



**Universidad
Europea**

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS

INDUSTRIALES

Mención Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE UN DEPÓSITO DE HIDRÓGENO
COMO COMBUSTIBLE PARA UN TREN DE ALTA
VELOCIDAD**

Alumno: D. PABLO ZAVALA SÁEZ

Director: D. CARLOS CASTELLOTE VARONA

JUNIO 2024

TÍTULO: DISEÑO DE UN DEPÓSITO DE HIDRÓGENO COMO
COMBUSTIBLE PARA UN TREN DE ALTA VELOCIDAD

AUTOR: PABLO ZAVALA SÁEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO: CARLOS CASTELLOTE VARONA

FECHA: 03 de junio de 2024

*Agradecimientos:
agradezco su apoyo a mis padres, a mi abuela Carmen, a Alejandro, a Arturo y a Natxo.*

RESUMEN

En esta memoria se presenta el estudio de un tanque hidrógeno, el cual sea capaz de funcionar a una presión de 700 bares, para equiparlo en una locomotora.

En primer lugar, se describe el hidrógeno como elemento y como combustible, y se explican las ventajas que este tiene respecto a los combustibles tradicionales. También se estudian los posibles materiales con los que conformar su capa intermedia, tomando a los materiales compuestos de fibra de carbono como la mejor opción.

Después se analizan los distintos materiales realizando la simulación de ensayos con SolidWorks, obteniendo resultados de tensiones de Von Mises, desplazamientos, deformaciones unitarias y factor de seguridad. Con todos los materiales estudiados, el depósito es viable, siendo la mejor opción el material compuesto con fibra de carbono IM10, teniendo el factor de seguridad más alto y las deformaciones más pequeñas.

Por último, se proponen dos futuras líneas de investigación, como son diseñar los soportes para acoplar el depósito a la locomotora o escoger los materiales óptimos para la capa interior y externa del depósito realizando un ensayo completo del depósito compuesto por las tres capas.

Palabras clave: hidrógeno, depósito, alta velocidad, fibra de carbono.

ABSTRACT

In this memory we present the study of a hydrogen tank, in which it be capable of working at a prepressure of 700 bar, to equipment in a locomotive.

In first place, it describes the hydrogen as an element and as a fuel, and explain the advantages respect the traditional fuels. Also, it will study the possible materials which conform the intermediate slade, taking the carbon fiber materials as the best option.

After this, it analyze the different materials making the simulation of the essay with SolidWorks, obtaining results of the Von Mises tensions, movements, unitary deformations and the security factor. With all of the materials study, the deposit is capable, being the best option the material compose by IM10 carbon fiber, having the highest security factor and the smallest unitary deformations.

At last, it is propose two future lines of investigation, as are desing the supports to acoplate the tank to the locomotive, or choose the best material to the internal and exterior slades of the tank, makin a complete essay of the deposit compose by the three slades.

Key words: hydrogen, tank, high speed, carbon fiber.

Índice

<i>Agradecimientos</i>	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	4
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO	12
1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	12
1.3 EL SECTOR FERROVIARIO	13
1.4 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	13
1.4.1 PROPIEDADES.....	13
1.4.2 OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO	14
1.4.3 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO	16
1.4.4 LA PILA DE HIDRÓGENO	17
1.4.5 VENTAJAS DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	19
1.5 TIPOS DE DEPÓSITOS.....	21
1.6 MATERIALES	24
1.7 TRENES DE HIDRÓGENO EN LA ACTUALIDAD.....	25
1.7.1 HYMPULSO.....	25
1.7.2 CORADIA ILINT.....	26
1.7.3 HYDRO FLEX.....	26
1.7.4 TALGO VITTAL ONE.....	27
1.7.5 FCH2RAIL	28
1.7.6 MIREO PLUS H.....	28
1.7.7 HYBARI	29
Capítulo 2. DIMENSIONAMIENTO PREVIO	30
2.1 MATERIALES	31
2.2 VOLUMEN DEL TANQUE.....	33
Capítulo 3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	35

3.1	SUJECCIÓN DEL DEPÓSITO.....	35
3.2	APLICACIÓN DE LA PRESIÓN.....	36
3.3	MALLADO.....	36
3.4	VARIABLES A ESTUDIAR.....	37
3.4.1	TENSIONES DE VON MISES.....	37
3.4.2	DESPLAZAMIENTOS.....	38
3.4.3	DEFORMACIONES UNITARIAS.....	38
3.4.4	FACTOR DE SEGURIDAD.....	39
Capítulo 4.	RESULTADO DE LOS ESTUDIOS.....	40
4.1	AS4.....	40
4.1.1	TENSIÓN DE VON MISES.....	40
4.1.2	Desplazamientos.....	42
4.1.3	DEFORMACIONES UNITARIAS.....	42
4.1.4	FACTOR DE SEGURIDAD.....	44
4.2	AS7.....	45
4.2.1	DESPLAZAMIENTOS.....	45
4.2.2	DEFORMACIONES UNITARIAS.....	45
4.2.3	FACTOR DE SEGURIDAD.....	47
4.3	IM6.....	48
4.3.1	DESPLAZAMIENTOS.....	48
4.3.2	DEFORMACIONES UNITARIAS.....	48
4.3.3	FACTOR DE SEGURIDAD.....	50
4.4	IM7.....	51
4.4.1	DESPLAZAMIENTOS.....	51
4.4.2	DEFORMACIONES UNITARIAS.....	51
4.4.3	FACTOR DE SEGURIDAD.....	53
4.5	IMA.....	54
4.5.1	DESPLAZAMIENTOS.....	54
4.5.2	DEFORMACIONES UNITARIAS.....	54
4.5.3	FACTOR DE SEGURIDAD.....	56
4.6	IM8.....	57
4.6.1	DESPLAZAMIENTOS.....	57

4.6.2	DEFORMACIONES UNITARIAS	57
4.6.3	FACTOR DE SEGURIDAD	59
4.7	IM10	60
4.7.1	DESPLAZAMIENTOS.....	60
4.7.2	DEFORMACIONES UNITARIAS	60
4.7.3	FACTOR DE SEGURIDAD	62
4.8	RESUMEN DE RESULTADOS	63
Capítulo 5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
5.1	TAMAÑO Y PESO.....	64
5.2	DESPLAZAMIENTOS	64
5.3	DEFORMACIONES UNITARIAS.....	64
5.4	FACTOR DE SEGURIDAD	65
Capítulo 6.	CONCLUSIONES	66
Capítulo 7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	68
ANEXOS	70
PRESUPUESTO	120
BIBLIOGRAFÍA	122

Índice de Figuras

Figura 1: Red de alta velocidad en Europa (El Español, 2018).....	13
Figura 2: Procesos que requieren aporte de energía térmica. Fuente [3]	15
Figura 3: Procesos que requieren aporte de electricidad o luz solar. Fuente [3]	15
Figura 4: Diagrama densidad-temperatura del hidrógeno. Fuente [5].....	16
Figura 5: Funcionamiento de una pila PEM. Fuente [7]	18
Figura 6: Pila PEM instalada en un tren Alstom. Fuente: Alstom.	18
Figura 7: Velocidades máximas, Tipos de Electrificación y Catenarias. Fuente [11]	19
Figura 8: Funcionamiento tren de hidrógeno. Fuente: La Vanguardia.	20
Figura 9: Tipos de depósito. Fuente [15].....	21
Figura 10: Depósitos tipo 1. Fuente: apilados.com	21
Figura 11: Depósito tipo 2. Fuente: apilados.com	22
Figura 12 Depósito tipo III. Fuente: apilados.com	22
Figura 13: Depósito Tipo IV. Fuente: apilados.com.....	23
Figura 14: Tanque de hidrógeno tipo IV. Fuente [9]	24
Figura 15: Talgo 250. Fuente: Talgo.	25
Figura 16: Tren Corada iLint. Fuente: Alstom.....	26
Figura 17: Hydro Flex. Fuente: hibridosyelectricos.com.....	27
Figura 18: Talgo Vittal One. Fuente: Talgo	27
Figura 19: Civia de Hidrógeno. Fuente: Adif.....	28
Figura 20: Mireo Plus H. Fuente: Siemens.....	29
Figura 21: Hybari. Fuente: RailTech.com.....	29
Figura 22: Talgo 350. Fuente: Talgo.	30
Figura 23: Sujeción del depósito	36
Figura 24: Distribución de la presión	36
Figura 25: Mallado del depósito	37
Figura 26: Mallado del depósito en detalle	37
Figura 27: Deformación Unitaria.....	38
Figura 28: Tensión de Von Mises AS4	40
Figura 29: Detalle de tensión de Von Mises AS4	41
Figura 30: Desplazamientos AS4	42
Figura 31: Deformaciones unitarias AS4	43
Figura 32: Deformación máxima unitaria AS4w	43
Figura 33: Factor de seguridad AS4.....	44
Figura 34: Factor de seguridad mínimo AS4.....	44
Figura 35: Desplazamientos AS7	45

Figura 36: Deformaciones unitarias AS7	46
Figura 37: Deformación unitaria máxima AS7	46
Figura 38: Factor de seguridad AS7.....	47
Figura 39: Factor de seguridad mínimo AS7	47
Figura 40: Desplazamientos IM6.....	48
Figura 41: Deformaciones unitarias IM6.....	49
Figura 42: Deformación unitaria máxima IM6.....	49
Figura 43: Factor de seguridad IM6	50
Figura 44: Factor de seguridad mínimo IM6.....	50
Figura 45: Desplazamientos IM7	51
Figura 46: Deformaciones unitarias IM7.....	52
Figura 47: Deformación unitaria máxima IM7.....	52
Figura 48: Factor de seguridad IM7	53
Figura 49: Factor de seguridad mínimo IM7.....	53
Figura 50: Desplazamientos IMA	54
Figura 51: Deformaciones unitarias IMA	55
Figura 52: Deformación unitaria máxima IMA	55
Figura 53: Factor de seguridad IMA.....	56
Figura 54: Factor de seguridad mínimo IMA	56
Figura 55: Desplazamientos IM8.....	57
Figura 56: Deformaciones unitarias IM8.....	58
Figura 57: Deformación unitaria máxima IM8.....	58
Figura 58: Factor de seguridad IM8	59
Figura 59: Factor de seguridad mínimo IM8.....	59
Figura 60: Desplazamientos IM10.....	60
Figura 61: Deformaciones unitarias IM10.....	61
Figura 62: Deformación unitaria máxima IM10.....	61
Figura 63: Factor de seguridad IM10	62
Figura 64: Factor de seguridad mínimo IM10.....	62
Figura 65: Estudio Von Mises con soportes	68
Figura 66: Detalle estudio Von Mises con soportes	69

Índice de Tablas

Tabla 1: El hidrógeno en números. Fuente [2]	14
Tabla 2: Equivalencias caudal de hidrógeno-producción eléctrica. Fuente [2].	20
Tabla 3: Comparativa hidrógeno-otros combustibles. Fuente [2]	20
Tabla 4: Características de los tanques de hidrógeno. Fuente: elaboración propia.	23
Tabla 5: Características del Talgo 350. Fuente [11].	31
Tabla 6: Características materiales compuestos de fibra de carbono. Fuente: elaboración propia a partir de [12].	32
Tabla 7: Resumen de resultados.	63
Tabla 8: Costes de ingeniería.	120
Tabla 9: Precios fibras de carbono.	120
Tabla 10: Coste fibra de carbono por depósito.	121

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Tras acabar mis estudios de ingeniería mecánica, entré a trabajar como becario en Talgo. Mi interés por los trenes y el sector ferroviario en general había sido nulo hasta el momento. Sin embargo, durante mis años en la universidad, siempre he sentido un especial interés por la energía, y por cómo esta se transforma para ser utilizada en nuestro beneficio. Incluso en la ESO ya me quedé reflexionando con la frase de “la energía ni se crea ni se destruye, se transforma”. Dicho esto, y ya en Talgo, no tardé en plantearme nuevas formas de obtener la energía necesaria para impulsar un tren.

1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

En este proyecto se va a diseñar un depósito de fibra de carbono para el almacenamiento de hidrógeno como combustible para impulsar un tren de alta velocidad. Para ello, se hará un diseño previo, el cual se evaluará mediante elementos finitos (Solid Works) para analizar su viabilidad y posibles modificaciones.

1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

- Capítulo 1: Se describe el sector ferroviario actual, la obtención del hidrógeno, su almacenamiento y sus ventajas como combustible. También se habla de los tipos de depósitos, de materiales y de los trenes de hidrógeno que hay en la actualidad.
- Capítulo 2: Se dimensiona el tanque, escogiendo materiales y calculando su volumen.
- Capítulo 3: Se describe el procedimiento metodológico que se va a seguir en los estudios con SolidWorks.
- Capítulo 4: Se muestran y comentan los resultados de tensiones de Von Mises, desplazamientos, deformaciones unitarias y factor de seguridad de todos los materiales estudiados.
- Capítulo 5: Se analizan los resultados obtenidos en el Capítulo 4.
- Capítulo 6: Se escriben las conclusiones del proyecto y se analiza si se han cumplido los objetivos.
- Capítulo 7: Se proponen futuras líneas de investigación.

1.3 EL SECTOR FERROVIARIO

Es importante destacar que el sector ferroviario está en auge y tiene una gran relevancia si queremos proteger al medio ambiente a la vez que mejoramos las conexiones nacionales e internacionales

El jueves 3 de junio de 2021, en Luxemburgo, en una reunión compuesta por los 27 ministros de Transporte de la Unión Europea, se concluyó con lo siguiente en el contexto del Pacto Verde Europeo de la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente:

“La necesidad tanto de luchar por una movilidad climáticamente neutra y respetuosa con el medio ambiente como de garantizar un sistema de transporte resiliente e interconectado, especialmente en tiempos de crisis, como se ha demostrado durante la pandemia de la COVID-19, coloca a los ferrocarriles en una posición clave dentro de la futura oferta de transporte” [1].

Los políticos afirmaron que el sector ferroviario sólo emite el 0,4 % de las emisiones de CO₂ generadas por el transporte, pero que supone el 8 % del transporte de personas y el 19 % del de mercancías en Europa.



Figura 1: Red de alta velocidad en Europa (El Español, 2018)

1.4 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

1.4.1 PROPIEDADES

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y no tóxico, y es el gas más sencillo de todos los elementos. Su átomo está formado por un solo protón y un

electrón, y al no tener neutrones, es también el elemento más ligero, unas 15 veces más ligero que el aire [2]. En la tabla 1 se exponen los datos básicos de dicho elemento.

Densidad	0,0899 kg/Nm ³ (gas) 0,0708 kg/l (líquido)
Poder calorífico	inferior: 120 MJ/kg Superior: 141,86 MJ/kg
Límites de inflamabilidad (concentración de H₂ en aire)	4,0-75,0 %
Límites de detonación	18,3-59,0 %
Coefficiente de difusión	0,61 cm ² /s

Tabla 1: El hidrógeno en números. Fuente [2]

Se trata del elemento más abundante en el universo, aunque en la Tierra no se encuentra en estado libre, sino formando compuestos orgánicos unido al carbono, o formando agua con el oxígeno. Es decir, no se trata de una fuente de energía primaria, sino de un portador de energía, también llamado “vector energético”.

1.4.2 OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO

Para producir el hidrógeno, hay que separarlo de los compuestos de los que forma parte, para lo que se requiere un aporte de energía (fósil, renovable o nuclear).

Las principales fuentes de obtención del hidrógeno son [3]:

- Recursos fósiles: derivados del petróleo, gas natural y carbón.
- Recursos renovables: agua y biomasa.

Las técnicas empleadas para la producción del hidrógeno son [3]:

- Procesos de conversión química: reformado, gasificación y pirólisis.
- Procesos termolíticos: termólisis directa y por ciclos termoquímicos.
- Procesos electrolíticos: electrólisis.
- Procesos biológicos: fermentación y digestión anaerobia.
- Procesos fotónicos: fotoelectrólisis, fotobiólisis y fotocatalisis.

En la figura 2 se muestran los procesos de producción de hidrógeno que requieren aporte de energía térmica y en la figura 3 los procesos que requieren aporte de electricidad o luz solar.

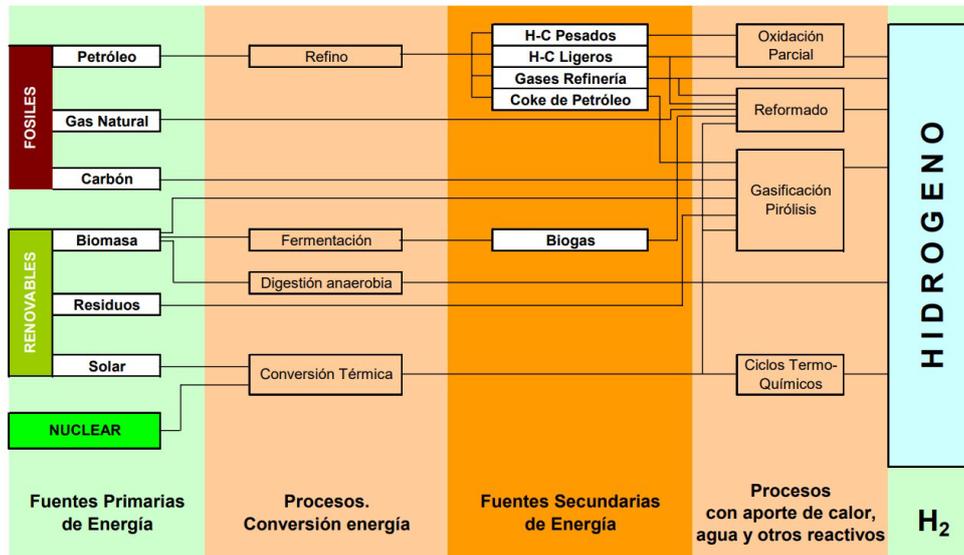


Figura 2: Procesos que requieren aporte de energía térmica. Fuente [3]

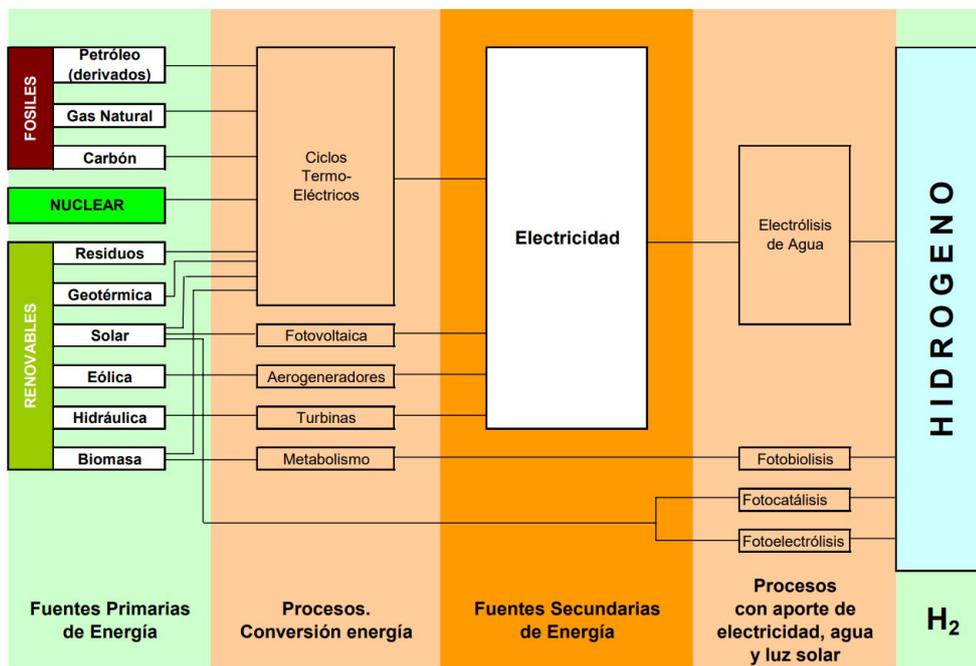


Figura 3: Procesos que requieren aporte de electricidad o luz solar. Fuente [3]

1.4.3 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

El principal reto con el hidrógeno es su almacenamiento, ya que, debido a su baja densidad a temperatura ambiente, ocupa un gran volumen que es difícil de gestionar.

Actualmente se están investigando numerosos métodos para conseguir almacenar el mayor hidrógeno ocupando el menor espacio posible. Podemos diferenciar dos grandes métodos de almacenamiento: almacenamiento físico y almacenamiento sólido o almacenamiento mediante materiales. En lo que respecta al almacenamiento físico encontramos el hidrógeno comprimido, el hidrógeno criocomprimido y el hidrógeno líquido. En cuanto al almacenamiento mediante materiales se encuentra el uso de hidruros metálicos u orgánicos, materiales absorbentes o el empleo de compuestos químicos ricos en hidrógeno. El almacenamiento mediante materiales aún no tiene el grado de desarrollo necesario, pero se presenta como una alternativa viable para el futuro. Hoy en día, los métodos de almacenamiento físicos son los más habituales y en los que hay un mayor grado de avance, ya que son muy parecidos a los utilizados con otros gases [4].

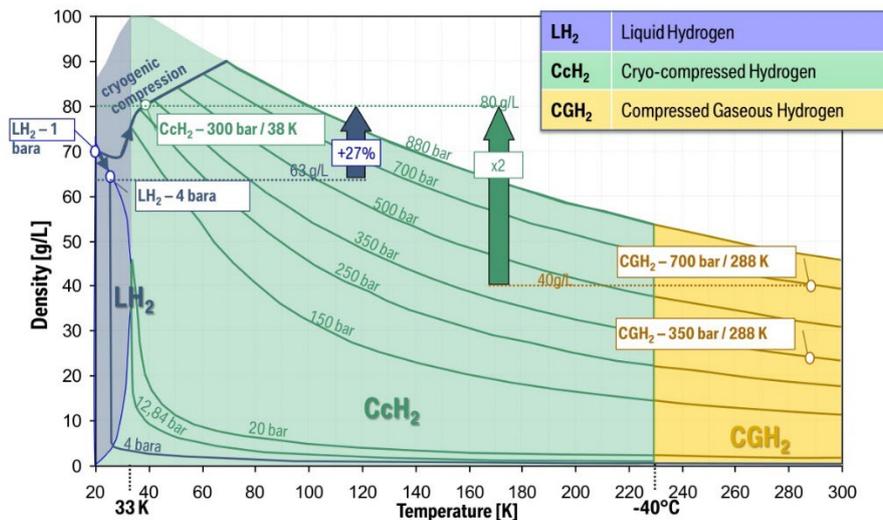


Figura 4: Diagrama densidad-temperatura del hidrógeno. Fuente [5]

Como se puede ver en la figura 4, el hidrógeno líquido y criocomprimido tienen una densidad muy superior al hidrógeno comprimido. Sin embargo, hasta el día de hoy no se han conseguido resolver los problemas que llevan asociados, por lo que se encuentran en una fase experimental. Por tanto, lo más empleado en la actualidad es el hidrógeno comprimido, y será para éste para el que realizaremos el diseño y las simulaciones de nuestro depósito.

En nuestro caso, el hidrógeno se va a almacenar a una presión de unos 700 bar en tanques especiales. Por esta razón, los depósitos deberán estar muy bien preparados para tales condiciones. Tienen que resistir a grandes tensiones y a un gran número de ciclos a fatiga por la carga y descarga del depósito. Hay que tener en cuenta también que, debido al pequeño tamaño de las moléculas de hidrógeno, estas pueden atravesar distintos materiales, por lo que deberá contar con una capa aislante en su interior. Además, deben estar preparados para recibir impactos en caso de accidente, así como tener resistencia a la abrasión.

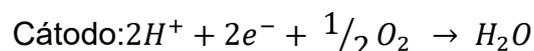
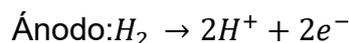
1.4.4 LA PILA DE HIDRÓGENO

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico formado por una pila galvánica, la cual convierte la energía química del combustible en energía eléctrica. Esto se consigue suministrando de forma continua en los dos electrodos de la pila el combustible (H_2) y el oxidante (O_2), teniendo lugar una reacción química en un medio electrolítico.

Los principales tipos de pilas son:

- Pilas de membrana de intercambio protónico (PEM)
- Pilas de metanol
- Pilas alcalinas
- Pilas de ácido fosfórico
- Pilas de carbonato fundido
- Pilas de óxido sólido

El tipo de pila que se utiliza en el sector ferroviario es la de membrana de intercambio protónico (PEM), ya que es ligera en relación a su potencia y se adapta bien a las variaciones de demanda energética. Las reacciones químicas que tienen lugar son las siguientes:



Su funcionamiento es:

1. En el ánodo se rompe la molécula de H_2 , separándose los protones H^+ de los electrones e^- , empleándose como catalizador el platino.
2. De manera simultánea, los protones atraviesan la membrana para llegar al cátodo y los electrones circulan por el circuito eléctrico.
3. En el cátodo, mediante un agente oxidante (oxígeno), los electrones se reintegran en una molécula (H_2O).

En la figura 5 se ve de manera esquemática el funcionamiento de una pila PEM, y en la figura 6 se ve una pila PEM real instalada en un tren [6].

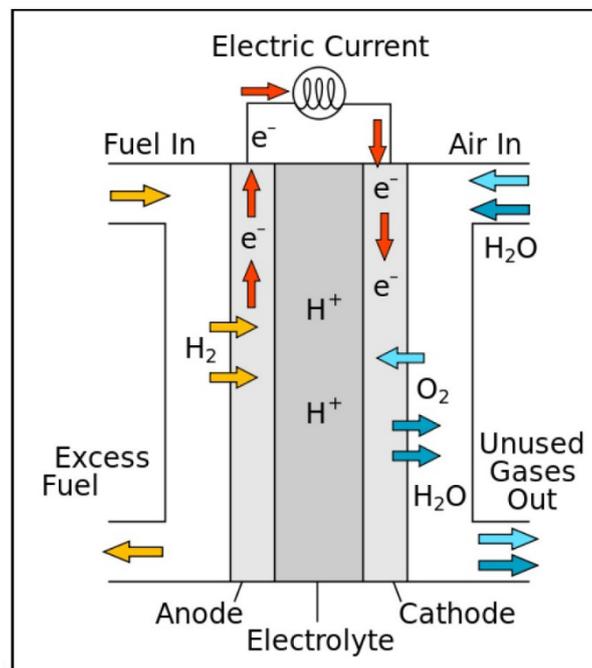


Figura 5: Funcionamiento de una pila PEM. Fuente [6]



Figura 6: Pila PEM instalada en un tren Alstom. Fuente: Alstom.

1.4.5 VENTAJAS DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

Dicho esto, y treinta años después de la entrada en España de la alta velocidad, se pretende poner en circulación trenes impulsados por locomotoras de hidrógeno.

Es importante destacar que, en el sector ferroviario, el hidrógeno no es sólo una manera de reducir emisiones contaminantes, si no que permite a los trenes circular por vías que no hayan sido electrificadas, como, por ejemplo, la línea hacia Extremadura (ver figura 7).

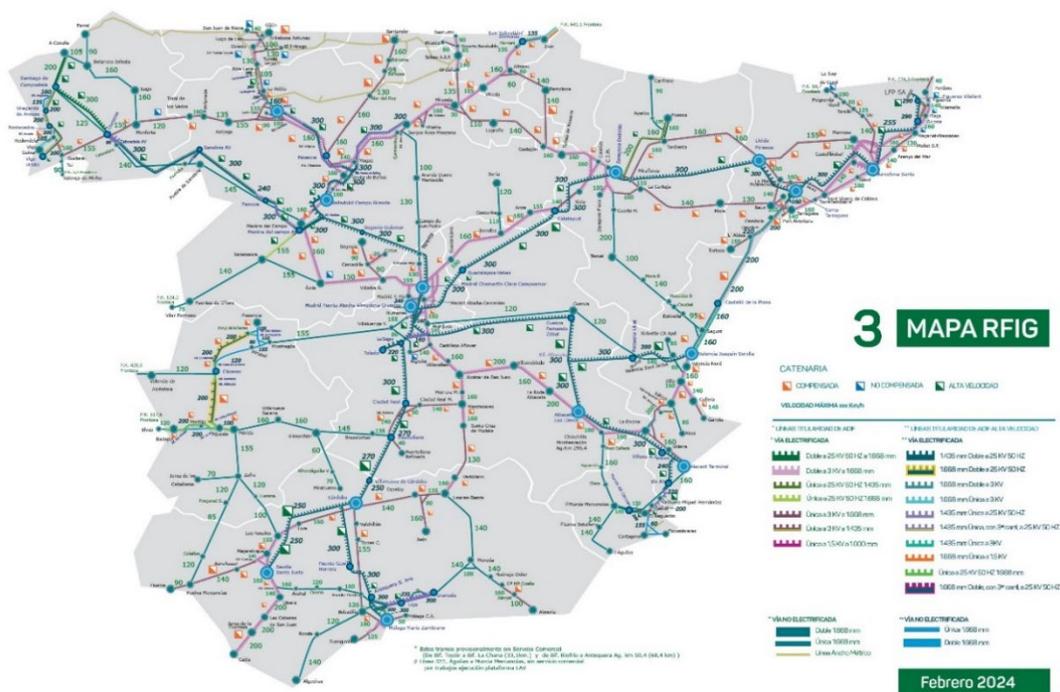


Figura 7: Velocidades máximas, Tipos de Electrificación y Catenarias. Fuente [7]

Esto es debido a que las locomotoras de hidrógeno, pese a ser eléctricas, obtienen la energía de las pilas de combustible. En el interior de estas pilas, se une el oxígeno con el hidrógeno, produciéndose una corriente eléctrica, y, como desecho, agua (ver figura 8). Por tanto, lo único que se emite a la atmosfera es vapor de agua, suponiendo este sistema una alternativa libre de emisiones y, en consecuencia, una reducción de la huella de carbono.

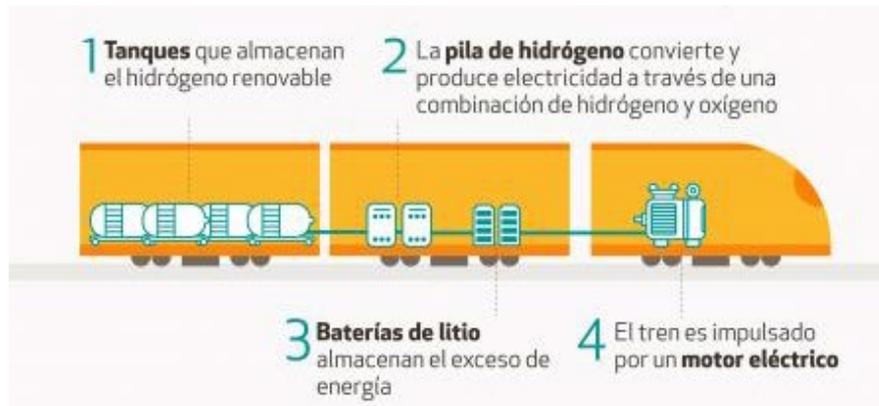


Figura 8: Funcionamiento tren de hidrógeno. Fuente: La Vanguardia (8).

Además, el hidrógeno presenta otra ventaja sobre los combustibles tradicionales, y es que, como se ve en la tabla 2 y 3, es capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que sus alternativas: 33,33 kWh/kg frente a los 13,9 kWh/kg del gas natural o frente a los 12,4 kWh/kg del petróleo [2].

H ₂ (kg/h)	H ₂ gas (Nm ³ /h)	H ₂ líquido (l/h)	Energía (kWh)
1	11,2	14,12	33,33
0,0899	1	1,270	3,00
0,0708	0,788	1	2,359
0,0300	0,333	0,424	1

Basadas en poder calorífico inferior

Tabla 2: Equivalencias caudal de hidrógeno-producción eléctrica. Fuente [2]

HIDRÓGENO	GASOLINA	GASÓLEO	GAS NATURAL*	METANO	METANOL
1 kg	2,78 kg	2,80 kg	2,54-3,14 kg	2,40 kg	6,09 kg
1 litro (líquido)	0,268 litros	0,236 litros	-----	-----	0,431 litros
1 litro (gas) **	0,097 litros	0,085 litros	0,30-0,35 litros	0,240 litros	0,191 litros

*dependiendo de la composición del GN ** todos los gases comprimidos a 350 bares

Tabla 3: Comparativa hidrógeno-otros combustibles. Fuente [2]

Por otro lado, es importante destacar que el hidrógeno se puede obtener desde una gran amplitud de fuentes naturales, por lo que no haría falta importarlo, como si se hace en España con el gas o el petróleo. Además, a diferencia de la electricidad, se puede almacenar con muchísimas menos pérdidas, lo que lo convierte en un vector energético excepcional.

1.5 TIPOS DE DEPÓSITOS

Como se ha comentado anteriormente, el método más extendido para almacenar hidrógeno es mediante hidrógeno comprimido a alta presión en tanques. En la figura 9 se pueden ver los 4 tipos de depósitos que se han desarrollado hasta el momento y que se describirán a continuación [8]

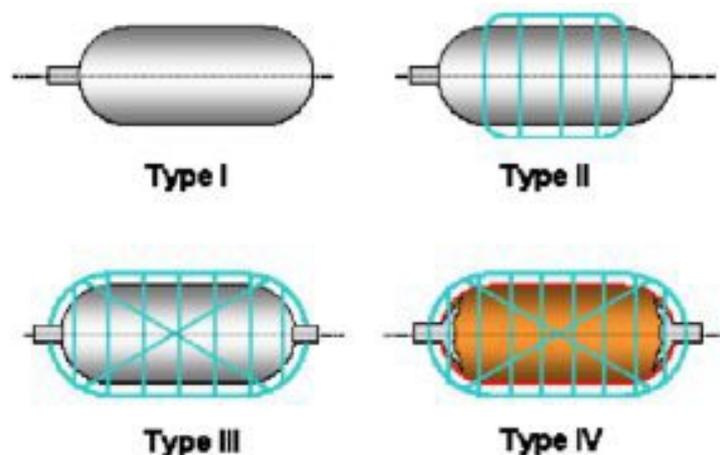


Figura 9: Tipos de depósito. Fuente [8]

Los de Tipo I son depósitos fabricados íntegramente en metal. Son utilizados para almacenar hidrógeno de uso industrial, con una presión entre 150 y 300 bares. Son los depósitos más extendidos debido a su bajo coste, pero inviables para vehículos debido a su alto peso (figura 10).



Figura 10: Depósitos tipo 1. Fuente: apilados.com

Los de Tipo II son los más resistentes. Están fabricados con un aro de revestimiento metálico envuelto por un compuesto de fibra de carbono o de vidrio. Su principal uso es en hidrolineras, debido a que aguantan altas presiones de hasta 1000 bares (figura 11).



Figura 11: Depósito tipo 2. Fuente: apilados.com

Respecto a los tanques de Tipo III, constan de un revestimiento interno metálico para evitar fugas del hidrógeno, envuelto a su vez por materiales compuestos que soportan los esfuerzos mecánicos. Debido a estos materiales son más ligeros que los de tipo I y II, y aguantan presiones de entre 500 y 700 bares (figura 12).



Figura 12 Depósito tipo III. Fuente: apilados.com

Los tipo IV son los más avanzados de todos. Su capa interna, para evitar la difusión del gas, es una camisa polimérica. A su vez, dicha camisa está envuelta por un compuesto de fibra de carbono para soportar los esfuerzos mecánicos, finalmente, se recubren de fibra de vidrio. Son los depósitos con mejor relación resistencia/peso, soportando hasta 700 bares, lo que los hacen ideales para su aplicación en el sector del transporte, pero tienen la contrapartida de ser los más costosos (figura 13).

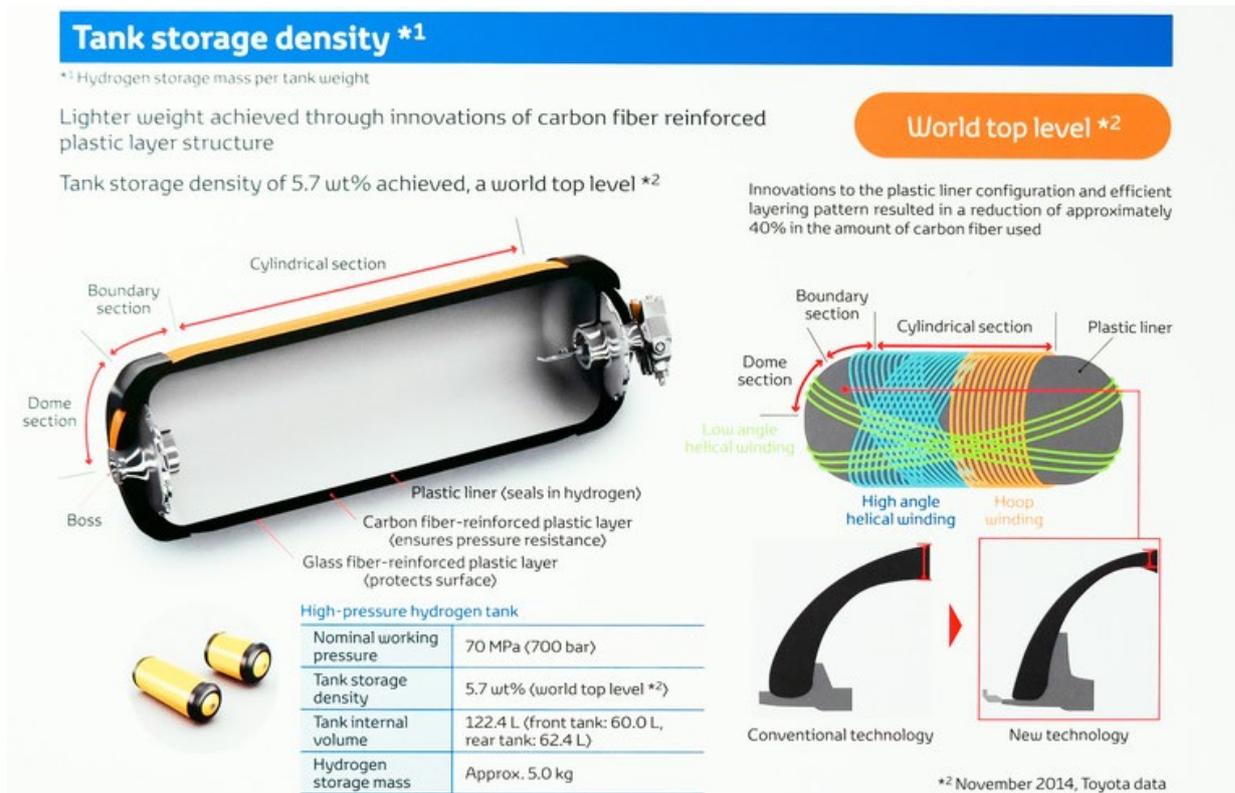


Figura 13: Depósito Tipo IV. Fuente: apilados.com

A continuación, en la tabla 4 se muestra un resumen de los tipos y sus características.

TIPO	I	II	III	IV
Composición	Metal (acero o aluminio)	Metal (capa gruesa) + Compuesto fibra de carbono o de vidrio	Metal (capa fina) + Compuesto fibra de carbono	Capa polimérica + Compuesto fibra de carbono + Fibra de vidrio
Presión de trabajo	150-300 bar	Hasta 1000 bar	500-700 bar	Hasta 700 bar

Tabla 4: Características de los tanques de hidrógeno. Fuente: elaboración propia.

1.6 MATERIALES

Nuestro tanque de hidrógeno será de tipo IV (figura 14), por lo que está compuesto por tres capas que se exponen a continuación, cada una de un material distinto y con una función específica:

- **Capa interna:**
Como se ha comentado anteriormente, es necesario aislar el depósito. El aislante óptimo para esta función es emplear una camisa polimérica de alta densidad [10], que actúa como barrera ante la difusión del gas.
- **Capa intermedia:**
Esta es la capa más importante, ya que es la responsable de mantener la rigidez estructural de nuestro tanque. Se pueden utilizar diversos metales, pero teniendo en cuenta la presión a soportar, quedarían unas paredes muy gruesas, lo que haría que aumentara mucho en peso y en tamaño. Por ello, vamos a optar por materiales compuestos con fibra de carbono, los cuales detallaremos más adelante en el dimensionamiento del depósito.
- **Capa exterior:**
Es la capa que está en contacto con el exterior y debe proteger al depósito de abrasiones y pequeños impactos. La fibra de vidrio es la mejor alternativa.

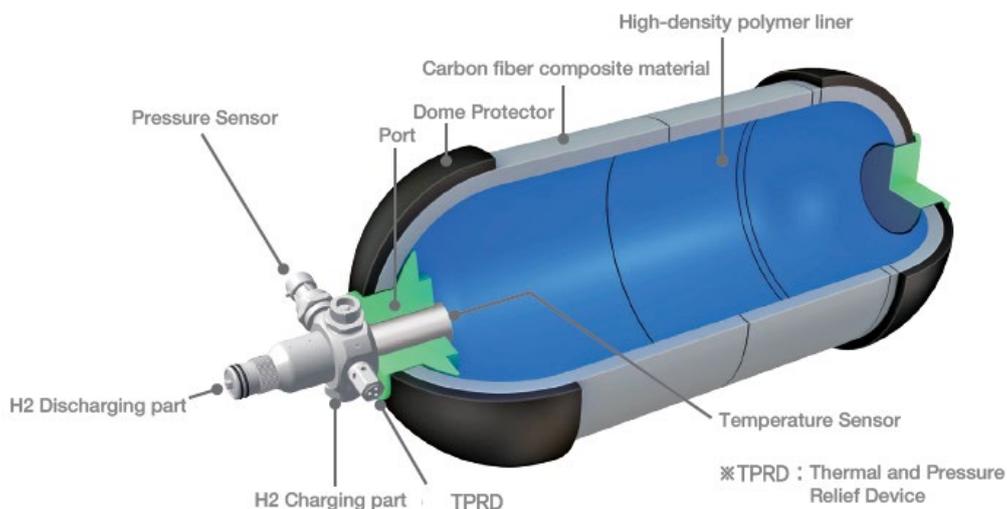


Figura 14: Tanque de hidrógeno tipo IV. Fuente [9]

1.7 TRENES DE HIDRÓGENO EN LA ACTUALIDAD

Una vez entendido el funcionamiento del hidrógeno como combustible en el sector ferroviario, vamos a ver algunos de los proyectos que se están desarrollando actualmente.

1.7.1 HYPULSO

Hypulso es un proyecto compuesto por diez empresas españolas entre las que destacan Talgo, Repsol, Ingeteam o Sener.

El proyecto tiene como propósito desarrollar un conjunto de tecnologías para luego aplicarlas al tren ya existente Talgo 250. Dichas tecnologías tendrán un carácter integral, afectando a toda la cadena del hidrógeno renovable, desde la generación hasta el consumo, pasando por el transporte y el almacenamiento, y siempre pensando en su aplicación al sector ferroviario. Además, se analizarán las consecuencias que tendrá la futura transición sobre la infraestructura ferroviaria que gestiona Adif, desde las instalaciones de mantenimiento hasta las vías.

En cuanto al tren, se trata de una adaptación del Talgo 250 híbrido, para convertirlo en un tren híbrido el cual pueda alimentarse de corriente mediante su catenaria, pero que pueda circular a base de hidrógeno en las vías que no estén electrificadas. Esto se consigue sustituyendo la unidad diésel de dicho tren, por el sistema de hidrógeno.

Es importante destacar que la clave de este proyecto es su perspectiva global, analizando cómo afecta la integración del hidrógeno en el sector ferroviario en todos sus niveles.



Figura 15: Talgo 250. Fuente: Talgo.

1.7.2 CORADIA ILINT

Alstom es la compañía más se ha centrado en el uso de la pila de hidrógeno tomando como base su tren de corto y medio recorrido Coradia Lint.

En septiembre de 2018 comenzó a hacer pruebas con viajeros en la línea Buxtehude – Bremervörde – Bremerhaven – Cuxhaven, convirtiéndose de esta manera en el primer tren de hidrógeno en el mundo en servicio comercial. El tren tiene una velocidad máxima de 140 Km/h y una autonomía de 1000 km.

Debido al éxito de las pruebas, la operadora EVB encargó 14 unidades que fueron entregadas en el año 2021, y en el año 2019 la operadora RMV encargó la fabricación de otras 27 unidades. Además, esta tecnología está también implementada en 6 trenes Coradia Stream que Alstom ha vendido a la operadora italiana FNM.



Figura 16: Tren Corada iLint. Fuente: Alstom

1.7.3 HYDRO FLEX

En junio de 2019, se presentó, de la mano de la Universidad de Birmingham y Porterbrook, lo que sería el primer tren de hidrógeno británico. A diferencia del Coradia iLint, el Hydro flex es una adaptación de un tren ya existente y fabricado en 1987 de la serie 319.

Tras varios meses de pruebas en vía cerrada, en septiembre de 2020 comenzó a circular por las vías de Network Rail.

Este tren es híbrido, ya que, aparte de impulsarse con hidrógeno, también puede recibir energía eléctrica tanto del pantógrafo como del tercer raíl.



Figura 17: Hydro Flex. Fuente: hibridosyelectricos.com

1.7.4 TALGO VITAL ONE

En septiembre de 2020 talgo presentó su propuesta de hidrógeno, y comenzó las pruebas dinámicas en mayo de 2022.

Al igual que el Hydro Flex, se trata de un tren híbrido, pudiendo circular por vías electrificadas alimentándose directamente de corriente eléctrica a través de un pantógrafo o mediante hidrógeno.

Está diseñado para circular a una velocidad máxima de 220 km/h alimentándose con el pantógrafo y de 160km/h en modo hidrógeno. La pila de hidrógeno consume tan solo 0,25 kg/km y su autonomía es de 800 km sin electrificación.



Figura 18: Talgo Vittal One. Fuente: Talgo

1.7.5 FCH2RAIL

El proyecto FCH2RAIL está siendo llevado a cabo por una agrupación de empresas entre las que destacan CAF, Toyota, Renfe o Adif.

CAF ya fabrica autobuses de hidrógeno a través de su filial Solaris, por lo que ya tiene experiencia con el hidrógeno en el sector del transporte.

Se trata de una adaptación del tren de CAF Civia 463-099 para funcionar con hidrógeno. En noviembre de 2023 comenzó las pruebas en vía real entre Torralba y Soria, y en abril de 2024 circuló en Portugal por la línea Miño, entre Valenca y Nueve, convirtiéndose en el primer tren de hidrógeno de Portugal. Gracias al éxito de esta última prueba, FCH2RAIL ha conseguido autorización para operar en Portugal.



Figura 19: Civia de Hidrógeno. Fuente: Adif.

1.7.6 MIREO PLUS H

Siemens junto a la DB han desarrollado el Mireo Plus H. Se trata de una versión de su tren Mireo Plus que puede circular por vías sin electrificar mediante hidrógeno y con electricidad captada con su pantógrafo por las que si lo estén. Su autonomía con hidrógeno es de entre 1000 y 1200 kilómetros.

En septiembre de 2023 se realizaron las primeras pruebas en vía abierta, y se planea su puesta en servicio a mediados de 2024.



Figura 20: Mireo Plus H. Fuente: Siemens.

1.7.7 HYBARI

Proyecto de JR East, Toyota e Hitachi. Se trata de un tren con unas prestaciones más limitadas que los anteriores. Cuenta con una velocidad máxima de 100 Km/h y una autonomía de 140 km.

Comenzó las pruebas en vía abierta en febrero de 2022.



Figura 21: Hybari. Fuente: RailTech.com

Capítulo 2. DIMENSIONAMIENTO PREVIO

En este apartado vamos a dimensionar el depósito de manera analítica, basándonos en datos y necesidades del tren en su conjunto. Como base vamos a tomar el Talgo 350 (figura 22).



Figura 22: Talgo 350. Fuente: Talgo.

En la tabla 5 se muestran las características del Talgo 350 [11]:

AVE 350	
Velocidad Máxima	363 km/h
Velocidad Comercial	330 km/h
Capacidad	Aprox. 400
Configuración	2 cabezas 12-13 coches (M-12/13R-M) Según necesidades del cliente
Ancho de vía (mm)	1435

Altura de piso (mm)	760 a cabeza carril
Longitud (m)	200
Ancho de la caja de los coches (mm)	2942
Peso en vacío (ton)	322 T
nº de EJES	21
Pasajeros/ WC	31-40
Tensión	25 Kv 50 Hz (AC) otras tensiones según necesidades del cliente
Potencia	2 x 4.000 kW (24.7 kW/t)
Freno	MOTRIZ Freno regenerativo, reostático y neumático COCHES Freno neumático
Normativa	UIC/ETI

Tabla 5: Características del Talgo 350. Fuente [11].

2.1 MATERIALES

En este estudio nos vamos a centrar en la capa intermedia, ya que es la encargada de mantener la rigidez estructural del tanque. Como se comentó anteriormente, vamos a descartar el uso de aluminios y aceros, ya que, debido a la alta presión requerida, las propiedades mecánicas de estos materiales nos obligarían a tener unas paredes muy gruesas y pesadas. Por tanto, nos vamos a centrar en materiales compuestos de fibra de carbono.

En concreto vamos a utilizar el material compuesto HexPly 8552. Este material está compuesto por una base de resina epoxi (40%) y una matriz de fibra de carbono (60%).

A continuación, en la tabla 6, se muestran las características en función del tipo de fibra de carbono que contenga:

Material compuesto con:	Límite elástico (MPa)	Índice de Young (GPa)	Densidad (g/cm ³)
Fibra de carbono AS4	2137	135	1,594
Fibra de carbono AS7	2344	133	1,594
Fibra de carbono IM6	2758	159	1,576
Fibra de carbono IM7	2723	164	1,588
Fibra de carbono IMA	2935	176	1,594
Fibra de carbono IM8	2963	181	1,594
Fibra de carbono IM10	3310	190	1,594

Tabla 6: Características materiales compuestos de fibra de carbono. Fuente: elaboración propia a partir de [12]

En cuanto al número de Poisson, vamos a tomar para todos los materiales un valor de 0,336. [13]

Ahora, mediante la ecuación de Laplace-Young, podemos aproximar la tensión que deberán soportar las paredes del cilindro del depósito para una presión de 700 bar:

$$\sigma = (P \cdot r) / t$$

P = presión

r = radio del cilindro

t = espesor de la pared

Como datos de partida vamos a tomar un espesor de 8 mm y un radio de 250 mm, con los que se obtendrá, en un principio, un depósito en un formato alargado. Estas medidas son para el dimensionamiento previo que podrá ser modificado posteriormente según los resultados obtenidos en las simulaciones que se realizarán.

$$\sigma = (70 \cdot 250) / 8 = 2187,5 \text{ MPa}$$

Por tanto, analizando el valor obtenido, según la tabla 6, podríamos hacer uso de todas las opciones a excepción de la fibra de carbono AS4.

2.2 VOLUMEN DEL TANQUE

Para estimar el volumen de nuestro depósito, lo primero que debemos tener en cuenta, es la demanda de hidrógeno de nuestro tren. Según el estudio de García Álvarez: "Anales de Mecánica y Electricidad" (2007) [14], el Talgo 350 consumió 8561 kWh en un trayecto Madrid-Sevilla (470,5 Km). Por tanto:

$$\text{Consumo Talgo 350} = 1819,6 \text{ kWh/100km}$$

Por otro lado, sabemos que el hidrógeno nos otorga una energía de 33,33 kWh/Kg. Sin embargo, hay que tener en cuenta el rendimiento de una pila de hidrógeno, que es de un 60% [15]. Por tanto:

$$\text{Relación energía-masa real hidrógeno} = 0,6 \cdot 33,33 \text{ kWh/Kg} = 20 \text{ kWh/Kg}$$

Es decir, con ambos datos que hemos calculado, obtenemos que:

$$\text{Kg H}_2 \text{ necesario para 100 Km} = 1819,6/20 = 90,98 \text{ Kg}$$

Teniendo en cuenta que la densidad del H₂ a 700 bar y temperatura ambiente es de 0,045 Kg/L:

$$\text{Volumen H}_2 \text{ necesario para 100 Km} = 90,98/0,045 = 2021,78 \text{ L}$$

Por tanto, ya sabemos el volumen que debe poder albergar nuestro depósito.

Si tenemos en cuenta que el radio del cilindro es de 250 mm, y que los extremos del depósito son casquetes semiesféricos, podemos deducir lo siguiente:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l + (4/3) \cdot \pi \cdot r^3$$
$$L = l + 2 \cdot r$$

V = Volumen del tanque
r = radio del cilindro
l = longitud del cilindro
L = longitud total del depósito

Por tanto, despejando la longitud del cilindro, obtenemos que las medidas del interior de nuestro depósito, para otorgar una autonomía de 100 km son:

$$l = 9963,5 \text{ mm}$$
$$L = 10463,5 \text{ mm} \approx 10500 \text{ mm}$$

$$r = 250 \text{ mm}$$

Capítulo 3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

En este estudio se va a simular el funcionamiento del depósito a una presión de 70 MPa. Para ello, se fijará el depósito, se le aplicará un mallado y se probará con los diferentes materiales propuestos, obteniendo resultados de tensión, desplazamiento, deformación unitaria y factor de seguridad.

El programa utilizado para este estudio será SolidWorks, el cual realiza los cálculos siguiendo la siguiente secuencia:



3.1 SUJECCIÓN DEL DEPÓSITO

Para la realización de las simulaciones, se va a sujetar el depósito por la boquilla, de tal manera que no actúe en él más que la propia fuerza de la presión y la reacción del mismo con su propia boquilla. Para ello se fijarán todas las caras exteriores de la boquilla como se muestra en la figura 23.

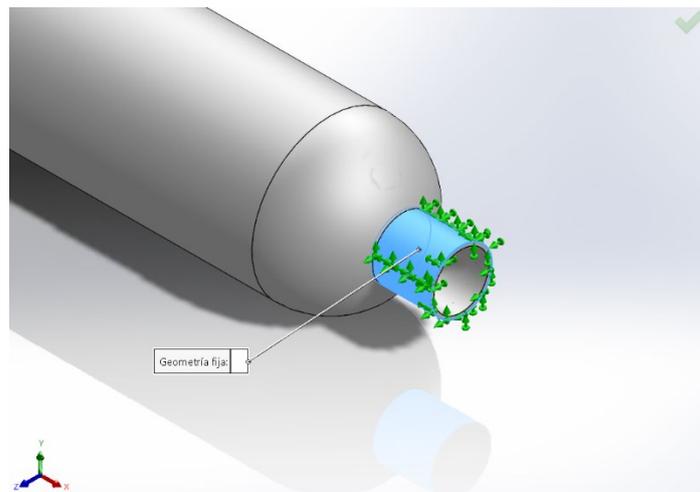


Figura 23: Sujeción del depósito

3.2 APLICACIÓN DE LA PRESIÓN

La presión se va a aplicar en dirección normal a las caras interiores, tanto en el cilindro central como en los casquetes semiesféricos, y de manera uniforme, como se puede ver en la figura 24. Su valor, como se ha comentado antes, será de 70 MPa.

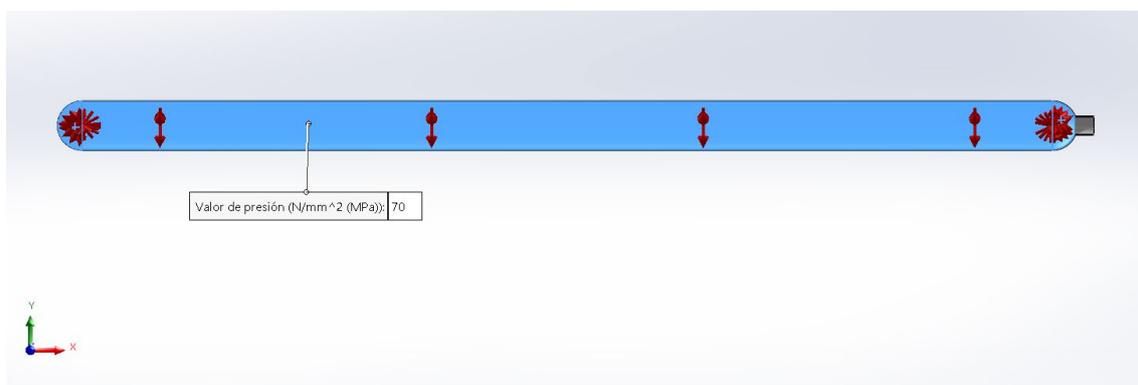


Figura 24: Distribución de la presión

3.3 MALLADO

El tamaño de la malla es un factor muy importante a la hora de realizar la simulación. Se ha de buscar un tamaño lo suficientemente pequeño para tener precisión en los resultados, pero que a su vez no provoque un tiempo de procesado excesivo, pudiendo incluso llegar a bloquear el programa. En este caso, atendiendo a las capacidades del ordenador, y teniendo en cuenta que la

longitud del depósito es algo mayor de diez metros, se ha optado por una malla de triángulos equiláteros de 30 mm de lado (figura 25 y 26)



Figura 25: Mallado del depósito

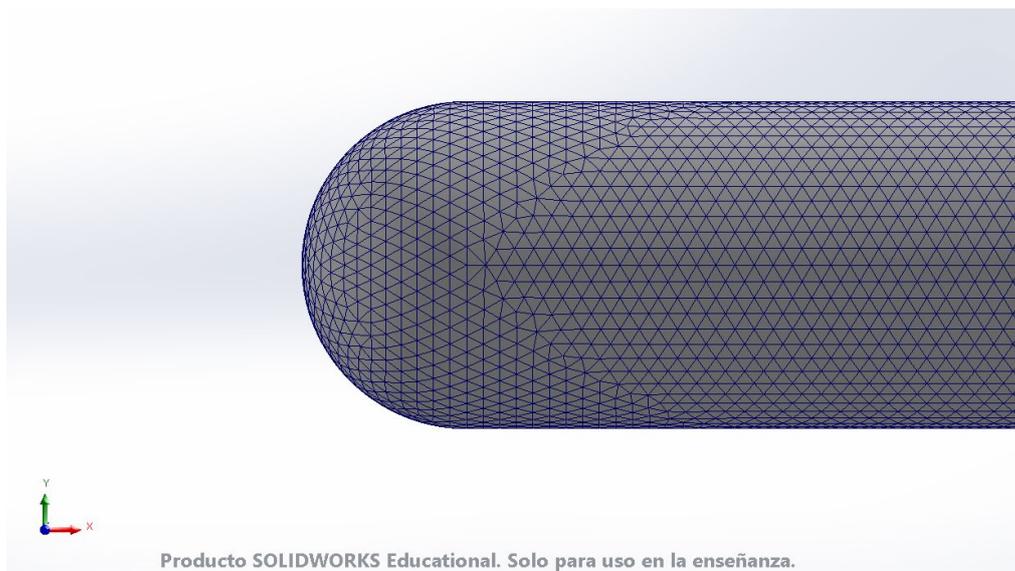


Figura 26: Mallado del depósito en detalle

3.4 VARIABLES A ESTUDIAR

3.4.1 TENSIONES DE VON MISES

Se trata de la tensión equivalente obtenida al sumar todas las tensiones del eje X, Y y Z. Si esta tensión es superior al límite elástico del material en algún punto, el objeto sometido a estudio podría llegar a romperse. La fórmula para calcular la tensión de Von Mises es la siguiente:

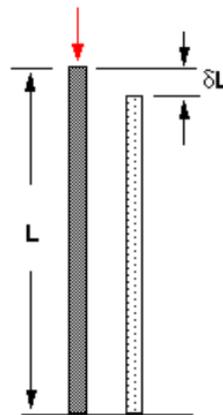
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}{2} + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}$$

3.4.2 DESPLAZAMIENTOS

Se entiende por desplazamiento como la distancia y dirección a la que se encuentra un punto del cuerpo respecto a ese mismo punto antes de aplicar las cargas a las que está sometido.

3.4.3 DEFORMACIONES UNITARIAS

La deformación unitaria es la proporción de cambio en longitud con respecto a la longitud original (figura 27). Se trata de una magnitud adimensional. [16].



$$\text{Deformación unitaria} = \delta L / L$$

Figura 27: Deformación Unitaria

En el caso de nuestro estudio, se analizará la deformación unitaria equivalente (ESTRN):

$$\text{ESTRN} = 2 [(\epsilon_1 + \epsilon_2) / 3]^{(1/2)}$$

Donde:

$$\epsilon_1 = 0.5 [(\text{EPSX} - \epsilon^*)^2 + (\text{EPSY} - \epsilon^*)^2 + (\text{EPSZ} - \epsilon^*)^2]$$

$$\epsilon_2 = [(\text{GMXY})^2 + (\text{GMXZ})^2 + (\text{GMYZ})^2] / 4$$

$$\epsilon^* = (\text{EPSX} + \text{EPSY} + \text{EPSZ}) / 3$$

La deformación unitaria permite ver como se deforma el depósito en las diferentes zonas sin que se vea afectada la medida por el desplazamiento.

3.4.4 FACTOR DE SEGURIDAD

Se trata de una medida utilizada para saber si un cuerpo o estructura aguantará a la carga a la que se somete. Se obtiene dividiendo la carga máxima que puede soportar (límite elástico) entre la carga real que soporta el material (tensión de Von Mises).

$$\text{FDS} = \text{Límite elástico} / \text{Tensión de Von Mises}$$

Por tanto, para un correcto dimensionamiento de un elemento, el factor de seguridad tendrá que ser, como mínimo, mayor que uno.

Capítulo 4. RESULTADO DE LOS ESTUDIOS

A continuación, se van a mostrar y comentar los resultados de los estudios. Aplicando los parámetros explicados en el Capítulo 3, se van a ensayar todos los materiales compuestos de fibra de carbono de la tabla 1111111. De cada uno de ellos, se va a obtener la distribución de las siguientes variables:

- Tensión de Von Mises:
- Desplazamiento.
- Deformación unitaria.
- Factor de seguridad

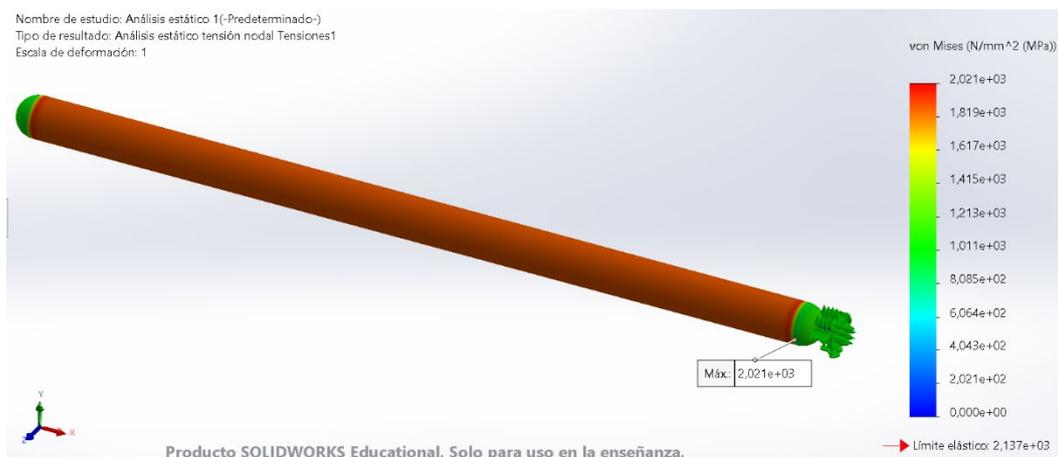
4.1 AS4

4.1.1 TENSIÓN DE VON MISES

La tensión de Von Mises es independiente al material aplicado al depósito, por lo que se explicará únicamente ahora, siendo exactamente igual en el resto de los casos.

En la figura 28 se puede observar la distribución de tensiones de Von Mises.

Figura 28: Tensión de Von Mises AS4



Como se puede apreciar, existe una distribución bastante uniforme en el cilindro central de entre 1800 y 2021 MPa. En los casquetes, debido a la geometría, la tensión es menor, de unos 1000 MPa, existiendo una pequeña franja de transición entre los casquetes y el cilindro.

En la figura 29 se puede ver el valor máximo en detalle:

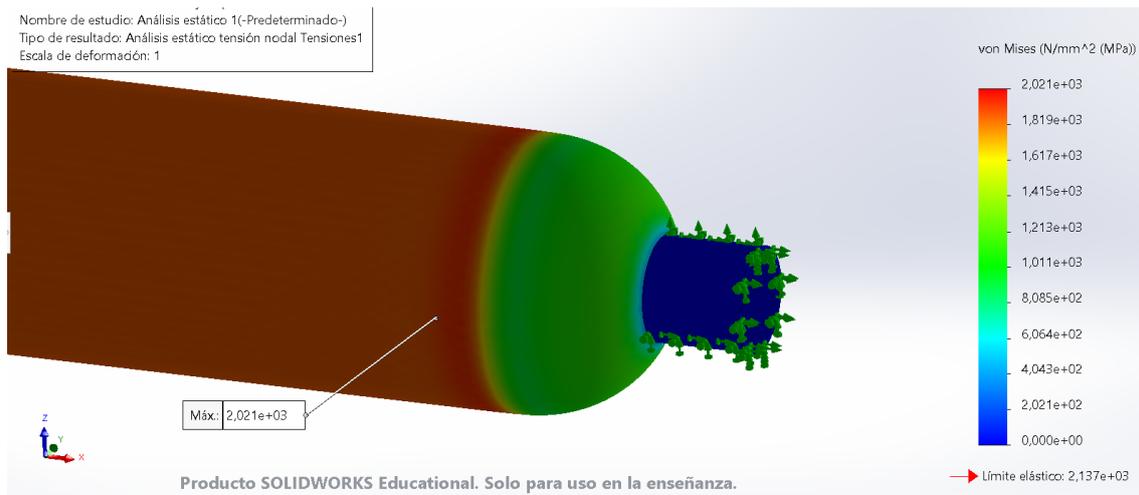


Figura 29: Detalle de tensión de Von Mises AS4

El valor máximo es de 2021 MPa, y se encuentra en el cilindro, muy próximo al casquete. En el caso del material compuesto con AS4, no supera el límite elástico del mismo, pero se queda muy cerca.

4.1.2 Desplazamientos

En la figura 30 se muestran los desplazamientos del depósito.

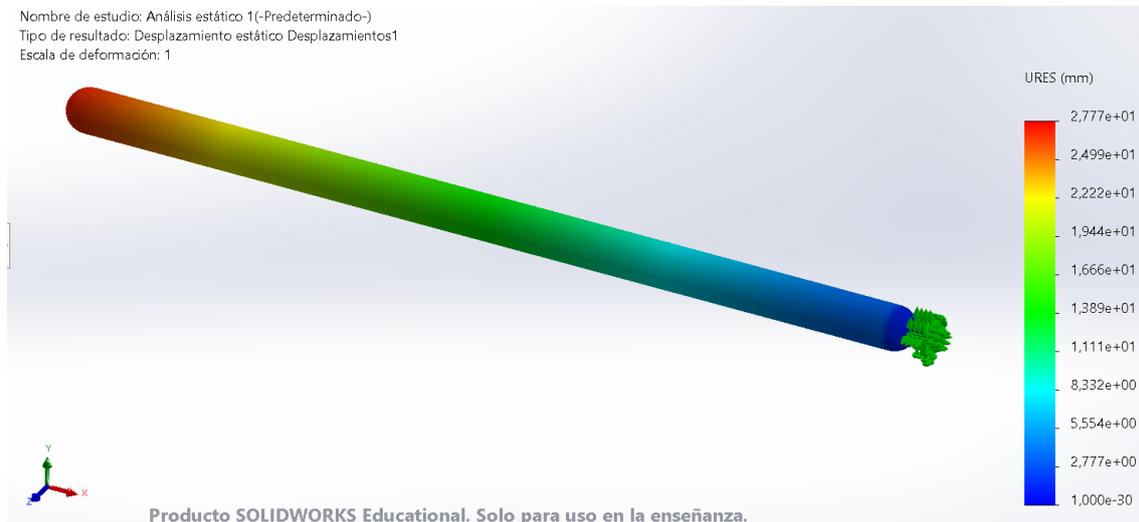


Figura 30: Desplazamientos AS4

Como es lógico, cerca de la boquilla existe muy poco desplazamiento, ya que esta está fija. Éste va aumentando según nos desplazamos hacia la izquierda del depósito, ya que se va acumulando. El valor máximo se encuentra en el casquete izquierdo y es de 27,8 mm. Puede parecer un valor elevado, pero es importante recordar que el depósito mide más de diez metros, por lo que proporcionalmente es un valor razonable.

4.1.3 DEFORMACIONES UNITARIAS

En la figura 31 se muestra la distribución de deformaciones unitarias, viéndose la deformación real a una escala 1:50 para facilitar su interpretación.

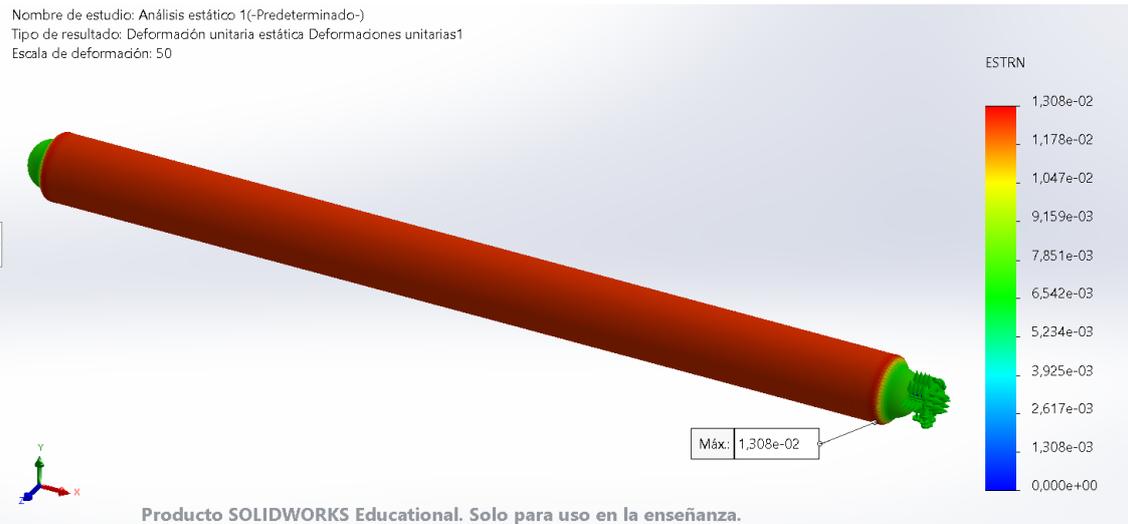


Figura 31: Deformaciones unitarias AS4

Como se puede observar, la mayor deformación está en la cara del cilindro, alcanzando su valor máximo de 0,0131 en la franja del cilindro que está más próxima al casquete (figura 32)

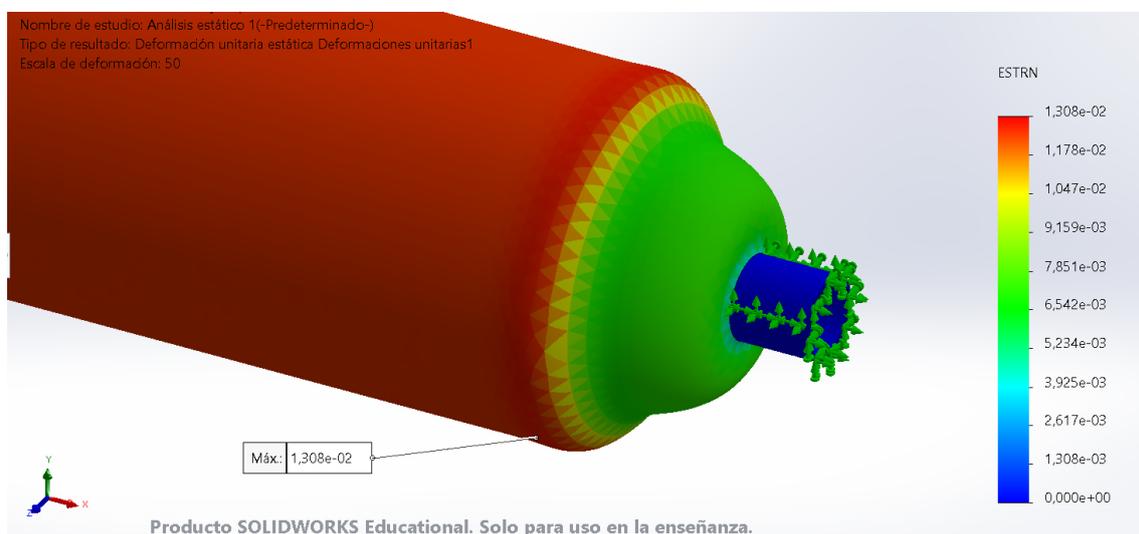


Figura 32: Deformación máxima unitaria AS4w

4.1.4 FACTOR DE SEGURIDAD

En la figura 33 se muestra cómo se distribuye el factor de seguridad, que, como es lógico, tiene la misma distribución que la tensión de Von Mises.

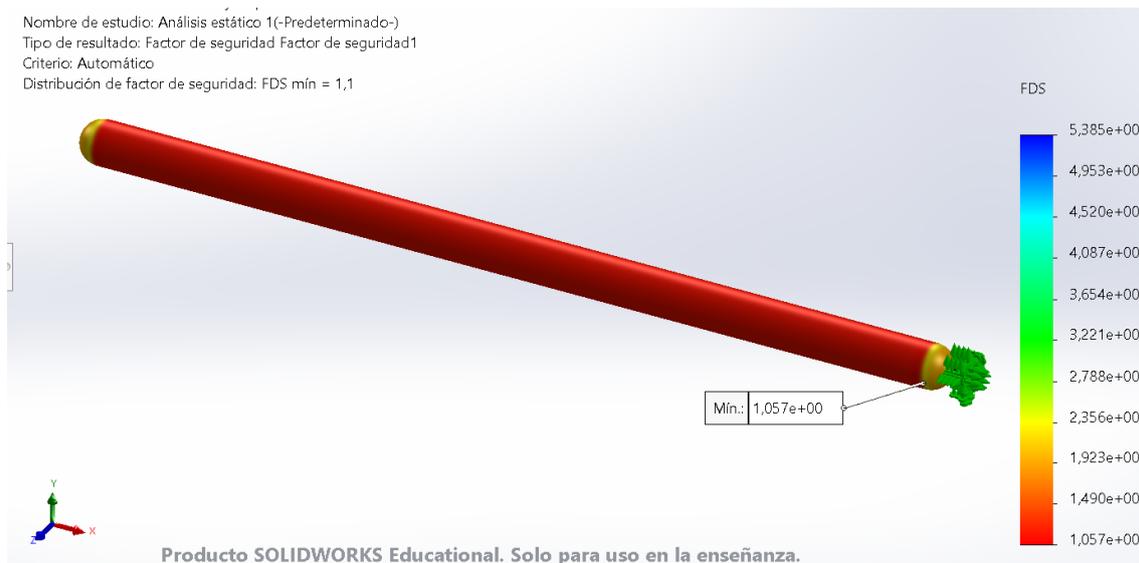


Figura 33: Factor de seguridad AS4

En la figura 34, y coincidiendo en el mismo punto con la tensión máxima de Von Mises, se puede ver el factor de seguridad mínimo, con un valor de 1,057.

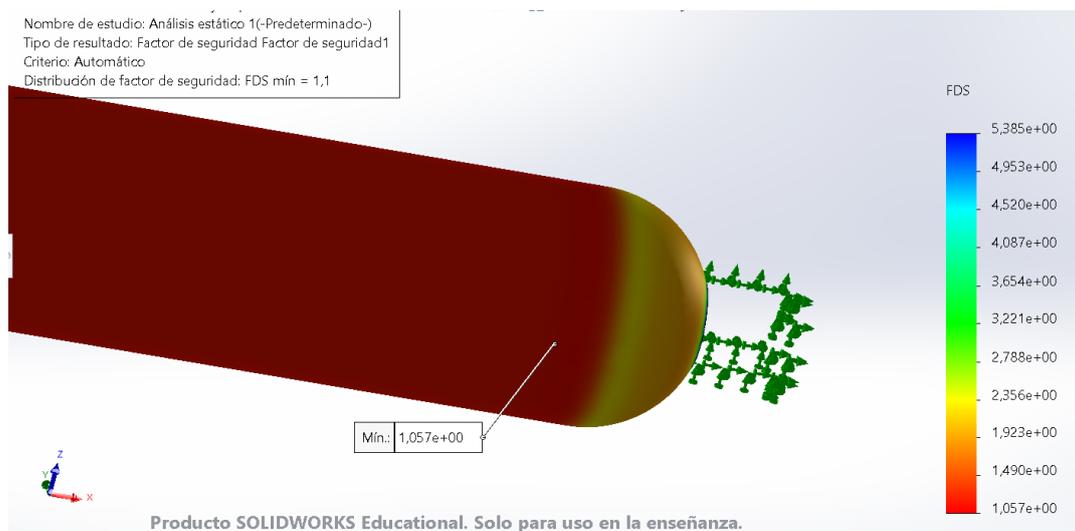


Figura 34: Factor de seguridad mínimo AS4

4.2 AS7

4.2.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 35 se muestran los desplazamientos del depósito.

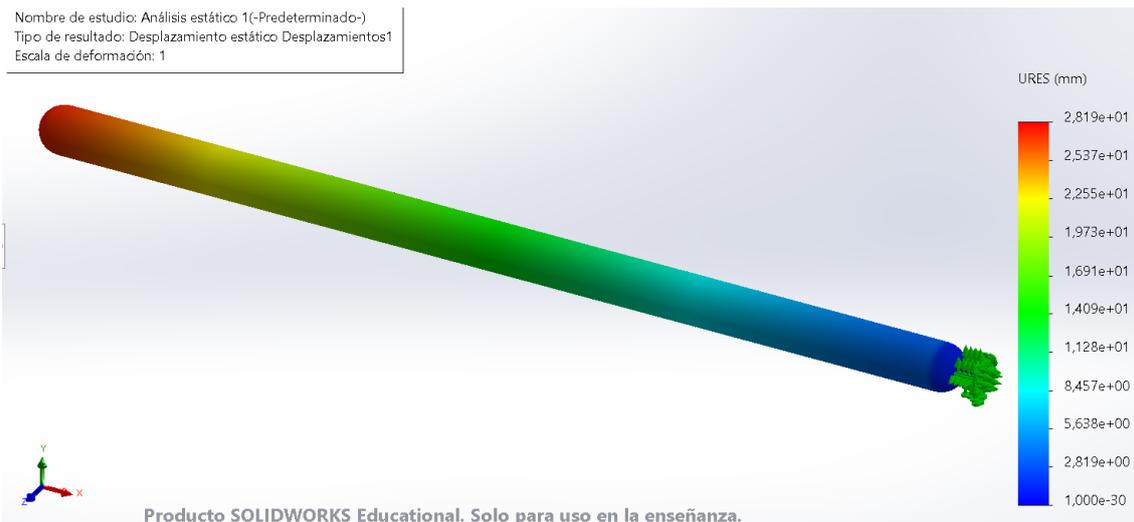


Figura 35: Desplazamientos AS7

El valor máximo se encuentra en el casquete izquierdo y es de 28,19 mm. Puede parecer un valor elevado, pero, como se ha aclarado anteriormente, el depósito mide más de diez metros, por lo que proporcionalmente es un valor razonable.

4.2.2 DEFORMACIONES UNITARIAS

En la figura 36 se muestra la distribución de deformaciones unitarias, viéndose la deformación real a una escala 1:50 para facilitar su interpretación.

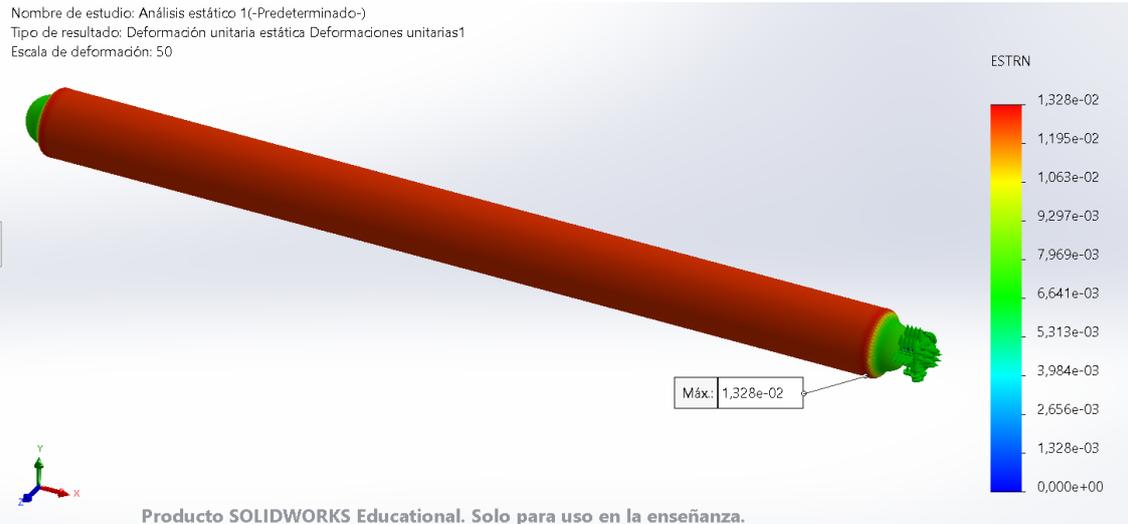


Figura 36: Deformaciones unitarias AS7

Como se puede observar, la mayor deformación está en la cara del cilindro, alcanzando su valor máximo de 0,0133 en la franja del cilindro que está más próxima al casquete (figura 37)

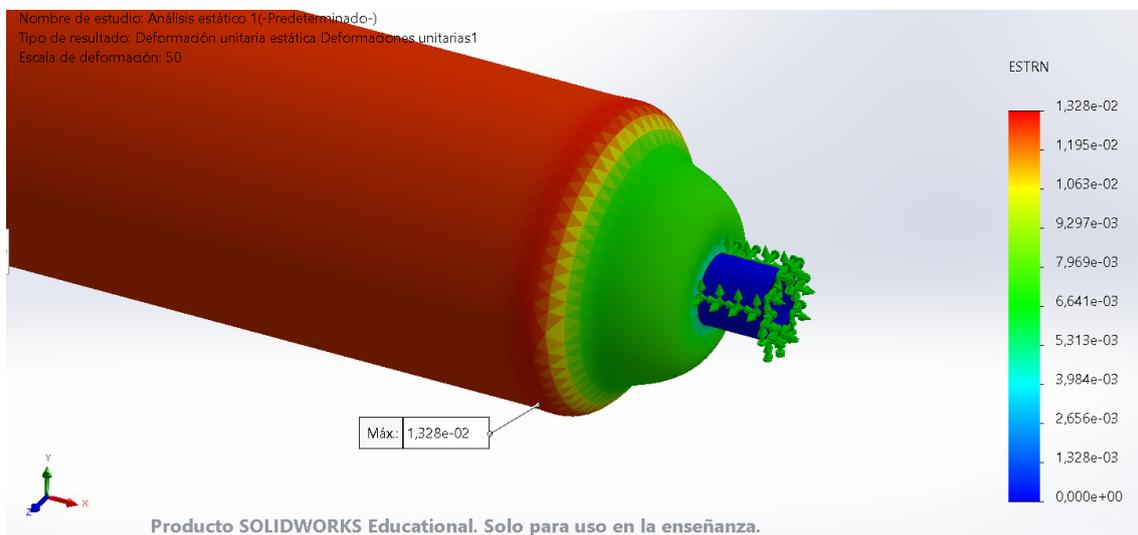


Figura 37: Deformación unitaria máxima AS7

4.2.3 FACTOR DE SEGURIDAD

En la figura 38 se muestra cómo se distribuye el factor de seguridad, que, como se ha comentado antes, tiene la misma distribución que la tensión de Von Mises.

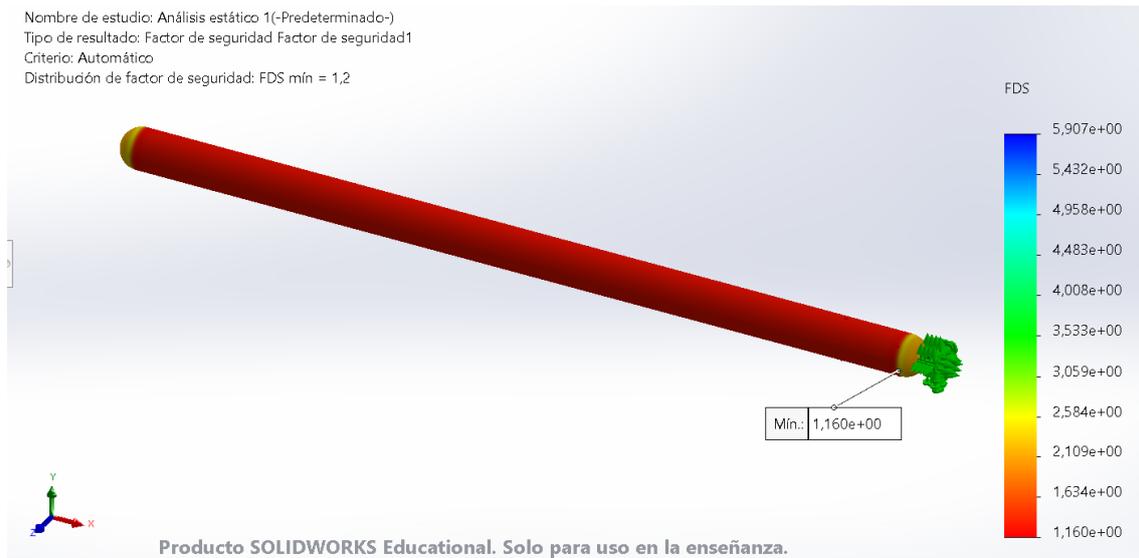


Figura 38: Factor de seguridad AS7

En la figura 39, y coincidiendo en el mismo punto con la tensión máxima de Von Mises, se puede ver el factor de seguridad mínimo, con un valor de 1,16.

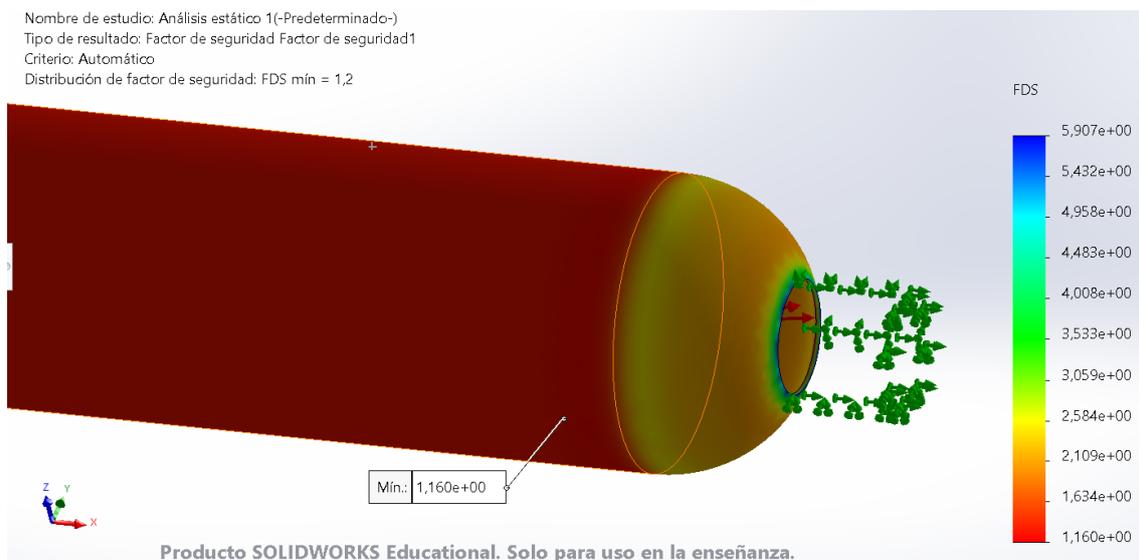


Figura 39: Factor de seguridad mínimo AS7

4.3 IM6

4.3.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 40 se muestran los desplazamientos del depósito.

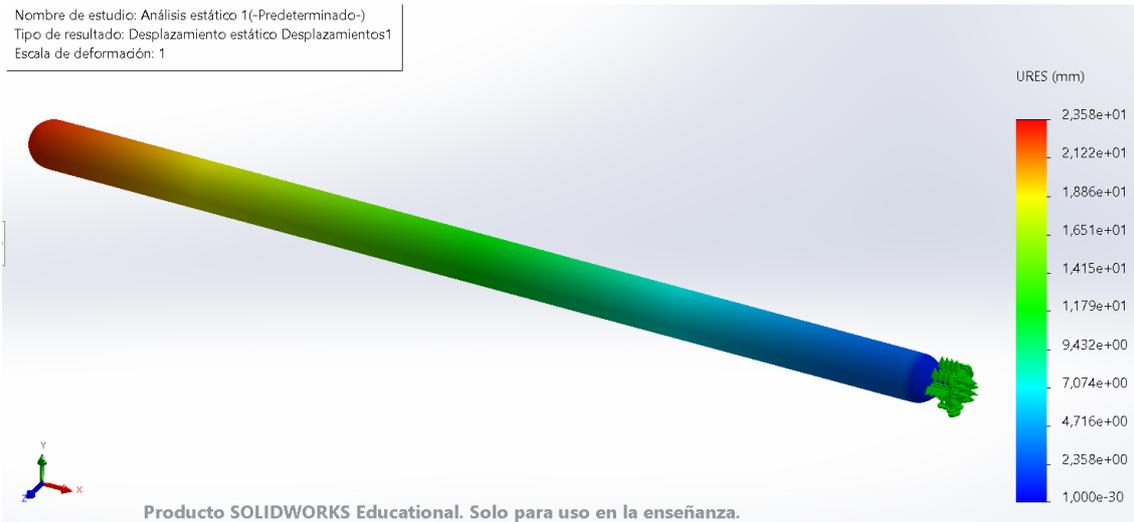


Figura 40: Desplazamientos IM6

El valor máximo se encuentra en el casquete izquierdo y es de 23,58 mm.

4.3.2 DEFORMACIONES UNITARIAS

En la figura 41 se muestra la distribución de deformaciones unitarias, viéndose la deformación real a una escala 1:50 para facilitar su interpretación.

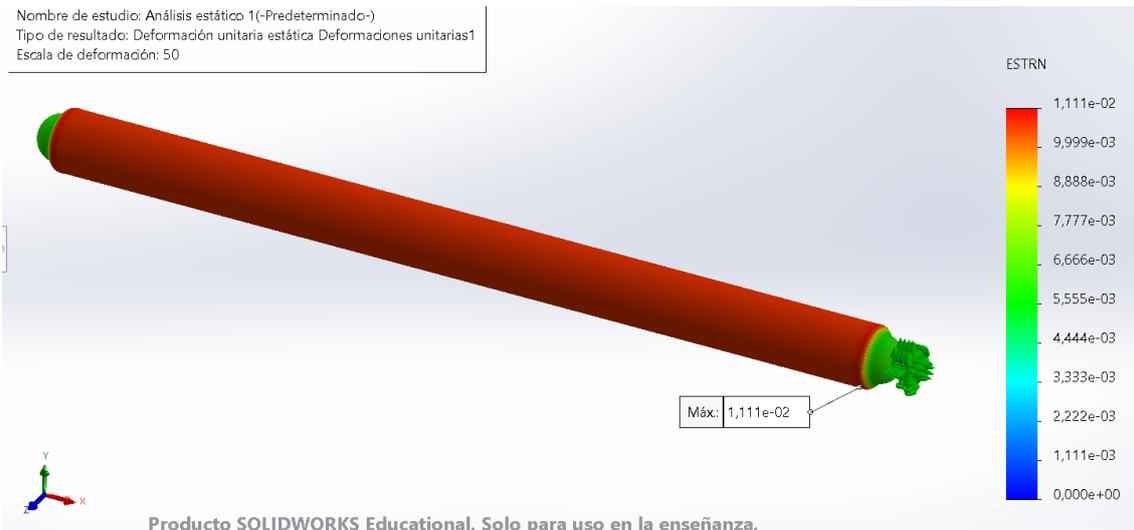


Figura 41: Deformaciones unitarias IM6

Como se puede observar, la mayor deformación está en la cara del cilindro, alcanzando su valor máximo de 0,0111 en la franja del cilindro que está más próxima al casquete (figura 42)

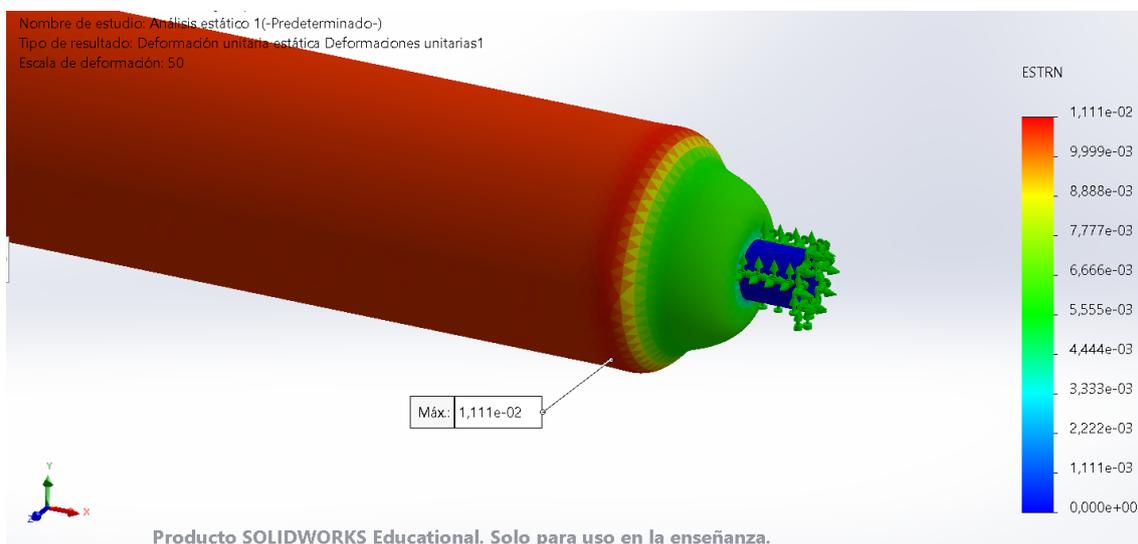


Figura 42: Deformación unitaria máxima IM6

4.3.3 FACTOR DE SEGURIDAD

En la figura 43 se muestra cómo se distribuye el factor de seguridad, que, como se ha comentado antes, tiene la misma distribución que la tensión de Von Mises.

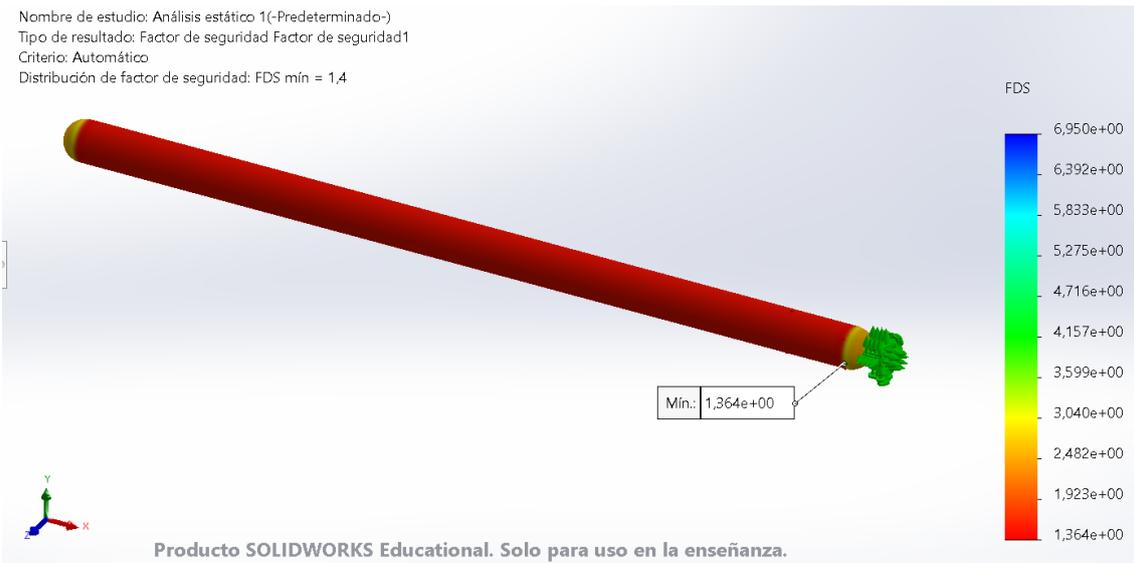


Figura 43: Factor de seguridad IM6

En la figura 44, y coincidiendo en el mismo punto con la tensión máxima de Von Mises, se puede ver el factor de seguridad mínimo, con un valor de 1,364.

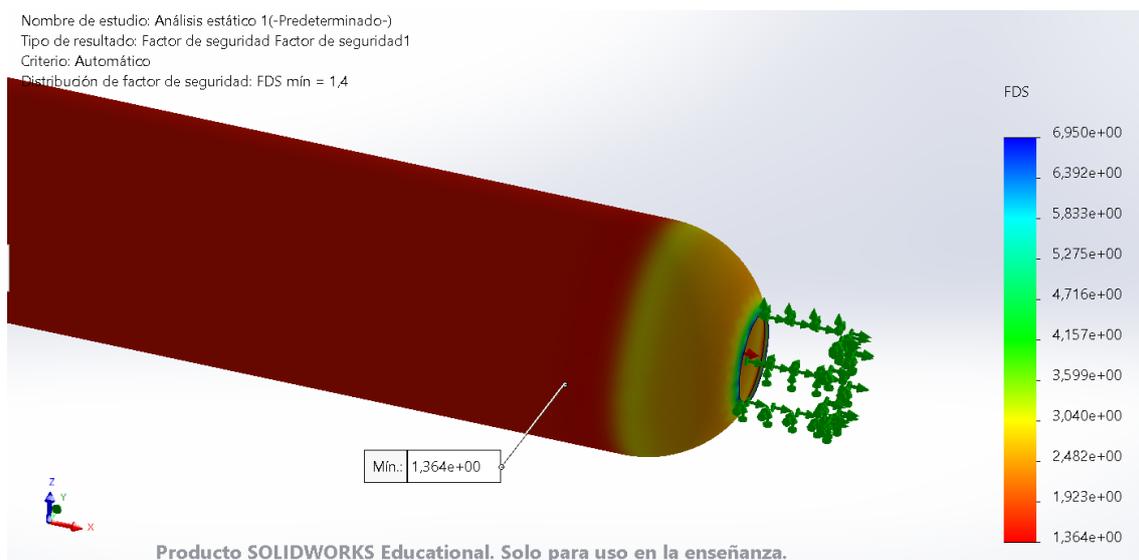


Figura 44: Factor de seguridad mínimo IM6

4.4 IM7

4.4.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 45 se muestran los desplazamientos del depósito.

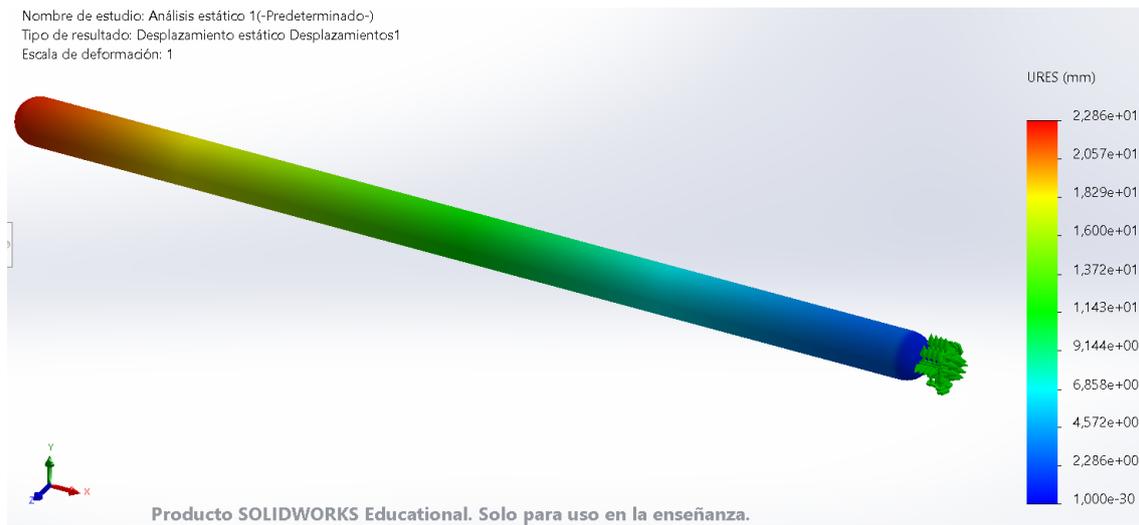


Figura 45: Desplazamientos IM7

El valor máximo se encuentra en el casquete izquierdo y es de 22,86 mm.

4.4.2 DEFORMACIONES UNITARIAS

En la figura 46 se muestra la distribución de deformaciones unitarias, viéndose la deformación real a una escala 1:50 para facilitar su interpretación.

Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
Escala de deformación: 50

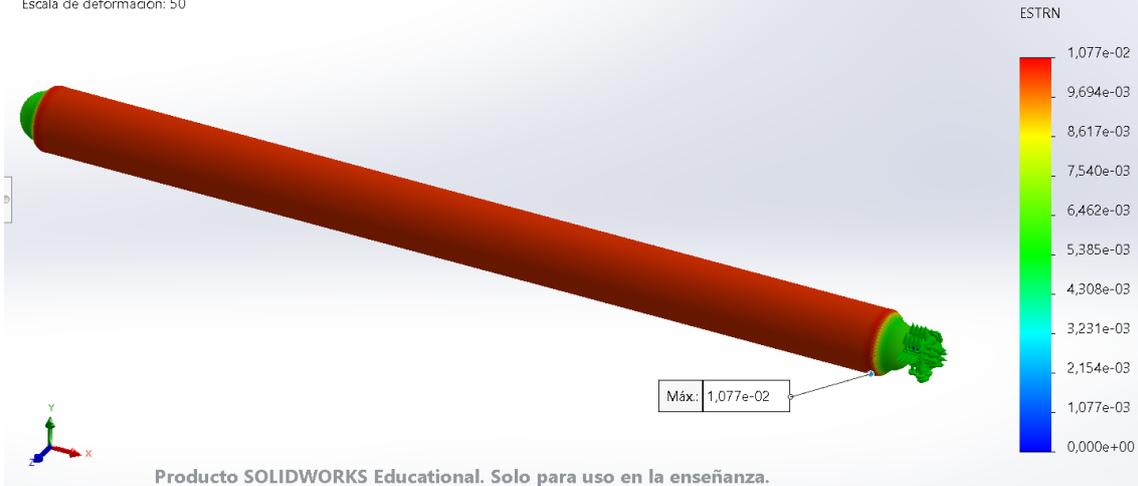


Figura 46: Deformaciones unitarias IM7

Como se puede observar, la mayor deformación está en la cara del cilindro, alcanzando su valor máximo de 0,0108 en la franja del cilindro que está más próxima al casquete (figura 47)

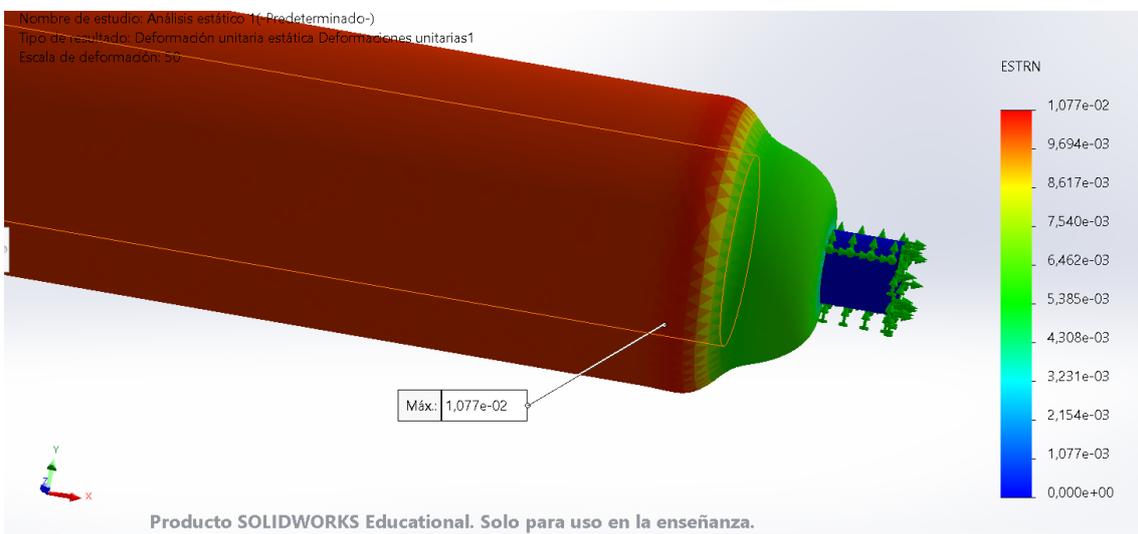


Figura 47: Deformación unitaria máxima IM7

4.4.3 FACTOR DE SEGURIDAD

En la figura 48 se muestra cómo se distribuye el factor de seguridad, que, como se ha comentado antes, tiene la misma distribución que la tensión de Von Mises.

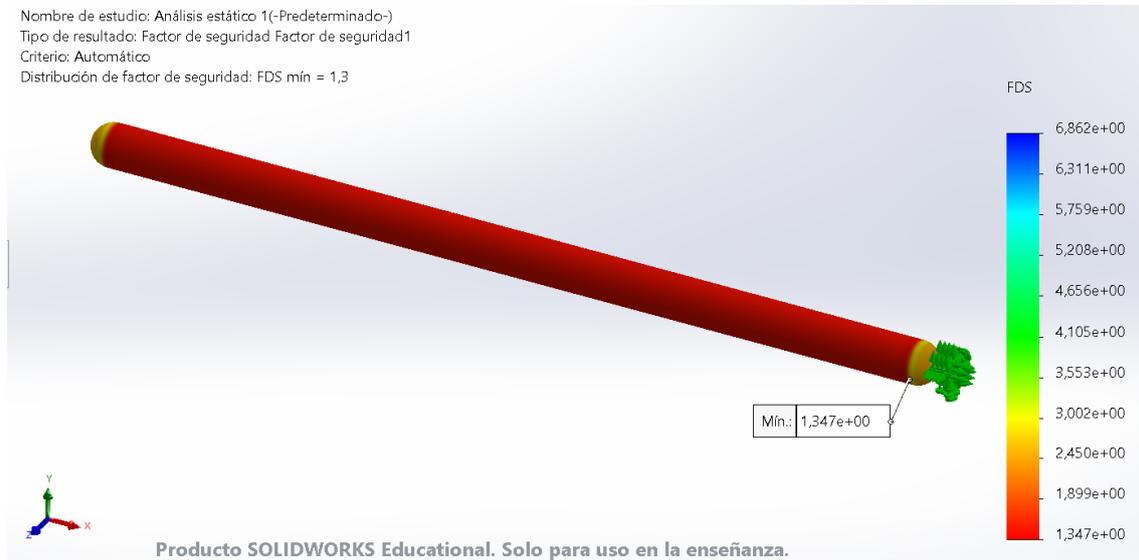


Figura 48: Factor de seguridad IM7

En la figura 49, y coincidiendo en el mismo punto con la tensión máxima de Von Mises, se puede ver el factor de seguridad mínimo, con un valor de 1,347.

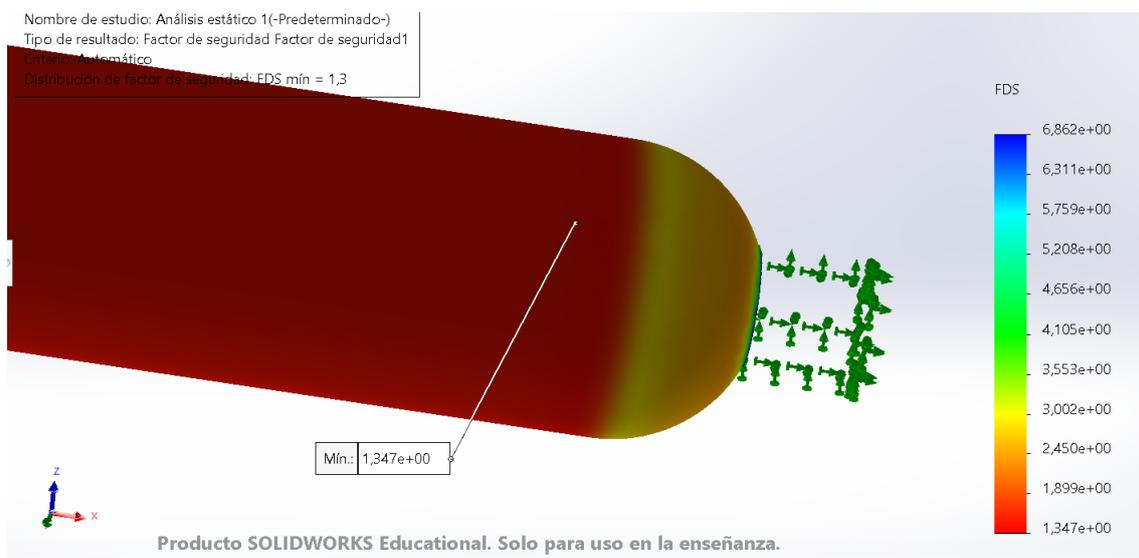


Figura 49: Factor de seguridad mínimo IM7

4.5 IMA

4.5.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 50 se muestran los desplazamientos del depósito.

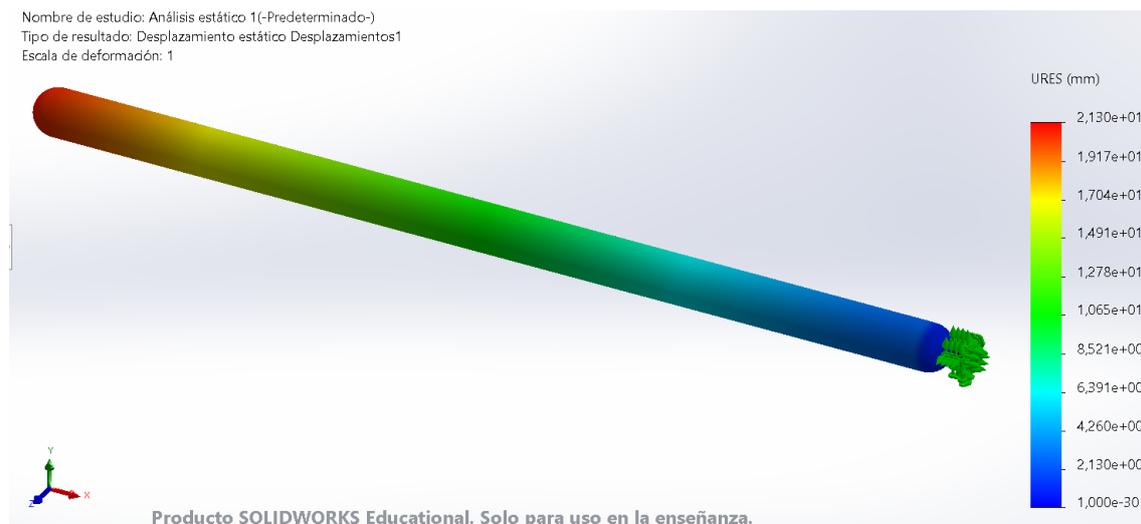


Figura 50: Desplazamientos IMA

El valor máximo se encuentra en el casquete izquierdo y es de 21,3 mm.

4.5.2 DEFORMACIONES UNITARIAS

En la figura 51 se muestra la distribución de deformaciones unitarias, viéndose la deformación real a una escala 1:50 para facilitar su interpretación.

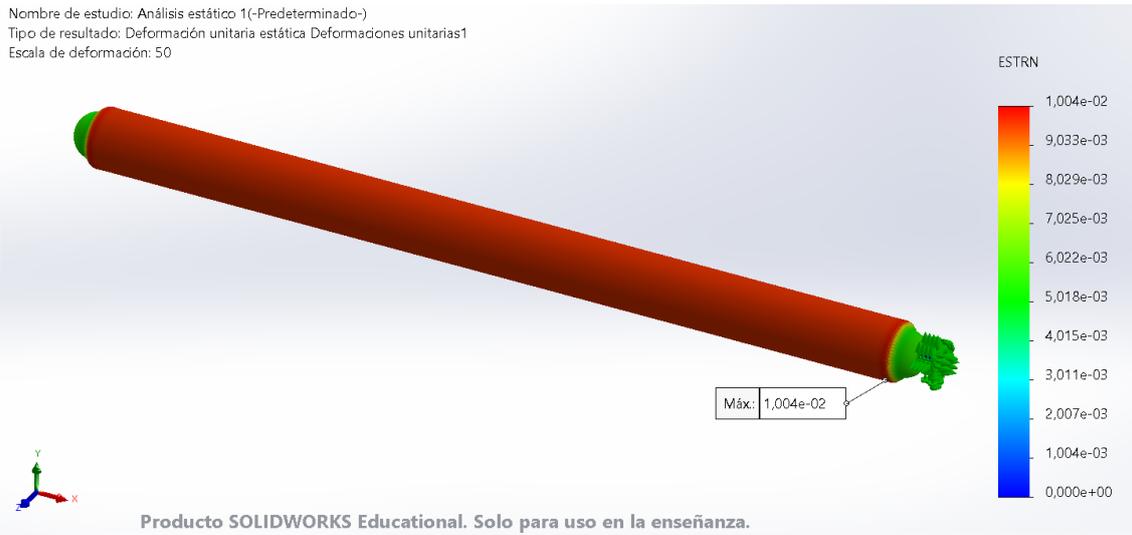


Figura 51: Deformaciones unitarias IMA

Como se puede observar, la mayor deformación está en la cara del cilindro, alcanzando su valor máximo de 0,01 en la franja del cilindro que está más próxima al casquete (figura 52)

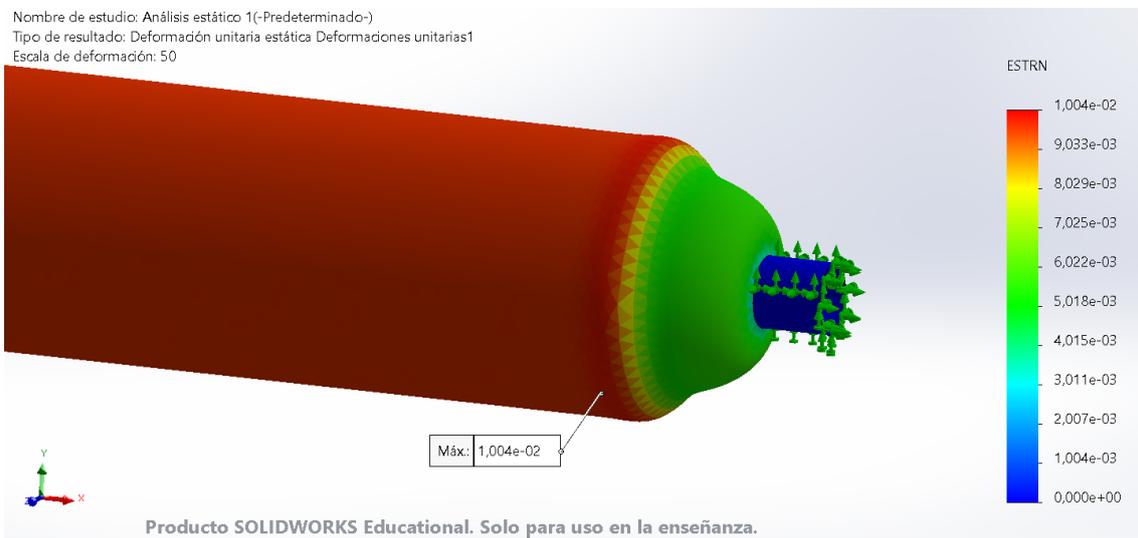


Figura 52: Deformación unitaria máxima IMA

4.5.3 FACTOR DE SEGURIDAD

En la figura 53 se muestra cómo se distribuye el factor de seguridad, que, como se ha comentado antes, tiene la misma distribución que la tensión de Von Mises.

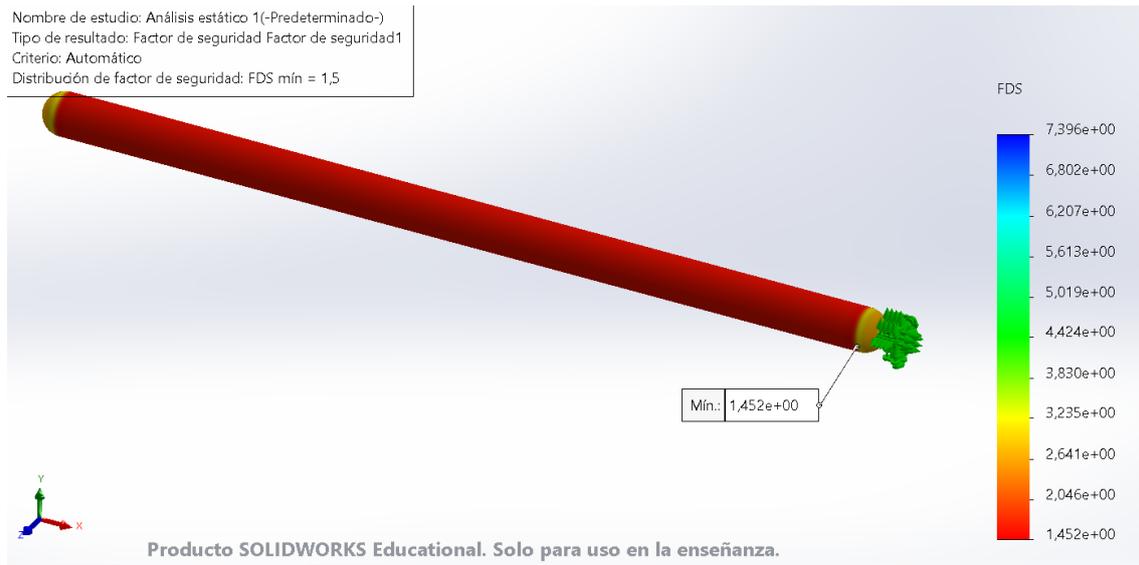


Figura 53: Factor de seguridad IMA

En la figura 54, y coincidiendo en el mismo punto con la tensión máxima de Von Mises, se puede ver el factor de seguridad mínimo, con un valor de 1,452.

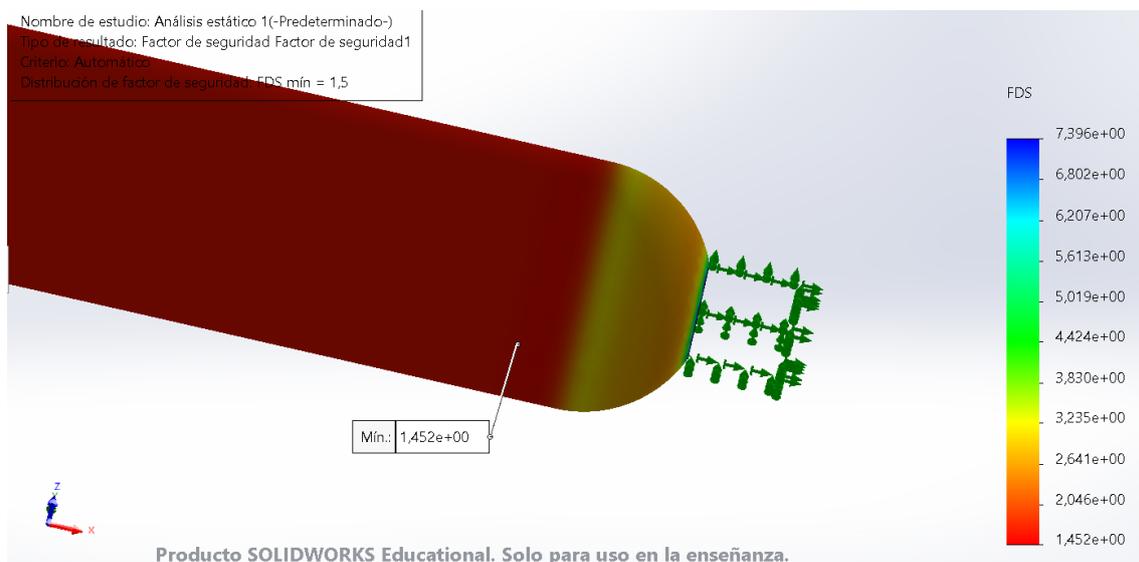


Figura 54: Factor de seguridad mínimo IMA

4.6 IM8

4.6.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 55 se muestran los desplazamientos del depósito.

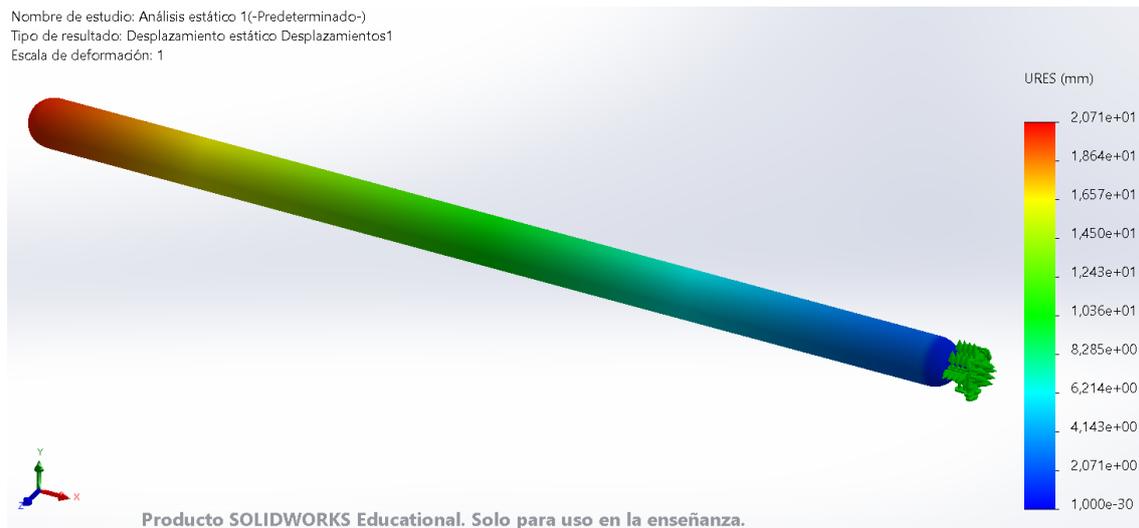


Figura 55: Desplazamientos IM8

El valor máximo se encuentra en el casquete izquierdo y es de 20,71 mm.

4.6.2 DEFORMACIONES UNITARIAS

En la figura 56 se muestra la distribución de deformaciones unitarias, viéndose la deformación real a una escala 1:50 para facilitar su interpretación.

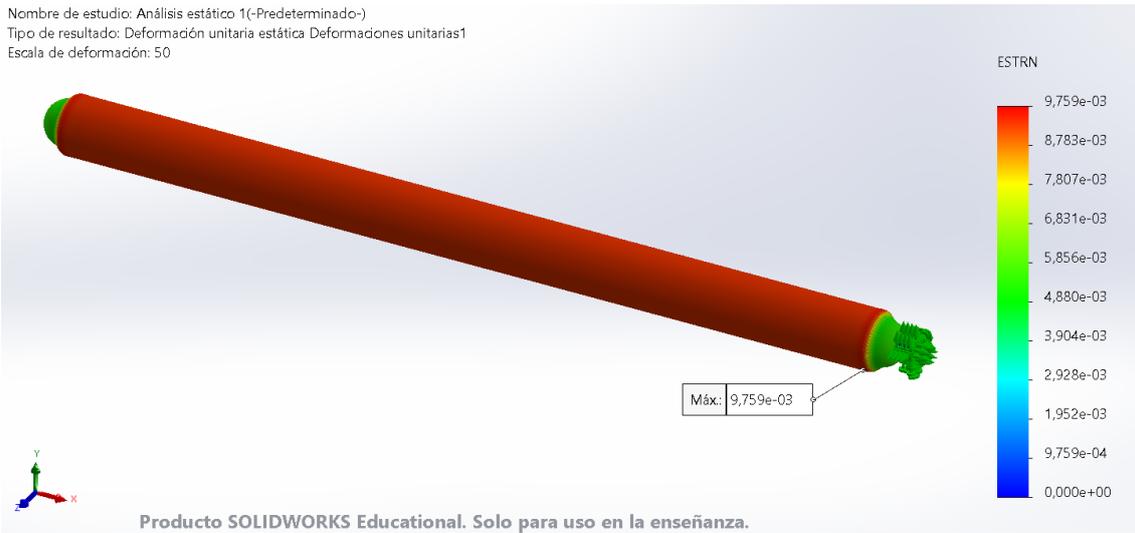


Figura 56: Deformaciones unitarias IM8

Como se puede observar, la mayor deformación está en la cara del cilindro, alcanzando su valor máximo de 0,0098 en la franja del cilindro que está más próxima al casquete (figura 57)

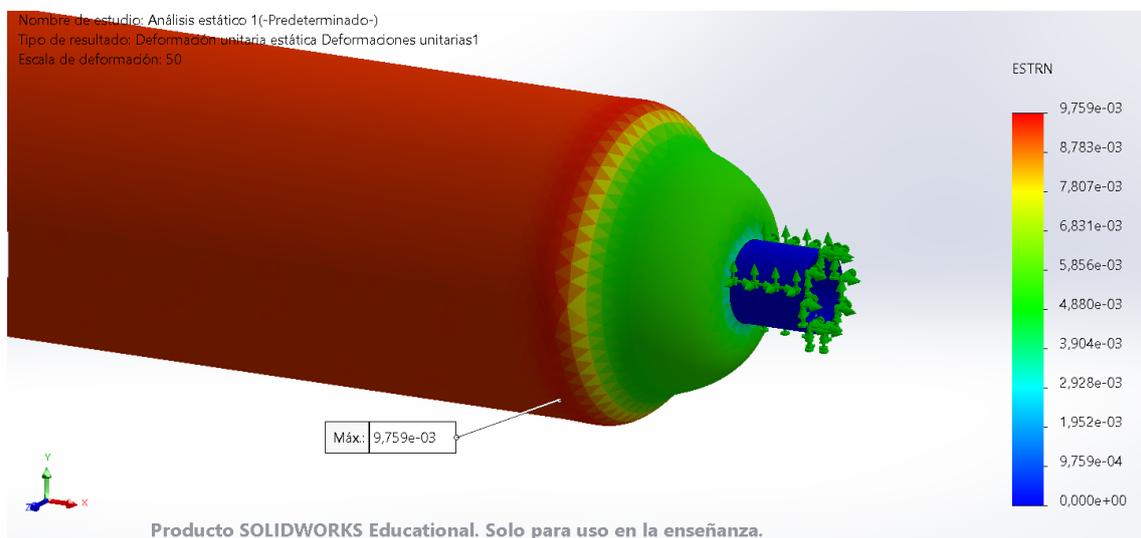


Figura 57: Deformación unitaria máxima IM8

4.6.3 FACTOR DE SEGURIDAD

En la figura 58 se muestra cómo se distribuye el factor de seguridad, que, como se ha comentado antes, tiene la misma distribución que la tensión de Von Mises.

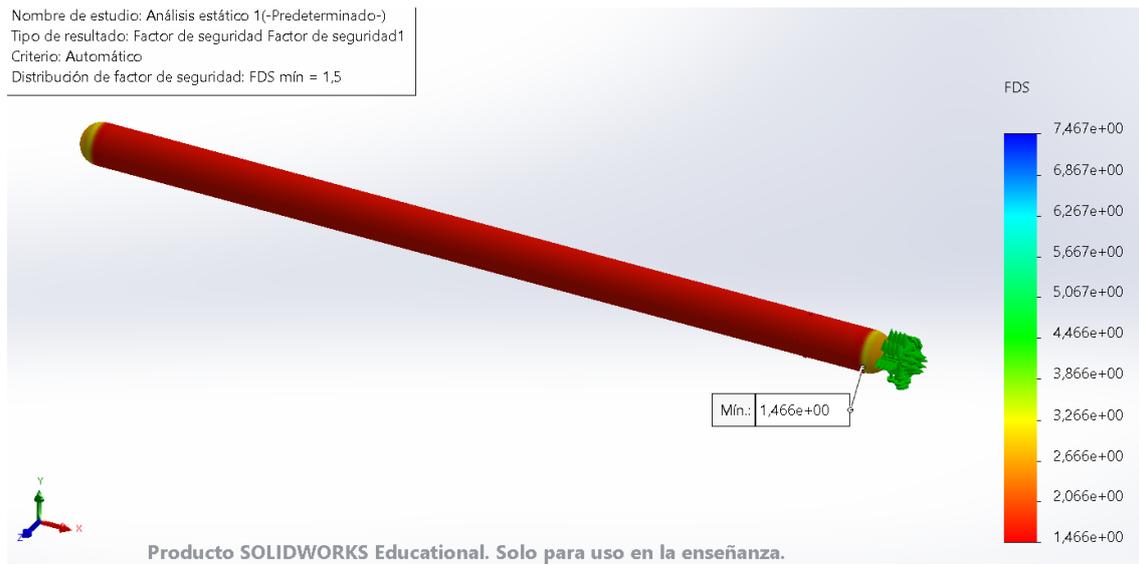


Figura 58: Factor de seguridad IM8

En la figura 59, y coincidiendo en el mismo punto con la tensión máxima de Von Mises, se puede ver el factor de seguridad mínimo, con un valor de 1,466.

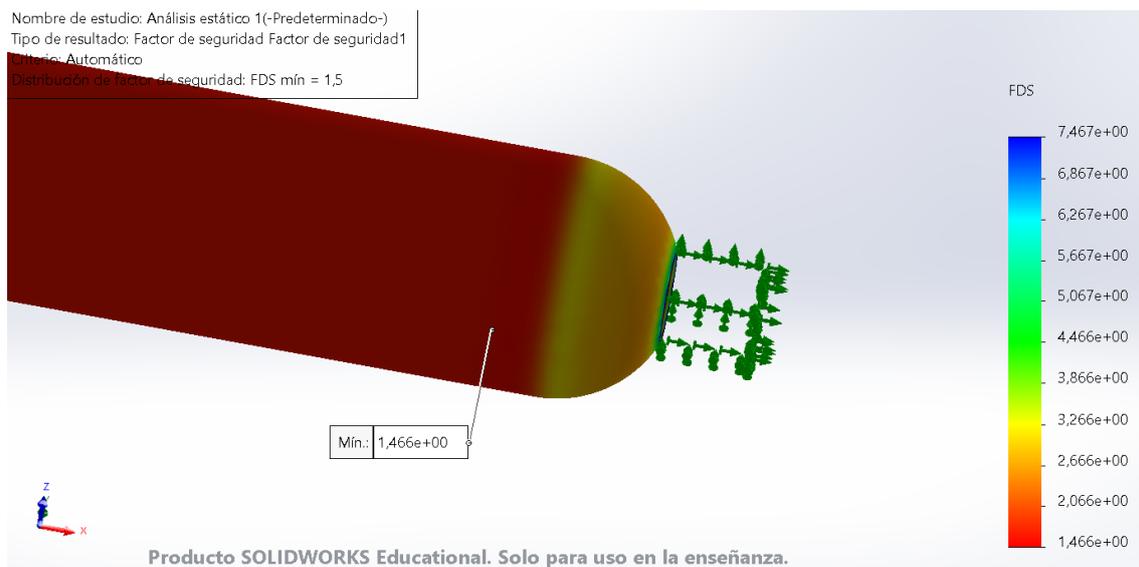


Figura 59: Factor de seguridad mínimo IM8

4.7 IM10

4.7.1 DESPLAZAMIENTOS

En la figura 60 se muestran los desplazamientos del depósito.

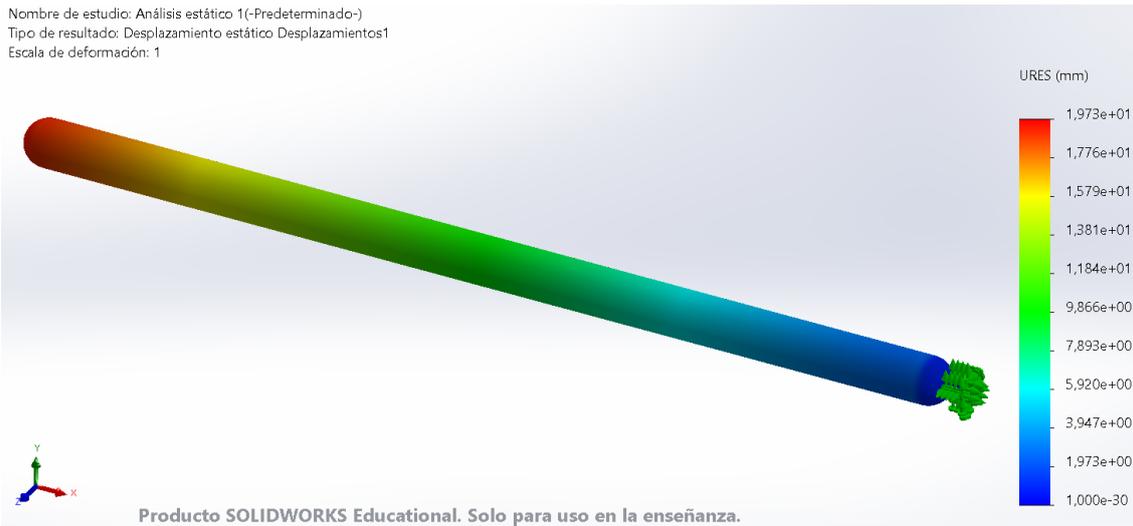


Figura 60: Desplazamientos IM10

El valor máximo se encuentra en el casquete izquierdo y es de 19,73 mm.

4.7.2 DEFORMACIONES UNITARIAS

En la figura 61 se muestra la distribución de deformaciones unitarias, viéndose la deformación real a una escala 1:50 para facilitar su interpretación.

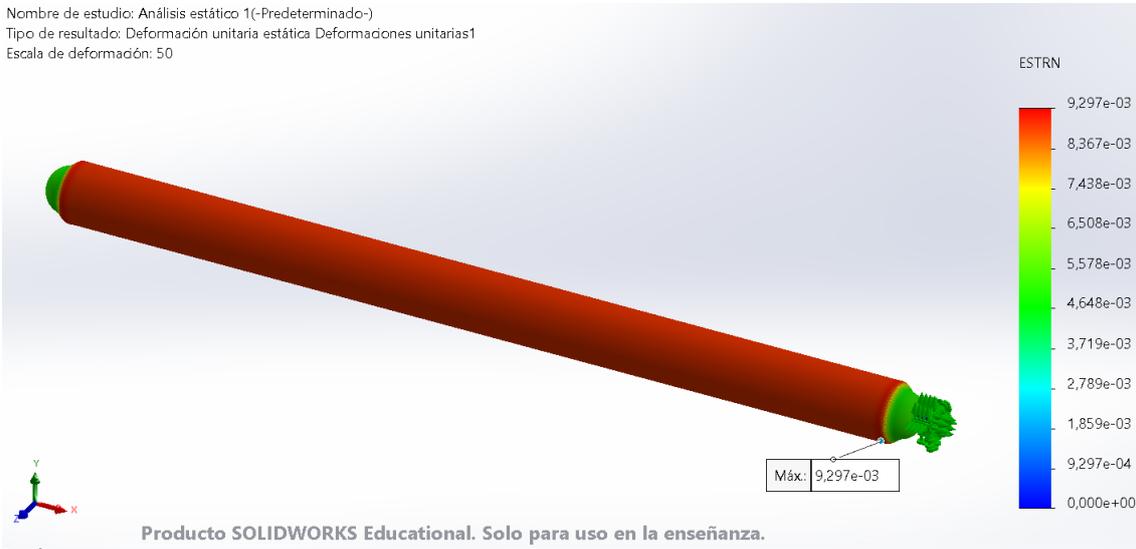


Figura 61: Deformaciones unitarias IM10

Como se puede observar, la mayor deformación está en la cara del cilindro, alcanzando su valor máximo de 0,0093 en la franja del cilindro que está más próxima al casquete (figura 62)

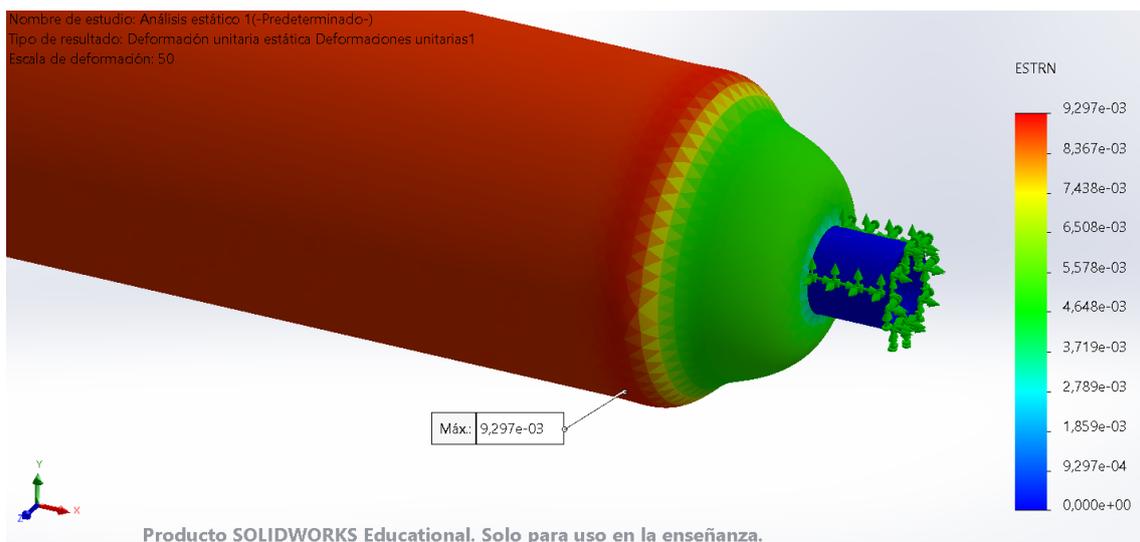


Figura 62: Deformación unitaria máxima IM10

4.7.3 FACTOR DE SEGURIDAD

En la figura 63 se muestra cómo se distribuye el factor de seguridad, que, como se ha comentado antes, tiene la misma distribución que la tensión de Von Mises.

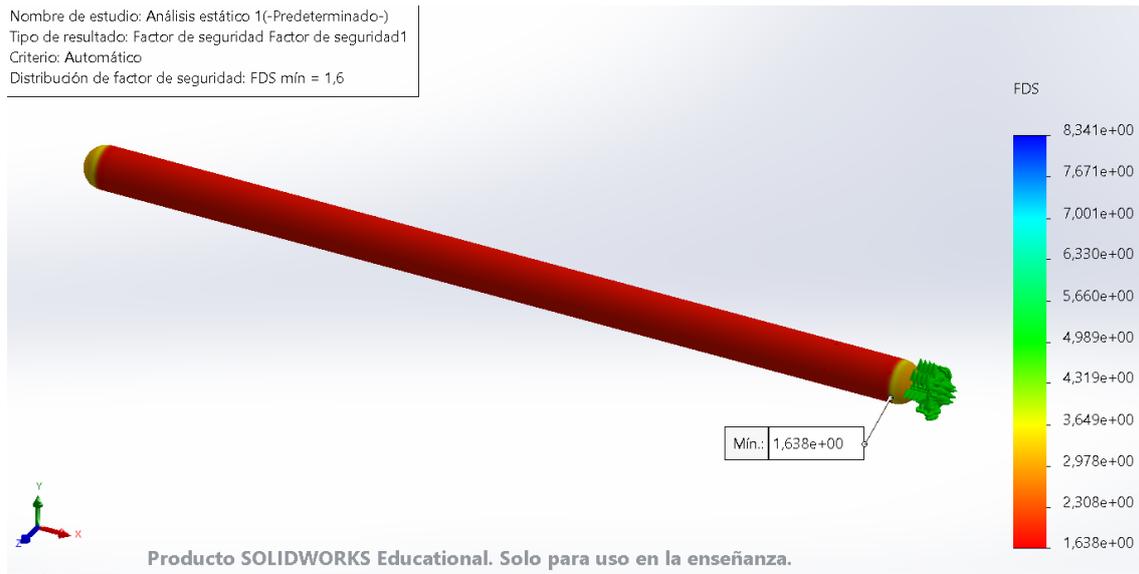


Figura 63: Factor de seguridad IM10

En la figura 64, y coincidiendo en el mismo punto con la tensión máxima de Von Mises, se puede ver el factor de seguridad mínimo, con un valor de 1,638.

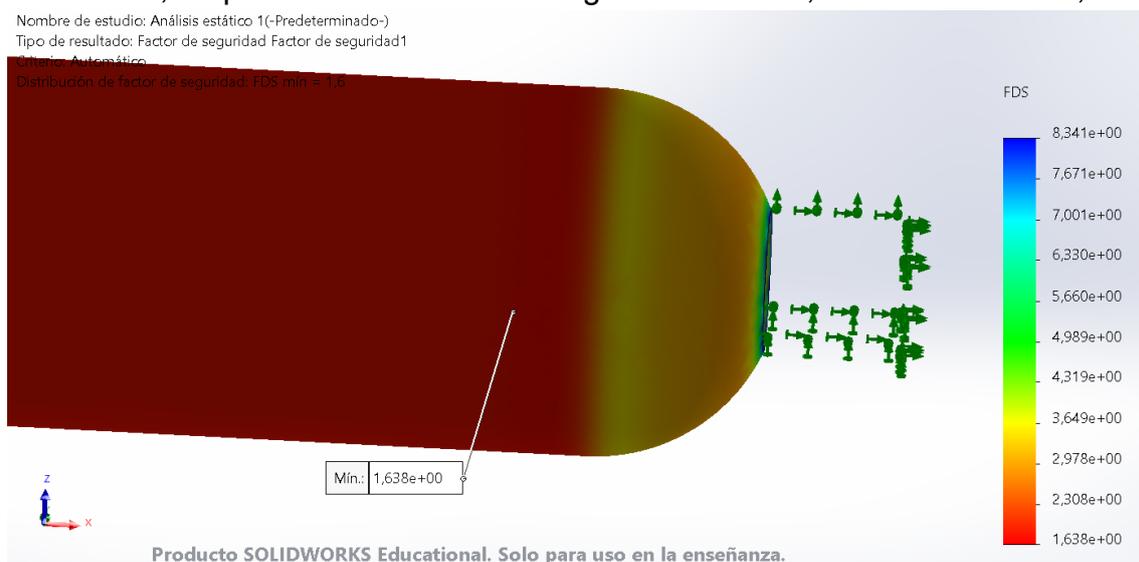


Figura 64: Factor de seguridad mínimo IM10

4.8 RESUMEN DE RESULTADOS

En la tabla 7 se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos.

MATERIAL COMPUESTO CON:	σ_{vm} (MPa)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (mm)	DEFORMACIÓN UNITARIA	FACTOR DE SEGURIDAD	MASA (sin boquilla) (Kg)
AS4	2021	27,8	0,0131	1,057	213,435
AS7	2021	28,19	0,0133	1,16	213,435
IM6	2021	23,58	0,0111	1,364	211,025
IM7	2021	22,86	0,0108	1,347	212,631
IMA	2021	21,3	0,01	1,452	213,435
IM8	2021	20,71	0,0098	1,466	213,435
IM10	2021	19,73	0,0093	1,638	213,435

Tabla 7: Resumen de resultados

Capítulo 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 TAMAÑO Y PESO

En primer lugar, se analiza el tamaño y peso del depósito. Su longitud de 10,516 metros puede parecer elevada, pero las locomotoras de hoy en día tienen una longitud superior a los 15 metros, por lo que existe margen para su instalación en las mismas.

En cuanto al peso, el depósito no supera con ningún material los 215 Kg, siendo este un peso ligero para el tamaño y capacidad del depósito, y más teniendo en cuenta que una locomotora pesa entre 100 y 200 toneladas.

Por tanto, tanto en tamaño como en peso, la instalación de nuestro depósito en una locomotora es viable.

5.2 DESPLAZAMIENTOS

El desplazamiento máximo se produce en el casquete izquierdo, ya que en los estudios no ha sido fijado en esa zona. Aun así, con ningún material se superan los 30 mm. Ésta puede parecer una cifra alta, pero siempre hay que tener en cuenta que el depósito mide más de diez metros de longitud, por lo que, en proporción a dicho tamaño, es una cifra correcta. Sin embargo, sí que podría suponer algún problema a la hora de elegir la ubicación del depósito, sujetarlo o al integrar la capa intermedia con el resto de capas, por lo que la mejor opción sería el material compuesto con IM10, con un desplazamiento máximo de 19,73 mm, siendo este el valor más bajo de todos los materiales estudiados.

5.3 DEFORMACIONES UNITARIAS

En cuando a la deformación del depósito, este se deforma, principalmente, por la cara del cilindro. Lo hace de manera bastante uniforme, aunque de una manera un poco más acentuada en las zonas cercanas a los casquetes, lo cual habría que tener en cuenta, por ejemplo, a la hora de poner fijaciones en esa zona o integrar la capa intermedia con el resto de capas. Por ello, la opción más óptima sería el material compuesto con IM10, que posee la deformación unitaria más pequeña con un valor de 0,0093.

5.4 FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad es el valor más importante a la hora de elegir el material, ya que determina la seguridad con la que funcionará el depósito. Todos los materiales estudiados tienen un factor de seguridad mayor que la unidad, por lo que todos aguantan la presión requerida. Aun así, para que el depósito tenga más margen en su funcionamiento, pudiendo soportar sobreesfuerzos por causas ajenas a nuestro control, sería idóneo tener un coeficiente de seguridad mayor que 1,5. Por esa razón, el material compuesto con IM10, con un factor de seguridad de 1,638, sería la opción idónea.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

En primer lugar, la geometría de partida de la capa intermedia ha resultado ser válida para todos los materiales considerados. Todos ellos han superado los ensayos simulados, por lo que el depósito podría funcionar con cualquiera de ellos.

Si nos centramos en la tensión de Von Mises, su distribución ha sido la misma con todos los materiales, ya que esta depende únicamente de la geometría y de la presión aplicada en el estudio.

En cuanto a los desplazamientos, con todos los materiales se han obtenido resultados aptos para la viabilidad del depósito, siendo más bajos cuanto mayor sea el módulo de Young.

Respecto a las deformaciones unitarias, éstas se reparten de una manera bastante uniforme con todos los materiales y en unos márgenes correctos, teniendo un valor inversamente proporcional al módulo de Young del material.

Atendiendo al factor de seguridad, con todos los materiales se supera la unidad, por lo que ninguno rompe con las condiciones del estudio. Éste es superior cuanto mayor sea el límite elástico del material.

Se observa también que los casquetes es la parte menos crítica. Sin embargo, la parte del cilindro próxima al casquete, ha demostrado ser en las simulaciones la parte más sensible a la presión estudiada.

Así, se concluye que la geometría establecida en origen fue adecuada, siendo además factible su instalación en una locomotora. Además, atendiendo a los desplazamientos, las deformaciones unitarias y el factor de seguridad, la opción más segura sería usar el material compuesto con IM10. No obstante,

este material es el más caro, por lo que se podrían barajar el resto de los materiales siempre y cuando cumplan con los requisitos de desplazamientos, deformaciones unitarias y factor de seguridad que se necesiten.

Capítulo 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez diseñado el depósito, como futura investigación, se podría tratar de diseñar unos soportes para fijar el depósito a la locomotora. Como se ve en la figura 65, se ha ensayado un pequeño ejemplo (sin boquilla).

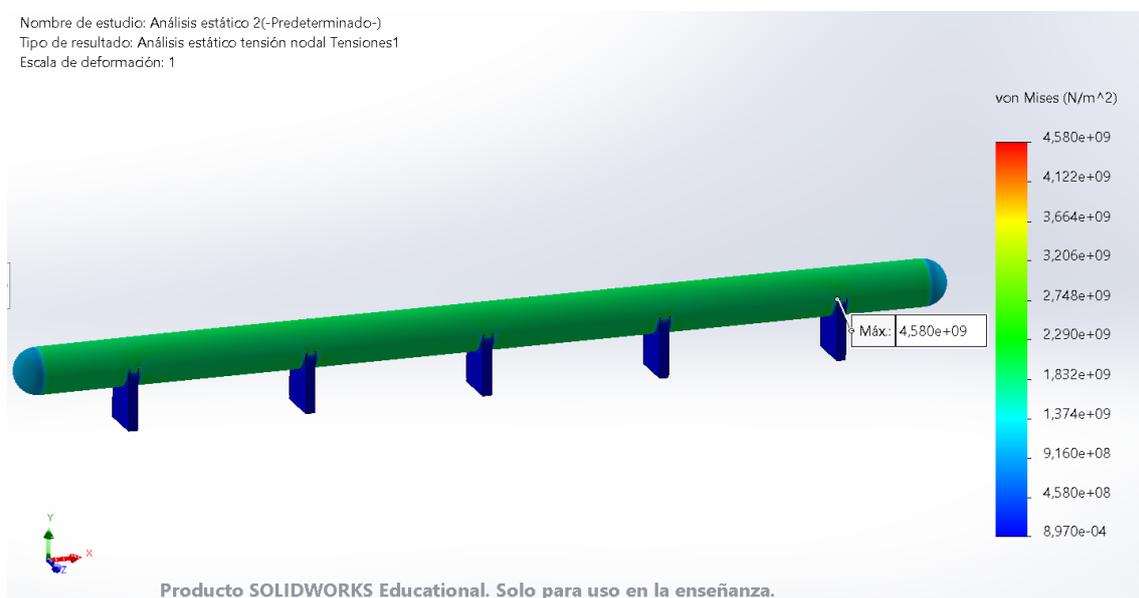


Figura 65: Estudio Von Mises con soportes

Se obtiene como resultado importantes concentraciones de tensiones en la unión de los soportes con el depósito. En la figura 66 se ve en detalle.

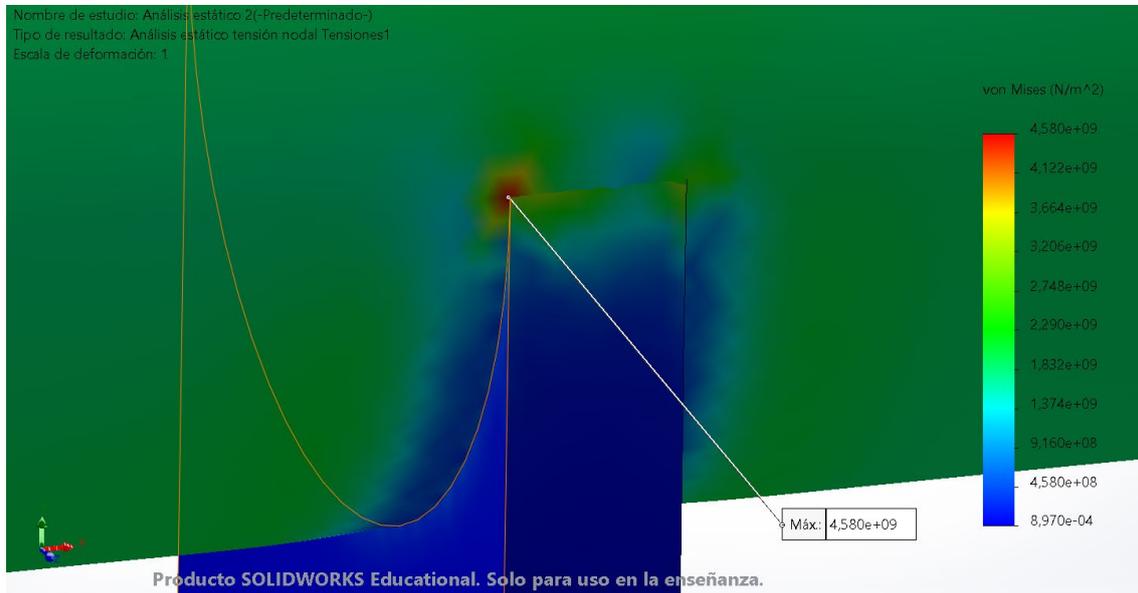


Figura 66: Detalle estudio Von Mises con soportes

Por tanto, para futuras líneas de investigación, se podría tratar de diseñar unos soportes con una geometría que minimizasen esa concentración de tensiones

Otra posible futura línea de investigación podría ser escoger los materiales óptimos para la capa interior y externa del depósito, y realizar un ensayo completo del depósito compuesto por las tres capas.

ANEXOS

ANEXO I: Fichas técnicas de materiales



Product Data Sheet

HexTow® AS4 carbon fiber is a continuous, high strength, high strain, PAN based fiber available in 3,000 (3K), 6,000 (6K) and 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties, and is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

AS4-GP 3k (1%), AS4-GP 12k (0.9%), and AS4 12k carbon fibers have been qualified to NMS 818 Carbon Fiber Specification (NCAMP). This allows customers to call out an industry standard, aerospace grade carbon fiber without the need to write and maintain their own specification.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength	650 ksi	4501 Mpa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	33.5 Msi	231 GPa
Ultimate Elongation at Failure	1.8%	1.8%
Density	0.0647 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length		
3K	11.8 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.210 g/m
6K	23.9 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.427 g/m
12K	48.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.858 g/m
Approximate Yield		
3K	7,086 ft/lb	4.75 m/g
6K	3,485 ft/lb	2.34 m/g
12K	1,734 ft/lb	1.17 m/g
Tow Cross-Sectional Area		
3K	1.82 x 10 ⁻⁴ in ²	0.12 mm ²
6K	3.70 x 10 ⁻⁴ in ²	0.24 mm ²
12K	7.43 x 10 ⁻⁴ in ²	0.48 mm ²
Filament Diameter	0.280 mil	7.1 microns
Carbon Content	94.0%	94.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	310 ksi	2137 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	19.6 Msi	135 GPa	
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	
0° Flexural Strength	274 ksi	1889 MPa	ASTM D790
0° Flexural Modulus	18.4 Msi	127 GPa	ASTM D2344
0° Short Beam Shear Strength	18.5 ksi	128 MPa	
0° Compressive Strength	222 ksi	1530 MPa	ASTM Mod. D695
0° Compressive Modulus	18.6 Msi	128 GPa	
0° Open Hole Tensile Strength	63.5 ksi	438 MPa	ASTM D5766
90° Tensile Strength	9.3 ksi	64 MPa	ASTM D3039
Fiber Volume	60%	60%	



Yarn/Tow Characteristics	U.S. Units	SI Units
Specific Heat	0.28 Btu/lb-°F	0.27 cal/g-°C
Electrical Resistivity	5.6×10^8 ohm-ft	1.7×10^8 ohm-cm
Coefficient of Thermal Expansion	-0.35 ppm/°F	-0.63 ppm/°C
Thermal Conductivity	3.95 Btu/hr-ft-°F	6.83 W/m-°K

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace grade specification HS-CP-5000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.

Sizing

Size	Compatibility	Recommended Uses
GP	Epoxy, Phenolic, Vinyl Ester, Polyurethane, Cyanate Ester, BMI	Weaving, Filament Winding, Prepreg Tape
G	Epoxy, Phenolic, Polyurethane	Weaving, Filament Winding, Prepreg Tape
Unsize	All Resins	Prepreg Tape

*Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.

Packaging

Standard packaging of HexTow® AS4 is as follows:

Filament Count	Size	Nominal Weight		Nominal Length	
		(lb)	(kg)	(ft)	(m)
3K	G (1%)	5.0	2.3	35,430	10,800
	GP (1%)	6.0	2.7	42,520	12,960
6K	G (1%)	3.0	1.4	10,450	3,190
	GP (1%)	6.0	2.7	20,910	6,375
12K	GP (0.25%)	8.0	3.6	13,880	4,230
	GP (1%)				
	Unsize	10.0	4.5	17,340	5,290

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Safety Data Sheet (SDS) before use of this product.



Product Data Sheet

HexTow® AS7 carbon fiber is a continuous, high strength, high strain, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties, and is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

AS7-GS 12k (0.5%) carbon fiber has been qualified to NMS 818 Carbon Fiber Specification (NCAMP). This allows customers to call out an industry standard, aerospace grade carbon fiber without the need to write and maintain their own specification.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength	715 ksi	4930 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	35.3 Msi	243 GPa
Ultimate Elongation at Failure	1.8%	1.8%
Density	0.0647 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length (12K)	44.8 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.800 g/m
Approximate Yield (12K)	1,880 ft/lb	1.25 m/g
Tow Cross-Sectional Area (12K)	6.93 x 10 ⁻⁴ in ²	0.45 mm ²
Filament Diameter	0.271 mil	6.9 microns
Carbon Content	94.0%	94.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	340 ksi	2344 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	19.2 Msi	133 GPa	
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	ASTM D2344
0° Short Beam Shear Strength	18.4 ksi	127 MPa	
0° Compressive Strength	260 ksi	1790 MPa	ASTM Mod. D695
Open Hole Tensile Strength	52.9 ksi	364 MPa	ASTM D5768
Open Hole Compressive Strength	46.0 ksi	317 MPa	ASTM D6484
Fiber Volume	60%	60%	

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace grade specification HS-CP-4000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment of HS-CP-4000 fiber.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.



Sizing

Size	Compatibility	Recommended Uses
GP	Epoxy, Phenolic, Vinyl Ester, Polyurethane, Cyanate Ester, BMI	Weaving, Filament Winding, Prepreg Tape
GS	Epoxy, Vinyl Ester, Polyurethane	Prepreg Tape
Unsize	All Resins	Prepreg Tape

**Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.*

Packaging

Standard packaging of HexTow® AS7 is as follows:

Filament Count	Sizing	Nominal Weight		Nominal Length	
		(lb)	(kg)	(ft)	(m)
12K	GP (0.9%)	8.0	3.6	14,880	4,540
	GS (0.5%)				
	Unsize				

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Safety Data Sheet (SDS) before use of this product.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets.

Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HiFlow® RTM resins
- HexBond® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycomb
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact>

©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

CTA-SIF AG23



Product Data Sheet

HexTow® IM6 carbon fiber is a continuous, high performance, intermediate modulus, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties. It is suggested for use in prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

The unique properties of HexTow® IM6 fiber, such as higher tensile strength and modulus, as well as good shear strength, allow structural designers to achieve both higher safety margins for both stiffness and strength critical applications.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength (12K)	850 ksi	5880 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	40.5 Msi	279 GPa
Ultimate Elongation at Failure (12K)	1.9%	1.9%
Density	0.0636 lb/in ³	1.76 g/cm ³
Weight/Length (12K)	25.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.446 g/m
Approximate Yield (12K)	3,337 ft/lb	2.24 m/g
Tow Cross-Sectional Area (12K)	3.93 x 10 ⁻⁴ in ²	0.25 mm ²
Filament Diameter	0.204 mil	5.2 microns
Carbon Content	95.0%	95.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

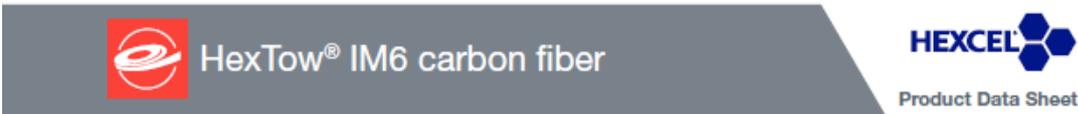
Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	400 ksi	2,758 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	23.0 Msi	159 GPa	
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	
0° Flexural Strength	260 ksi	1,793 MPa	ASTM D790
0° Flexural Modulus	21.5 Msi	148 GPa	
0° Short Beam Shear Strength	18.0 ksi	124 MPa	ASTM D2344
Fiber Volume	60%	60%	

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace grade specification HS-CP-5000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.



Sizing

Size	Compatibility	Recommended Uses
G	Epoxy, Phenolic, Polyurethane	Weaving, Prepreg Tape
Unsize	All Resins	Prepreg Tape

**Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.*

Packaging

Standard packaging of HexTow® IM6 is as follows:

Filament Count	Sizing	Nominal Weight		Nominal Length	
		(lb)	(kg)	(ft)	(m)
12K	G (0.25%)	4.0	1.8	13,330	4,060
	Unsize				

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Material Safety Data Sheet (MSDS) before use of this product.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HiFlow® RTM resins
- HexBond® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycomb
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact>

©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

CTA.310 AG.23



Product Data Sheet

HexTow® IM7 carbon fiber is a continuous, high performance, intermediate modulus, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties. It is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

The unique properties of HexTow® IM7 fiber, such as higher tensile strength and modulus, as well as good shear strength, allow structural designers to achieve both higher safety margins for both stiffness and strength critical applications.

IM7-G 12K (0.25%) carbon fiber has been qualified to NMS 818 Carbon Fiber Specification (NCAMP). This allows customers to call out an industry standard, aerospace grade carbon fiber without the need to write and maintain their own specification.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength	820 ksi	5670 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	40.0 Msi	276 GPa
Ultimate Elongation at Failure	1.8%	1.8%
Density	0.0643 lb/in ³	1.78 g/cm ³
Weight/Length		
6K	12.5 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.223 g/m
12K	25.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.446 g/m
Approximate Yield		
6K	6,874 ft/lb	4.48 m/g
12K	3,337 ft/lb	2.24 m/g
Tow Cross-Sectional Area		
6K	1.94 x 10 ⁻⁴ in ²	0.13 mm ²
12K	3.89 x 10 ⁻⁴ in ²	0.25 mm ²
Filament Diameter	0.203 mil	5.2 microns
Carbon Content	95.0%	95.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	395 ksi	2,723 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	23.8 Msi	164 GPa	
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	
0° Flexural Strength	270 ksi	1,862 MPa	ASTM D790
0° Flexural Modulus	22.0 Msi	152 GPa	
0° Short Beam Shear Strength	18.5 ksi	128 MPa	ASTM D2344
0° Compressive Strength	245 ksi	1,689 MPa	ASTM Mod. D695
0° Compressive Modulus	21.7 Msi	150 GPa	
Open Hole Tensile Strength	62.1 ksi	428 MPa	ASTM D5766
Open Hole Compressive Strength	48.9 ksi	337 MPa	ASTM D6484
90° Tensile Strength	9.3 ksi	64.1 MPa	ASTM D3039
Fiber Volume	60%	60%	



HexTow[®] IM7 carbon fiber



Product Data Sheet

Yarn/Tow Characteristics	U.S. Units	SI Units
Specific Heat	0.21 Btu/lb-°F	0.21 cal/g-°C
Electrical Resistivity	4.9×10^{-5} ohm-ft	1.5×10^{-3} ohm-cm
Coefficient of Thermal Expansion	-0.36 ppm/°F	-0.64 ppm/°C
Thermal Conductivity	3.12 Btu/hr-ft-°F	5.40 W/m-°K

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace grade specification HS-CP-5000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.

Sizing

Size	Compatibility	Recommended Uses
GP	Epoxy, Phenolic, Vinyl Ester, Polyurethane, Cyanate Ester, BMI	Weaving, Filament Winding, Prepreg Tape
G	Epoxy, Phenolic, Polyurethane	Weaving, Prepreg Tape
Unsize	All Resins	Prepreg Tape

**Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.*

Yarn/Tow Characteristics	U.S. Units	SI Units
Specific Heat	0.21 Btu/lb-°F	0.21 cal/g-°C
Electrical Resistivity	4.9×10^{-5} ohm-ft	1.5×10^{-3} ohm-cm
Coefficient of Thermal Expansion	-0.36 ppm/°F	-0.64 ppm/°C
Thermal Conductivity	3.12 Btu/hr-ft-°F	5.40 W/m-°K

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace grade specification HS-CP-5000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available Sizes on our website or contact our technical team for additional information.



HexTow® IM7 carbon fiber



Product Data Sheet

Packaging

Standard packaging of HexTow® IM7 is as follows:

Filament Count	Sizing	Nominal Weight		Nominal Length	
		(lb)	(kg)	(ft)	(m)
6K	GP (1%)	5.0	2.3	33,330	10,160
12K	Unsize	4.0	1.8	13,330	4,060
	G (0.25%)	8.0	3.6	26,670	8,130
	GP (0.9%)				

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Safety Data Sheet (SDS) before use of this product.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets.

Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HiFlow® RTM resins
- HexBond® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycomb
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact>

©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

CTA 351 / AG23

3



Product Data Sheet

HexTow® IM8 carbon fiber is a continuous, high performance, intermediate modulus, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties. It is suggested for use in prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion where additional strength and modulus are required over IM7.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength	895 ksi	6170 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	44.1 Msi	304 GPa
Ultimate Elongation at Failure	1.9%	1.9%
Density	0.0647 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length (12K)	25.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.446 g/m
Approximate Yield (12K)	3,337 ft/lb	2.24 m/g
Tow Cross-Sectional Area (12K)	3.86 x 10 ⁻⁴ in ²	0.25 mm ²
Filament Diameter	0.202 mil	5.1 microns
Carbon Content	95.0%	95.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	430 ksi	2963 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	26.2 Msi	181 GPa	
0° Tensile Strain	1.5%	1.5%	
0° Short Beam Shear Strength	18.5 ksi	128 MPa	ASTM D2344
0° Compressive Strength	258 ksi	1781 MPa	ASTM Mod. D695
Open Hole Tensile Strength	61.8 ksi	426 MPa	ASTM D5766
Open Hole Compressive Strength	42.6 ksi	293 MPa	ASTM D6484
Fiber Volume	60%	60%	

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace grade specification HS-CP-5000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.



HexTow® IM8 carbon fiber



Product Data Sheet

Sizing

Size	Compatibility	Recommended Uses
GP	Epoxy, Phenolic, Vinyl Ester, Polyurethane, Cyanate Ester, BMI	Weaving, Filament Winding, Prepreg Tape
GS	Epoxy, Vinyl Ester, Polyurethane	Prepreg Tape

**Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.*

Packaging

Standard packaging of HexTow® IM8 is as follows:

Filament Count	Sizing	Nominal Weight		Nominal Length	
		(lb)	(kg)	(ft)	(m)
12K	GP (0.3%)	4.0	1.8	13,330	4,060
	GP (0.9%)				
	GS (0.5%)				

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Safety Data Sheet (SDS) before use of this product.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HiFlow® RTM resins
- HexBond® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycomb
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact>

©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

CTA 352 AG23



Product Data Sheet

HexTow® IM10 carbon fiber is a continuous, high performance, intermediate modulus, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties. It is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

The unique properties of HexTow® IM10 fiber, such as the highest commercially available tensile strength, intermediate modulus, and good shear strength allow structural designers to achieve higher safety margins for both stiffness and strength critical applications.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength	990 ksi	6826 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	45.4 Msi	313 GPa
Ultimate Elongation at Failure	2.0%	2.0%
Density	0.0647 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length (12K)	18.1 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.324 g/m
Approximate Yield (12K)	4,594 ft/lb	3.09 m/g
Tow Cross-Sectional Area (12K)	2.81 x 10 ⁻⁴ in ²	0.18 mm ²
Filament Diameter	0.173 mil	4.4 microns
Carbon Content	95%	95%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	480 ksi	3310 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	27.5 Msi	190 GPa	
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	
90° Tensile Strength	11.6 ksi	80 MPa	ASTM D3039
0° Short Beam Shear Strength	18.1 ksi	125 MPa	ASTM D2344
0° Compressive Strength	260 ksi	1793 MPa	ASTM Mod. D695
0° Compressive Modulus	23.8 Msi	164 GPa	
Open Hole Tensile Strength	86 ksi	593 MPa	ASTM D5766
Open Hole Compressive Strength	53.0 ksi	365 MPa	ASTM D6484
Fiber Volume	60%	60%	

Yarn/Tow Characteristics	U.S. Units	SI Units
Specific Heat	0.21 Btu/lb-°F	0.21 Cal/g-°C
Electrical Resistivity	4.3 x 10 ⁻⁵ ohm-ft	1.3 x 10 ⁻³ ohm-cm
Coefficient of Thermal Expansion	-0.39 ppm/°F	-0.70 ppm/°C
Thermal Conductivity	3.55 Btu/hr-ft-°F	6.14 W/m-°K



HexTow® IM10 carbon fiber



Product Data Sheet

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel industrial grade specification HS-CP-3000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Conformance will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.

Sizing

Size	Compatibility	Recommended Uses
GP	Epoxy, Phenolic, Vinyl Ester, Polyurethane, Cyanate Ester, BMI	Weaving, Filament Winding, Prepreg Tape
GS	Epoxy, Vinyl Ester, Polyurethane	Prepreg Tape

**Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.*

Packaging

Standard packaging of HexTow® IM10 is as follows:

Filament Count	Sizing	Nominal Weight		Nominal Length	
		(lb)	(kg)	(ft)	(m)
12K	GP (0.9%)	4.0	1.8	18,380	5,600
	GS (0.5%)	2.0	0.9	9,190	2,800

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Safety Data Sheet (SDS) before use of this product.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HiFlow® RTM resins
- HexBond® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycomb
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact>

©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

CTR-354-AG23

2



Product Data Sheet

HexTow® IMA carbon fiber is a continuous, high performance, intermediate modulus, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties. It is suggested for use in prepregging.

The unique properties of HexTow® IMA fiber, such as higher tensile strength and modulus, as well as good shear strength, allow structural designers to achieve both higher safety margins for both stiffness and strength critical applications.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength (12K)	880 ksi	6,067 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	43.2 Msi	298 GPa
Ultimate Elongation at Failure (12K)	1.9%	1.9%
Density	0.0648 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length (12K)	25.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.446 g/m
Approximate Yield (12K)	3,345 ft/lb	2.25 m/g
Tow Cross-Sectional Area (12K)	3.83 x 10 ⁻⁴ in ²	0.25 mm ²
Filament Diameter	0.202 mil	5.1 microns
Carbon Content	95.0%	95.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	426 ksi	2935 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	25.5 Msi	176 GPa	
0° Tensile Strain	1.5%	1.5%	
0° Short Beam Shear Strength	17.2 ksi	119 MPa	ASTM D2344
0° Compressive Strength	276 ksi	1903 MPa	ASTM Mod. D695
Open Hole Tensile Strength	69.2 ksi	477 MPa	ASTM D5766
Open Hole Compressive Strength	44.8 ksi	309 MPa	ASTM D6484
Fiber Volume	60%	60%	



HexTow® IMA carbon fiber



Product Data Sheet

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace specification HS-CP-6000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.

Sizing

Size	Compatibility	Recommended Uses
GS	Epoxy, Vinyl Ester, Polyurethane	Prepreg Tape

**Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.*

Packaging

Standard packaging of HexTow® IMA is as follows:

Filament Count	Sizing	Nominal Weight		Nominal Length	
		(lb)	(kg)	(ft)	(m)
12K	GS (0.5%)	8.0	3.6	26,670	8,130

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Safety Data Sheet (SDS) before use of this product.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HiFlow® RTM resins
- HexBond® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycomb
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

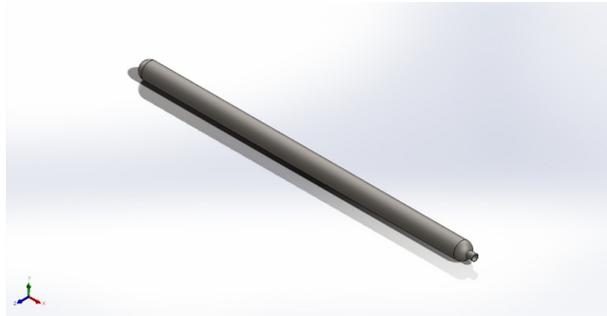
<http://www.hexcel.com/contact>

©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

CTA 36PA/G23

2

ANEXO II: Resultados de los estudios con SolidWorks



Simulación de EnsamblajeDepósitoPablo

Fecha: viernes, 26 de abril de 2024
Diseñador: Pablo Zavala Sáez
Nombre de estudio: AS4
Tipo de análisis: Análisis estático

Información de modelo



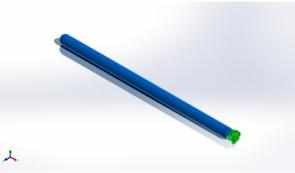
Nombre del modelo: EnsamblajeDepósitoPablo
Configuración actual: Predeterminado

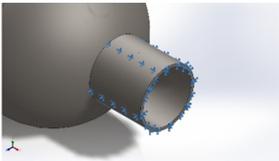
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Saliente-Extruir1 	Sólido	Masa:1,90293 kg Volumen:0,00119381 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:18,6487 N	C:\Users\pzpab\ OneDrive\Docu- mentos\TFG\Pab- lo_ensayos\IMA\ Boquilla.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024
Cortar-Extruir1 	Sólido	Masa:213,435 kg Volumen:0,133899 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:2.091,66 N	C:\Users\pzpab\ OneDrive\Docu- mentos\TFG\Pab- lo_ensayos\IMA\ DepositoPablo.S- LDPRT Abr 26 17:32:52 2024

Propiedades de estudio

Nombre de estudio	AS4
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA)

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AS4 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 2,137e+09 N/m² Módulo elástico: 1,35e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,337 Densidad: 1.594 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Bocquilla-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(DepositoPablo-1)</p>
Datos de curva:N/A		

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Cargas y sujeciones

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 3 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 70 Unidades: N/mm² (MPa) Ángulo de fase: 0 Unidades: deg</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado independiente

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	30 mm
Tamaño mínimo del elemento	30 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06

Momentos de reacción

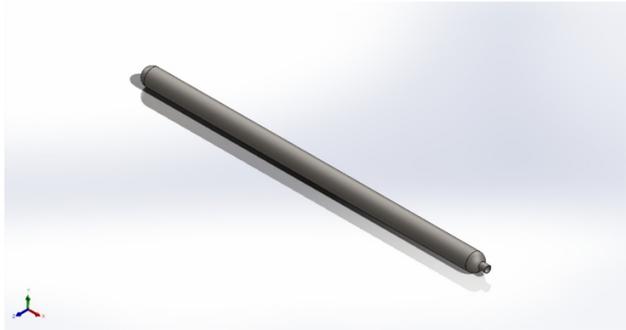
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	43,4536	1.278,16	50.603,4	50.619,6

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33



Simulación de Ensamblaje Depósito Pabl

O

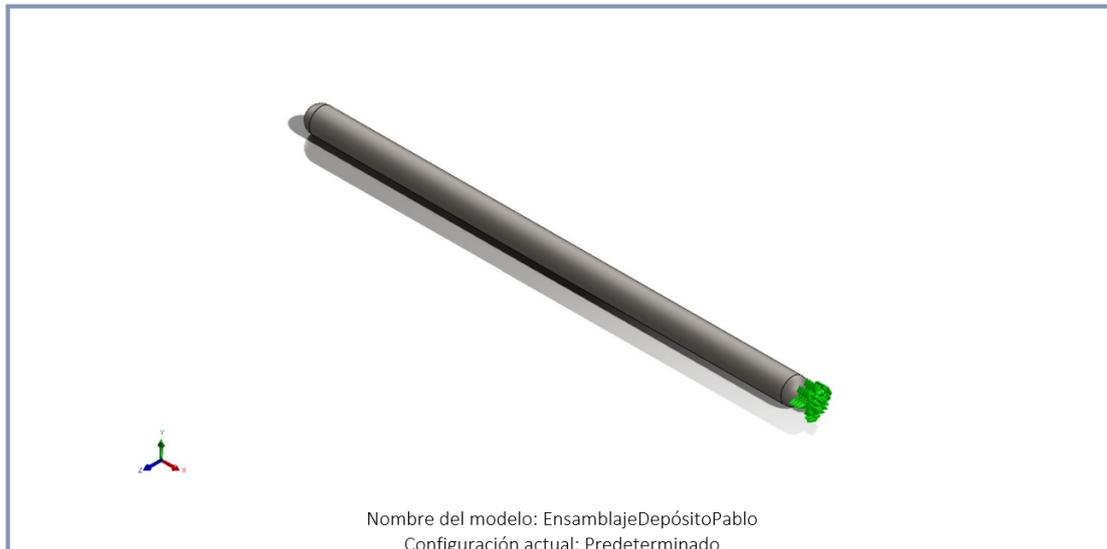
Fecha: viernes, 26 de abril de 2024

Diseñador: Pablo Zavala Sáez

Nombre de estudio: AS7

Tipo de análisis: Análisis estático

Información de modelo



Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Saliente-Extruir1</p>	Sólido	Masa:1,90293 kg Volumen:0,00119381 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:18,6487 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\Boquilla.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024
 <p>Cortar-Extruir1</p>	Sólido	Masa:213,435 kg Volumen:0,133899 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:2.091,66 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\DepositoPablo.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024

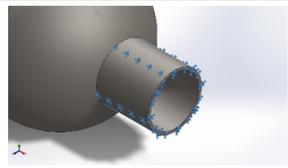
Propiedades de estudio

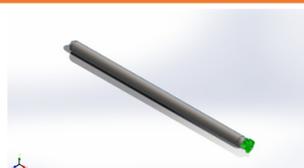
Nombre de estudio	AS7
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA)

Propiedades de material

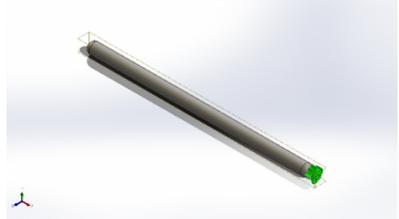
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AS7 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 2,344e+09 N/m² Módulo elástico: 1,33e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,337 Densidad: 1.594 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Boquilla-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(DepositoPablo-1)</p>
Datos de curva: N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 3 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 70 Unidades: N/mm² (MPa) Ángulo de fase: 0 Unidades: deg</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado independiente

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	30 mm
Tamaño mínimo del elemento	30 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06

Momentos de reacción

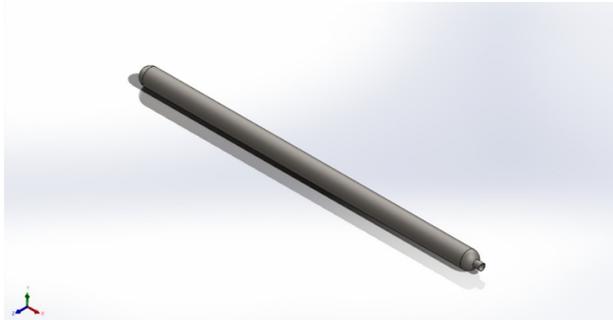
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	44,0161	1.278,16	50.603,4	50.619,6

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33



Simulación de EnsamblajeDepósitoPabl

0

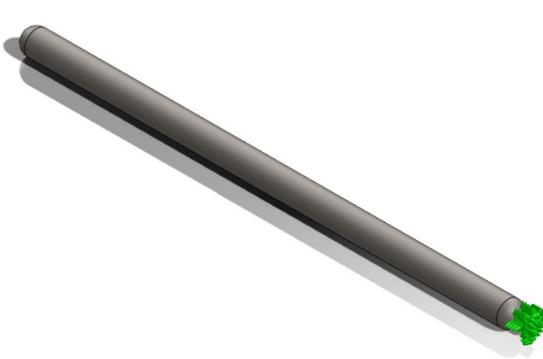
Fecha: viernes, 26 de abril de 2024

Diseñador: Pablo Zavala Sáez

Nombre de estudio: IM6

Tipo de análisis: Análisis estático

Información de modelo



Nombre del modelo: EnsamblajeDepósitoPablo
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Saliente-Extruir1</p>	Sólido	Masa:1,88144 kg Volumen:0,00119381 m ³ Densidad:1.576 kg/m ³ Peso:18,4381 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\Boquilla.SLDPR Abr 26 17:32:52 2024
 <p>Cortar-Extruir1</p>	Sólido	Masa:211,025 kg Volumen:0,133899 m ³ Densidad:1.576 kg/m ³ Peso:2.068,04 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\DepositoPablo.SLDPR Abr 26 17:32:52 2024

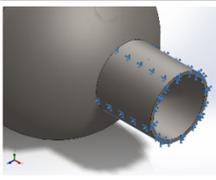
Propiedades de estudio

Nombre de estudio	IM6
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA)

Propiedades de material

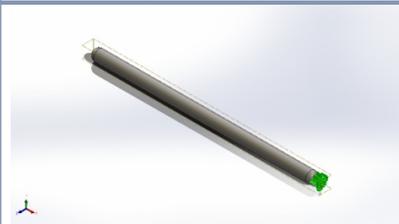
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: IM6 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 2,758e+09 N/m² Módulo elástico: 1,59e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,337 Densidad: 1.576 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Boquilla-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(DepositoPablo-1)</p>
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 3 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 70 Unidades: N/mm² (MPa) Ángulo de fase: 0 Unidades: deg</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado independiente

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	30 mm
Tamaño mínimo del elemento	30 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06

Momentos de reacción

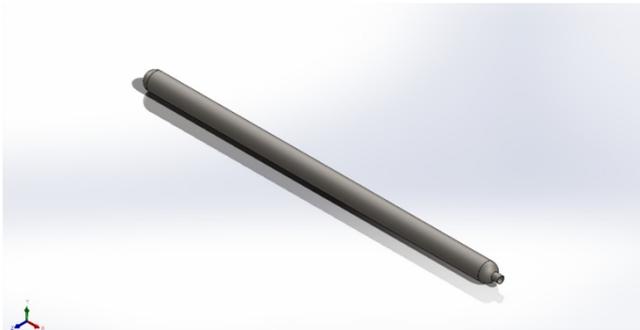
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	43,5161	1.278,16	50.603,4	50.619,6

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33

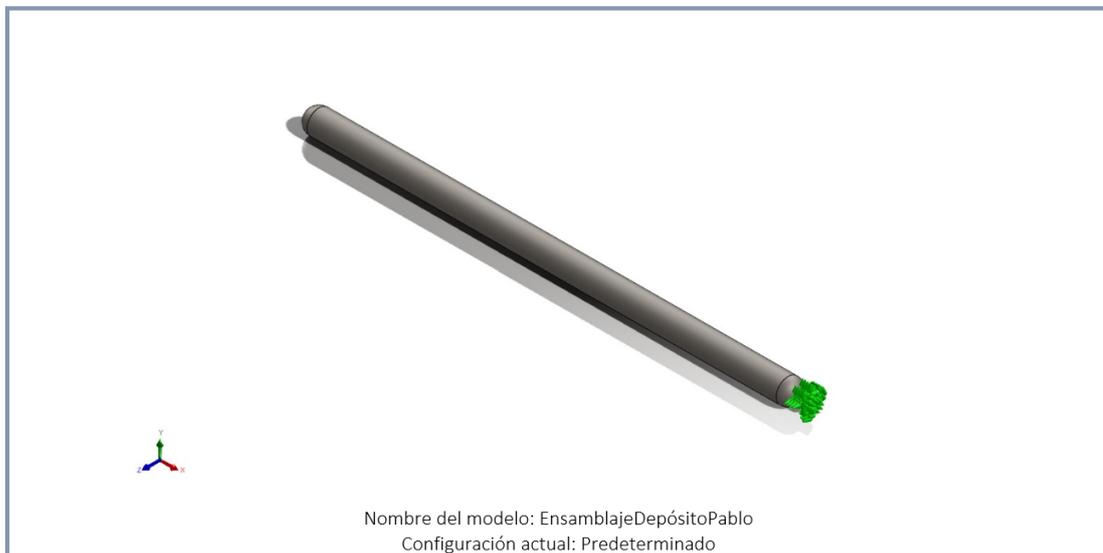


Simulación de EnsamblajeDepósitoPabl

0

Fecha: viernes, 26 de abril de 2024
Diseñador: Pablo Zavala Sáez
Nombre de estudio: IM7
Tipo de análisis: Análisis estático

Información de modelo



Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Saliente-Extruir1</p>	Sólido	Masa:1,89576 kg Volumen:0,00119381 m ³ Densidad:1.588 kg/m ³ Peso:18,5785 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\Boquilla.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024
 <p>Cortar-Extruir1</p>	Sólido	Masa:212,631 kg Volumen:0,133899 m ³ Densidad:1.588 kg/m ³ Peso:2.083,79 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\DepositoPablo.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024

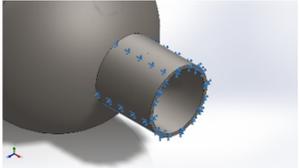
Propiedades de estudio

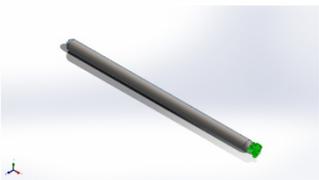
Nombre de estudio	IM7
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA)

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: IM7</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 2,723e+09 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 1,64e+11 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,337</p> <p>Densidad: 1.588 kg/m³</p>	Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Boquilla-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(DepositoPablo-1)
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 3 cara(s)</p> <p>Tipo: Normal a cara seleccionada</p> <p>Valor: 70</p> <p>Unidades: N/mm² (MPa)</p> <p>Ángulo de fase: 0</p> <p>Unidades: deg</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado independiente

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	30 mm
Tamaño mínimo del elemento	30 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06

Momentos de reacción

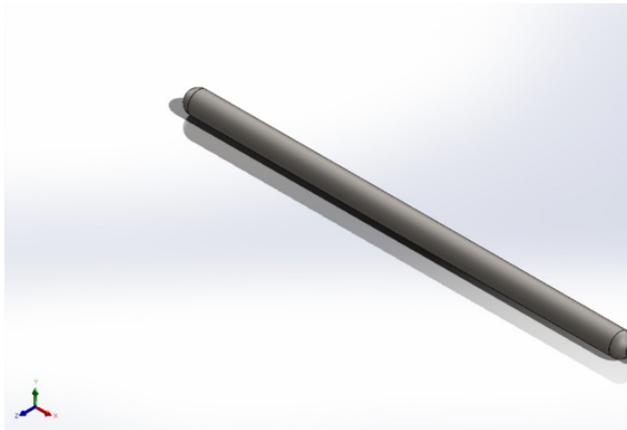
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	43,4536	1.278,16	50.603,4	50.619,6

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33



Simulación de Ensamblaje Depósito o Pablo

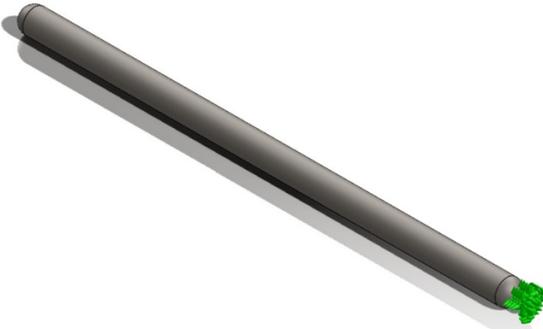
Fecha: viernes, 26 de abril de 2024

Diseñador: Pablo Zavala Sáez

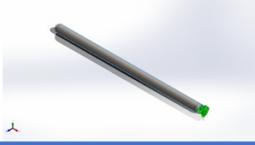
Nombre de estudio: IM8

Tipo de análisis: Análisis estático

Información de modelo



Nombre del modelo: EnsamblajeDepósitoPablo
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Saliente-Extruir1</p>	Sólido	Masa:1,90293 kg Volumen:0,00119381 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:18,6487 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\Boquilla.SLDPR Abr 26 17:32:52 2024
 <p>Cortar-Extruir1</p>	Sólido	Masa:213,435 kg Volumen:0,133899 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:2.091,66 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\DepositoPablo.SLDPR Abr 26 17:32:52 2024

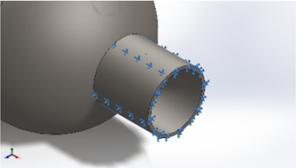
Propiedades de estudio

Nombre de estudio	IM8
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA)

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: IM8 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 2,963e+09 N/m² Módulo elástico: 1,81e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,337 Densidad: 1.594 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Boquilla-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(DepositoPablo-1)</p>
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 3 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 70 Unidades: N/mm² (MPa) Ángulo de fase: 0 Unidades: deg</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado independiente

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	30 mm
Tamaño mínimo del elemento	30 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06

Momentos de reacción

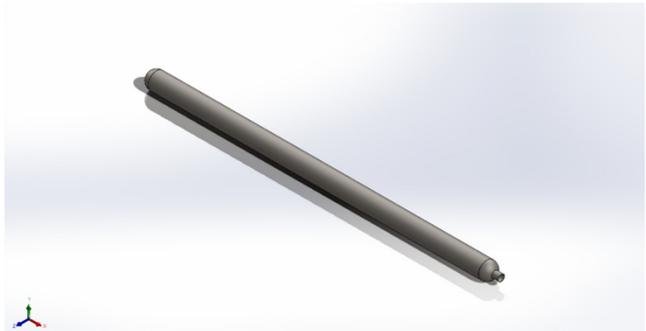
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	43,9223	1.278,16	50.603,4	50.619,6

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33



Información de modelo

Simulación de EnsamblajeDepósitoPabl

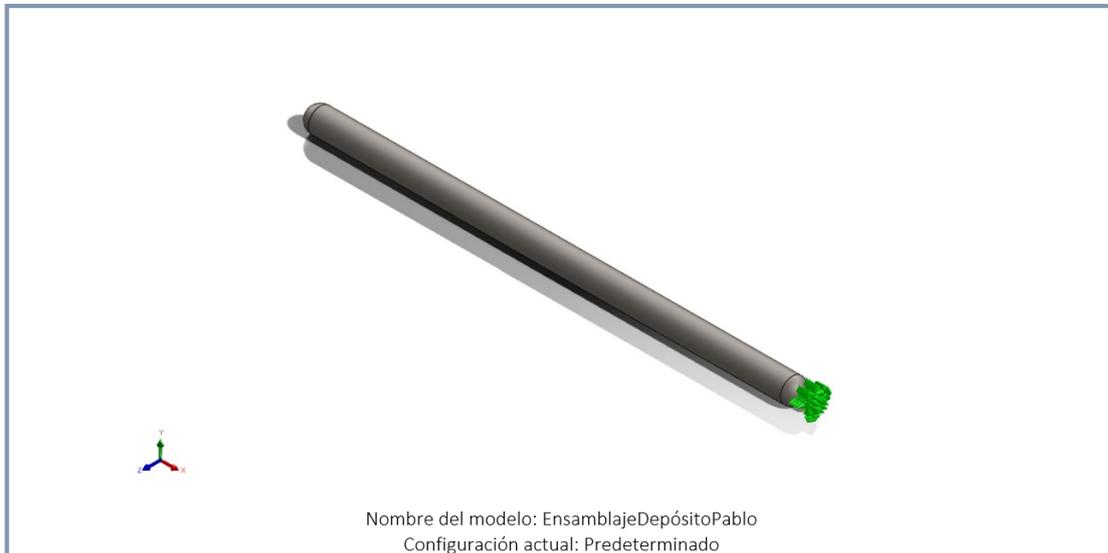
0

Fecha: viernes, 26 de abril de 2024

Diseñador: Pablo Zavala Sáez

Nombre de estudio: IM10

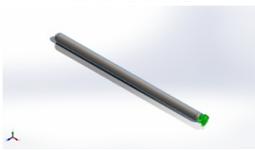
Tipo de análisis: Análisis estático



Nombre del modelo: EnsamblajeDepósitoPablo

Configuración actual: Predeterminado

Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Saliente-Extruir1</p>	Sólido	Masa:1,90293 kg Volumen:0,00119381 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:18,6487 N	C:\Users\pzapab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\Boquilla.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024
 <p>Cortar-Extruir1</p>	Sólido	Masa:213,435 kg Volumen:0,133899 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:2.091,66 N	C:\Users\pzapab\OneDrive\Documents\TFG\Pablo_ensayos\IMA\DepositoPablo.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024

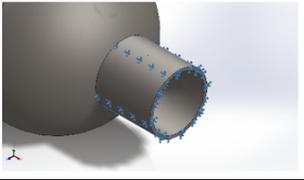
Propiedades de estudio

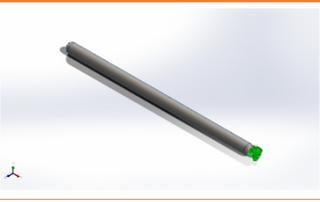
Nombre de estudio	IM10
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\pznab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA)

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: IM10 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 3,31e+09 N/m² Módulo elástico: 1,9e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,337 Densidad: 1.594 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Boquilla-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(DepositoPablo-1)</p>
Datos de curva: N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 3 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 70 Unidades: N/mm² (MPa) Ángulo de fase: 0 Unidades: deg</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado independiente

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	30 mm
Tamaño mínimo del elemento	30 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06

Momentos de reacción

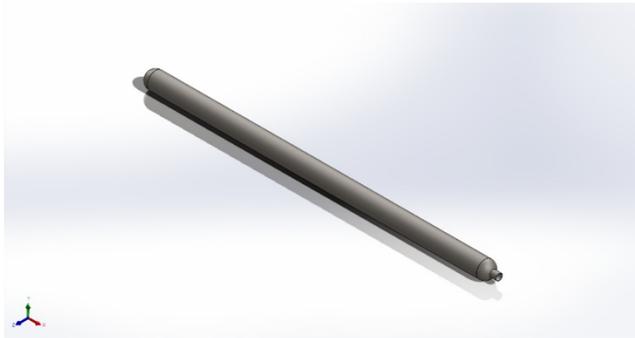
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	43,9223	1.278,16	50.603,4	50.619,6

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33



Simulación de EnsamblajeDepósitoPabl

0

Fecha: viernes, 26 de abril de 2024

Diseñador: Pablo Zavala Sáez

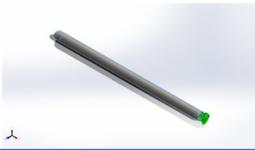
Nombre de estudio: IMA

Tipo de análisis: Análisis estático

Información de modelo



Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Saliente-Extruir1</p>	Sólido	Masa:1,90293 kg Volumen:0,00119381 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:18,6487 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA\Boquilla.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024
 <p>Cortar-Extruir1</p>	Sólido	Masa:213,435 kg Volumen:0,133899 m ³ Densidad:1.594 kg/m ³ Peso:2.091,66 N	C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA\DepositoPablo.SLDPRT Abr 26 17:32:52 2024

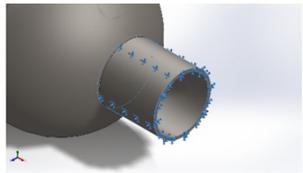
Propiedades de estudio

Nombre de estudio	IMA
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\pzpab\OneDrive\Documentos\TFG\Pablo_ensayos\IMA)

Propiedades de material

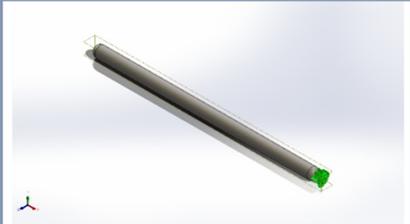
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: IMA Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 2,935e+09 N/m² Módulo elástico: 1,76e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,337 Densidad: 1.594 kg/m³</p>	Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Boquilla-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(DepositoPablo-1)
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 3 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 70 Unidades: N/mm² (MPa) Ángulo de fase: 0 Unidades: deg</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado independiente

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	30 mm
Tamaño mínimo del elemento	30 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	2,19933e+06	-0,976563	9,125	2,19933e+06

Momentos de reacción

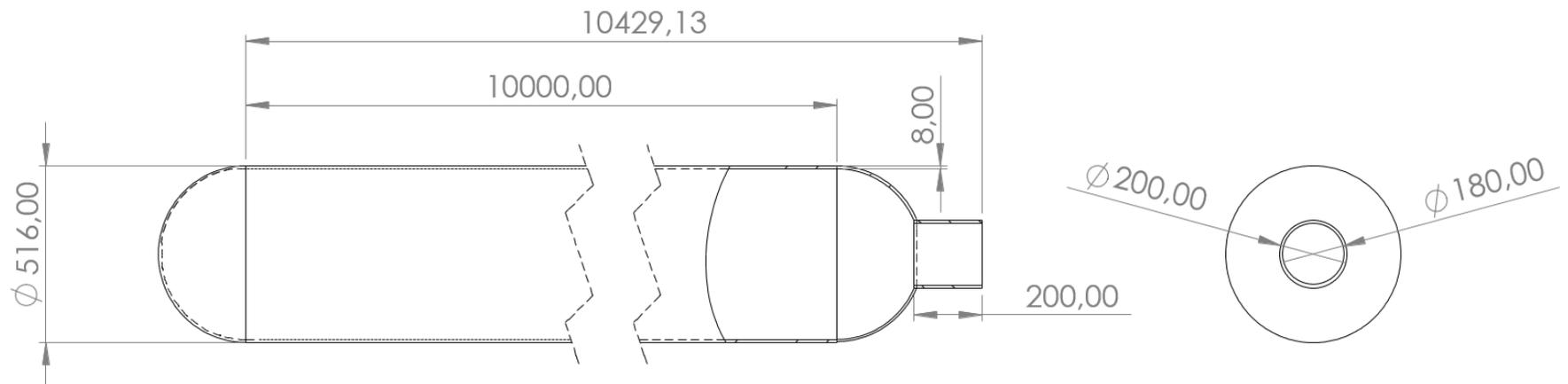
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	43,4536	1.278,16	50.603,4	50.619,6

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

Trabajo Fin de Grado

Grado: Grado en Sistemas Industriales. Mención mecánica

Proyecto: Diseño de un depósito de hidrógeno como combustible para un tren de alta velocidad

Nº
1

Escala:
1:20

El alumno:
Pablo Zavala Sáez

Fecha:
17/05/2024

- Normas ISO:

NORMA	TEMA
ISO 14687:2019	Calidad del combustible de hidrógeno. Especificaciones de producto.
ISO 19880-1:2022	Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio.
ISO 26142:2010	Aparatos de detección de hidrógeno. Aplicaciones estacionarias.
ISO 19881:2018	Hidrogeno gaseoso. Contenedores de combustible para vehículos terrestres.
ISO/TR 15916:2015	Consideraciones básicas para la seguridad de los sistemas de hidrógeno.
ISO 19882:2024	Hidrógeno gaseoso. Dispositivos de alivio de presión activados térmicamente para contenedores de combustible de vehículos de hidrógeno comprimido.
ISO 11114-1:2024	Cilindros de gas: Compatibilidad de los materiales de los cilindros y válvulas con el contenido de gas.
ISO 11119-4:2016	Cilindros de gas. Diseño construcción y ensayo.

- Normas europeas:

NORMA	TEMA
2023/1804/UE	Relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos.
CE 79/2009	Relativa a la homologación de los vehículos de motor impulsados por hidrógeno.

PRESUPUESTO

En cuanto al presupuesto, se van a tener en cuenta los gastos de ingeniería y el coste de los materiales:

- Costes de ingeniería:

El sueldo medio de un ingeniero junior en el año 2024 es de 25.000 € al año brutos, lo que se traduce en 12,82 € la hora. Por tanto, habiendo dedicado 240 horas, el coste es de 3076,8 € (tabla 8).

Horas dedicadas	Coste/hora	Total
240	12,82 €	3076,8 €

Tabla 8: Costes de ingeniería

- Costes de materiales:

Los precios de la fibra de carbono pura, actualizados con el IPC a abril de 2024 son los siguientes (tabla 9) [17]:

Fibra de carbono	Precio (€/kg)
AS4	46
AS7	51,8
IM6	81,3
IM7	80,1
IMA	82,4
IM8	84,7
IM10	155,4

Tabla 9: Precios fibras de carbono

Para el cálculo del coste en materiales del depósito, hay que tener en cuenta que los compuestos contienen un 60% en volumen de fibra y un 40% de resina. En este estudio se va a calcular solo el precio de la fibra por la imposibilidad de encontrar precios de la resina epoxi. (tabla 10)

FIBRA	MASA (KG) (60%)	COSTE (€)
AS4	143,808	6615,17
AS7	143,808	7449,25
IM6	141,397	11495,58
IM7	143,004	11454,62
IMA	143,808	11849,78
IM8	143,808	12180,54
IM10	143,808	22347.76

Tabla 10: Coste fibra de carbono por depósito

BIBLIOGRAFÍA

[1] Consejo de Transporte, Telecomunicaciones y Energía (Transporte) (2021).

Obtenido de: <https://www.consilium.europa.eu/es/meetings/tte/2021/06/03/>.

[2] Asensio, P. (2007). Hidrógeno y pila de combustible. Obtenido de:

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-paratodos-hidrogeno-y-pila-de-combustible>.

[3] García-Conde, A. G. (2010). Producción, almacenamiento y distribución de

hidrógeno. España. Obtenido de: http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5.

[4] Apilados.com (s.f.): recuperado el 24 de febrero de 2024 de:

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

[5] Klaas Kunze & Oliver Kircher (2012): CRYO-COMPRESSED HYDROGEN

STORAGE (BMW Group). Cryogenic Cluster day, Oxford, september 28, 2012

[6] Coradia iLint-Hydrogen Fuel Cell Train. Rail Conference (2018). Obtenido

de: https://www.apta.com/wp-content/uploads/Coradia-iLint-%E2%80%93-Hydrogen-Fuel-Cell-Train_James_Varney-1.pdf

[7] ADIF. Declaración sobre la red 2024

[8] Langmi, H.W.; Engelbrecht, N.; Modisha, P.M.; Bessarabov, D. (2022) Chapter 13-Hydrogen Storage. In *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2022; pp. 455–486. ISBN 978-0-12-819424-9. Obtenido de: <https://shop.elsevier.com/books/electrochemical-power-sources-fundamentals-systems-and-applications/smolinka/978-0-12-819424-9>

[9] La Vanguardia (2022): Funcionamiento de un tren de hidrógeno. Obtenido de: <https://www.lavanguardia.com/natural/20220429/8228148/tren-hidrogeno-transporte-futuro-cero-emisiones-espana-brl.html>

[10] Pérez, L (2022): Métodos de almacenamiento del hidrógeno. SynerHy. Artículo técnico. Obtenido de: <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>

[11] Talgo. Características Talgo 350 (s.f.). Recuperado el 14 de Marzo de 2024 de: <https://www.talgo.com/es/talgo-350>

[12] HEXCEL. Fichas técnicas. Fibra de carbono (s.f.). Recuperado el 24 de Febrero de 2024 de: <https://es.hexcel.com/Resources/DataSheets/Carbon-Fiber>

[13] Bartoletti, J. (2013): Caracterización a fatiga de compuestos de fibra de carbono unidireccionales a 0° y 45° . Obtenido de: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/80013/fichero/Proyecto+de+fin+d+e+carrera-+JULIA+BARTOLETTI.pdf>

[14] García Álvarez, A. (2007): “Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos”. *En Anales de Mecánica y Electricidad* (vol. LXXXIV, fas. V).

[15] Pérez Manso, A. (2012): "Influencia del diseño de los canales de flujo en el rendimiento de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)". Tesis Doctoral. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/10810/9989>

[16] SolidWorks (2023): Ayuda en línea. Obtenido de: https://help.solidworks.com/2023/spanish/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm

[17] Wang, R.; Zheng, S.; Zheng, Y. (2011): Polymer Matrix Composites and Technology. Ed. Elsevier, 2011. 576 págs.