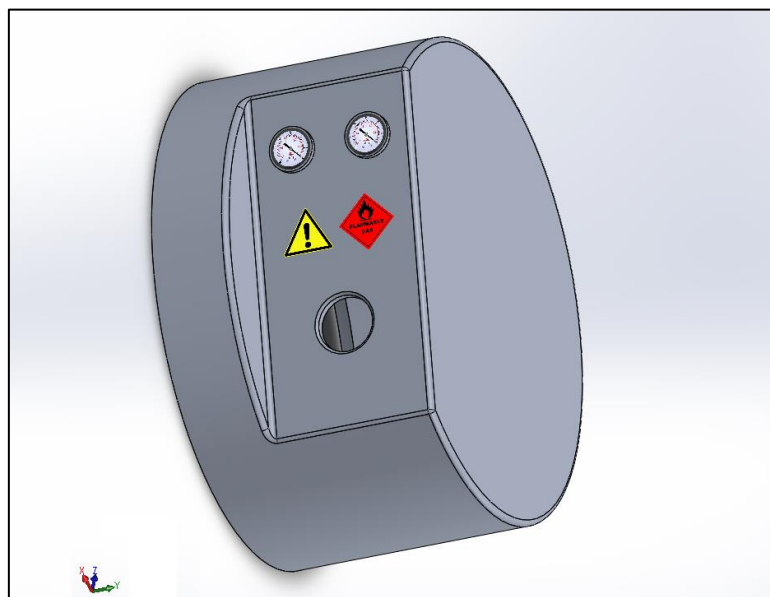


Figura 34: Diseño final tapa protectora del depósito.

3.6. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE LOS ESTADOS TENSIONALES.

En este apartado se estudiará el estado tensional al que estará sometido el depósito, debido a la presión interna ejercida por el hidrógeno almacenado a alta presión. Las tensiones ejercidas en la superficie del depósito dependerán de las dimensiones del recipiente, es decir de su radio de curvatura y del espesor de la pared, que es el encargado de contener el gas a alta presión.

Para determinar los esfuerzos mecánicos a los que estará sometido el recipiente, se deberá de considerar una hipótesis de trabajo para aplicar las ecuaciones de equilibrio. Si la relación (R/e) entre el radio del recipiente y el espesor es mayor a 10 veces, se podrá plantear la hipótesis de recipientes de pared delgada, donde se trata la pared del depósito como una superficie y se aplican las ecuaciones de Laplace-Young. Por el contrario, si esta relación no supera las 10 veces, se deberá aplicar la hipótesis de recipientes de pared gruesa, y el cálculo será más complejo.

En este caso el radio del depósito es de 425 mm, por lo que el espesor máximo, para plantear una hipótesis de pared delgada será de 42.5 mm, que no se deberá de sobrepasar, ya que las tensiones en la superficie interna y externa serían lo suficientemente dispares para que las ecuaciones de Laplace-Young ya no se cumplan.

Planteando las ecuaciones de equilibrio en el depósito a lo largo de su eje vertical (eje Y), realizando una sección transversal, en la dirección Z, tal y como se muestra en la *Figura 35*, se puede observar que la pared del depósito está ejerciendo una fuerza de tracción respecto de la otra mitad. Esta fuerza será igual a una tensión denominada longitudinal, multiplicada por el espesor de la pared y por la longitud de la circunferencia, tal y como se muestra en la expresión:

$$F = \sigma_x \cdot e2\pi R$$

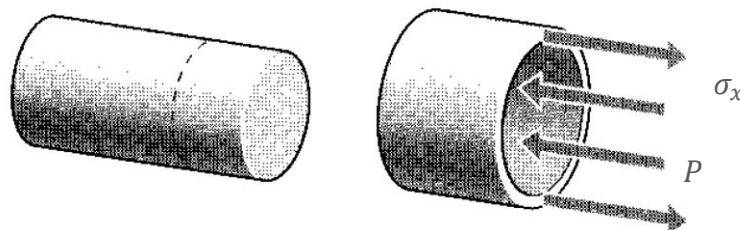


Figura 35: Diagrama solido libre de un depósito cilíndrico sometido a tensión longitudinal

Sin embargo, esta fuerza deberá de estar en equilibrio con la presión interna del gas ejercida en las paredes de este, por lo tanto, la ecuación de equilibrio podría plantearse del siguiente modo, tal y como se plantea en las ecuaciones de Laplace-Young.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

$$P \cdot \pi R = \sigma_x \cdot e 2\pi R$$

Si se despeja la tensión longitudinal, de la ecuación anterior esta vendrá definida por la expresión:

$$\sigma_x = \frac{P \cdot R}{2 \cdot e} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot e}$$

Si se analiza ahora una sección longitudinal, a lo largo del eje x del recipiente y se plantean las ecuaciones de equilibrio, tal y como se muestra en la *Figura 36*, la fuerza de tracción ejercida por las paredes a lo largo de su sección transversal, que será la tensión en la dirección de la circunferencia del recipiente por su longitud, todo ello multiplicado por 2, ya que son dos las paredes en la sección transversal. Esta fuerza se igualará a la presión ejercida a lo largo de la superficie lateral del recipiente. Aplicando el mismo principio que en el caso de la tensión axial y las ecuaciones de Laplace-Young, la ecuación de equilibrio quedaría tal y como se muestra.

$$P \cdot 2RL = \sigma_\theta \cdot e 2L$$

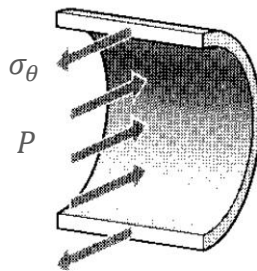


Figura 36: Diagrama solido libre sección sometida a tensión circunferencial

Si se despeja la tensión circunferencial de la ecuación de equilibrio y se desarrolla dicha expresión, la tensión en el eje de la circunferencia del recipiente vendrá definido por:

$$\sigma_\theta = \frac{P \cdot R}{e} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot e}$$

Como se puede observar de las expresiones de ambas tensiones, la tensión circunferencial es el doble que la tensión axial. Por lo tanto, la mayor parte de la presión interna del recipiente será soportado por la superficie cilíndrica del recipiente, en los extremos con forma de esferoide, los esfuerzos y tensiones serán menores.

Debido a que se está trabajando con recipientes de paredes delgadas, las tensiones en la superficie interna y externa serán muy similares, por lo tanto, la tensión cortante a través de la sección transversal se podrá despreciar. Teniendo claro los esfuerzos mecánicos que actúan en la superficie de un recipiente cilíndrico se puede establecer el

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

estado tensional de cada uno de los puntos que forman su superficie. Este estado tensional será el siguiente:

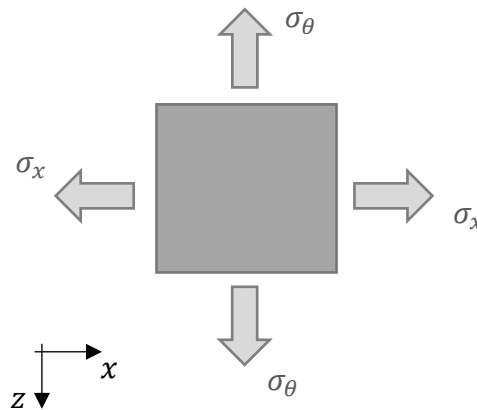


Figura 37: Estado tensional superficie de un recipiente a presión de pared delgada

Observando el estado tensional y el valor de las fuerzas, se puede comprobar que la rotura más probable se producirá en la dirección perpendicular a la tensión circunferencial, ya que esta siempre tendrá un valor superior a la tensión radial, siempre y cuando el material en el que está fabricado el recipiente, sea un material isotrópico, con la misma resistencia mecánica en cualquiera de sus direcciones.

Si se expresan los esfuerzos mecánicos de un elemento finito por unidad de longitud, conocidas las dimensiones del recipiente excepto el espesor de pared, y la presión interna que soporta el recipiente se puede afirmar que el estado tensional en las direcciones XZ será:

$$N_x = \sigma_x \cdot e = \frac{P \cdot D}{4 \cdot e} \cdot e = \frac{100 \text{ MPa} \cdot 850 \text{ mm}}{4} = 21\,250 \text{ N/mm}$$

$$N_z = \sigma_\theta \cdot e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot e} \cdot e = \frac{100 \text{ MPa} \cdot 850 \text{ mm}}{2} = 42\,500 \text{ N/mm}$$

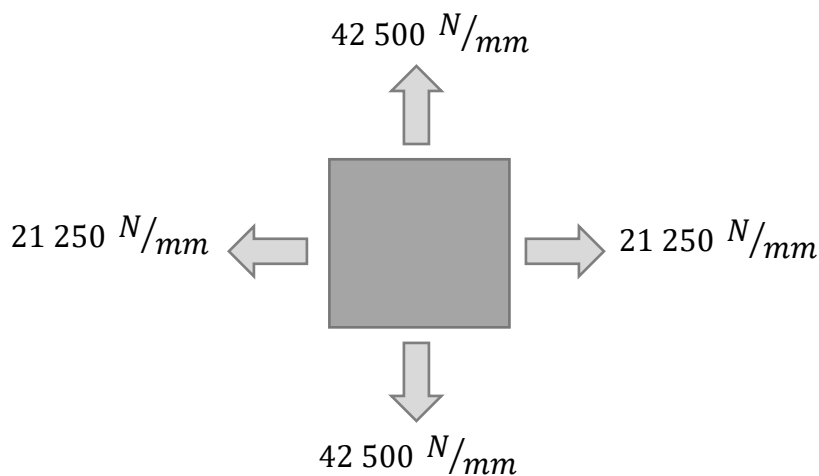


Figura 38: Estado tensional depósito de Hidrógeno sometido a una presión interna de 100 MPa

4.

SELECCIÓN DE MATERIALES

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

4.1. ANÁLISIS EN ACERO Y ALUMINO

Para realizar una adecuada selección de materiales primero, se va a realizar un dimensionado en materiales que usualmente se utilizan para fabricar recipientes a presión, como son el acero y el aluminio. Para la realización de los cálculos se empleará la teoría d Von Mises y las características mecánicas de los materiales, que en este caso se realizará para un acero de construcción laminado en caliente, y para una aleación de aluminio, las propiedades mecánicas de ambos se muestran en la *Tabla 11*.

	Acero S275	Aluminio 7050
<i>Modulo elástico (E)</i>	210 000 N/mm ²	72 000 N/mm ²
<i>Módulo cortante (G)</i>	81 000 N/mm ²	26 900 N/mm ²
<i>Límite elástico (S_y)</i>	275 N/mm ²	490 N/mm ²
<i>Limite a tracción (X_t)</i>	450 N/mm ²	550 N/mm ²
<i>Coefficiente de Poisson (ν)</i>	0.3	0.33
<i>Densidad (ρ)</i>	7 850 kg/m ³	2 830 kg/m ³

Tabla 11: Propiedades mecánicas del acero y aluminio

Aplicando las ecuaciones de un recipiente a presión de pared delgada que ya se vieron en el apartado 3.6, se pueden definir las tensiones 1 y 2 y la tensión equivalente de Von Mises, tal y como se muestra:

$$\sigma_1 = \sigma_{axial} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{circunferencial} = \frac{P \cdot R}{e}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{\left(\frac{P \cdot R}{2 \cdot e} - \frac{P \cdot R}{e}\right)^2 + \left(\frac{P \cdot R}{2 \cdot e} - 0\right)^2 + \left(\frac{P \cdot R}{e} - 0\right)^2}{2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\left(-\frac{P \cdot R}{2 \cdot e}\right)^2 + \left(\frac{P \cdot R}{2 \cdot e}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{P \cdot R}{2 \cdot e}\right)^2}{2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{P \cdot R}{e}$$

Para calcular el espesor necesario para soportar los esfuerzos se tendrá en cuenta un factor de seguridad a la rotura de $n=1$, ya que será simplemente para el cálculo del espesor mínimo necesario para que el material soporte dicho estado tensional. Por lo tanto, si se compara con la tensión de rotura:

$$n \leq \frac{X_t}{\sigma_{eq}} = \frac{X_t}{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{P \cdot R}{e}}$$

$$e \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{n \cdot P \cdot R}{X_t}$$

Si se sustituye numéricamente los valores de la *Tabla 11*, tanto para el aluminio como para el acero en la expresión anterior, se obtienen los siguientes valores de espesor:

$$e_{acero} \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 \cdot 100 \text{ MPa} \cdot 850 \text{ mm}}{450 \text{ MPa}} = 163.6 \approx 164 \text{ mm}$$

$$e_{aluminio} \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 \cdot 100 \text{ Mpa} \cdot 850 \text{ mm}}{550 \text{ MPa}} = 133.84 \approx 134 \text{ mm}$$

Como se puede observar de los resultados, se obtienen unos espesores muy grandes, que sobrepasan los límites para seguir considerando como un problema de recipiente a presión de pared delgada, y se necesitarían cálculos más complejos para estudiar esta situación. Por lo tanto y a la vista de los resultados, se optará por utilizar materiales compuestos para el estudio del proyecto ya que con estos se consiguen propiedades mecánicas mayores y las posibilidades de combinaciones con diferentes materiales son mucho más amplias que si se utilizan materiales tradicionales.

4.2. ANÁLISIS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son una combinación de dos o más componentes no solubles, unidos entre sí de manera sinérgica, obteniendo unas propiedades mecánicas mayores, que la de los materiales que lo forman por separado.

El material compuesto consta de dos fases. La fase dispersa denominada refuerzo, más rígida y resistente y que otorga la mayor parte de las propiedades mecánicas al material compuesto, se suele presentar en fibras, y pueden disponerse en una o varias direcciones. La fase matriz, es donde se encuentra embebida la fase dispersa, y que se encarga de aportar procesabilidad y coherencia al material, así como resistencia térmica y ambiental.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

Debido a su naturaleza heterogénea y anisotrópica, los materiales compuestos tienen unas características muy diferentes a los materiales estructurales convencionales utilizados en ingeniería, por lo que es imprescindible analizar su comportamiento mecánico. Existen diferentes escalas de análisis: micromecánico, macromecánico (Teoría clásica de laminación), y estructural (*Figura 39*).

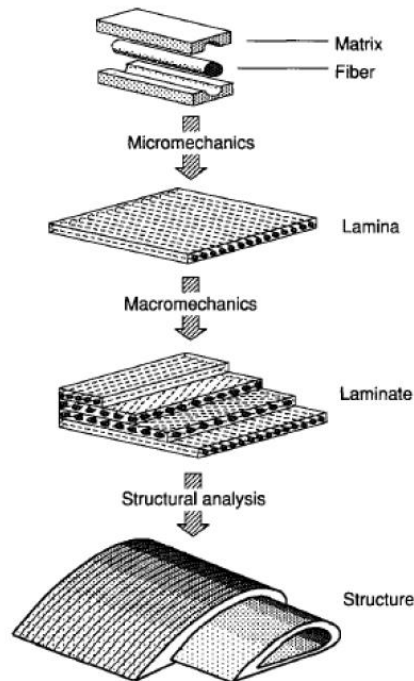


Figura 39: Niveles de análisis material compuesto

Las características propias de los materiales compuestos, les otorgan la capacidad de poder combinarse en una infinidad de maneras, otorgando características mecánicas diferentes en cada tipo de combinación. De este modo puede haber combinaciones de fibra corta, fibra larga, tejidos multiaxiales, superposición de capas orientadas en diferentes ángulos, laminados, volumen de fibras, así como diferentes matrices etc.

Es por este motivo que se hace imprescindible desarrollar modelos de análisis para determinar las características del material con el que se trabaja.

4.2.1. Análisis Micromecánico, Modelo de Chamis

Al estar formados por dos o más componentes, los materiales compuestos presentan unas propiedades mecánicas, que son una combinación de todos los compuestos que lo forman. Por este motivo es necesario realizar un análisis micromecánico, de una lámina de material compuesto para determinar las características mecánicas de este. Para ello se usará la "Ley de las mezclas modificada" o Método de Chamis.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

Este método se basa en el análisis de una lámina de material compuesto, donde el espesor es muy pequeño en comparación con sus otras dimensiones, y con las fibras orientadas en un determinado ángulo, en este caso el ángulo de las fibras coincide con los ejes cartesianos, y este estará sometido a un estado tensional dado (Figura 40).

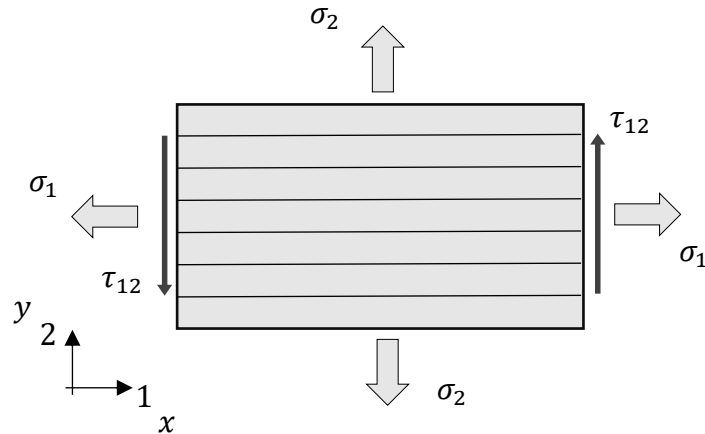


Figura 40: Estado tensional de una lamina

Conocidas las características mecánicas de la matriz y del elemento de refuerzo, es posible calcular las características mecánicas del material compuesto, mediante las expresiones siguientes:

- **Constantes Elásticas.**

$$E_1 = E_{Lf} \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \qquad E_2 = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_{Tf}}\right)}$$

$$E_3 = E_2$$

$$G_{12} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{LTf}}\right)} \qquad G_{23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{TTf}}\right)}$$

$$G_{13} = G_{21}$$

$$\nu_{12} = \nu_{LTf} \cdot V_f + \nu_m \cdot (1 - V_f)$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1}$$

- **Constantes Resistentes:**

$$X_t = V_f \cdot X_{tf}$$

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

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

$$X_c = V_f \cdot X_{cf}$$

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

$$S_{12} = S_m \cdot \left[1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{LTf}} \right) \right]$$

Si se analiza el estado tensional de la figura anterior y las relaciones entre tensiones y deformaciones (σ - ε) de manera paramétrica, se pueden obtener las expresiones de deformación transversal, longitudinal y la debida a cortadura.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{21} \cdot \frac{\sigma_2}{E_2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_{12} \cdot \frac{\sigma_1}{E_1}$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$$

Representando esta relaciones tensión-deformación, de manera matricial se puede construir la matriz en las direcciones 1-2, también conocida como matriz de flexibilidad denominada con la letra [S] y que multiplica al vector de tensiones principales y cortadura, el resultado dará la deformada en el plano. La inversa de esta matriz será la matriz de rigidez denominada con la letra [Q].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon_{12}] = [S] \cdot [\sigma_{12}]$$

$$[\varepsilon_{12}] = [S]^{-1} \cdot [\sigma_{12}]$$

$$[\varepsilon_{12}] = [Q] \cdot [\sigma_{12}]$$

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

Si las fibras del material compuesto no están alineadas con los ejes cartesianos x-y, y sus ejes locales forman un ángulo θ , con la horizontal (Figura 41), entonces se deberá transformar la matriz de rigidez, para que se tenga en cuenta a la hora de obtener la relación de tensión-deformación que sufre el material cuando trabaja orientado en un determinado ángulo, que suele ser muy usual cuando se utilizan materiales compuestos.

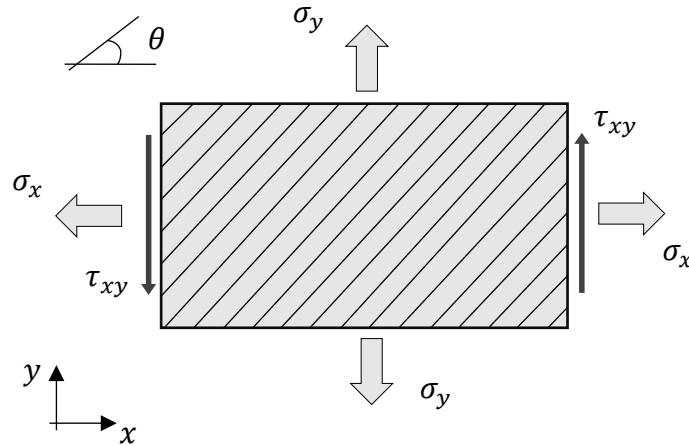


Figura 41: Estado tensional de una lámina de material compuesto, con las fibras orientadas en un ángulo θ

Para poder construir la matriz de flexibilidad se necesitará transformar las tensiones y deformaciones que aparecen debidas al ángulo θ , para ello se deberá multiplicar estas por las matrices de transformación correspondientes.

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \text{sen}^2\theta & 2 \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\theta \\ \text{sen}^2\theta & \cos^2\theta & -2 \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\theta \\ -\text{sen}\theta \cdot \cos\theta & \text{sen}\theta \cdot \cos\theta & (\cos^2\theta - \text{sen}^2\theta) \end{bmatrix}$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \text{sen}^2\theta & \text{sen}\theta \cdot \cos\theta \\ \text{sen}^2\theta & \cos^2\theta & -\text{sen}\theta \cdot \cos\theta \\ -2 \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\theta & 2 \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\theta & (\cos^2\theta - \text{sen}^2\theta) \end{bmatrix}$$

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] \cdot [\sigma_{xy}] \rightarrow [\sigma_{xy}] = [\sigma_{12}] \cdot [T_\sigma]^{-1}$$

$$[\varepsilon_{12}] = [T_\varepsilon] \cdot [\varepsilon_{xy}] \rightarrow [\varepsilon_{xy}] = [\varepsilon_{12}] \cdot [T_\varepsilon]^{-1}$$

Realizando la transformación de tensiones y deformaciones, a partir del ángulo θ , y desarrollando el cálculo se puede obtener igual que en el caso anterior, la matriz de flexibilidad, y la matriz de rigideces tal y como se puede observar a continuación:

$$[\varepsilon_{xy}] = [\overline{S}_{xy}] \cdot [\sigma_{xy}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [\overline{S}_{xy}]^{-1} \cdot [\sigma_{xy}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [\overline{Q}_{xy}] \cdot [\sigma_{xy}]$$

4.2.2. Teoría Clásica de Laminación de Placas

La Teoría de Laminación de Capas (CLPT, por sus siglas en inglés), trata de estudiar el comportamiento de un laminado compuesto por varias láminas de material compuesto, de un determinado espesor h . Las fibras de las láminas que lo componen pueden estar orientadas en diferentes ángulos $\pm \theta$ (Figura 42).

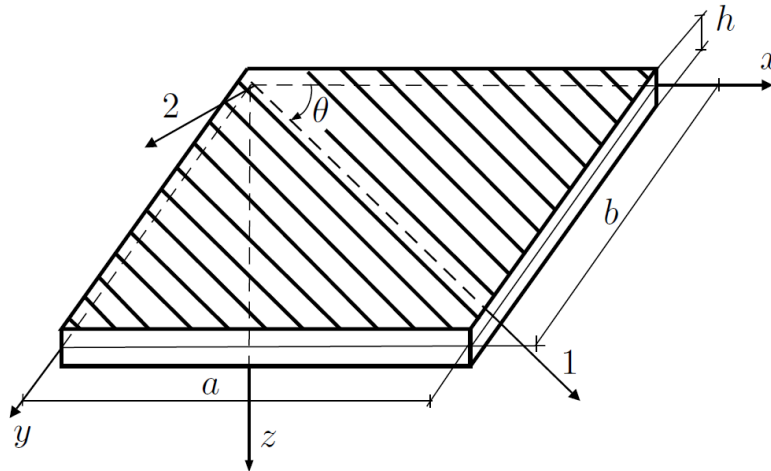


Figura 42: Lámina de material compuesto de un determinado espesor h

Si se realiza un corte de sección vertical a lo largo del eje z , se puede observar que el material compuesto está formado por un número de láminas n , cuyo espesor viene definido por la expresión:

$$e_n = h - h_{n-1}$$

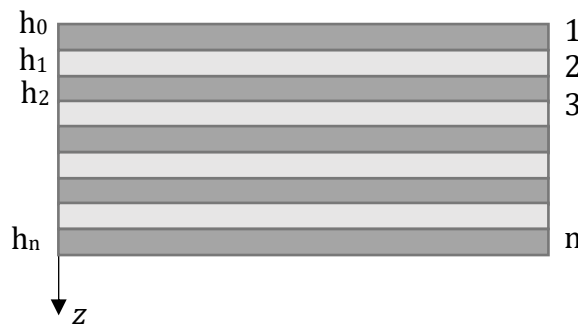


Figura 43: Sección vertical laminado compuesto

Según el ángulo θ , en el que estén orientadas las fibras de cada lámina que forma el material compuesto, se pueden obtener dos tipos de laminado, simétrico y asimétrico. En el laminado simétrico las láminas están dispuestas respecto al plano medio del laminado, con los ángulos orientados de manera opuesta.

En cambio, en el laminado asimétrico las láminas adquieren diferentes ángulos, y disposiciones respecto al plano medio, esto hace que el análisis del material compuesto sea mucho más complejo que en un laminado simétrico, y además aparecen

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

deformaciones en el plano medio (Figura 44). En el presente trabajo se utilizarán laminados simétricos por ser más apropiado para el uso y la aplicación que se le dará.

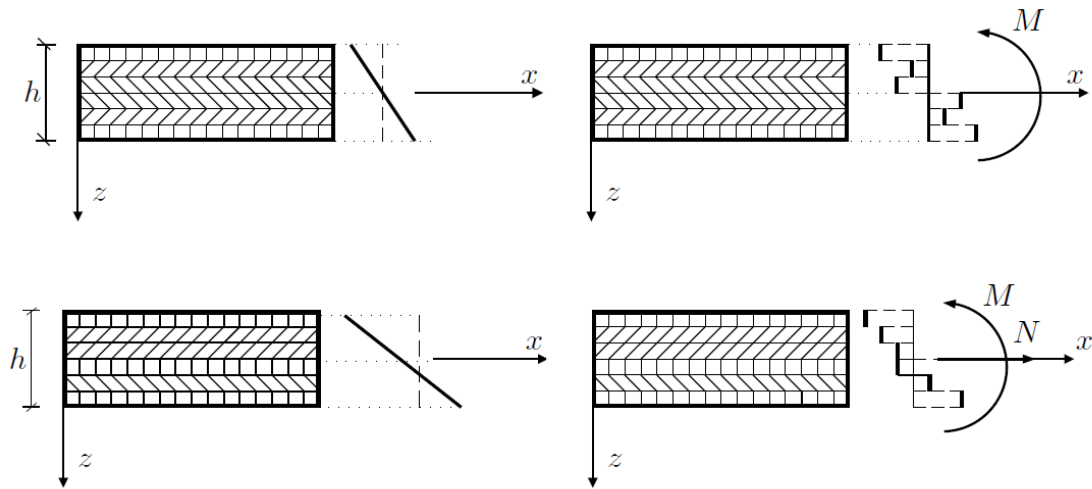


Figura 44: Distribución de tensiones y deformaciones de un laminado simétrico (Arriba) y de un laminado asimétrico (Abajo)

En un laminado de un material compuesto cualquiera se puede considerar que el material presenta un comportamiento elástico-lineal hasta la rotura, y que la deformación en cualquiera de las láminas que lo componen es igual a la deformación del laminado completo. Además, el espesor de cada una de las láminas es muy pequeño en comparación con sus demás dimensiones.

Teniendo esto en cuenta, se puede definir el estado tensional de un laminado de una determinada altura h , tal y como se indica en la Figura 45, donde los vectores de tensión y deformación vienen definidos como: $\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]$, $\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}]$ respectivamente, y el de esfuerzos como: $N = [N_x, N_y, N_{xy}]$.

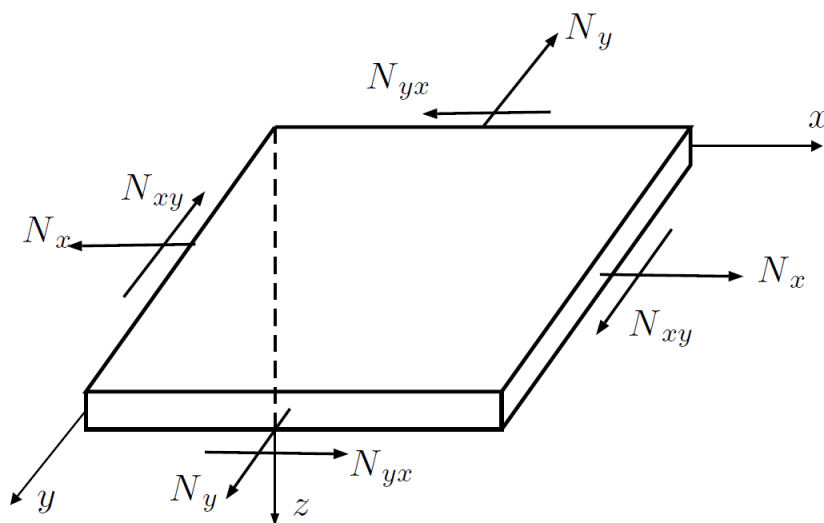


Figura 45: Estado tensional de un laminado de material compuesto.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

Si sobre este laminado se considera un elemento diferencial en el eje z , y se analiza la relación entre los esfuerzos y deformaciones que actúan en la lámina, y estableciendo el equilibrio entre los esfuerzos y tensiones se puede afirmar que:

$$N = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma dz = \int_{-h/2}^{h/2} Q \cdot \varepsilon dz = \int_{-h/2}^{h/2} Q \cdot \varepsilon^0 dz + \int_{-h/2}^{h/2} Q \cdot k \cdot z dz$$

Siendo Q , la matriz de rigidez reducida de una lámina con las fibras orientadas un determinado ángulo θ , que se expresó en el apartado anterior del análisis micromecánico. Por otro lado, aparece un coeficiente k , que representa el vector de curvatura provocada por los desplazamientos. La deformación en el plano medio ε^0 , dependerá del tipo de laminado, si este es simétrico o no. Si se desarrolla la expresión anterior, esta se puede expresar como:

$$N = [A] \cdot \varepsilon^0 + [B] \cdot k$$

Siendo la matriz $[A]$, la matriz de rigidez en el laminado por el vector deformación en el plano medio ε^0 . Y la matriz $[B]$, como la matriz de acoplamiento flexión-extensión por el vector k de curvatura.

Si del mismo analizamos el estado tensional de la lámina sometida a unos momentos definidos mediante el vector $M = [M_x, M_y, M_{xy}]$, tal y como se muestra en la *Figura 46*, y se aplica el equilibrio entre estos momentos y las tensiones producidas en el laminado, se puede obtener la expresión de momentos.

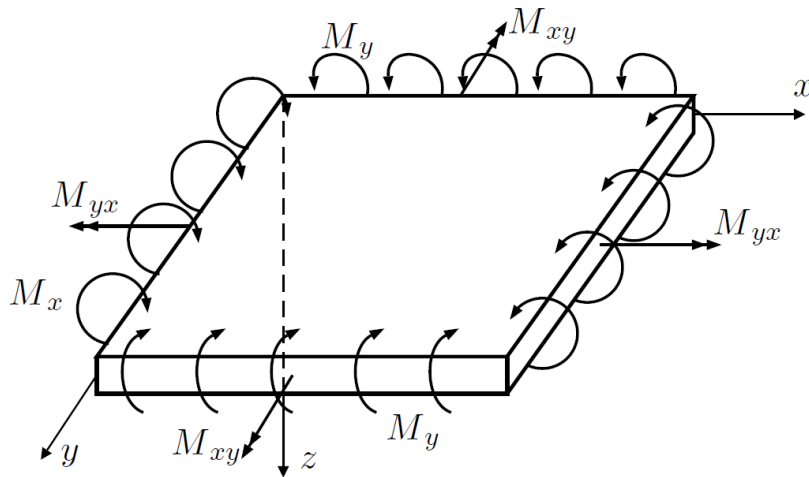


Figura 46: Definición de momentos en un estado tensional de un laminado

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma z dz = \int_{-h/2}^{h/2} Q \cdot \varepsilon z dz = \int_{-h/2}^{h/2} Q \cdot \varepsilon^0 z dz + \int_{-h/2}^{h/2} Q \cdot k z^2 dz$$

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

Al igual que con la expresión resultante de esfuerzos obtenida en el análisis anterior, se puede definir que:

$$M = [B] \cdot \varepsilon^0 + [D] \cdot k$$

Para este análisis de equilibrio de esfuerzos y momentos en un lamina de material compuesto, el orden de las láminas no tiene influencia alguna. Ahora bien, si el laminado está formado por un determinado número n de grupos de láminas, donde cada grupo de láminas tiene una orientación de fibras determinada con un ángulo θ , las matrices de que forman las ecuaciones de momentos y esfuerzos, A, B y D pueden discretizarse como:

$$A = \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i [h_i - h_{i-1}]$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i [h_i^2 - h_{i-1}^2]$$

$$D = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i [h_i^3 - h_{i-1}^3]$$

Donde la matriz \bar{Q}_i , representa la matriz de rigidez en las direcciones x-y, de una lámina de material compuesto cuyas fibras tienen una orientación en un determinado ángulo θ .

$$\bar{Q}_i = [T_\varepsilon]^{-1} \cdot Q \cdot [T_\sigma]^{-1}$$

Si agrupamos de manera matricial las matrices A, B y D respecto de los vectores de esfuerzos y momentos $[N, M]$ y de las deformaciones y curvaturas $[\varepsilon, k]$, quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix}$$

Si se consideran la matriz de momentos igual a 0, que es una situación habitual en aplicaciones en ingeniería se podrá establecer la relación entre tensiones y deformaciones, para un laminado de material compuesto.

$$[\varepsilon] = [a] \cdot [N] \Rightarrow [N] = h \cdot [\sigma] \Rightarrow [\varepsilon] = [a] \cdot [\sigma] \cdot h$$

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

Por tanto, se podrá definir las características mecánicas del laminado de material compuesto a partir de las relaciones del análisis micromecánico, que se desarrolló anteriormente.

$$[a] \cdot h = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & 0 \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{bmatrix}$$

4.2.3. Cálculo del ángulo mágico

Una vez conocidas las características ortotrópicas de los materiales compuestos y sobre todo cuando están dispuestos en laminados de fibras unidireccionales, se hace indispensable conocer cuál es el ángulo óptimo en el que se deberá construir un depósito cilíndrico a alta presión.

Si se analiza el estado tensional del depósito cilíndrico compuesto por un laminado de fibra unidireccional, orientada un determinado ángulo θ , tal y como se muestra en la *Figura 47*.

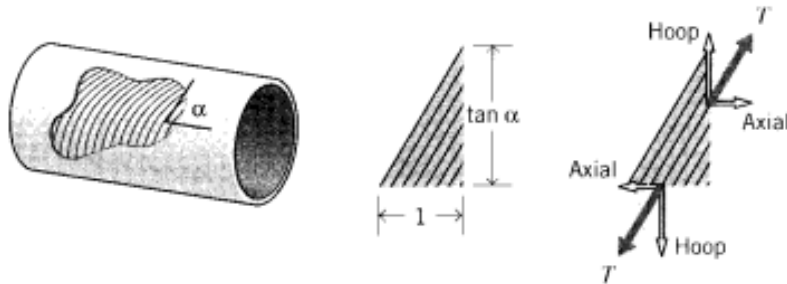


Figura 47: Estado tensional de un laminado orientado un determinado ángulo α

Planteando las ecuaciones de equilibrio, igualando las tensiones axial y circunferencial a los esfuerzos ejercidos por la presión interna, y teniendo en cuenta que la tensión (T) soportada por el laminado en la dirección del ángulo α del laminado, se puede establecer las relaciones siguientes:

$$\sigma_x = n \cdot T \cdot \sen \theta = \frac{P \cdot D}{2 \cdot e} \cdot (1 \cdot e)$$

$$\sigma_\theta = n \cdot T \cdot \cos \theta = \frac{P \cdot D}{4 \cdot e} \cdot (\tan \alpha \cdot e)$$

Si se divide la primera expresión de la tensión axial, entre la segunda expresión de la tensión circunferencial, se puede obtener el ángulo óptimo para soportar ambas tensiones:

$$\tan^2\theta = 2 \rightarrow \theta = 54.57^\circ$$

Este ángulo es el óptimo para un recipiente a presión, donde las fibras están orientadas en ese ángulo para hacer el recipiente igual de resistente en ambas direcciones y poder soportar el doble de tensión circunferencial que tensión axial. Este ángulo es utilizado en el trenzado de las mangueras antincendios para evitar que la boquilla salga despedida hacia delante o hacia atrás, una vez se abre la válvula.

4.2.4. Optimización y cálculo del laminado mediante el software eLamX²©

En este apartado se realizará un análisis avanzado de materiales compuestos, con el fin de optimizar el laminado y conseguir un número de capas inferior al que se obtendría con un análisis tradicional para un material isotrópico. Para llevar a cabo esta optimización se utilizará el programa informático eLamX²©, desarrollado por la Universidad Técnica de Dresde, para el estudio de materiales compuestos en el ámbito de la Ingeniería Aeroespacial.

Para comenzar con el estudio del laminado, se realizará un análisis micromecánico mediante el modelo de Chamis, tal y como ya se explicó en el apartado 4.1.1. Para ello se proporciona las características de los materiales que componen el compuesto, en este caso se trata de una fibra de carbono de alto modulo con un 70% de fibra. Las características mecánicas, tanto de la matriz epoxi, como el refuerzo en fibra de carbono, se muestran en las *Tablas 12 y 13*, respectivamente.

MATRIZ EPOXI

ρ	1.18 g/cm ³
E	3 500 MPa
G	1 296 MPa
S_t	55 MPa
S_c	103 MPa
ν	0.35

Tabla 12: Propiedades y características mecánicas del Epoxi

FIBRA DE CARBONO HM

ρ	1.70 g/cm ³
E_{11}	379 212 MPa
E_{22}	62 053 MPa
G_{12}	75 842 MPa
G_{23}	48 263 MPa
X_t	2 500 MPa
X_c	1 500 MPa
ν_{12}	0.20
ν_{23}	0.25

Tabla 13: Propiedades y características mecánicas Fibra de Carbono High Module

Usando las ecuaciones del análisis micromecánico mediante el modelo de Chamis, del apartado 4.1.1, se puede calcular tanto las constantes elásticas, como las constantes resistentes del material compuesto de carbono-epoxi en un 70% en fibra de carbono. Las características mecánicas del material compuesto se recogen en la *Tabla 14*.

MATERIAL COMPUESTO FIBRA DE CARBONO 70%

ρ	1.55 g/cm ³
E_1	266 498 MPa
E_2	16 625 MPa
G_{12}	7 297 MPa
G_{23}	6 976 MPa
X_t	1 750 MPa
Y_t	48 MPa
X_c	1 050 MPa
Y_c	90 MPa
S	48 MPa
ν_{12}	0.25
ν_{23}	0.19

Tabla 14: Propiedades y características mecánicas material compuesto

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

Introduciendo en el programa tanto las propiedades y características de la matriz y del refuerzo, en este caso la fibra, el programa es capaz de calcular automáticamente estos parámetros, eligiendo el método de cálculo de Chamis, tal y como se muestra en la *Figura 48*. El material compuesto se forma automáticamente y queda registrado en la base de datos del programa, en este caso una fibra de carbono de alto modulo con un 70%.

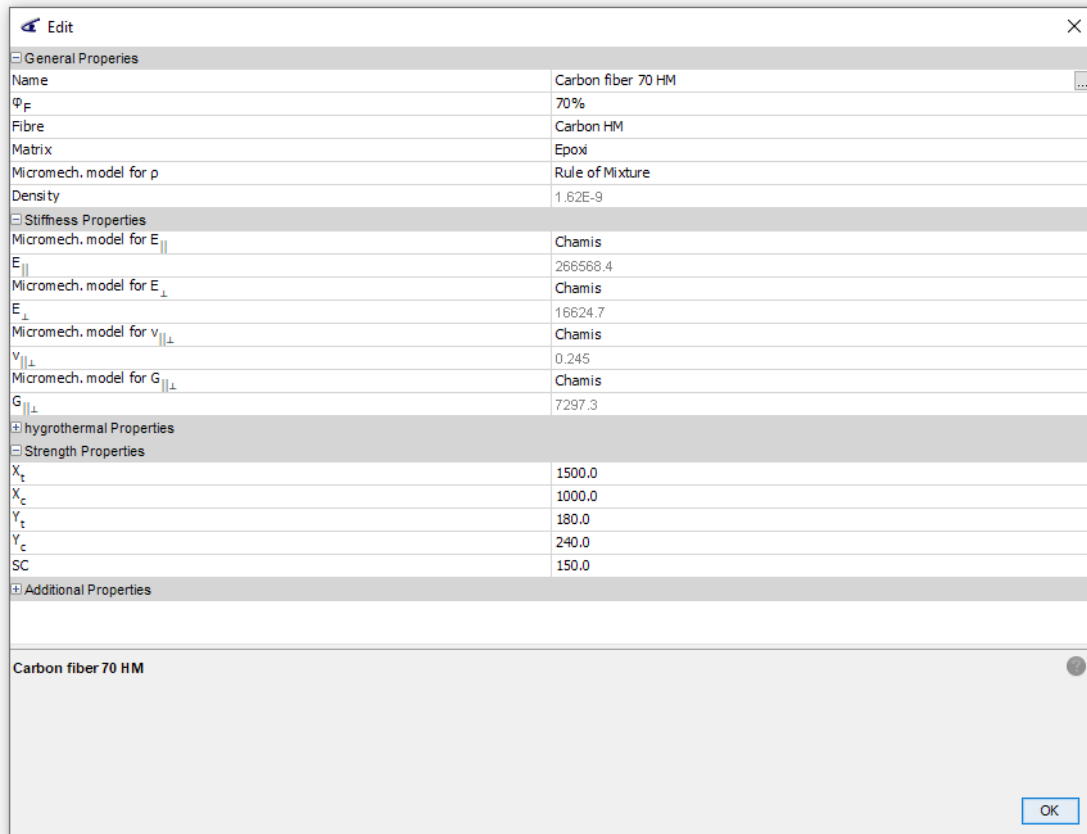


Figura 48: Cálculo material compuesto mediante el software eLamX.

Una vez calculadas las características mecánicas del compuesto, mediante el análisis micromecánico en el programa, es posible jugar con diferentes laminados cambiando el espesor de capa, el ángulo, criterio de fallo, etc. Esto cambiará drásticamente el comportamiento mecánico del material y la resistencia de este a los esfuerzos.

4.2.4.1. Laminado Isotrópico

Para comenzar la optimización del laminado partiremos de un laminado isotrópico, es decir un laminado con las mismas características mecánicas en todas sus direcciones, para ello se ha probado un laminado [0, 45, -45, 90]_s simétrico, muy común en el ámbito de la ingeniería de materiales compuestos, y se ha sometido al estado tensional del depósito que se calculó en el apartado 3.6 Estudio y definición de los estados tensionales. En la *Figura 49*, muestra la gráfica polar del laminado, en esta aparece la evolución de elementos de la submatriz A, en función del ángulo, y que están relacionados con las características mecánicas del material compuesto.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

El elemento A_{11} , está relacionado con modulo en la dirección longitudinal del material compuesto, representado en color rojo, el elemento A_{22} está ligado al módulo en la dirección transversal en amarillo, el A_{66} al de cortadura representado en verde en la gráfica y el A_{12} al coeficiente de Poisson, en azul.

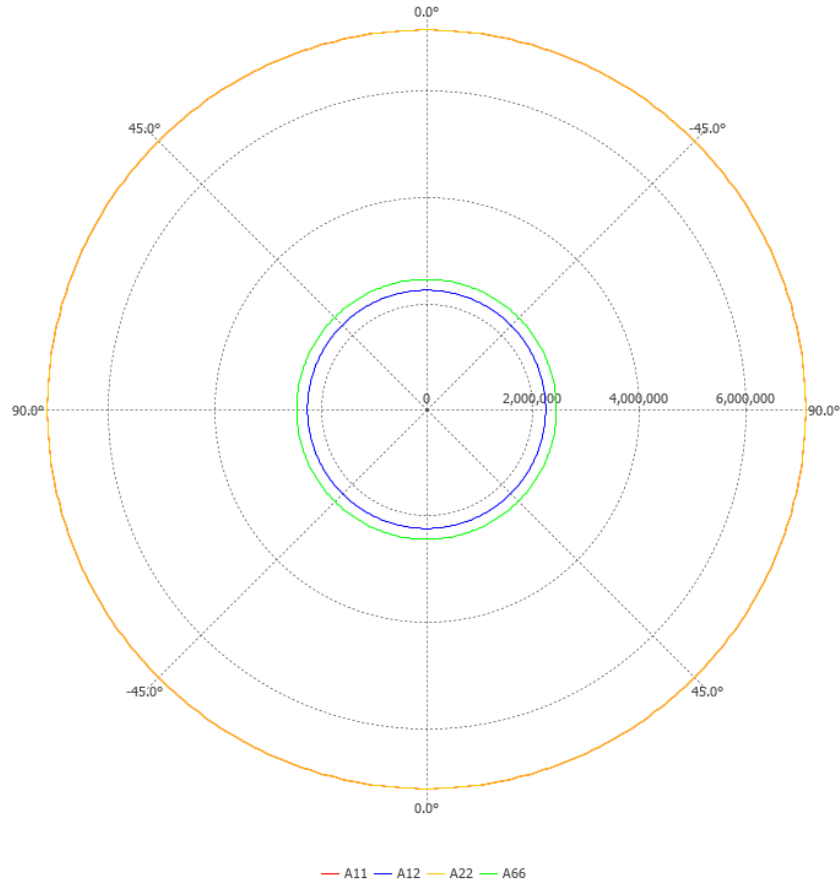


Figura 49: Polar chart laminado [0,45,-45,90]s

Como se puede ver los elementos de la matriz A están representados en forma de circunferencia lo que indica que estamos ante un material isotrópico donde los elementos tienen el mismo valor a lo largo de todas las direcciones del laminado.

Para conformar el laminado se ha dispuesto de 64 capas, con un grosor de capa de 1 mm por lo que el grosor total del laminado es de 64 mm. Si bien el grosor de la pared del depósito, supera el límite marcado para ser analizado como un depósito de pared delgada, es el mínimo grosor en el que el laminado es capaz de soportar el estado tensional.

En la *Figura 50* se puede observar la matriz ABD, que ya se vio como obtenerla en el análisis de materiales compuestos y que relaciona las tensiones y deformaciones de un material compuesto, representada con los colores rojo, verde y azul en la figura. También se puede observar como las fibras orientadas en la dirección de 90°, son las más sometidas debida a la distribución de tensiones, y en estas solo se alcanza un factor de seguridad en torno a 1.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

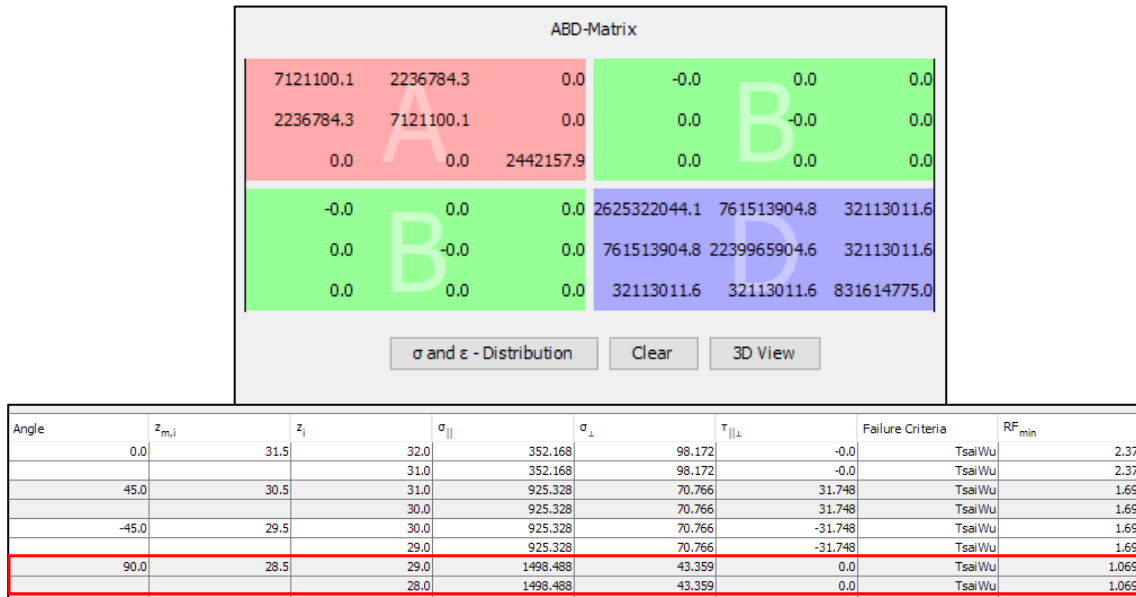


Figura 50: Matriz de esfuerzos-deformaciones, y tensiones alcanzadas en las direcciones del laminado

El laminado isotrópico $[0, 45, -45, 90]_s$ quedará por tanto descartado, ya que el espesor de pared logrado es demasiado grueso, además de que en el laminado hay direcciones donde las fibras están sobredimensionadas, y que no soportan las mismas tensiones que en otras direcciones donde las fibras solo son capaces de lograr un factor de seguridad muy pequeño.

4.2.4.2. Laminado con ángulo mágico

El siguiente laminado a analizar será el laminado con las fibras orientadas un ángulo determinado, y sometido al estado tensional del depósito. Este ángulo será el ángulo óptimo de laminado o ángulo mágico, que ya se calculó en el apartado 4.1.3, y que es igual de resistente tanto en la dirección longitudinal como en la dirección circunferencial en un cilindro.

Para componer el laminado, se han dispuesto las láminas orientadas en una configuración $[55, -55]_s$, con un total de 200 láminas de 0.2 mm cada una, lo que supone un grosor de laminado de 40 mm. El factor de seguridad que se alcanza con este laminado es de 1.089, por lo que con este laminado no se puede reducir más el grosor de capa por que provocaría el fallo mecánico en el depósito.

Como se puede observar en la *Figura 51* la tensión que soporta cada una de las láminas es mucho mayor que en el caso del laminado isotrópico, por lo que cada capa esta igual de solicitada y por tanto no hay ninguna dirección en la que el laminado este sobredimensionado. Es por tanto que el laminado esta optimizado para las direcciones longitudinal y circunferencial del depósito. También se puede observar como la matriz de esfuerzos ABD, es más pequeña, debido a que las tensiones están mejor repartidas, a través de las capas que forman el laminado.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

No.	Angle	$\sigma_{ }$	σ_{\perp}	$\tau_{ \perp}$	RF_{min}
1	55.0	1500.646	93.104	26.521	1.089
		1500.646	93.104	26.521	1.089
2	-55.0	1500.646	93.104	-26.521	1.089
		1500.646	93.104	-26.521	1.089
3	55.0	1500.646	93.104	26.521	1.089
		1500.646	93.104	26.521	1.089
4	-55.0	1500.646	93.104	-26.521	1.089
		1500.646	93.104	-26.521	1.089
5	55.0	1500.646	93.104	26.521	1.089
		1500.646	93.104	26.521	1.089
6	-55.0	1500.646	93.104	-26.521	1.089
		1500.646	93.104	-26.521	1.089
7	55.0	1500.646	93.104	26.521	1.089
		1500.646	93.104	26.521	1.089
8	-55.0	1500.646	93.104	-26.521	1.089
		1500.646	93.104	-26.521	1.089
9	55.0	1500.646	93.104	26.521	1.089
		1500.646	93.104	26.521	1.089
10	-55.0	1500.646	93.104	-26.521	1.089
		1500.646	93.104	-26.521	1.089

Figura 51: Tensiones soportadas por las 10 primeras capas del laminado

En la gráfica polar del laminado, *Figura 52*, se puede observar cómo los elementos de la matriz A, relacionados con las características mecánicas del laminado, varían

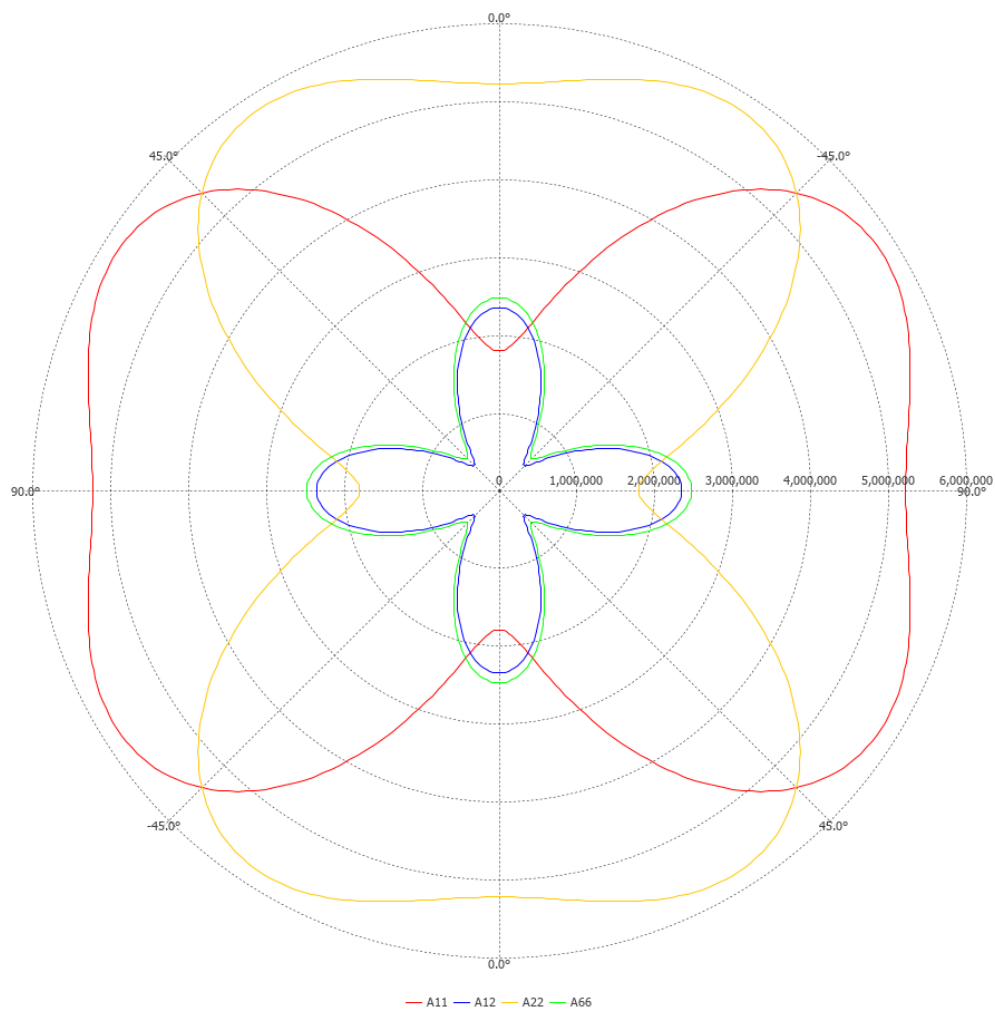


Figura 52: Grafico polar del laminado [55,-55]_s

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

acentuadamente en función del ángulo, por lo tanto, estamos claramente ante un laminado anisotrópico.

Sin embargo, el programa eLamX²®, tiene la opción de realizar un estudio completo del laminado pudiendo optimizar el ángulo de las capas del laminado para conseguir un espesor menor.

4.2.4.3. Laminado optimizado mediante software

Mediante la función de optimizado de laminado que ofrece el programa, se puede realizar un estudio del laminado donde es capaz de optimizar cada una de las capas que conforman el laminado el material compuesto.

Para realizar la optimización se deberá escoger el paso de los ángulos que el programa establecerá para el laminado, en este caso se ha realizado un optimizado con un paso de 5° grados en los ángulos de las capas tal y como se muestra en la *Figura 53*. El laminado será simétrico, y el criterio de fallo escogido será el de Tsai-Wu, el grosor de capa será de 0.2.

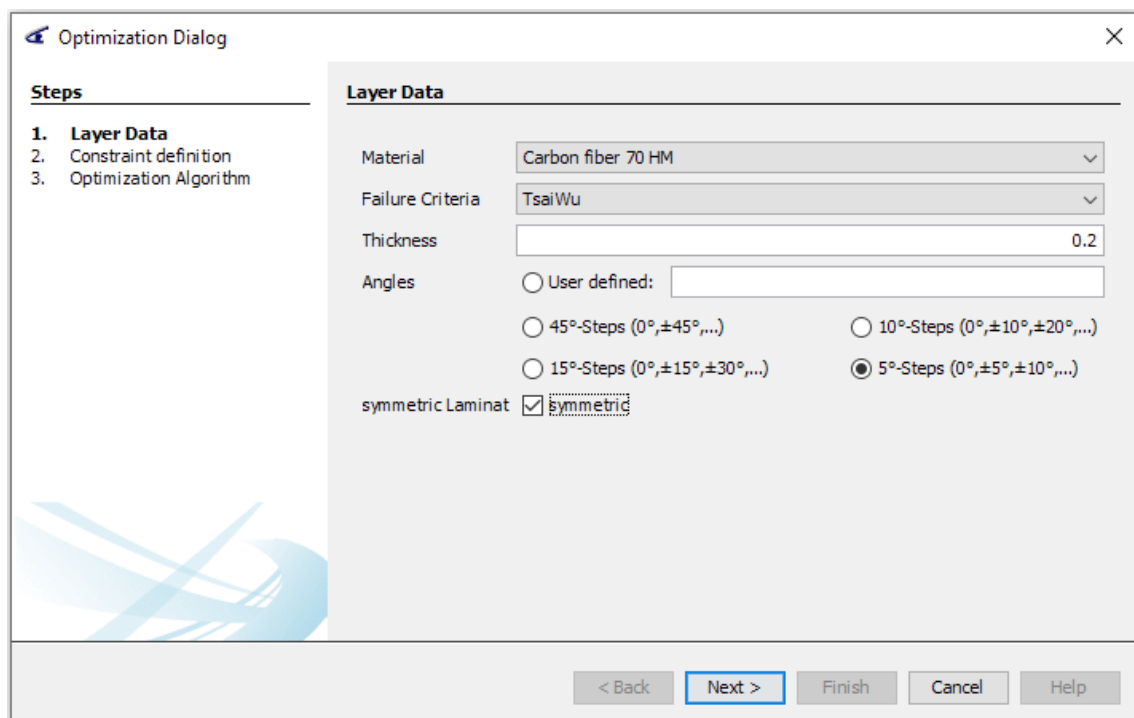


Figura 53: Modulo de optimización del programa eLamX

Una vez establecidos los parámetros de cálculo del laminado, se definirán los esfuerzos y el estado tensional máximo al que estará sometido. El programa analiza una cantidad de hipótesis y establece un laminado optimizo para ese estado tensional en concreto, con capas a diferentes ángulos.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

El resultado de la optimización es un laminado de 180 capas, lo que equivale a un grosor de 36 mm, y un factor de seguridad de 1.007. La configuración del laminado calculado es [85,55,-75,-80,-45,0,85,90,-50,-80,-20,-10,90,45,60,85,45,-85], y esta secuencia se repetirá otras 5 veces para completar el laminado.

La optimización llevada a cabo por el software eLamX²®, calcula el ángulo de cada capa para que este sea el adecuado, teniendo en cuenta el ángulo de la capa anterior y los esfuerzos mecánicos a los que se ve sometido *Figura 54*. Además, en la optimización se pretende que todas las láminas con ángulos diferentes soporten una tensión parecida tanto en la dirección longitudinal como en la dirección transversal.

Angle	$\sigma_{ }$	σ_{\perp}	$\tau_{ \perp}$	RF _{min}
85.0	1644.964	125.815	-0.008	1.007
	1644.964	125.815	-0.008	1.007
55.0	1645.147	125.806	-0.009	1.007
	1645.147	125.806	-0.009	1.007
-75.0	1644.894	125.818	-0.002	1.007
	1644.894	125.818	-0.002	1.007
-80.0	1644.904	125.818	-0.004	1.007
	1644.904	125.818	-0.004	1.007
-45.0	1644.946	125.816	0.007	1.007
	1644.946	125.816	0.007	1.007
0.0	1645.207	125.803	0.007	1.007
	1645.207	125.803	0.007	1.007
85.0	1644.964	125.815	-0.008	1.007
	1644.964	125.815	-0.008	1.007
90.0	1644.939	125.816	-0.007	1.007
	1644.939	125.816	-0.007	1.007
-50.0	1644.925	125.817	0.006	1.007
	1644.925	125.817	0.006	1.007
-80.0	1644.904	125.818	-0.004	1.007
	1644.904	125.818	-0.004	1.007
-20.0	1645.094	125.809	0.01	1.007
	1645.094	125.809	0.01	1.007
-10.0	1645.156	125.806	0.009	1.007
	1645.156	125.806	0.009	1.007
90.0	1644.939	125.816	-0.007	1.007
	1644.939	125.816	-0.007	1.007
45.0	1645.201	125.803	-0.007	1.007
	1645.201	125.803	-0.007	1.007
60.0	1645.117	125.807	-0.01	1.007
	1645.117	125.807	-0.01	1.007
85.0	1644.964	125.815	-0.008	1.007
	1644.964	125.815	-0.008	1.007
45.0	1645.201	125.803	-0.007	1.007
	1645.201	125.803	-0.007	1.007
-85.0	1644.919	125.817	-0.006	1.007

Figura 54: Tensiones en el laminado optimizado.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

En la *Figura 55* se puede observar la gráfica polar del laminado, donde se ve claramente que es un laminado anisotrópico, y que los valores de los elementos de la submatriz A, adquieren una forma simétrica, tanto en el módulo longitudinal, transversal, cortadura y Poisson.

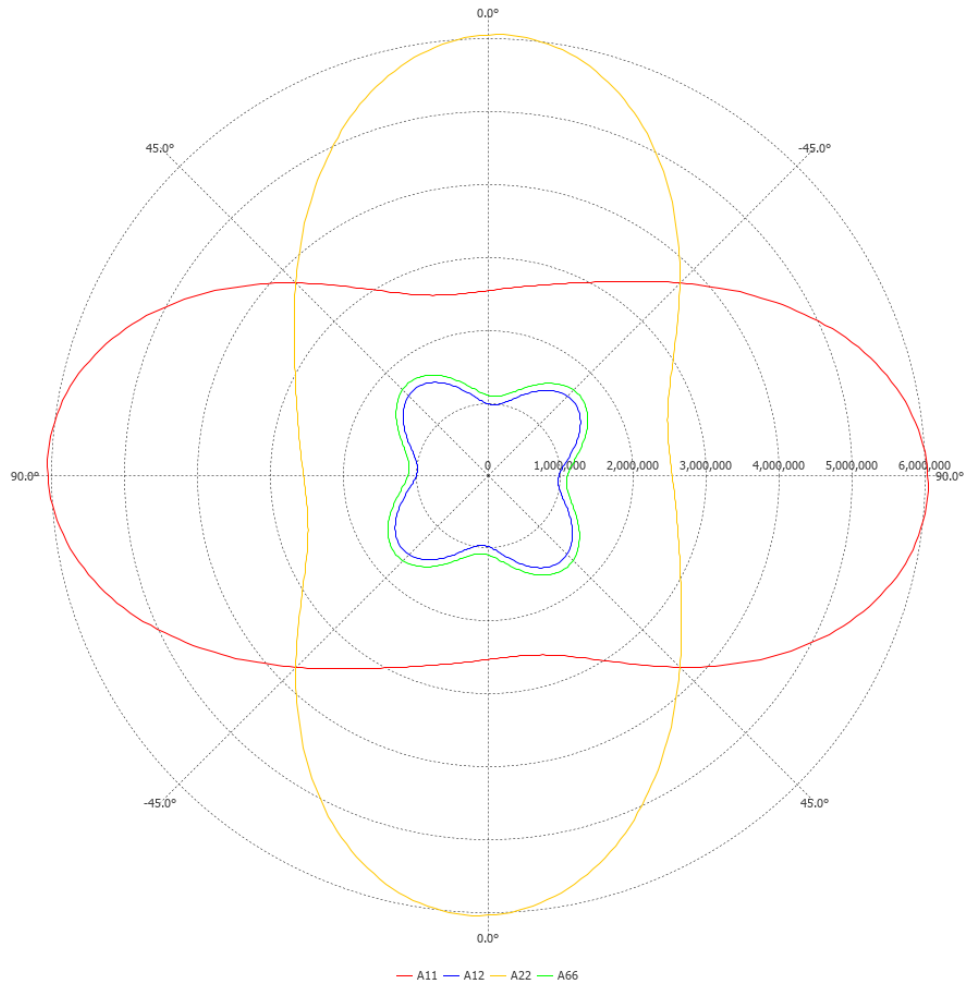


Figura 55: Gráfica polar del laminado optimizado.

También pueden calcularse las características mecánicas del laminado, utilizando las fórmulas del apartado 4.1.2 del análisis de materiales compuestos y calcular la matriz de rigidez y deformación. En este caso el programa las calcula automáticamente y en la *Figura 56* podemos observar la matriz ABD, y su inversa, representada cada submatriz en un color diferente. Las constantes ingenieriles del laminado quedan recogidas en la *Tabla 15*.

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

2530084.4	978906.9	-81976.0	0.0	0.0	-0.0
978906.9	6039721.9	81815.1	0.0	0.0	0.0
-81976.0	81815.1	1094429.5	-0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	-0.0	269848226.7	104284917.4	-13646270.9
0.0	0.0	0.0	104284917.4	658564894.5	634574.4
-0.0	0.0	0.0	-13646270.9	634574.4	11676136...

(a)

4.2317E-7	-6.9086E-8	3.6861E-8	-6.9878E-23	8.4562E-24	-8.3852E-24
-6.9086E-8	1.7702E-7	-1.8408E-8	8.4395E-24	-2.4469E-23	1.5832E-24
3.6861E-8	-1.8408E-8	9.1786E-7	-8.5741E-24	1.1443E-24	-1.7791E-22
-6.9878E-23	8.4395E-24	-8.5741E-24	3.9727E-9	-6.2954E-10	4.6773E-10
8.4562E-24	-2.4469E-23	1.1443E-24	-6.2954E-10	1.6182E-9	-8.2371E-11
-8.3852E-24	1.5832E-24	-1.7791E-22	4.6773E-10	-8.2371E-11	8.6196E-9

(b)

Figura 56: Matriz ABD representado con la letra (a) y su inversa representada con la letra (b)

LAMINADO OPTIMIZADO

E_x	64 742 MPa
E_y	158 941 MPa
G_{xy}	29 839 MPa
ν_{12}	0.16
ν_{23}	0.40

Tabla 15: Constantes ingenieriles del laminado optimizado mediante el software eLamX

IV. SELECCIÓN DE MATERIALES

5.

SIMULACIÓN MEDIANTE FEA

V. FABRICACIÓN

5.1. ANÁLISIS ESTÁTICO MATERIALES COMPUESTOS

En este apartado se realizará el análisis de la simulación por elementos finitos del depósito en materiales compuestos, para ello se utilizará la herramienta de simulación que ofrece el programa SolidWorks. En ella se definirá un nuevo estudio y se realizará un análisis estático del recipiente.

Primero se pasará a definir las características del material compuesto que se han calculado en el apartado anterior, para llevar a cabo la simulación. En la pestaña de edición de material se introducirá los valores y las características del laminado que se calcularon mediante el Modelo de Chamis. *Figura 57.*

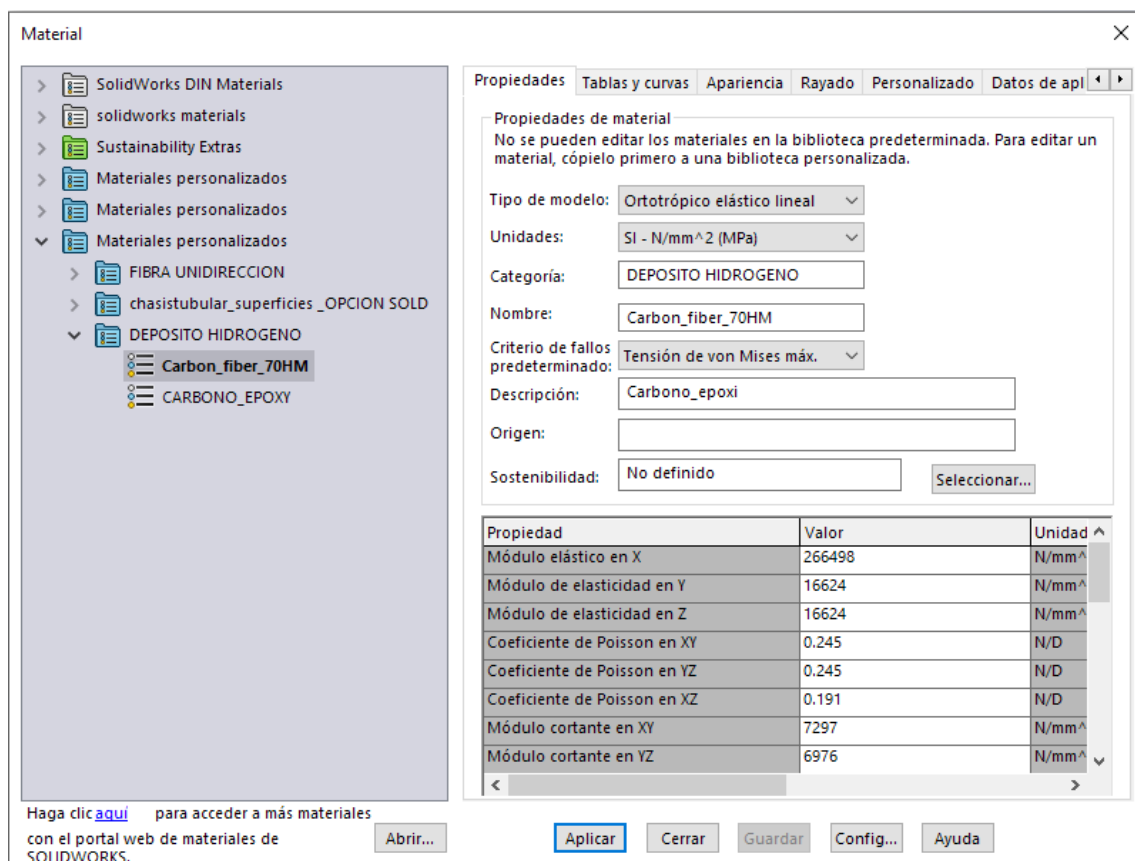


Figura 57: Definición características material compuesto en Solid Works

Una vez definidas las características del material compuesto, se pasará a definir el laminado que tendrá el depósito en la herramienta de simulación del programa. Para ello el programa ofrece una ventana de configuración del laminado denominada, "Definición de elementos Shell". En esta ventana se introducirá el espesor del laminado, y la orientación de las capas que se calculó mediante el programa de optimización de material compuestos eLamX²®, y que tiene la secuencia [85,55,-75,-80,-45,0,85,90,-50,-80,-20,-10,90,45,60,85,45,-85]_s.

V. FABRICACIÓN

En este caso el programa no deja poner más 50 capas, por lo que se optará por poner 36 capas de 1 mm de espesor, y con la secuencia de laminado anterior dispuesta de manera simétrica. Si bien, este no es el espesor de las capas del laminado que se calculó, donde el espesor era de 0.3 mm, la simulación no será del todo exacta ya que el programa tiene limitado el número de capas. En la *Figura 58* se puede observar la pestaña de definición del laminado en el programa.

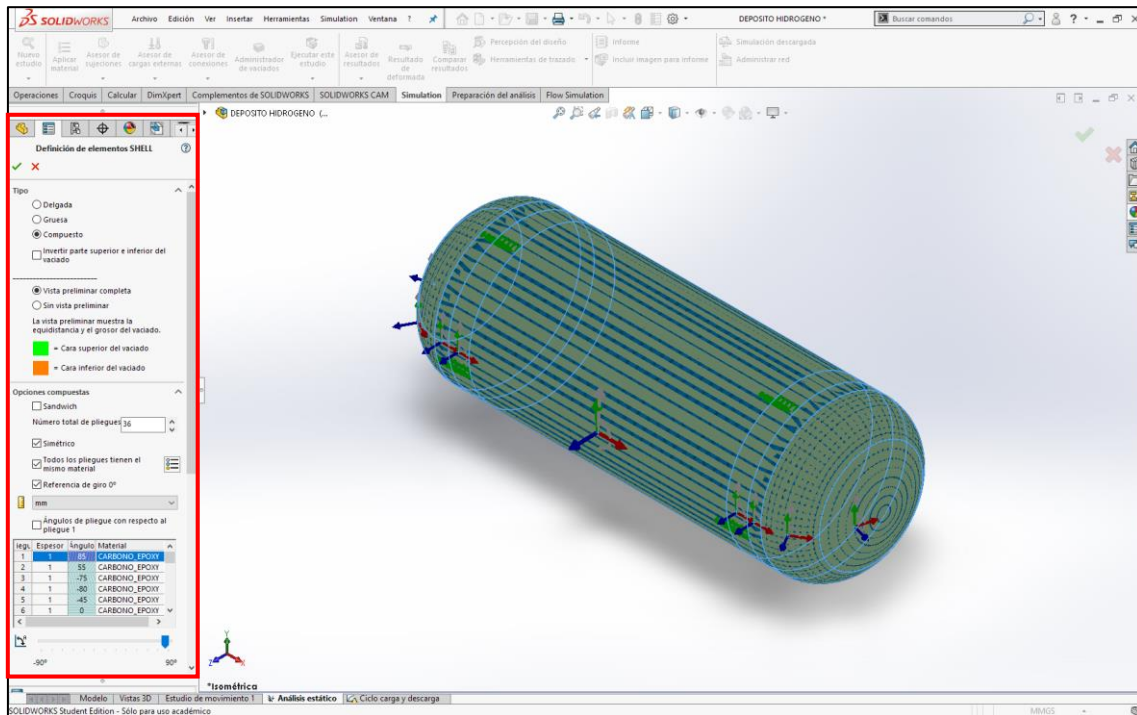


Figura 58: Pestaña definición de laminado en SolidWorks

También se tendrá en cuenta que, el laminado se construya desde la superficie del depósito hacia el exterior, y no hacia el interior para evitar que el volumen interior del depósito se vea alterado en la simulación, se define como valor de equidistancia y representa el valor a partir del cual crece el laminado hasta la superficie de referencia, puede observarse en la *Figura 59*.

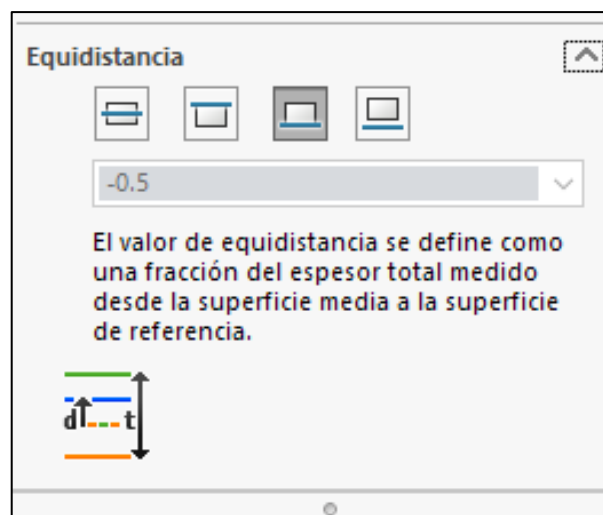


Figura 59: Definición de la superficie de referencia para el laminado

V. FABRICACIÓN

Una vez definido el material, se establecerán las sujeciones que tendrá el depósito, en este caso serán las zonas delimitadas por las líneas de partición, y que será por donde irá sujetado el depósito a los anclajes y estos al bastidor del vehículo. En la teoría estas zonas representadas mediante flechas verdes en la *Figura 60*, tendrán desplazamientos y deformaciones nulos, ya que se trata de una geometría fija.

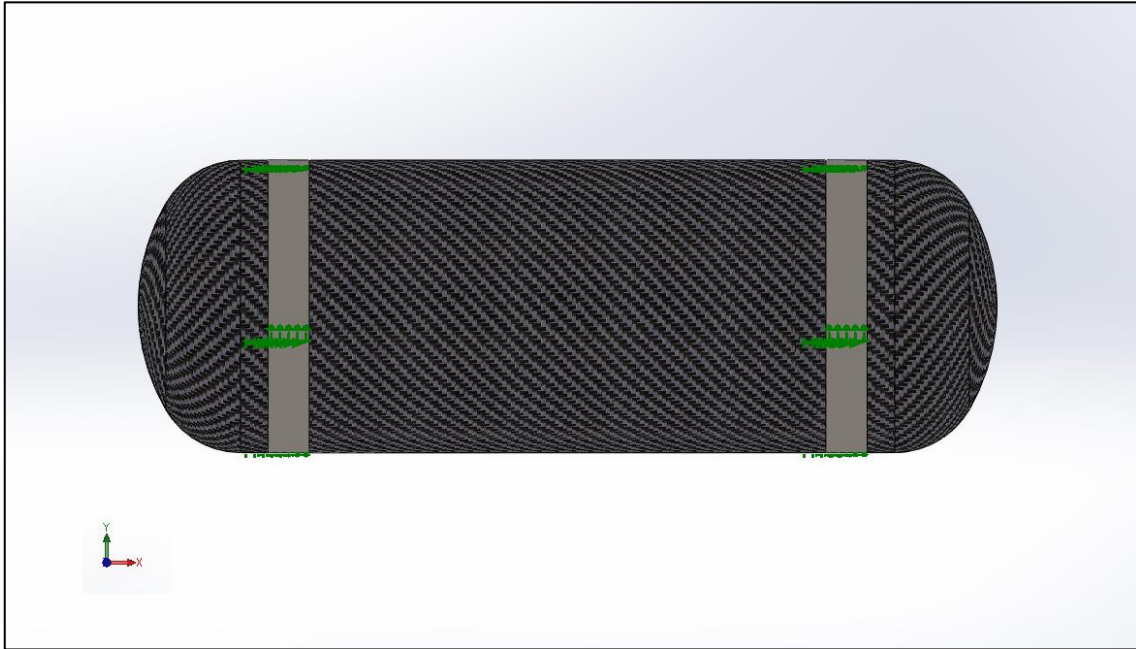


Figura 60: Representación de las sujeciones en el apartado de simulación de SolidWorks

El siguiente paso será definir el valor de carga al que estará sometido el depósito, en este caso será un valor de presión interna de 100 Mpa, que equivale a los 1000 bares a los que se almacenará el gas. Para ello se definirá sobre la superficie interna de la pieza, el valor presión, representado con flechas rojas en la *Figura 61*.

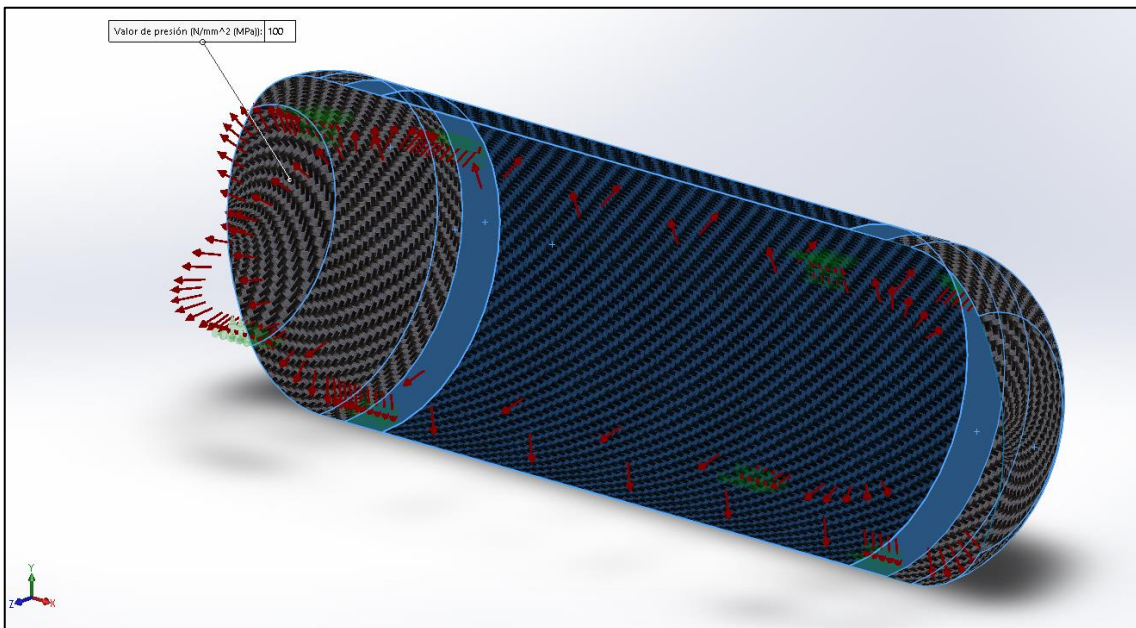


Figura 61: Representación presión interna en el depósito.

V. FABRICACIÓN

Definidas las condiciones de simulación del estudio, se creará la malla que servirá para lanzar la simulación del estudio, y el cálculo de los pequeños elementos que la componen. *Figura 62.*

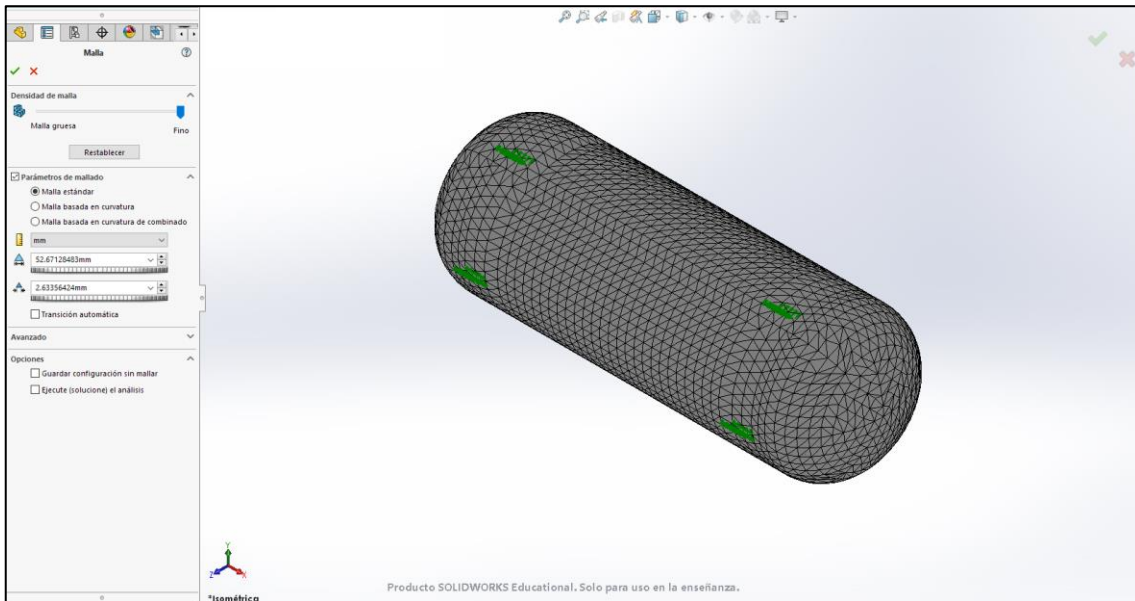


Figura 62: Mallado del depósito de almacenamiento de hidrógeno en SolidWorks

Creada la malla del depósito, ya se puede lanzar la simulación en el programa, que calculara los elementos que componen dicha malla, creando un mapa de colores con los resultados de las tensiones, deformaciones y desplazamientos calculados en los finitos puntos que componen el depósito. En las *Figuras 63 y 64*, pueden observarse los resultados obtenidos. Estos resultados son para la capa número 1, que es la más solicitada y por tanto será la más desfavorecida, ya que cada pliegue tendrá unos valores de tensión y deformación distintos.

En la *Figura 63*, se observan los valores de tensiones, y se observa claramente que estamos por debajo del límite elástico del laminado, y que la tensión máxima de 1200 MPa aproximadamente se da en la parte cilíndrica del depósito. El coeficiente de seguridad que se obtiene en la simulación es de 1.46.

Los valores de deformaciones se pueden observar en la *Figura 64*. Se obtiene un desplazamiento máximo de alrededor de 3 mm, aunque no existe ninguna restricción en cuanto a la deformación producida en este tipo de recipientes a presión, sí que se deberá de tener en cuenta y vigilar sobre en ciclos de carga y descarga, donde la fatiga del material puede suponer la rotura del depósito.

V. FABRICACIÓN

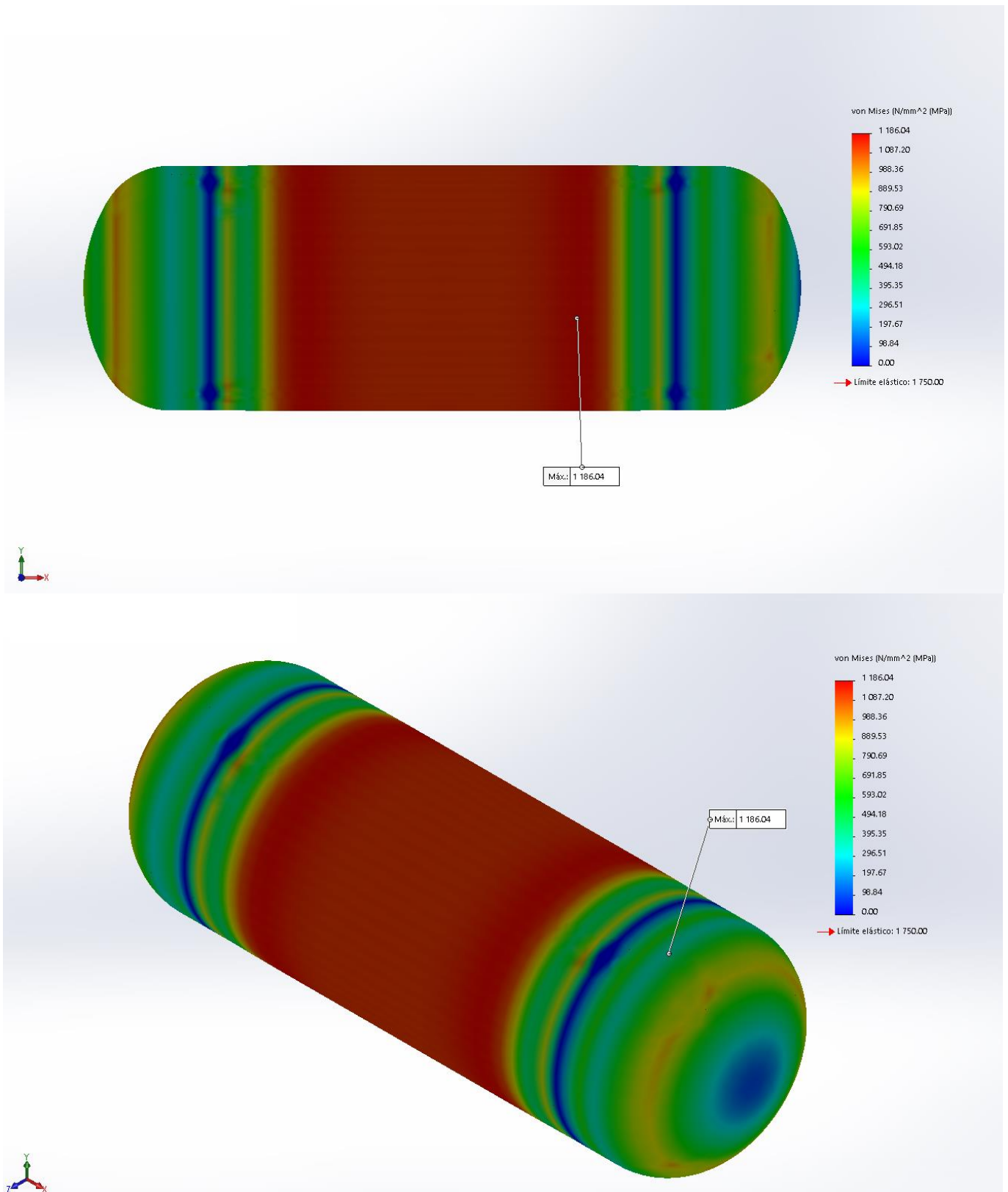


Figura 63: Tensiones obtenidas en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 100 MPa

V. FABRICACIÓN

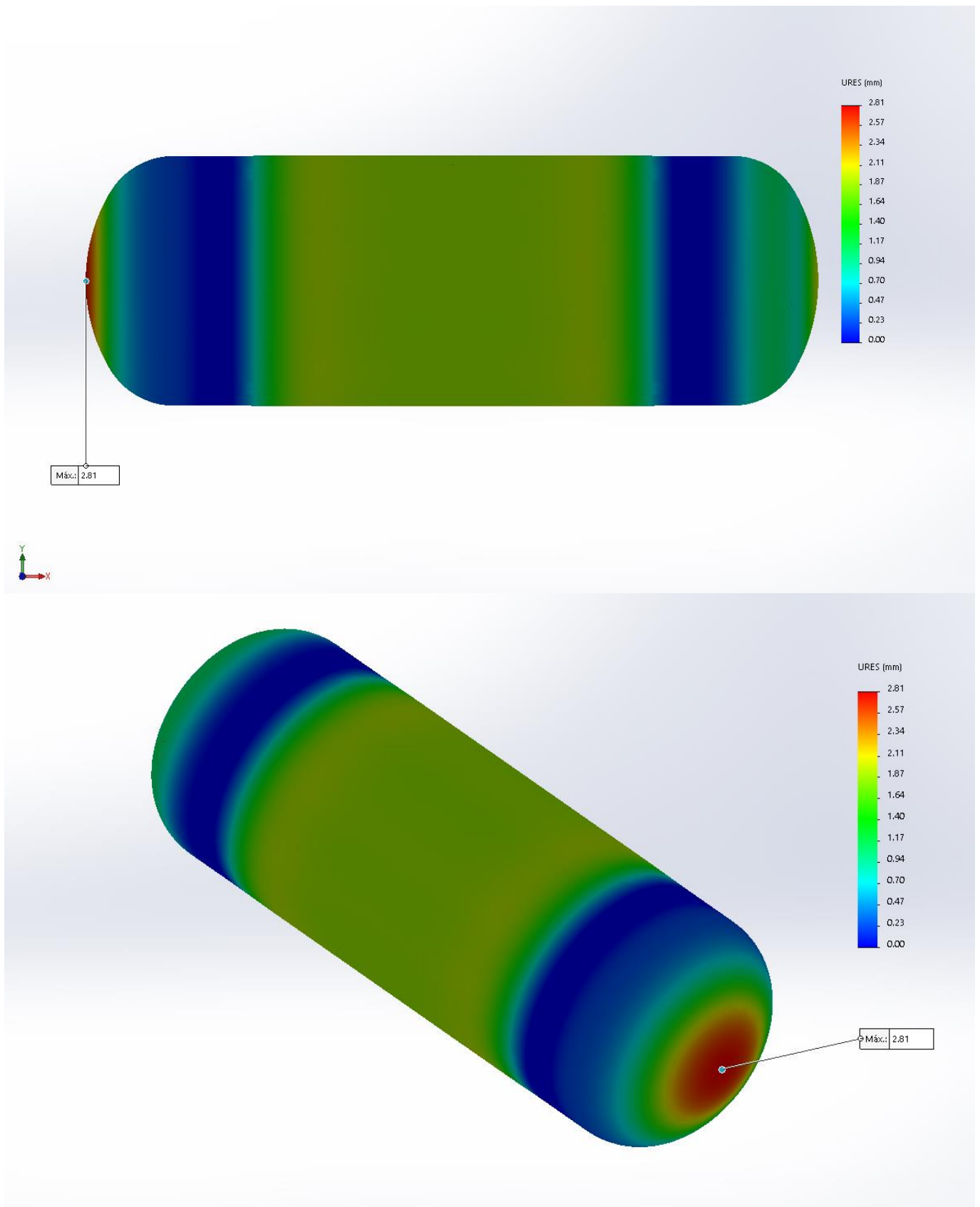


Figura 64: Desplazamientos obtenidos en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 100 MPa

V. FABRICACIÓN

En el reglamento de homologación para recipientes de hidrógeno a presión, se indica que el depósito se someterá a un ensayo de presión de ruptura, la cual deberá de ser superior o igual al 225% del valor de PNT. Aunque la PMTP tiene un valor de 1000 bares, y para la cual se ha diseñado el depósito, la presión máxima de ruptura deberá de ser de 1575 bares, ya que este porcentaje actúa sobre la PNT, que en este caso es de 700 bares. Por lo tanto, se han analizado las tensiones y desplazamientos para estos valores de presión interna, y comprobar que el depósito es capaz de soportar dichos esfuerzos.

En las *Figuras 65 y 66*, se pueden observar las tensiones y desplazamientos obtenidos para la presión de 700 bares, que equivale a 70 MPa, y se puede comprobar que la tensión máxima está muy por debajo de los 1750 Mpa que marca el límite elástico del laminado, por lo tanto, tiene un coeficiente de seguridad de alrededor de $n=2.33$

En los desplazamientos ocurre algo muy similar y el desplazamiento máximo alcanzado en la cabeza del depósito llega hasta los 1.77 mm, más de 1 mm de diferencia con el caso anterior de 100 MPa, estando por debajo del desplazamiento permitido en el depósito de 2572 mm de longitud total.

Las *Figura 67*, muestra n los resultados obtenidos para la presión de ruptura de 157.5 MPa. Se puede comprobar que las tensiones máximas alcanzadas alcanzan los 1690 MPa, muy cerca del límite elástico, con apenas un coeficiente de seguridad de $n=1.036$, ya muy cerca de la rotura.

En los desplazamientos *Figura 68*, también se observa un crecimiento significativo pasando a los 4 mm aproximadamente lo que puede llegar a suponer ya un problema a tener en cuenta. Sin embargo, el depósito es capaz de cumplir con la normativa aplicable y la presión de ruptura estará por encima del valor de 225% de la PNT.

V. FABRICACIÓN

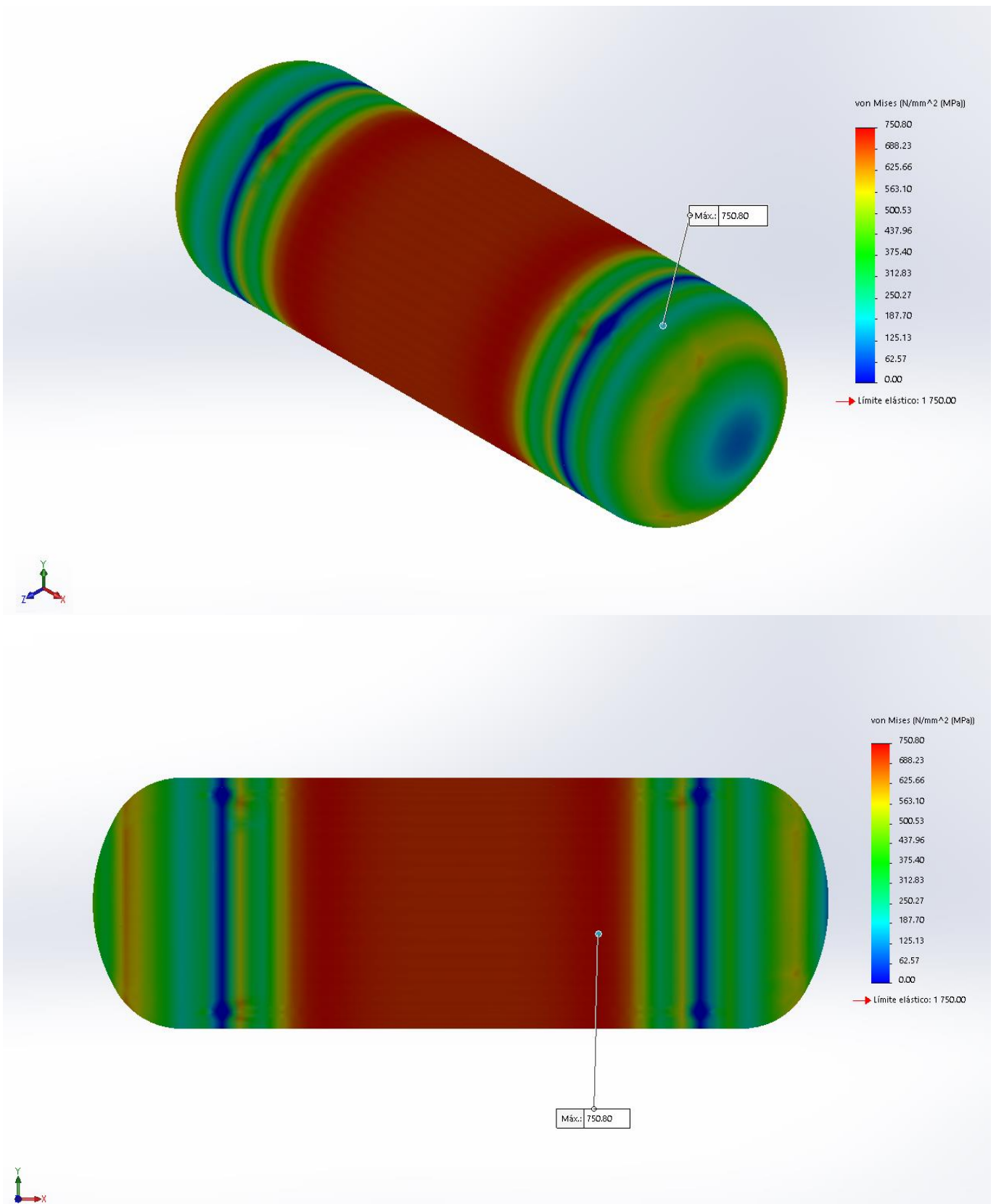


Figura 65: Tensiones obtenidas en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 70 MPa

V. FABRICACIÓN

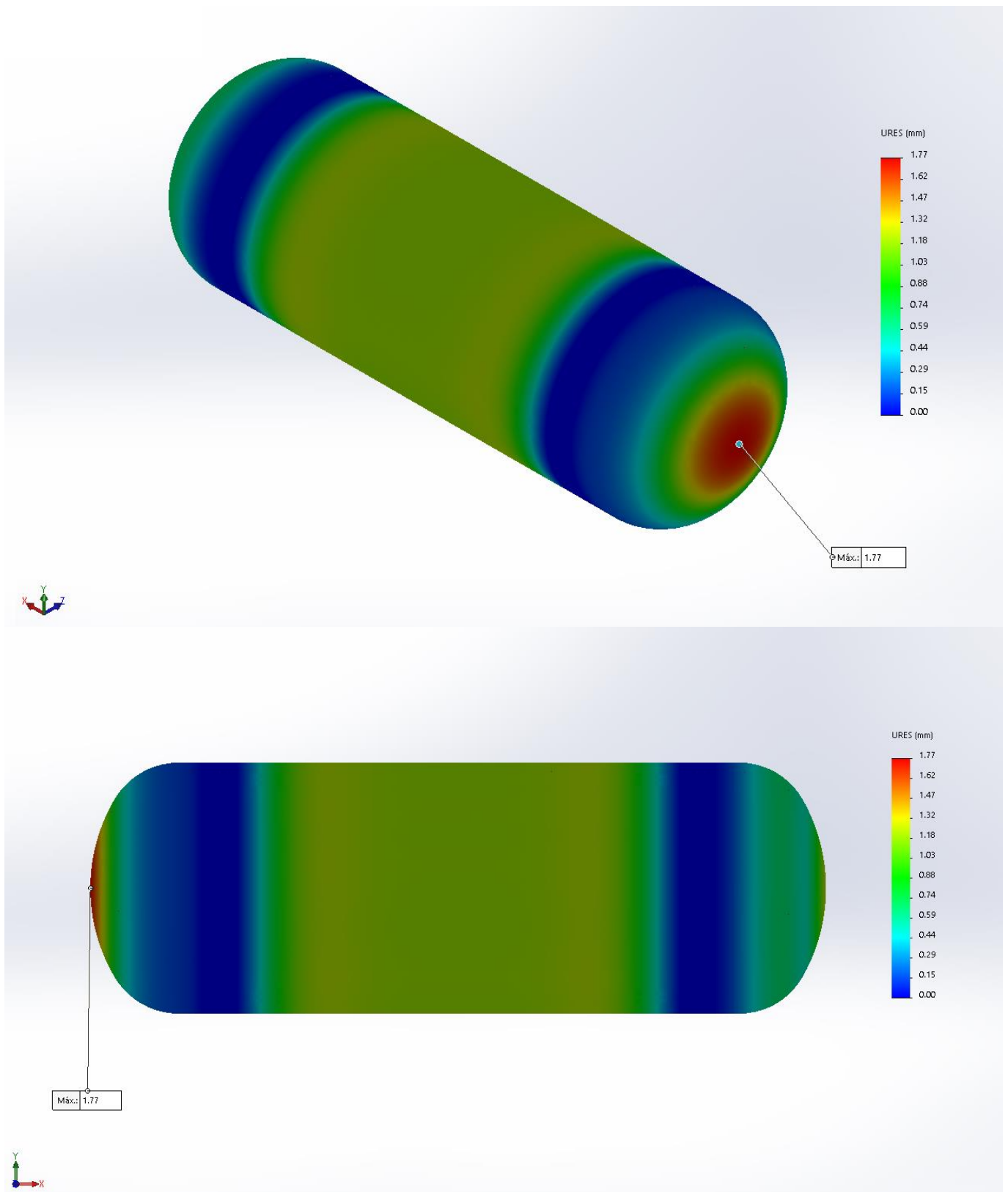


Figura 66: Desplazamientos obtenidos en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 70 MPa

V. FABRICACIÓN

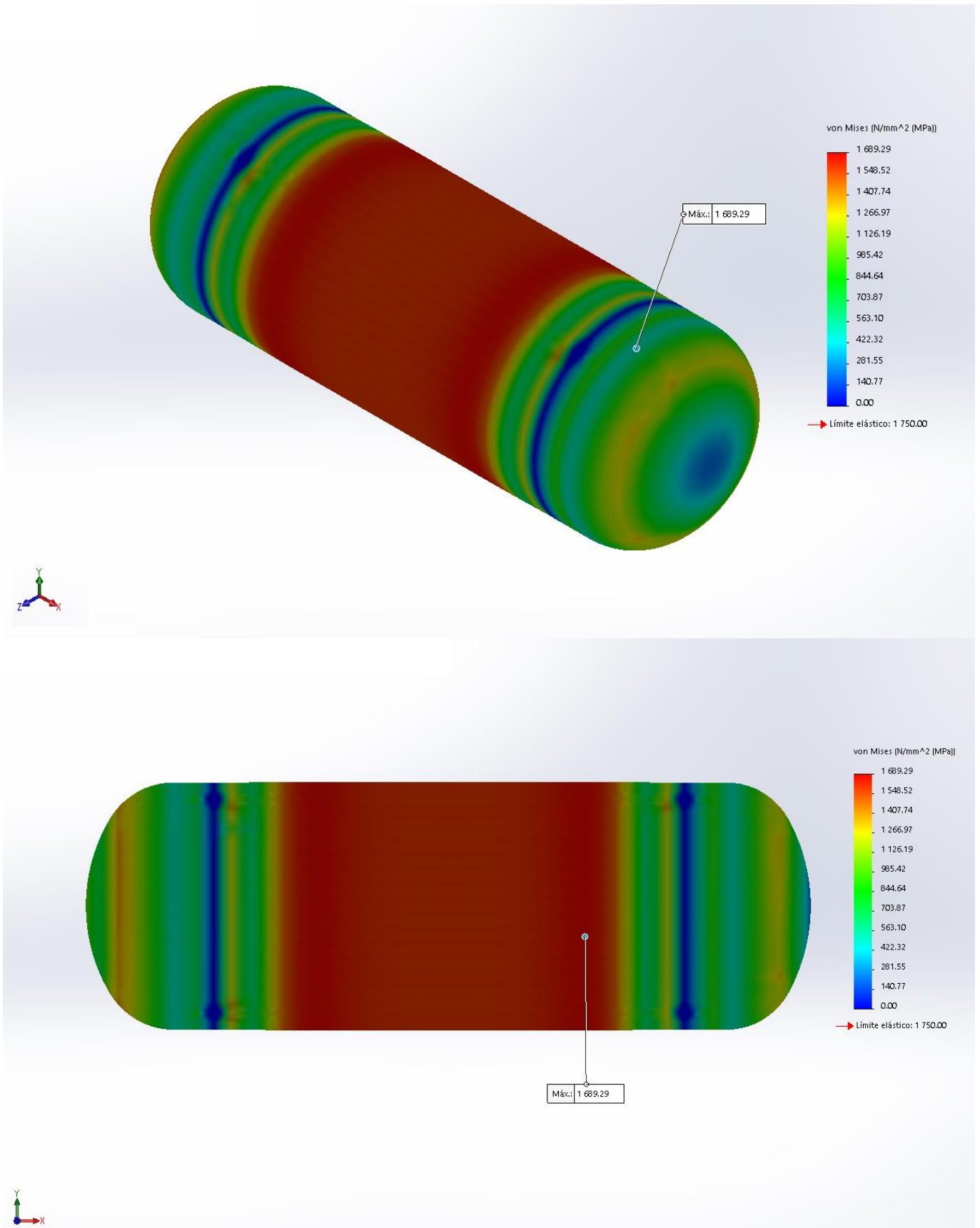


Figura 67: Tensiones obtenidas en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 157.5 MPa

V. FABRICACIÓN

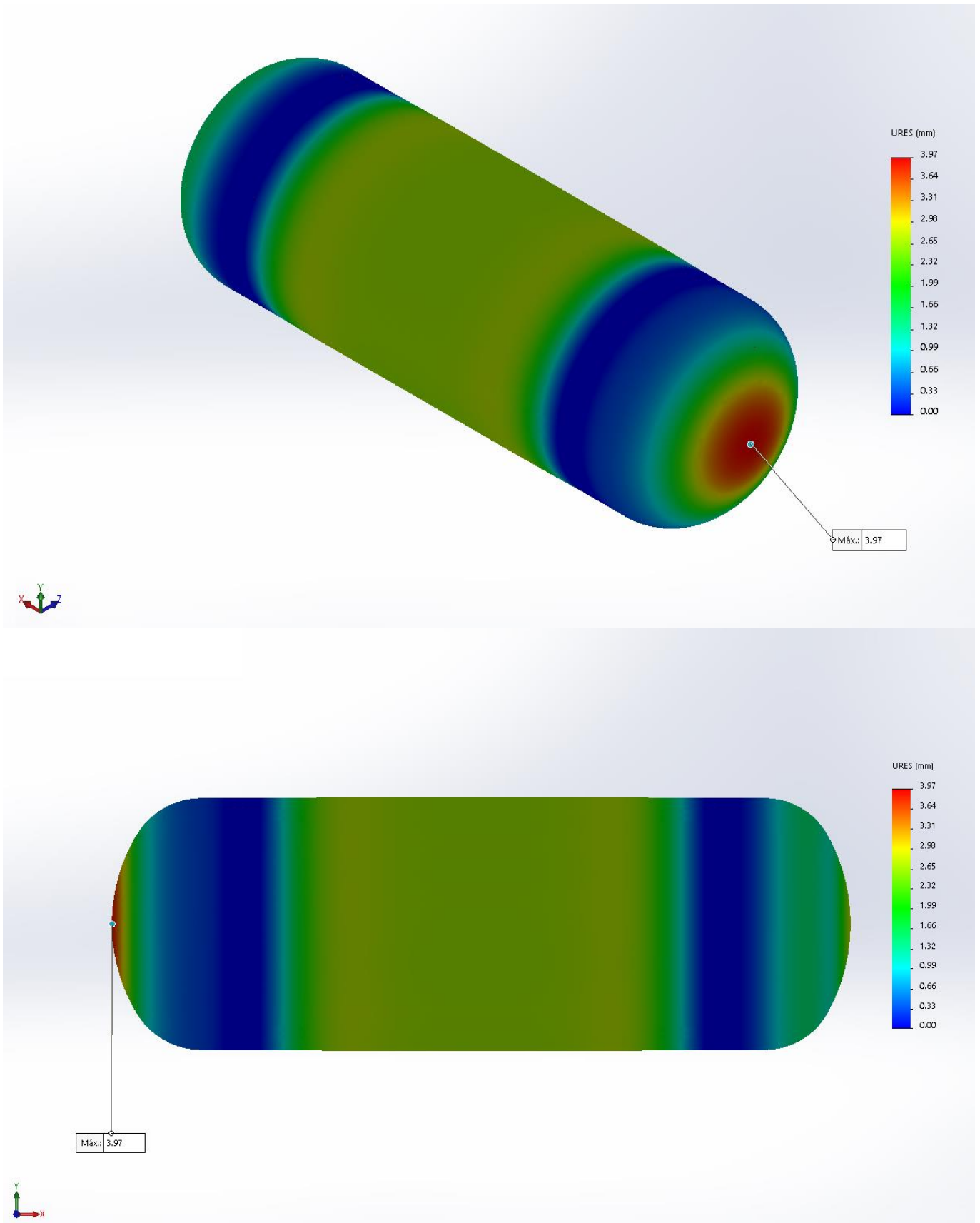


Figura 68: Desplazamientos obtenidos en el depósito de material compuesto de 36 mm de espesor y 157.5 MPa

5.2. ANÁLISIS ESTÁTICO ACERO Y ALUMINIO

En este apartado se analizará también mediante elementos finitos materiales como el acero y el aluminio, con el fin de tener una comparación directa entre los resultados obtenidos para materiales compuestos, y los materiales más comunes de fabricación de recipientes a presión.

En el apartado 4.1 ya se calculó el espesor necesario para que el recipiente soportara los esfuerzos a los que estaría sometido con una PMTP de 1 000 bares, y como se comprobó estos superan ampliamente el límite marcado para analizar el recipiente como un depósito de pared delgada. Sin embargo, se analizará el depósito mediante elementos finitos igualmente en estos materiales, para tener una comparación directa entre los tipos de materiales.

Se comenzará seleccionando el material, para el primer caso un acero aleado SJ 275, y para el segundo una aleación de aluminio 7050. Para comparar el resultado se ha mantenido el espesor de 36 mm de pared al igual que en el material compuesto, para observar las diferencias, en cuanto a tensiones y desplazamientos .

En las *Figura 69 y 70*, se observan las tensiones y desplazamientos respectivamente tras la simulación a una presión de 100 MPa, para el acero aleado. Como se observa en las imágenes las tensiones superan claramente el límite elástico del material, superando incluso el límite a rotura. La tensión máxima se da en la cara cilíndrica del recipiente, con un valor de 1270 MPa.

Al contrario que la tensión máxima, el desplazamiento máximo se da en las cabezas del recipiente, llegando a un máximo de 3.50 mm, y sobrepasando el desplazamiento máximo permitido.

En las *Figura 71 y 72* se muestra el análisis realizado esta vez para una aleación de aluminio 7050, en las mismas condiciones de presión y espesor de pared que en el caso anterior. Para el aluminio las tensiones máximas obtenidas son ligeramente inferiores, obteniéndose un máximo de 1245 MPa, aunque también se sobrepasa claramente el límite elástico del material y la tensión de ruptura.

En cuanto a los desplazamientos obtenidos, estos son muy superiores a los obtenidos por el acero llegando incluso hasta los 12.50 mm, que lo hace una aplicación prácticamente imposible ya que tendríamos un total de 25 mm a lo largo de la longitud del cilindro por lo que lo hace inviable. Estos resultados se deben a que el aluminio es un material mucho más dúctil que el acero.

V. FABRICACIÓN

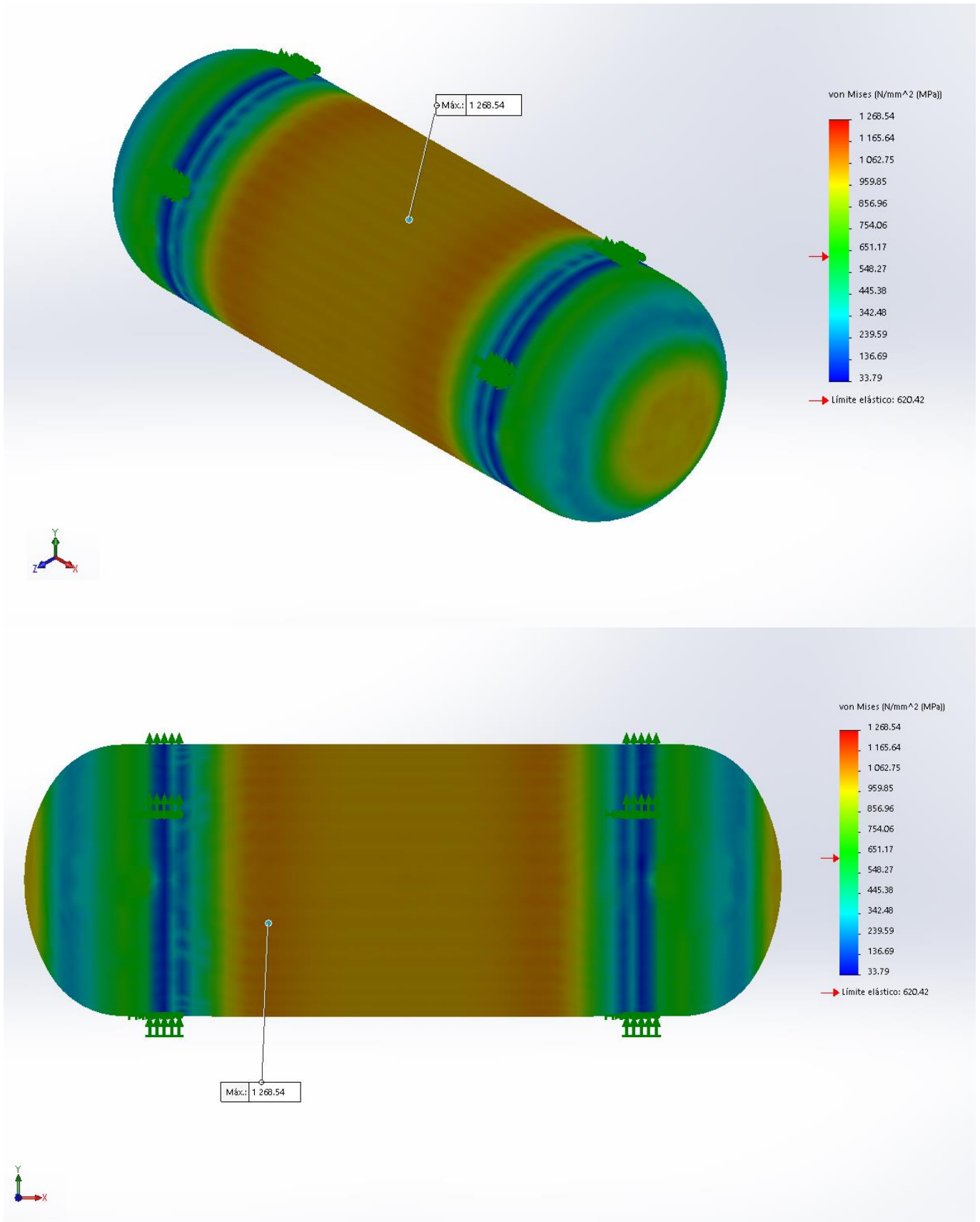


Figura 69: Tensiones obtenidas para acero aleado SJ 275 de 36 mm de espesor y 100 MPa

V. FABRICACIÓN

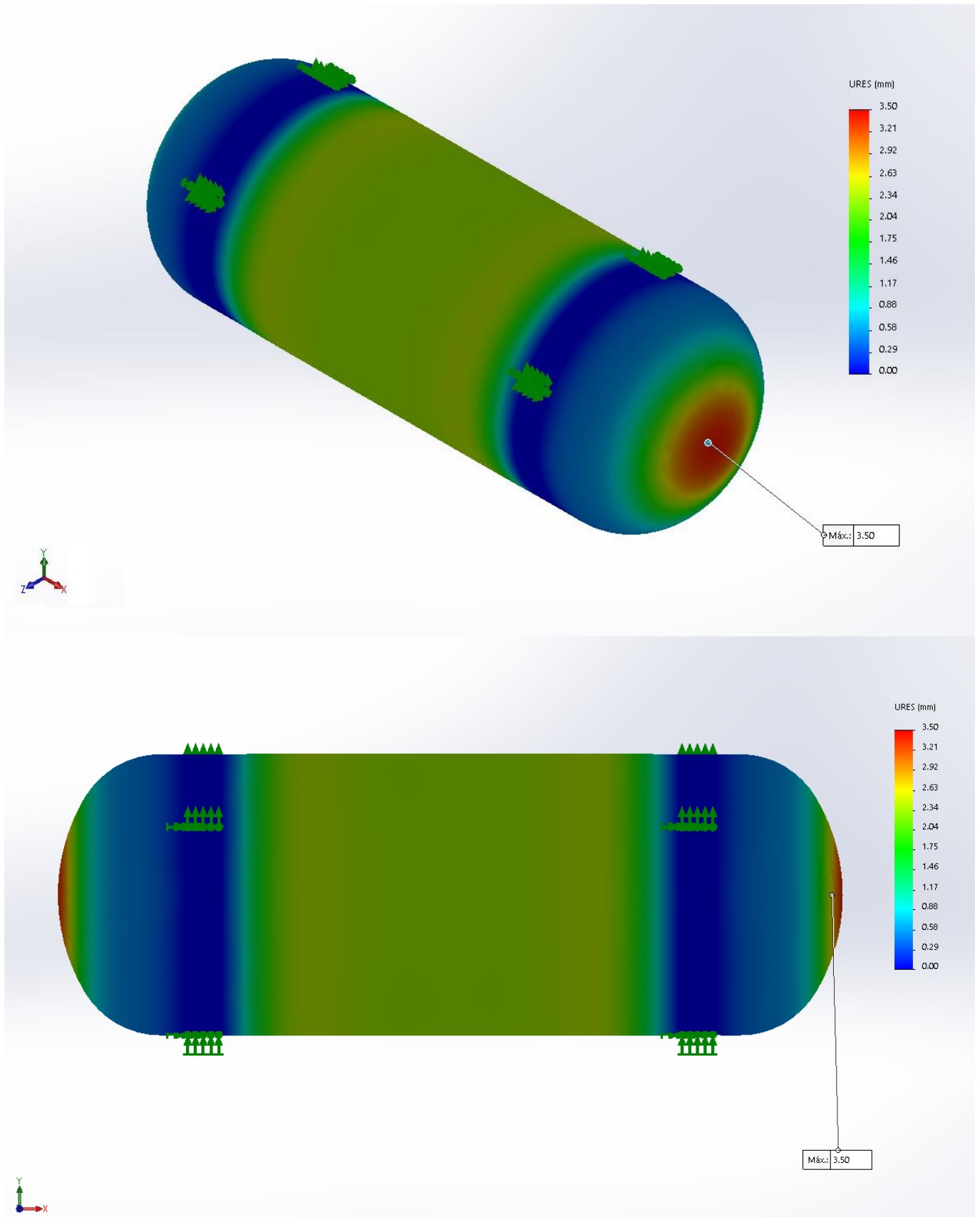


Figura 70: Desplazamientos obtenidos para acero SJ275 y 36 mm de espesor y 100 MPa

V. FABRICACIÓN

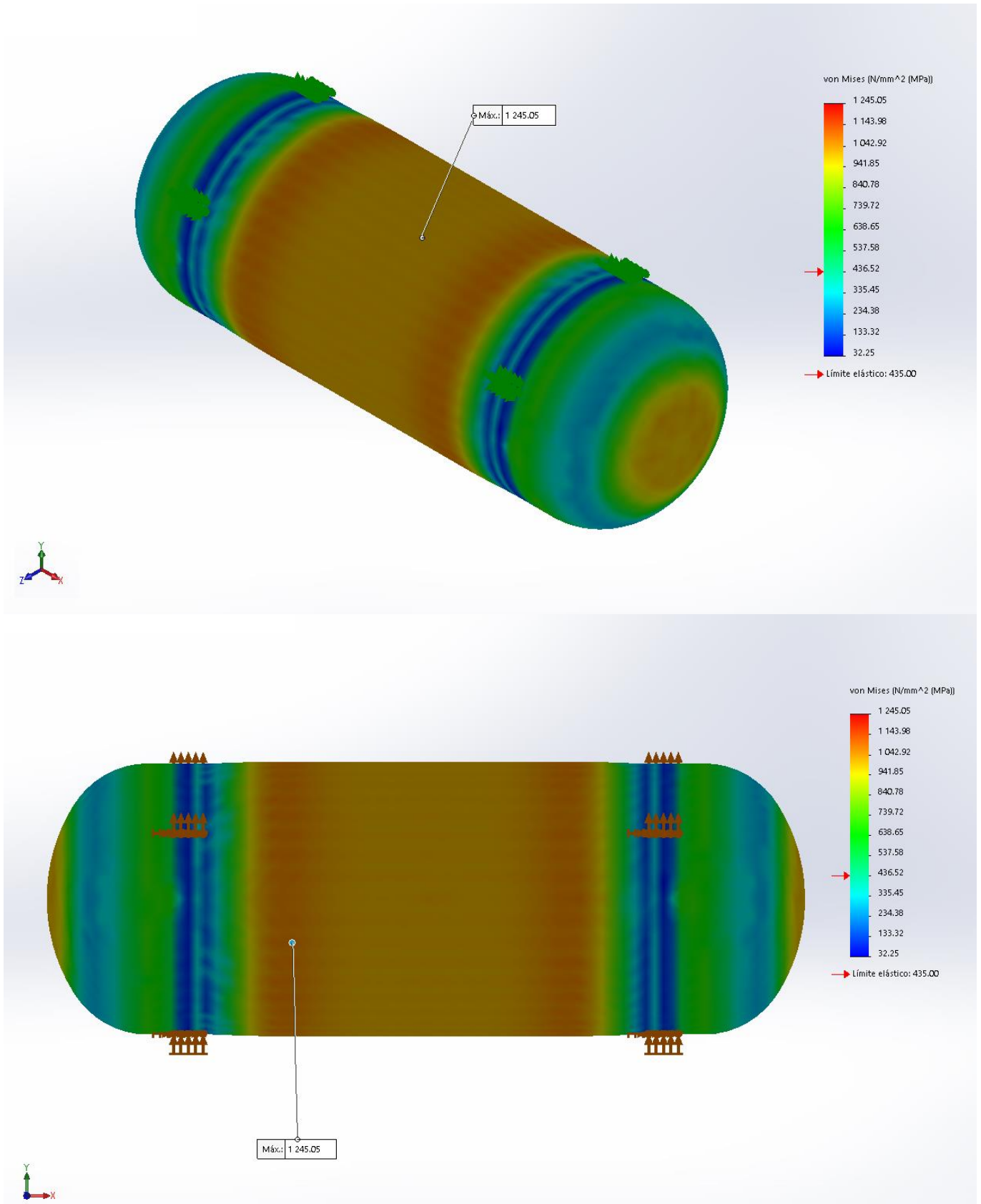


Figura 71: Tensiones obtenidas para aluminio 7050 y 36 mm de espesor y 100 MPa

V. FABRICACIÓN

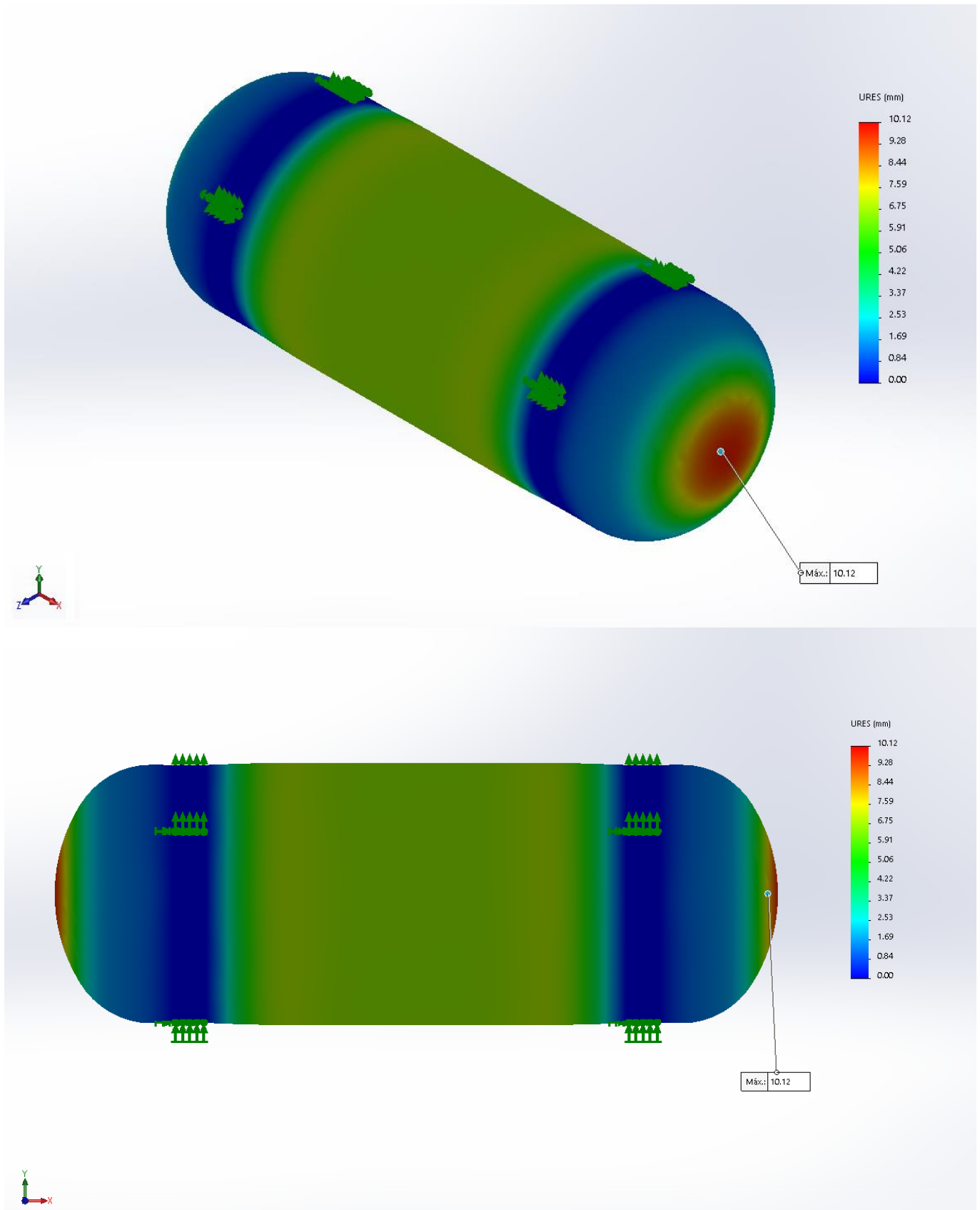


Figura 72: Desplazamientos obtenidos para aluminio 7050 y 36 mm de espesor y 100 MPa

6.

FABRICACIÓN

V. FABRICACIÓN

6.1. LINER INTERIOR DE HDPE.

Para la fabricación del liner interior en Polietileno de alta densidad (HDPE), se utilizará la base de datos de CES Edupack con el fin de determinar, el mejor proceso de conformado para su fabricación.

Estableciendo los criterios de forma, espesores y compatibilidad de materiales, se ha llegado a la conclusión de que el proceso de conformado, que más se adapta a las características de fabricación del liner interior del depósito, es el proceso de inyección y moldeo por soplado.

Este proceso de fabricación se basa en la inyección de una preforma sobre un molde donde adquiere la forma cilíndrica inicial posteriormente pasa a otro molde con la forma final de la pieza, donde se fija la preforma y se introduce dentro de un molde hueco. Posteriormente, se inyecta aire caliente a través de un mandril, que empuja al polímero contra las paredes del molde, después se enfría y se solidifica, obteniendo así la pieza acabada. La secuencia del proceso de fabricación se puede observar en la *Figura 73*.

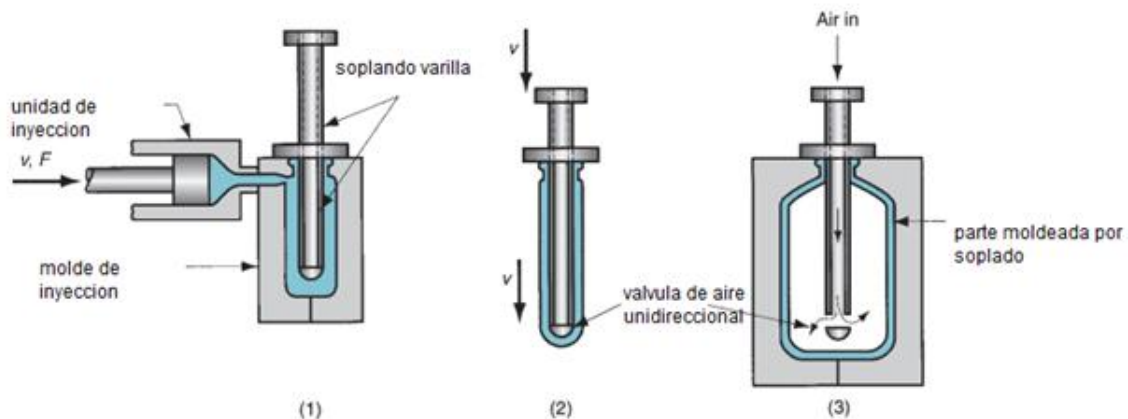


Figura 73: Secuencia de moldeo por inyección soplado para la fabricación de recipientes de PE

Mediante este proceso de fabricación de inyección soplado se consigue un control mayor sobre el peso y el espesor de la pieza, además de una precisión mayor que, con el moldeo por soplado tradicional, lo que lo hace ideal para esta aplicación.

También puede llevarse a cabo un soplado por inyección en capa múltiple, usado normalmente en piezas que requieren estanqueidad y rigidez. Al añadir varias capas de polímero, permite evitar la difusión de ciertos gases como por ejemplo el hidrógeno, es por este motivo y por la flexibilidad y posibilidades que ofrece este proceso de fabricación por lo que una opción muy interesante para la fabricación del liner interior.

6.2. CUERPO EN MATERIAL COMPUESTO.

Para la fabricación del cuerpo del depósito en material compuesto, se ha de tener en cuenta la forma y características tanto del depósito como de la pieza, para elegir adecuadamente el proceso de fabricación más conveniente. En este caso la forma cilíndrica del depósito y la orientación de las capas en ángulos diferentes hace que el bobinado de filamentos sea el proceso de conformado más adecuado.

El bobinado de filamentos es un proceso sencillo. Unas bobinas de hilos de fibra normalmente preimpregnados en una resina epoxídica, son enrollados de manera precisa sobre un mandril giratorio, tal y como se muestra en la *Figura 74*.

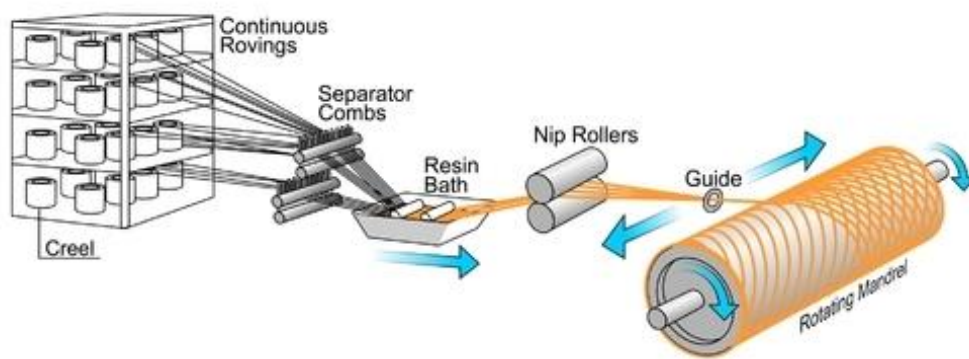


Figura 74: Proceso de conformado de materiales compuestos mediante el bobinado filamentos

El proceso de bobinado es un proceso automatizado donde los hilos son pretensados con una tensión controlada, con el fin de obtener una rigidez mayor o menor dependiendo de la tensión aplicada. La orientación de los filamentos también es automatizada y controlada, pudiendo establecerse capas con diferentes ángulos a las capas anteriores, por lo que pueden modificarse las características y propiedades de la pieza en función del ángulo y el número de capas.

Los filamentos son aplicados mediante una guía que va montada en un carro, y que puede desplazarse tanto perpendicular como transversalmente. Dependiendo de la inclinación del cabezal, la velocidad de movimiento del carro y la rotación del mandril pueden obtenerse diferentes ángulos de inclinación de los filamentos. La velocidad de avance del carro suele estar entre los 15-30 m/min para fibra de carbono y aramida.

El liner irá sobre el mandril y el bobinado se aplicará encima de este, quedando así en la cara interior del depósito. Una vez se han aplicado las capas y se ha obtenido el espesor necesario, se lleva a un horno donde la resina se cura, llevándose a cabo el proceso de polimerización, obteniéndose así las características mecánicas finales del material compuesto. Una vez la resina ha curado por completo el mandril se retira en el proceso de desmolde, quedando el liner en el interior y dejando del depósito hueco.

7.

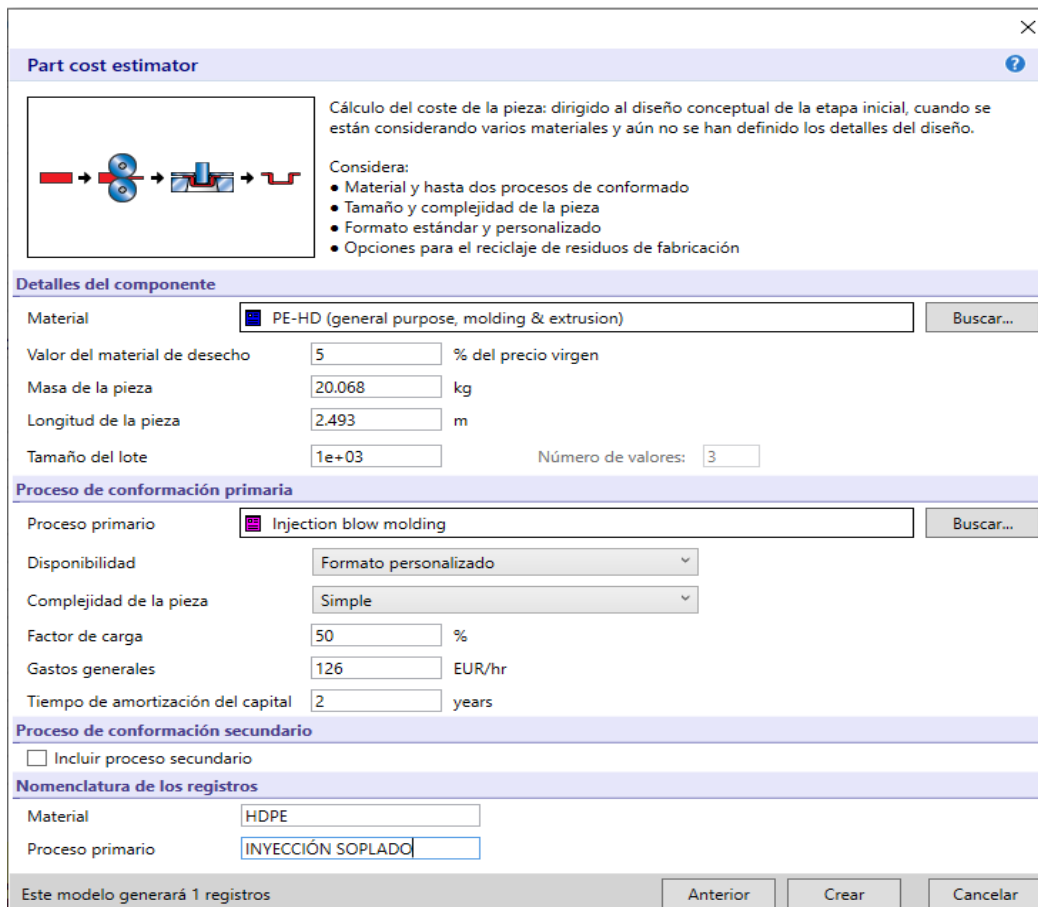
ESTUDIO ECONÓMICO

VI. ESTUDIO ECONÓMICO

7.1. COSTES DE FABRICACIÓN LINER HDPE

Tanto para el cálculo de la fabricación del liner interior, como del material compuesto del depósito, se hará uso de la herramienta “Part Cost Estimator” del programa CES EduPack, y que permitirá estimar el precio de fabricación aproximada de los componentes que integran el depósito. Mediante esta herramienta se consigue estimar un presupuesto, que resulta muy útil en la etapa inicial de diseño del depósito.

Para calcular la materia prima necesaria, primero se ha de calcular el volumen que ocupa el liner en el depósito. En este caso el liner de 3 mm y con las dimensiones del depósito ocupa un volumen de 21 dm³, que si se multiplica por la densidad del Polietileno de Alta Densidad (HDPE), que es de 960 Kg/m³ aproximadamente, por lo que la masa necesaria de Polietileno para fabricar el liner es de aproximadamente 20 Kg.



Part cost estimator

Cálculo del coste de la pieza: dirigido al diseño conceptual de la etapa inicial, cuando se están considerando varios materiales y aún no se han definido los detalles del diseño.

Considera:

- Material y hasta dos procesos de conformado
- Tamaño y complejidad de la pieza
- Formato estándar y personalizado
- Opciones para el reciclaje de residuos de fabricación

Detalles del componente

Material: PE-HD (general purpose, molding & extrusion) [Buscar...]

Valor del material de desecho: 5 % del precio virgen

Masa de la pieza: 20.068 kg

Longitud de la pieza: 2.493 m

Tamaño del lote: 1e+03 Número de valores: 3

Proceso de conformación primaria

Proceso primario: Injection blow molding [Buscar...]

Disponibilidad: Formato personalizado

Complejidad de la pieza: Simple

Factor de carga: 50 %

Gastos generales: 126 EUR/hr

Tiempo de amortización del capital: 2 years

Proceso de conformación secundario

Incluir proceso secundario

Nomenclatura de los registros

Material: HDPE

Proceso primario: INYECCIÓN SOPLADO

Este modelo generará 1 registros [Anterior] [Crear] [Cancelar]

Figura 75: Cálculo coste fabricación liner en Ces-EduPack

El precio del Polietileno de Alta Densidad pueda variar entre el 1.40 y 1.53 €/kg, por lo que el precio de la materia prima por unidad esta entre 28.5- 31.1 €/Kg, teniendo en cuenta que en el proceso de fabricación un 5% del material de la pieza se desecha, debido a las operaciones de eliminación de rebabas que puedan quedar tras el proceso de conformado.

VI. ESTUDIO ECONÓMICO

El precio del coste de fabricación del liner, vendrá dado por la complejidad de la pieza, que en este caso se trata de una pieza con una geometría simple, de la productividad representada con un grado de carga del 50%, y los gastos generales del proceso se han establecido en 126 €/h, estipulado en mano de obra y costes energéticos para todo el territorio nacional. El tamaño del lote, que se ha establecido es de 1000 unidades, y con un periodo de amortización el capital a 2 años.

La herramienta de estimación de costos, teniendo en cuenta los parámetros anteriores, establece una serie de valores que se muestran en la *Tabla 16*.

Estudio fabricación liner

<i>Costo por unidad (€)</i>	43.4 – 46
<i>Peso unidad (kg)</i>	20.1
<i>Precio material por unidad (€)</i>	28.5 - 31.1
<i>Costo de fabricación por unidad (€)</i>	14.9
<i>Porcentaje precio material</i>	66.6 %
<i>Porcentaje costo fabricación</i>	33.4 %
<i>Fabricación (ud.)</i>	1 000

Tabla 16: Costo fabricación liner interior en HDPE

El coste de fabricación de cada liner de HDPE, está entorno a los 45 € aproximadamente, que si se multiplica por el número total de Liners a fabricar la cifra asciende a un total de 45 000 € aproximadamente dependiendo de a qué precio se consigue el material. El programa también muestra información interesante acerca del proceso de fabricación de la pieza, como es precio de la maquinaria y las herramientas, ratio de producción etc. Estos datos pueden mostrarse en otra Tabla que se muestra a continuación.

Estudio fabricación liner

<i>Vida maquinaria (ud.)</i>	160 600
<i>Inversión de capital (€)</i>	38 210
<i>Ratio de producción (ud./h)</i>	139
<i>Fracción material utilizado</i>	99 %
<i>Coste maquinaria por unidad (€)</i>	13.99
<i>Gastos generales por unidad (€)</i>	0.93

Tabla 17: Costes de maquinaria y producción Liner en HDPE

7.2. COSTES DE FABRICACIÓN MATERIAL COMPUESTO.

Para poder calcular el costo de fabricación del material compuesto, que compone el depósito mediante la herramienta de estimación de costes del programa CES EduPack, se ha introducido en la base de datos del programa, el tipo de fibra utilizada y su matriz. En este caso se trata de una fibra de alto modulo en un 70% con matriz epoxi, como ya se explicó en apartados anteriores (*Figura 76*).

Fibra continua (UD y QI)

Predice el comportamiento de materiales reforzados con fibras continuas

Unidireccional = fibras alineadas [0°]
Cuasi isotropo = fibras en disposición multiaxial [0° / +45° / -45° / 90°]

Suposiciones:

- Distribución uniforme del refuerzo
- Unión perfecta entre matriz y fibra
- El material es totalmente denso

Orientación de la fibra
Unidireccional

Registros utilizados

Matriz: Epoxy resin (cycloaliphatic) [Buscar...]

Fibra: Carbon fibers, high modulus (5 micron, f) [Buscar...]

Variables del modelo

Introduce valores o rango de valores. Por ejemplo, 1; 3; 8 o 1-8

Fracción volumétrica de fibra: 70 % Número de valores: 6

Nomenclatura de los registros

Matriz: EPOXI

Fibra: CARBONO

Este modelo generará 1 registros [Anterior] [Crear] [Cancelar]

Figura 76: Introducción del material compuesto en la base de datos de CES EduPack

El precio de la fibra de carbono dependerá mucho de la calidad con la que se fabrique, en este caso al tratarse de una fibra de alto modulo donde su modulo esta entre 370 y 390 GPa, el precio de la materia prima será elevado, ya que cuanto mayor sea su modulo normalmente el precio de la fibra se incrementará.

Al igual que para la fabricación del liner, se introducirá los datos que se tendrán en cuenta para la estimación de costes, como son la geometría y complejidad de la pieza, el porcentaje de material usado, gastos generales, tasa de productividad, periodo de amortización del capital, tamaño de lote etc. (*Figura 77*).

VI. ESTUDIO ECONÓMICO

Part cost estimator ?

Cálculo del coste de la pieza: dirigido al diseño conceptual de la etapa inicial, cuando se están considerando varios materiales y aún no se han definido los detalles del diseño.

Considera:

- Material y hasta dos procesos de conformado
- Tamaño y complejidad de la pieza
- Formato estándar y personalizado
- Opciones para el reciclaje de residuos de fabricación

Detalles del componente

Material Buscar...

Valor del material de desecho % del precio virgen

Masa de la pieza kg

Longitud de la pieza m

Tamaño del lote Número de valores:

Proceso de conformación primaria

Proceso primario Buscar...

Disponibilidad

Complejidad de la pieza

Factor de carga %

Gastos generales EUR/hr

Tiempo de amortización del capital years

Proceso de conformación secundario

Incluir proceso secundario

Nomenclatura de los registros

Material

Proceso primario

Este modelo generará 1 registros

Anterior Crear Cancelar

Figura 77: Cálculo de costes fabricación de material compuesto

Exactamente igual que en el caso anterior la herramienta de estimación de costes ofrece los resultados de costo de fabricación y material, así como otros datos de interés y que resultan fundamentales para el análisis y estudio de la viabilidad económica de la fabricación del depósito.

Estudio fabricación material compuesto

Costo por unidad (€)	15 300 – 30 500
Peso unidad (kg)	408
Precio material (€/kg)	35.6 -70.9
Costo de fabricación por unidad (€)	90.5
Porcentaje precio material	99.6 %
Porcentaje costo fabricación	0.42 %
Fabricación (ud.)	1 000

Tabla 18: Coste fabricación material compuesto depósito almacenamiento de hidrógeno

VI. ESTUDIO ECONÓMICO

De la tabla anterior se puede observar, que el 99% del precio del depósito en fibra de carbono es el material. El precio varía ostensiblemente, ya que depende de la calidad del material con la que se esté trabajando, en este caso y como ya se adelantó, se empleará para la fabricación una fibra con un módulo de Young alto, por lo que el precio será bastante alto en una zona intermedia rondando los 20 000 € por unidad aproximadamente. Al igual que en el caso anterior, se puede consultar datos adicionales del proceso de fabricación y que se muestran en la *Tabla 19*.

Estudio fabricación material compuesto

<i>Vida maquinaria (ud.)</i>	380
<i>Inversión de capital (€)</i>	83 750
<i>Ratio de producción (ud./h)</i>	1.5
<i>Fracción material utilizado</i>	95 %
<i>Coste maquinaria por unidad (€)</i>	3.30
<i>Gastos generales por unidad (€)</i>	87.2

Tabla 19: Costo maquinaria fabricación material compuesto depósito almacenamiento de hidrógeno

De la tabla anterior se pueden extraer varias conclusiones. Se puede comprobar que el coste e inversión de maquinaria por unidad, no es muy grande, al igual que los gastos generales añadidos. Esto se debe a que el proceso de bobinado por filamentos es un proceso de conformado bastante sencillo, y muy fácil de automatizar por lo que no requiere de un gran desembolso en esta parte, pero si en la inversión inicial de ahí los 83 750 €. Además, también se puede observar que la vida en unidades para la fabricación es de tan solo 380 ud, por lo que se deberá tener en cuenta y realizar el mantenimiento y sustitución de maquinaria cuando sea necesario.

7.3. VIABILIDAD ECONÓMICA

Una vez se han calculado los costes de fabricación mediante el programa CES EduPack, se hará un estudio económico para determinar la rentabilidad económica de la producción de depósitos. Para el precio del material se escogerá un coste intermedio, ya que este se encuentra dentro de un rango determinado y dependerá de varios factores. Primero se han de identificar y agrupar los costes variables y los costes fijos de producción, *Tabla 20* y *21* respectivamente, para calcular el punto de equilibrio donde la suma del dinero gastado se iguala a la de dinero generado.

Costes variables

Concepto	Precio
Material liner HDPE	29.80 €
Material compuesto (Fibra de carbono HM 70)	22 850 €
Amortización fabricación liner	0.24 €
Amortización Fabricación material compuesto	220.40 €
Total	23 100.44 €

Tabla 20: Costes variables de fabricación del depósito de almacenamiento de hidrógeno

Costes fijos anuales

Concepto	Precio
Gastos generales (Mano de obra, luz, agua, limpieza etc.)	88 130 €
Costo maquinaria (utilización, mantenimiento etc.)	17 290 €
Alquiler	900 €
Impuestos territoriales	500 €
Total	106 820 €

Tabla 21: Costos fijos fabricación depósito H₂

VI. ESTUDIO ECONÓMICO

Para calcular el punto de equilibrio, se deberá de tener en cuenta el precio de venta del depósito, en este caso se establecerá un beneficio del 6 % aproximadamente ⁵ por lo que el precio de venta de cada depósito será 24 486.46 €. Para calcular el punto de equilibrio se utiliza la expresión que se muestra a continuación:

$$PE = \frac{C_F}{P_V - C_V} = \frac{106\,820\ \text{€}}{24\,486.46\ \text{€/ud} - 23\,100.44\ \text{€/ud}} = 78\ \text{ud}$$

Donde:

- C_F → Costes fijos.
- C_V → Costes variables.
- P_V → Precio de venta del producto.

El punto de equilibrio en este caso se encuentra entorno a las 78 unidades producidas, por lo que la empresa será rentable siempre y cuando supere los 78 depósitos que es el punto donde se encuentra el punto de equilibrio. A partir de aquí la empresa generará beneficios. Esto se observa mucho mejor si se representa en una gráfica los costes, e ingresos, tal y como se muestra en la *Figura 78*.

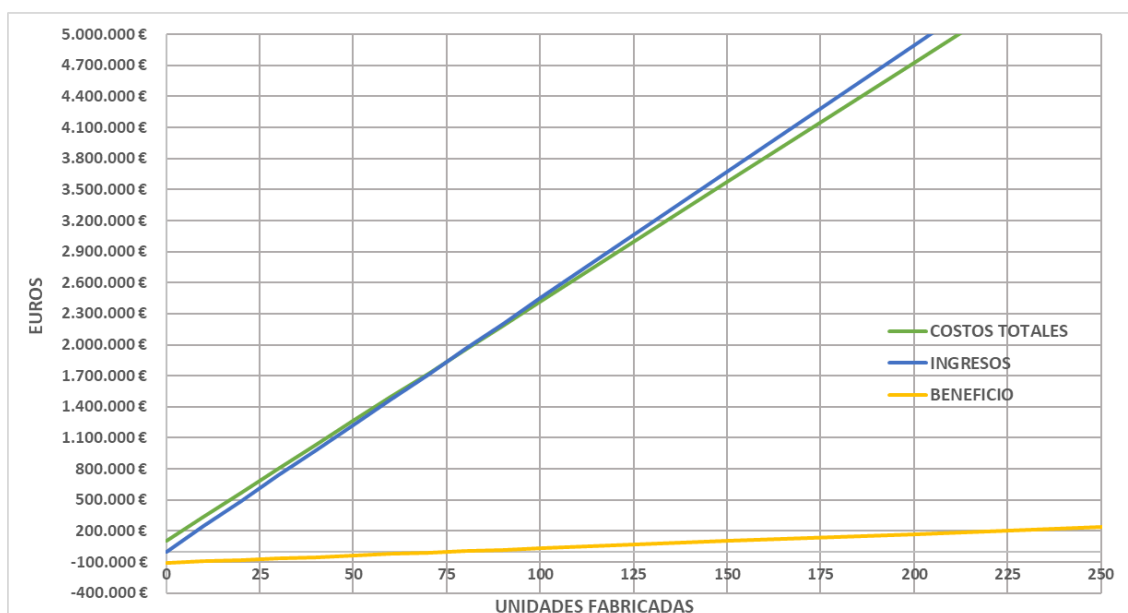


Figura 78: Gráfica punto de equilibrio y beneficio por unidades vendidas

Como se puede observar en la gráfica el punto de equilibrio se encuentra en torno a las 75 unidades vendidas, que es donde la curva de ingresos corta a la de costos totales, en este caso el beneficio es nulo. A partir de ahí el beneficio sube paulatinamente a medida que se aumentan las ventas de unidades. Pudiendo llegar a un beneficio de 1 279 200 € siempre y cuando la fábrica trabaje al 100 % de su capacidad, y con todas

⁵ De acuerdo con la Ley 9/2017, del 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público se menciona en su artículo 246 que el porcentaje que se estima en concepto de beneficio industrial es del 6%

VI. ESTUDIO ECONÓMICO

las unidades previstas vendidas. La evolución de costos, ingresos y beneficios según las unidades puede observarse más en detalle en la *Tabla 22*.

Unidades	Costos totales	Ingresos	Beneficio bruto
0	106 820 €	- €	- 106 820 €
10	337 824 €	244865 €	- 92 960 €
20	568 829 €	489 729 €	- 79 100 €
30	799 833 €	734 594 €	- 65 239 €
40	1 030.838 €	979 458 €	- 51 379 €
50	1 261 842 €	1 224 323 €	- 37 519 €
60	1 492 846 €	1 469 188 €	- 23 659 €
70	1 723 851 €	1 714 052 €	- 9 799 €
80	1 954 855 €	1 958 917 €	4 062 €
90	2 185 860 €	2 203 781 €	17 922 €
100	2 416 864 €	2 448 646 €	31 782 €
150	3 571 886 €	3 672 969 €	101 083 €
200	4 726 908 €	4 897 292 €	170 384 €
300	7 036 952 €	7 345 938 €	308 986 €
400	9 346 996 €	9 794 584 €	447 588 €
500	11 657 040 €	12 243 230 €	586 190 €
600	13 967 084 €	14 691 876 €	724 792 €
700	16 277 128 €	17 140 522 €	863 394 €
800	18 587 172 €	19 589 168 €	1 001 996 €
900	20 897 216 €	22 037 814 €	1 140 598 €
1000	23 207 260 €	24 486 460 €	1 279 200 €

Tabla 22: Evolución costos e ingresos producción depósitos de almacenamiento hidrógeno

Teniendo en cuenta todos estos aspectos se puede elaborar una tabla resumen con el precio final del depósito de almacenamiento de hidrógeno, *Tabla 23*.

Precio depósito de H₂

Concepto	Precio
Material	22 879.80 €
Costos generales	220.64 €
Beneficio 6 %	1 386.02
IVA 21 %	5 142.16 €
Total	29 628.62 €

Tabla 23: Presupuesto depósito de hidrógeno

8.

APÉNDICES

I. BIBLIOGRAFÍA

ASENSIO, P. (2007). *Hidrógeno y pila de combustible*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid [en línea]. Disponible en: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-paratodos-hidrogeno-y-pila-de-combustible.pdf> [última consulta: 22 diciembre 2020].

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DEL HIDROGENO (2020). *El Hidrógeno*. [en línea]. Disponible en: http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=es [última consulta: 27 Julio de 2020].

HYDROGEN EUROPE (2020). *Joint call for the deployment of hydrogen fuel cell trucks A needed shift towards a carbon-neutral society*. Bruselas. [en línea]. Disponible en: https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/2020.02.12%20Joint%20call%20for%20deployment%20of%20FC%20trucks_final%20version%20with%20logos.pdf [última consulta: 27 Julio de 2020].

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. (2004). *Prestaciones en Vehículos*. [en línea] Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/laboratorio-de-tecnologias-iv/material-didactico/prestaciones.pdf> [última consulta: 22 Julio de 2020].

BORGWARNER (2020). *Comunicado de Prensa, Motor Eléctrico de BorgWarner Mueve Camión Híbrido Plug-in*. Michigan. [en línea]. Disponible en: https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/press-release-downloads/motor-el%C3%A9ctrico-de-borgwarner-mueve-cami%C3%B3n-h%C3%ADbrido-plug-in.pdf?sfvrsn=7dc88d3c_2 [última consulta: 27 Julio de 2020].

DGT, Dirección General de Tráfico (2015). *Reglamentación sobre vehículos pesados, prioritarios, especiales, de transporte de personas y mercancías y tramitación administrativa*. Madrid: Ministerio del Interior.

CEPE (2019). *Disposiciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos de motor y sus componentes en relación con el rendimiento en cuanto a seguridad de los vehículos de hidrógeno*. Reglamento n.º 134. Ginebra: Diario Oficial de la Unión Europea.

VIII. APÉNDICES

ARAGONES MORROS, A. (2017). *Hydrogen gas containment for a bike*. Trabajo Final de Máster. Institute of Polymer Product, (Austria): Engineering. Johannes Kepler University Linz.

CALLEJA RAMOS, E. (2018). *Diseño de una pila de hidrógeno para su aplicación en automoción*. Trabajo Final de Máster. Valladolid: Escuela de Ingenierías Industriales.

CASADO CEREZAL, D. (2016). *Dimensionado y evaluación de un vehículo automóvil basado en una pila de combustible con almacenamiento a bordo de hidrógeno*. Trabajo Final de Máster. Valladolid: Escuela de Ingenierías Industriales.

CASTILLO SEBASTIÁN, E. (2016). *Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos*. Trabajo Final de Grado. Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño, Universidad Politécnica de Valencia.

HUA, T. Q., AHLUWALIA, R. K., PENG, J. K., KROMER, M., y otros (2011). *Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications*. International Journal of Hydrogen Energy.

HURTADO, J. I. L., & SORIA, B. Y. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

ROYLANCE, D. (2001). *Pressure vessels*. Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.

GONZÁLEZ GARCÍA CONDE, A. (2010). *“Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno”*.

RODRÍGUEZ, A. C. (2006). *“Las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro”*. Anales de mecánica y electricidad Julio-Agosto 2006.

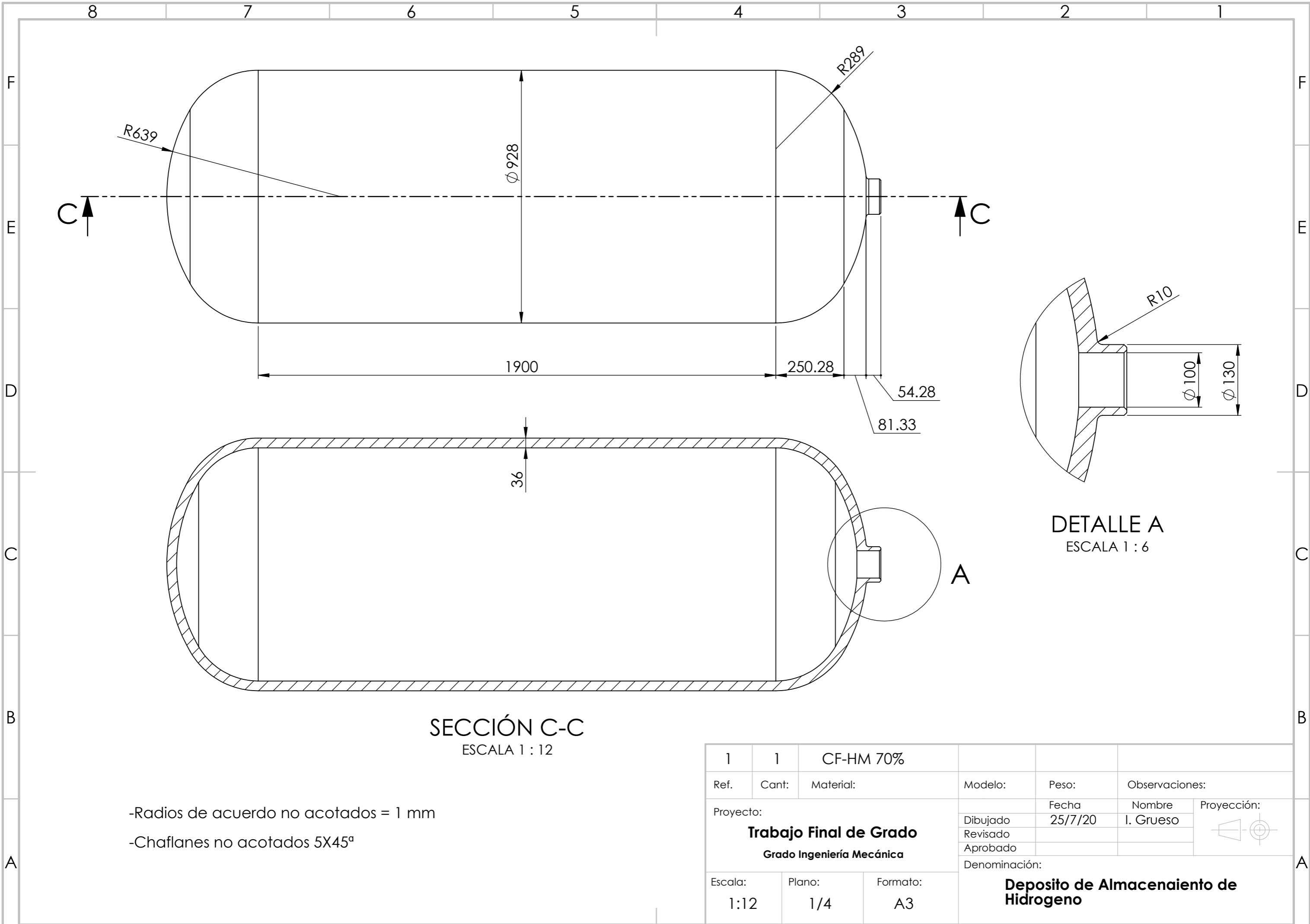
PERETTI, H. A., & VISINTIN, A. (2005). *“Hidrógeno, combustible del futuro:¿ Por qué, cómo y dónde?”* Carbón, 8, 15-20.

II. *NORMATIVA*

REGLAMENTO N.º 134 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE). Disposiciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos de motor y sus componentes en relación con el rendimiento en cuanto a seguridad de los vehículos de hidrógeno [2019/795].(*Se adjunta como anexo a esta memoria, un extracto del reglamento)

ISO/TC 197 HYDROGEN TECHNOLOGIES: Standardization in the field of systems and devices for the production, storage, transport, measurement and use of hydrogen.

III. PLANOS ACOTADOS



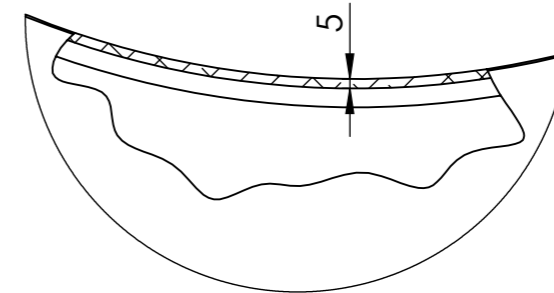
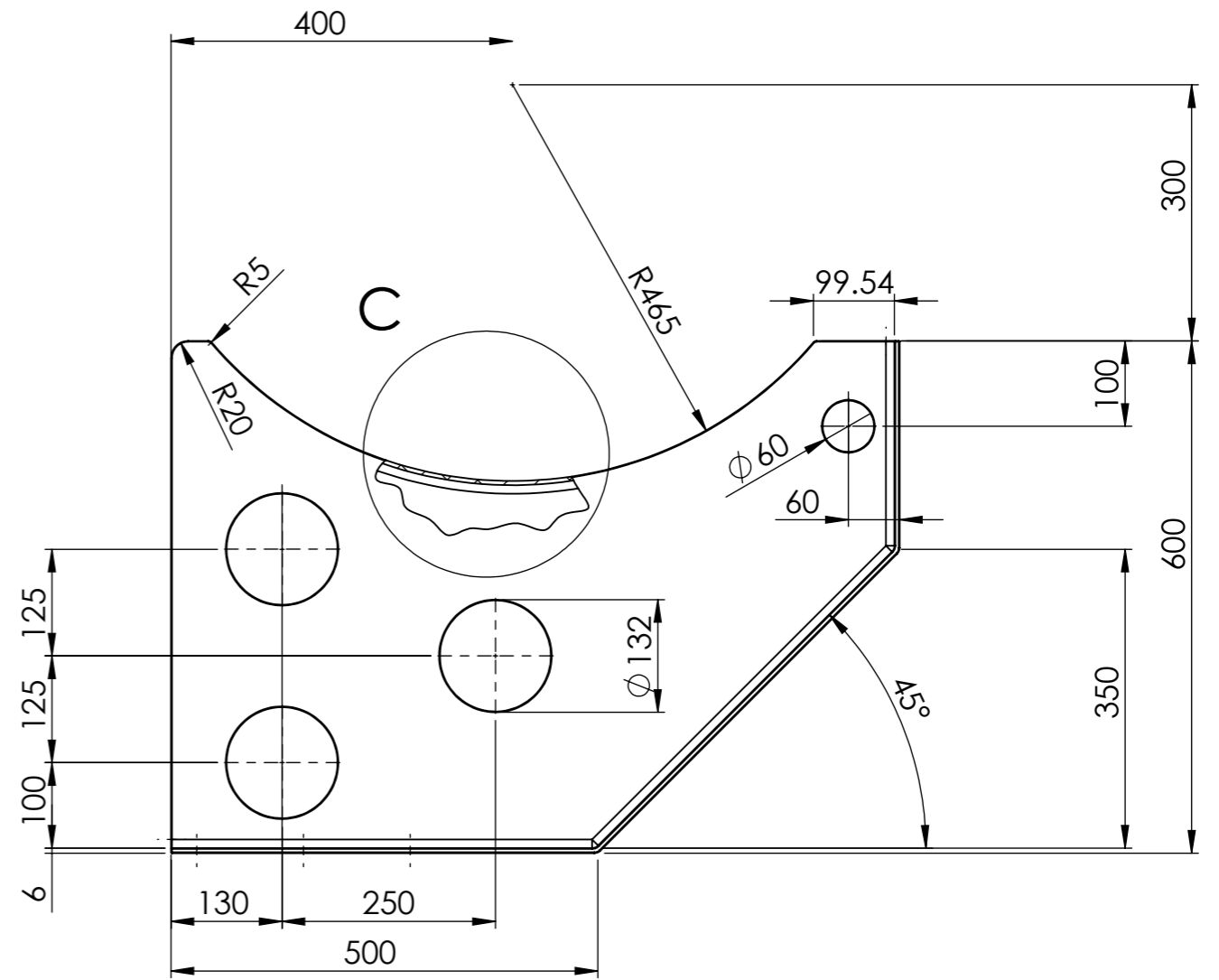
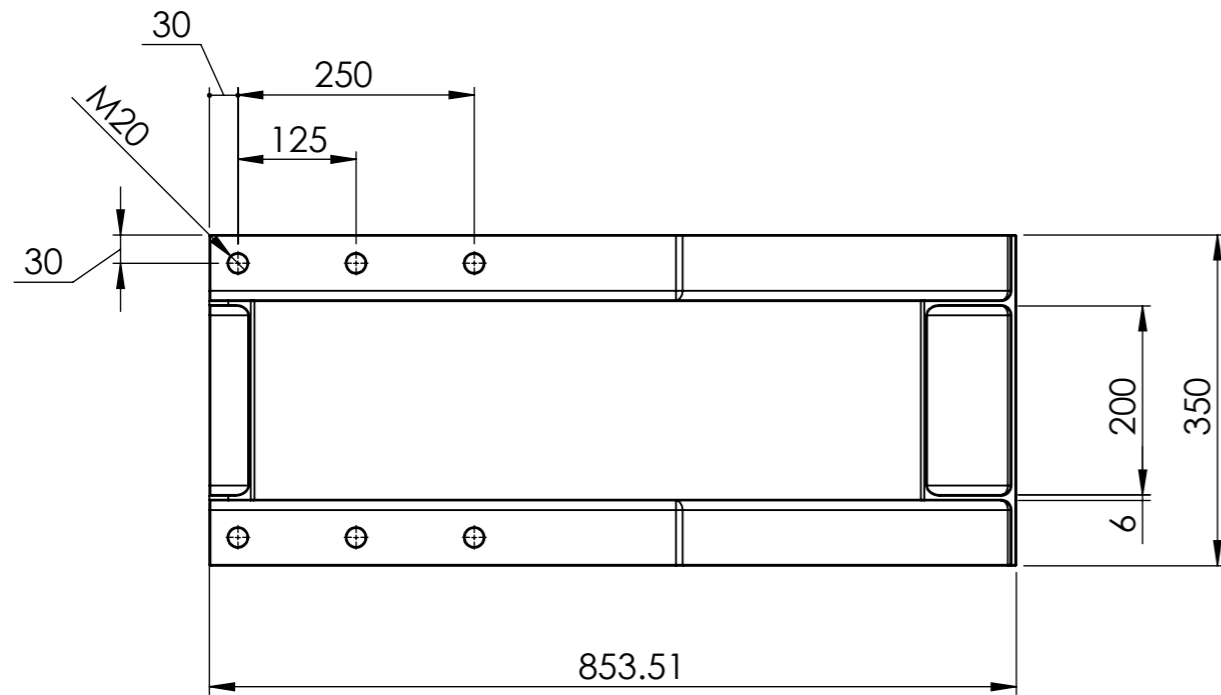
SECCIÓN C-C
ESCALA 1 : 12

DETALLE A
ESCALA 1 : 6

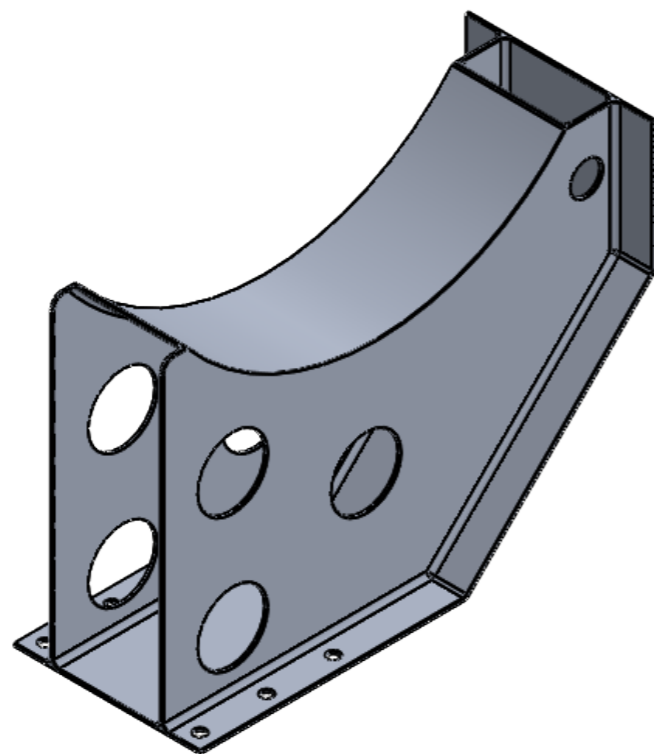
-Radios de acuerdo no acotados = 1 mm
-Chaflanes no acotados 5X45°

1	1	CF-HM 70%			
Ref.	Cant:	Material:	Modelo:	Peso:	Observaciones:
Proyecto:				Fecha	Nombre
Trabajo Final de Grado Grado Ingeniería Mecánica			Dibujado	25/7/20	I. Grueso
			Revisado		
			Aprobado		
Escala:			Denominación:		
1:12			Deposito de Almacenamiento de Hidrogeno		
Plano:			Proyección:		
1/4					
Formato:					
A3					

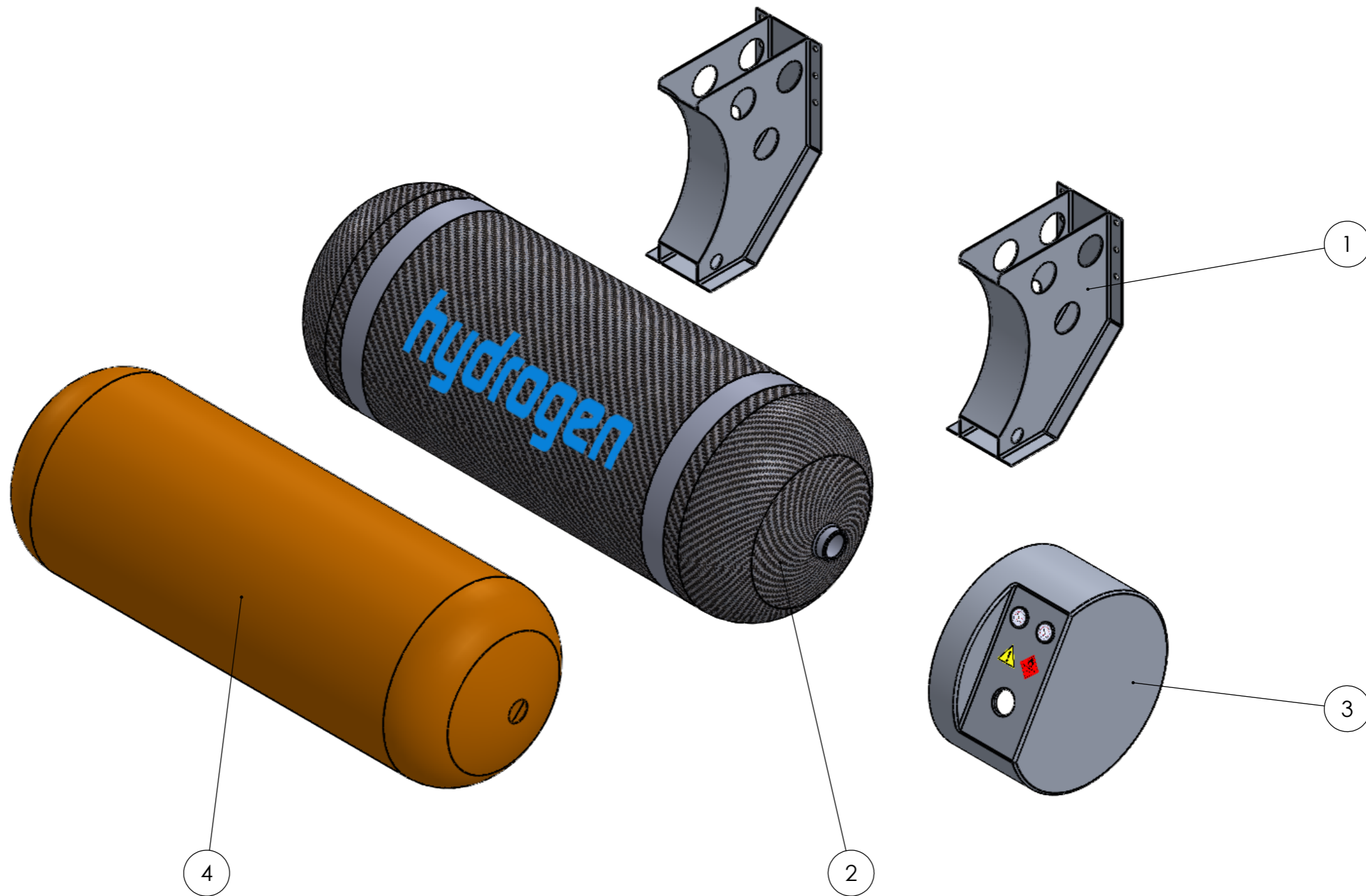
- Radios de acuerdo no acotados = 10 mm
- Chaflanes no acotados: 1X45°



DETALLE C
ESCALA 1 : 4

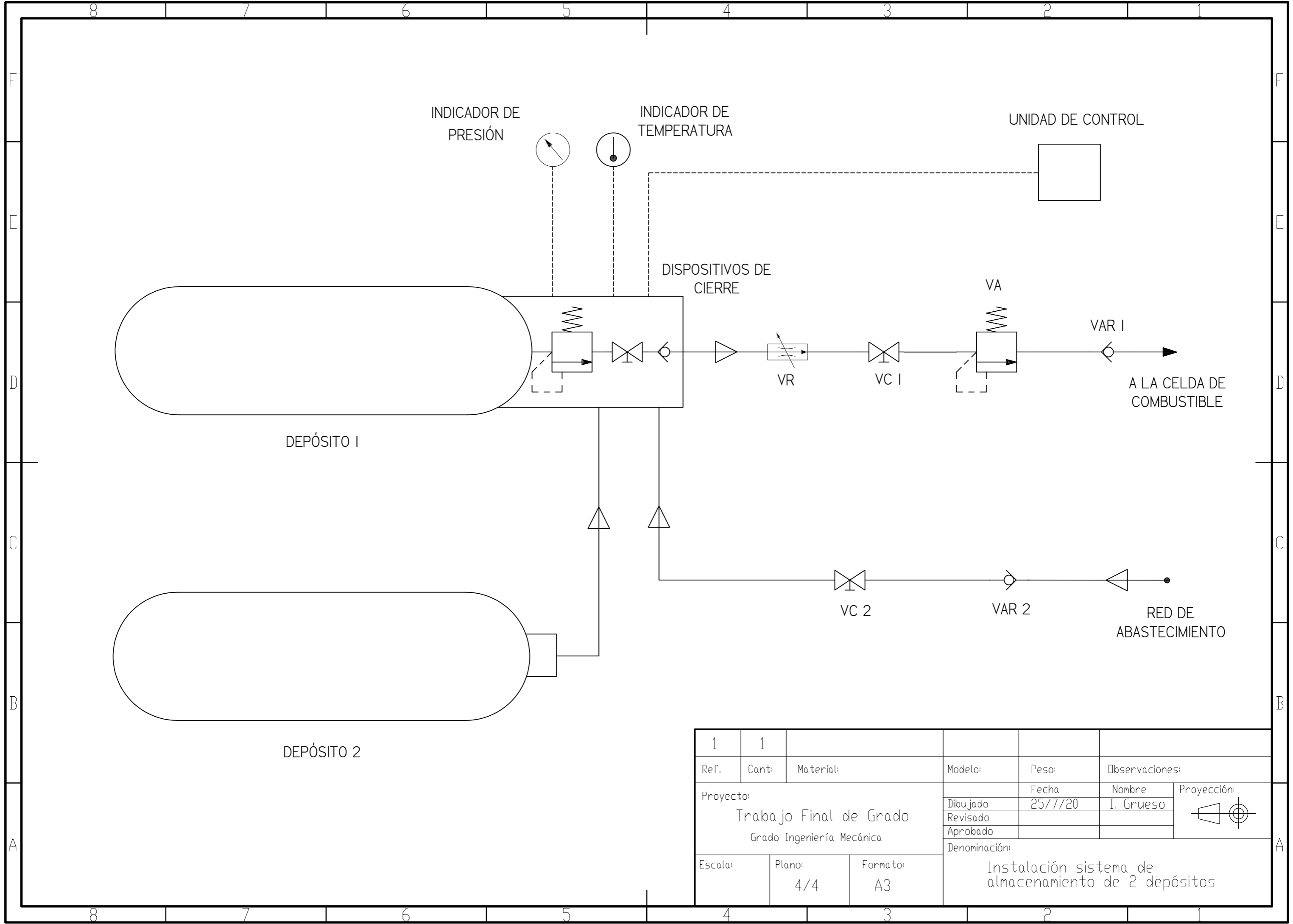


1	1	ALUMINIO 7050			
Ref.	Cant:	Material:	Modelo:	Peso:	Observaciones:
Proyecto:				Fecha	Nombre
Trabajo Final de Grado				25/7/20	I. Grueso
Grado Ingeniería Mecánica					
Escala:			Denominación:		
1:8	Plano:	Formato:	Anclaje para depósito de almacenamiento de hidrógeno		
	2/4	A3			

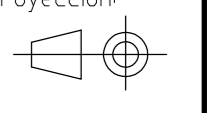


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	ANCLAJE	Aleación Al 7050	2
2	DEPOSITO	Material compuesto CF-HM 70%	1
3	TAPA	Aleación Al 7050	1
4	LINER	Polímero HDPE	1

1	1				
Ref.	Cant:	Material:	Modelo:	Peso:	Observaciones:
Proyecto:				Fecha	Nombre
Trabajo Final de Grado Grado Ingeniería Mecánica				25/7/20	I. Grueso
			Dibujado		
			Revisado		
Escala:			Proyección:		
Plano:			Denominación:		
Formato:			Ensamblaje sistema de almacenamiento		
1:18					
3/4					
A3					



1	1				
Ref.	Cant:	Material:	Modelo:	Peso:	Observaciones:
Proyecto:			Fecha		Nombre
Trabajo Final de Grado			25/7/20		I. Grueso
Grado Ingeniería Mecánica					
Escala:			Plano:		Formato:
			4/4		A3
Denominación:			Instalación sistema de almacenamiento de 2 depósitos		



CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK