



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Propuesta de depósito de gas natural adsorbido para automoción

Autor: Víctor de Santos Hernández

Tutores: Antolín Lorenzana Ibán y Antonio Foces Mediavilla

Valladolid, julio de 2019

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Grado se propone un depósito de gas natural adsorbido para automoción.

Para ello, se han analizado las diferentes propiedades de materiales adsorbentes, seleccionando aquellas que mejor se adecúan para el caso de gas natural. Mediante el software ANSYS se han simulado diferentes tipos de depósitos, incluyendo bridas y cierres. Se opta por aquel que, cumpliendo criterios funcionales (cabida en el vehículo) y resistentes (tensiones máximas admisibles) suponga un menor coste de fabricación.

Palabras clave: adsorción, depósitos a presión, cierre, tensiones y desplazamientos.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Tabla de contenido

RESUMEN	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. ENUNCIADO DEL PROYECTO	11
1.2. OBJETIVO Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	12
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE USAR GAS NATURAL VEHICULAR	15
2.2. ALMACENAMIENTO GAS NATURAL VEHICULAR	20
2.2.1. Gas natural licuado (GNL).....	20
2.2.2. Gas natural comprimido (GNC).....	22
2.2.3. Gas natural adsorbido (GNA).....	23
2.2.4. Características de los materiales adsorbentes	25
2.3. COMPARACIÓN ENTRE GAS NATURAL COMPRIMIDO Y ADSORBIDO.....	28
2.4. RECIPIENTES A PRESIÓN	30
2.4.1. Tipos de depósitos.....	31
2.4.2. Tipos de cierres	33
2.4.3. Bridas	38
2.5. VEHÍCULOS DE GAS NATURAL	39
2.5.1. Modelos de vehículos de gas existentes en el mercado	41
3. VALIDACIÓN	49
3.1. CÁLCULOS ANALÍTICOS	50
3.2. MODELO 3D	59
3.3. MODELO TIPO SHELL	64
3.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	68
4. DIMENSIONADO.....	69
4.1. VOLUMEN INTERNO NECESARIO	70
4.2. ELECCIÓN DEL TIPO DE CIERRE	71
4.3. RELACIÓN LONGITUD/DIÁMETRO ÓPTIMA	83
5. CONCLUSIONES.....	93
6. LÍNEAS FUTURAS	95
ANEXO: PLANO DEL DEPÓSITO	97
REFERENCIAS	101

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Índice de figuras

Figura 2-1. Composición volumétrica gas natural.	13
Figura 2-2. Reducción de emisiones utilizando gas natural.	15
Figura 2-3. Kilometraje dependiendo del combustible empleado.	16
Figura 2-4. Reducción acústica utilizando gas natural.	16
Figura 2-5. Etiqueta ECO.	17
Figura 2-6. Estaciones de repostaje de gas natural.	17
Figura 2-7. Localización estaciones de servicio a día 17/05/2019.	18
Figura 2-8. Leyenda de estaciones de gas natural.	19
Figura 2-9. Comparativa autonomía gasóleo-gas natural.	20
Figura 2-10. Diagrama de Andrew para el metano.	21
Figura 2-11. Depósito GNL camión pesado.	22
Figura 2-12. Depósitos GNC en los bajos del coche.	22
Figura 2-13. Fenómeno de adsorción.	23
Figura 2-14. Fenómeno de adsorción.	24
Figura 2-15. Nanotubos de carbono enrollados.	26
Figura 2-16. Monolitos de carbón activo.	27
Figura 2-17. Relación lineal de adsorción de carbones activos.	28
Figura 2-18. GNC - GNA.	29
Figura 2-19. Comparación capacidad de almacenamiento entre GNA y GNC.	29
Figura 2-20. Depósito tipo I.	31
Figura 2-21. Depósito tipo III.	32
Figura 2-22. Depósito tipo IV.	32
Figura 2-23. Depósitos tipo 4 Audi A4 Avant.	33
Figura 2-24. Cierre plano.	34
Figura 2-25. Ejemplos de soldadura cabezal plano.	34
Figura 2-26. Tipos de soldaduras permitidas.	35
Figura 2-27. Cierre semiesférico.	36
Figura 2-28. Cierres elíptico y toriesférico.	36
Figura 2-29. Cierres cónico y torocónico.	37
Figura 2-30. Cierre especial.	37
Figura 2-31. Esquema de los componentes del sistema de gas natural.	40
Figura 2-32. Evolución prevista de los vehículos de gas.	41
Figura 3-1. Modelo de referencia.	49
Figura 3-2. Representación tensiones cilindro sometido a presión interna.	50
Figura 3-3. Cuarto de cilindro con condiciones de contorno.	52
Figura 3-4. Resultado simulación tensiones cilindro.	53
Figura 3-5. Cilindro sometido a presión interna.	54
Figura 3-6. Desplazamientos radiales de un cilindro sometido a presión interna.	55

Figura 3-7. Desplazamientos longitudinales cilindro sometido a tracción.....	56
Figura 3-8. Tensiones en esfera.....	57
Figura 3-9. Esfera cortada por simetrías.....	58
Figura 3-10. Resultado simulación tensiones esfera.....	58
Figura 3-11. Resultado simulación desplazamientos esfera.....	59
Figura 3-12. Octavo de cilindro con condiciones de contorno modelo 3D.	60
Figura 3-13. Modelo 3D mallado.....	60
Figura 3-14. Variación de la tensión en función del número de elementos en modelo 3D.....	61
Figura 3-15. Variación del desplazamiento longitudinal en función del número de elementos en modelo 3D.	62
Figura 3-16. Distribución de tensiones modelo 3D.	63
Figura 3-17. Distribuciones desplazamientos longitudinales modelo 3D.....	63
Figura 3-18. Condiciones de contorno aplicadas en el modelo shell.....	64
Figura 3-19. Mallado modelo tipo shell.	65
Figura 3-20. Variación de la tensión en función del número de elementos en modelo tipo shell.	66
Figura 3-21. Variación del desplazamiento longitudinal en función del número de elementos en modelo tipo shell.	66
Figura 3-22. Tensiones modelo tipo shell.....	67
Figura 3-23. Desplazamientos modelo tipo shell.....	67
Figura 4-1. Esquema del depósito final.	69
Figura 4-2. Tensiones cierre plano vista isométrica.	72
Figura 4-3. Tensiones cierre plano parte interior.....	73
Figura 4-4. Desplazamientos longitudinales vista isométrica.....	73
Figura 4-5. Desplazamientos longitudinales vista perfil.....	74
Figura 4-6. Distribución de tensiones cierre semiesférico vista isométrica. ...	75
Figura 4-7. Distribución de tensiones cierre semiesférico vista perfil.....	75
Figura 4-8. Distribución de desplazamientos del cierre semiesférico vista isométrica.....	76
Figura 4-9. Distribución de desplazamientos cierre semiesférico vista perfil. .	76
Figura 4-10. Tensiones cierre elíptico parte exterior.	77
Figura 4-11. Tensiones cierre elíptico parte interior.....	78
Figura 4-12. Desplazamientos cierre elíptico vista isométrica.	78
Figura 4-13. Desplazamientos cierre elíptico vista perfil.	79
Figura 4-14. Tensiones cierre toriesférico parte exterior.	80
Figura 4-15. Tensiones cierre toriesférico parte interior.....	80
Figura 4-16. Desplazamientos cierre toriesférico vista isométrica.	81
Figura 4-17. Desplazamientos cierre toriesférico vista perfil.	81
Figura 4-18. Dimensiones furgón IVECO Daily GNC.....	83
Figura 4-19. Espesor requerido en función de la tensión ocasionada.	86
Figura 4-20.. Espesor mínimo requerido en función de la relación L/D.	87

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Figura 4-21. Desplazamiento máximo en función de la relación L/D.....	89
Figura 4-22. Masa de octavo de depósito en función de la relación L/D.....	89

Índice de tablas

tabla 2-1. Comparacion PCS y PCI.....	14
tabla 2-2. Propiedades del metano.	14
tabla 2-3. Estaciones de servicio disponibles.....	19
tabla 2-4. Comparación tamaño de poros y superficie específica.	27
tabla 2-5. Comparación gas natural comprimido y adsorbido.....	30
tabla 3-1. Propiedades del material empleado.	50
tabla 3-2.Variación de las tensiones y desplazamientos en función del tamaño de malla en modelo 3D.	61
tabla 3-3.Variación de las tensiones y desplazamientos en función del tamaño de malla en modelo tipo shell.	65
tabla 3-4.Comparación resultados simulaciones.	68
tabla 4-1. Comparación resultados tipos de cierre simulados.	82
tabla 4-2.Resultados simulación diferentes relaciones L/D con espesor constante.....	85
tabla 4-3. Espesor mínimo requerido en función de L/D.....	86
tabla 4-4. Dimensiones finales teóricas para cada relación L/D.....	88
tabla 4-5. Resultado depósito espesor 8 mm.....	90

1. Introducción

1.1. Enunciado del proyecto

En dicho Trabajo de Fin de Grado se tratará de determinar cuál es la geometría óptima de un depósito de gas natural adsorbido para automoción.

Primeramente, se analizarán criterios resistentes (tensiones y desplazamientos) producidos en depósitos sometidos a presión interna dependiendo del tipo de cierre empleado. Para ello se emplearán tanto expresiones analíticas, cuando existan, como el software ANSYS para su simulación.

Cuatro tipos de cierres tipo *shell* fueron simulados: plano, semiesférico, elíptico y toriesférico. Esta elección no dependerá únicamente de las tensiones y desplazamientos originados, sino que también se tendrán en cuenta factores como la localización de estas, coste de fabricación, cantidad de material empleado y factor de forma.

Una vez seleccionado el cierre se modificará la relación entre su longitud y su diámetro, cumpliendo siempre un volumen interno determinado y cabida en el vehículo, para lograr que la masa empleada sea mínima.

Con todo esto (cierre elegido y dimensiones del depósito) la geometría final del depósito quedará definida.

1.2. Objetivo y motivación del proyecto

El mundo actual es dinámico y cambiante centrado, sobre todo, tanto en los aspectos económicos como en los medioambientales. Es por eso que la cohesión de estos dos aspectos es crucial a la hora de desarrollar nuevas tecnologías y, por lo tanto, también lo será en el desarrollo de este trabajo.

En los últimos años debido a una crisis sufrida, el sector de la automoción se ha visto en la obligación de adaptarse y evolucionar cambiando la tecnología existente para ajustarse lo más rápidamente al mercado.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la modificación legislativa hacia los vehículos más contaminantes con el gran endurecimiento de los impuestos hacia los mismos para disminuir las emisiones hacia el ambiente. Es por eso que el desarrollo de nuevas fuentes de energía más limpias es uno de los principales objetivos a desarrollar por las compañías.

Actualmente, predominan los motores de gasolina y diésel, bastante más perjudiciales para el medio ambiente que los vehículos híbridos, eléctricos o de gas. El objetivo a largo plazo es conseguir que todos los vehículos sean de los tres últimos mencionados. Para ello se debe mejorar en aspectos clave como estaciones de servicio, tecnología, producción, etc. y conseguir que sean lo suficientemente robustos para dar ese paso hacia el cambio.

Una mentalidad más enfocada a cuidar el entorno junto con la reducción de costes y el avance de la tecnología hacen del gas natural una fuente de energía que reúne todos los requisitos necesarios para su implantación en el mercado como fuente de energía.

2. Estado del arte

Se denomina gas “natural” porque en su constitución química no interviene ningún proceso. Es una mezcla gaseosa no corrosiva ni tóxica, inodora e incolora de hidrocarburos cuya composición volumétrica aproximada (Figura 2-1) está principalmente compuesta por metano (79-97 %), aunque también contiene una proporción variable etano (0.1 -11.4%), de hidrocarburos superiores (propano, butano, pentano y hexano; 0.12 - 5 %), de nitrógeno (0.5 -6.5 %) y dióxido de carbono (0-1.5 %).

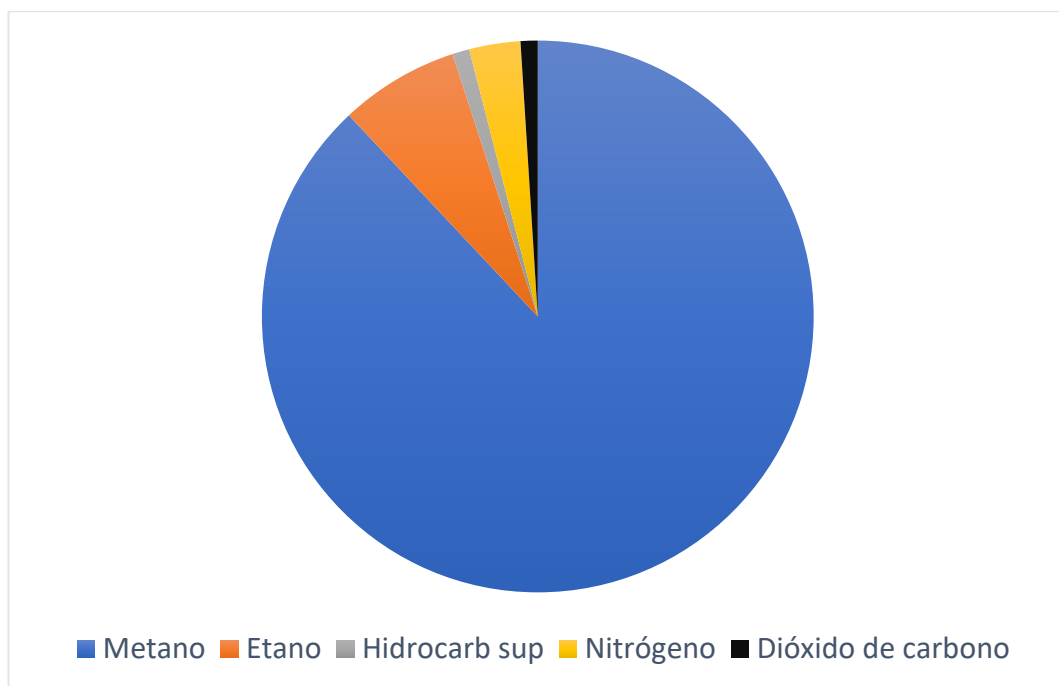


Figura 2-1. Composición volumétrica gas natural.

El gas natural se consume tal y como se encuentra en la naturaleza, y su estructura molecular más simple hace que se queme limpiamente por lo que en su combustión no se producen partículas sólidas ni azufre.

Entre las propiedades de este gas como combustible destaca su poder calorífico. Mientras que, por unidad de masa, es superior al de la gasolina y al del gasóleo, cuando se comprara en proporciones volumétricas queda muy por debajo de sus competidores (tabla 2-1):

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

tabla 2-1. Comparación PCS y PCI

Combustible	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/Nm ³)
Metano	50	35,7
gas natural (EU)	45,1	35,7
gas natural (Rusia)	49,2	35,8
Hidrógeno	120,1	10,7
Gasolina	43,2	32200
Gasóleo	43,1	35900

Ese bajo poder calorífico en comparación con la gasolina y el gasóleo lastran al gas natural en su utilización como combustible en el sector de la automoción.

Debido a que su composición es prácticamente en su totalidad metano, sus propiedades [1] se pueden resumir en la tabla 2-2:

tabla 2-2. Propiedades del metano.

Propiedades físicas	Propiedades químicas
Formula molecular	CH ₄
Peso molecular	16.04 g/mol
Temperatura de ebullición a 1 atm	-161 °C
Temperatura de fusión	-183 °C
Temperatura de autoignición	537 °C
Solubilidad en agua a 20 °C	3.3
Densidad relativa respecto al aire	0.6
Relación de expansión	1 litro de líquido equivale a 600 de gas
Límites de explosividad (% en volumen en el aire)	5-15

En cuanto a su combustión, es necesario que la mezcla de combustible y comburente este dentro de unos márgenes de inflamabilidad, por lo que no todas las mezclas son adecuadas. De no estar entre esos márgenes, la combustión no se iniciaría o se apagaría en algún instante de tiempo, provocando una combustión incompleta. La temperatura de inflamación del gas a una atmósfera oscila entre los 482 °C y 632 °C, temperatura mucho mayor que la de la gasolina o el gasóleo que se encuentra sobre los 456°C. Por lo que el motor de gas natural necesitará de un sistema de refrigeración mejor. Esto, sumado a que la densidad del gas natural es menor que la del aire y que, en caso de fuga, no puede explotar por sí solo en el exterior, hacen de este combustible que sea seguro.

2.1. Ventajas e inconvenientes de usar gas natural vehicular

La contaminación atmosférica, derivada de las emisiones de gases por los vehículos, se ha convertido en un grave problema a nivel mundial. Es por eso por lo que el gas natural es un combustible idóneo para combatirla, presentando las siguientes ventajas [2]:

- **Medioambiental:** reduce, a casi cero, las emisiones contaminantes (Figura 2-2): un 85 % los óxidos de nitrógeno (NO_x) y elimina el 96 % de las partículas sólidas. Contribuye a paliar el efecto invernadero eliminando la totalidad de las emisiones de azufre (SO₂) y una reducción de hasta un 25 % de las emisiones de monóxido de carbono (CO) y de dióxido de carbono (CO₂).



Figura 2-2. Reducción de emisiones utilizando gas natural.

- Ahorro económico: el coste por kilómetro de vehículos con gas natural es de un 30 % menor que uno diésel y 50 % menor que uno de gasolina. Por ejemplo, un vehículo ligero con 20 euros puede recorrer 275 km si es de gasolina o 375 km si es diésel, mientras que con gas natural recorrería un total de 555 km (Figura 2-3).

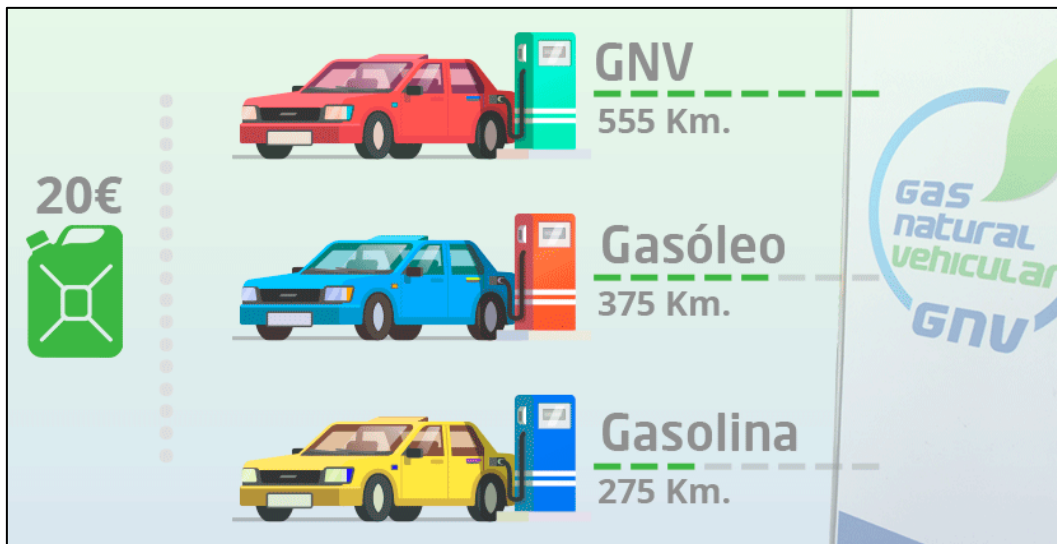


Figura 2-3. Kilometraje dependiendo del combustible empleado.

- Acústica: los motores de gas natural producen hasta un 50 % menos de ruido (Figura 2-4) y vibraciones respecto de los vehículos diésel.



Figura 2-4. Reducción acústica utilizando gas natural.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- Entrada en zonas urbanas de atmosfera protegida: estas restricciones dependen del nivel de contaminación de la zona y existen penalizaciones para aquellos que no las cumplan. Los vehículos de gas, al ser una fuente de energía limpia, tienen acceso a esas zonas restringidas para el resto.



Figura 2-5. Etiqueta ECO.

En cuanto a las desventajas [2], presenta:

- Infraestructuras para el repostaje: la escasez de estas es la principal desventaja frente a los de gasolina o diésel. Aunque el número de estaciones está creciendo poco a poco todavía no son suficientes.

Una situación estimativa de lo que se puede encontrar en Europa es la siguiente (Figura 2-6):



Figura 2-6. Estaciones de repostaje de gas natural

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Según la web de NGVA, en Europa existen 3630 estaciones de GNC y 207 de GNL, de las cuales en España solo hay un total de 60.

Actualmente, el número de estaciones en la península ha aumentado y la ubicación de cada una de ellas se puede ver en la siguiente imagen (Figura 2-7):



Figura 2-7. Localización estaciones de servicio a día 17/05/2019

Atendiendo a la leyenda de los símbolos (Figura 2-8):

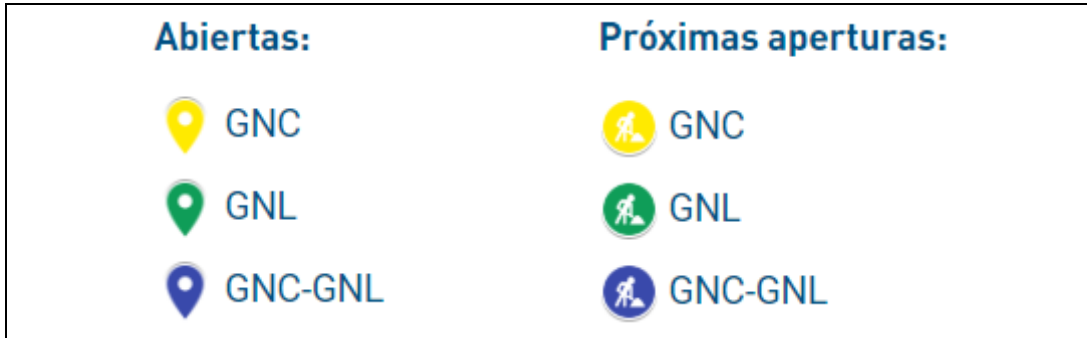


Figura 2-8. Leyenda de estaciones de gas natural.

Actualmente, según la web gasnam el listado de gasineras es el siguiente (tabla 2-3):

tabla 2-3. Estaciones de servicio disponibles.

	España			Portugal		
	Abierta	En proyecto	Total	Abierta	En proyecto	Total
GNC	33	19	52	5	0	5
GNC y GNL	32	24	56	5	7	12
GNL	10	0	10	1	1	2
Total	75	43	118	11	8	19

- **Autonomía:** tanto los vehículos de GNC (gas natural comprimido) como los de GNL (gas natural licuado) tienen menor autonomía para la misma cantidad de combustible. Haciendo una comparativa podemos observar que para igualarla harían falta 5 y 1,8 veces más respectivamente (Figura 2-9).

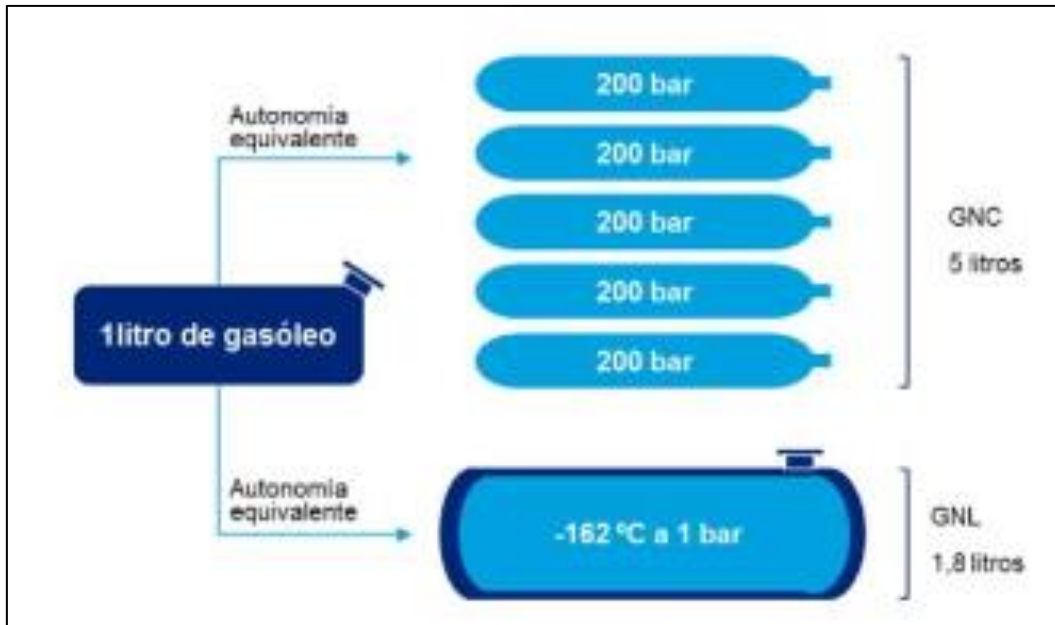


Figura 2-9. Comparativa autonomía gasóleo-gas natural

- Precio de los vehículos: al ser una tecnología más compleja y novedosa, el precio de compra de los vehículos que funcionan con gas natural es mayor.

2.2. Almacenamiento gas natural vehicular

La forma de utilización del gas natural vehicular en los motores de combustión interna alternativos (MCIA) es en modo gaseoso, sin embargo, su almacenamiento puede darse de tres formas diferentes según su estado en el depósito:

2.2.1. Gas natural licuado (GNL)

El gas natural licuado, o en inglés *liquefied natural gas* (LNG), se denomina así debido a que se encuentra almacenado en estado líquido. Como se puede observar en la imagen P-V de Andrew [3] para el metano (Figura 2-10), la temperatura que se da para que el gas se encuentre en estado líquido a 1 atm es de -161 °C.

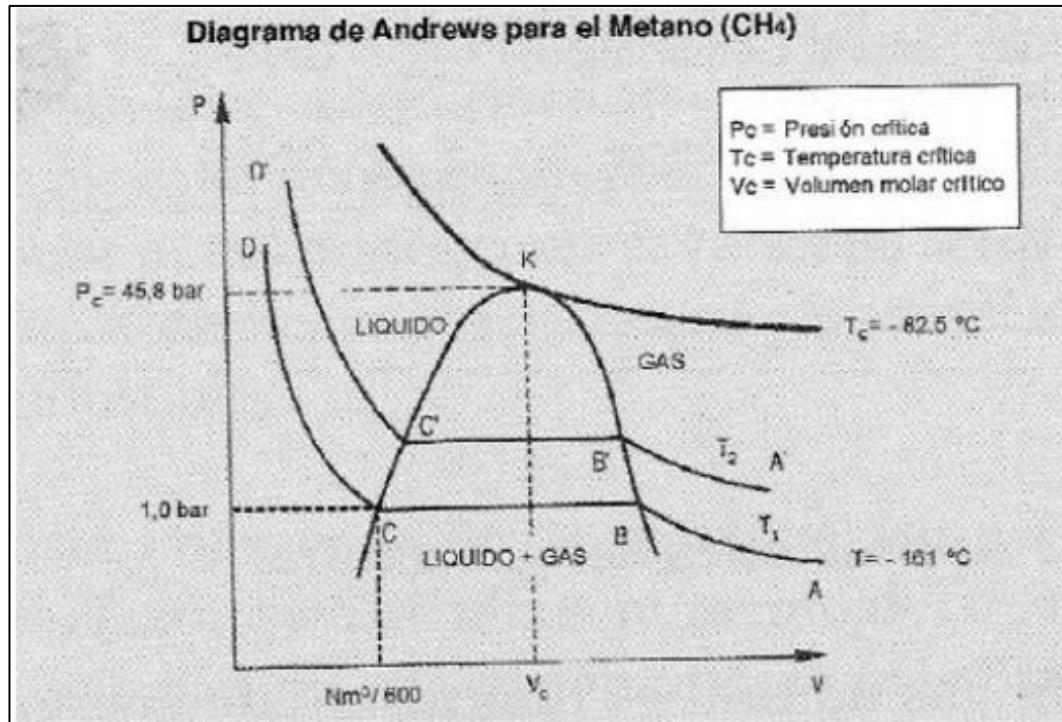


Figura 2-10. Diagrama de Andrew para el metano.

La base de esta tecnología se fundamenta en que al aumentar la densidad del gas licuado (a unos 437.31 kg/m³) ocupa entre 580-600 veces menos que en estado gaseoso en condiciones de 1 bar y 15 °C. Esto significa que para un mismo depósito se puede almacenar mucha más cantidad de energía por unidad de volumen, es decir, mucha más autonomía del vehículo en el que se incorpore.

Al ir aumentando la presión de almacenamiento, la temperatura de licuefacción aumenta y, por lo tanto, disminuye la densidad del líquido, es decir, la capacidad de almacenamiento por unidad de volumen disminuye y, consigo, la autonomía del vehículo. Por esta razón la presión a la que se almacena es a presión ambiente.

Sin embargo, hay un inconveniente, que es el llegar a temperaturas tan bajas de almacenamiento. Esto supone un coste muy alto de equipos para, no solo conseguirlas, sino también para mantenerlas. Estos factores hacen que su aplicación sea únicamente en transporte pesado (Figura 2-11), sobre todo de larga distancia, ya que proporciona una mayor autonomía, como camiones, autobuses o buques marinos.



Figura 2-11. Depósito GNL camión pesado.

2.2.2. Gas natural comprimido (GNC)

El gas natural comprimido, o en inglés *compressed natural gas* (CNG), en este caso el gas se encuentra almacenado en estado gaseoso, a unos 200 bar de presión y temperatura ambiente. Estos depósitos se sitúan normalmente en los bajos de los vehículos (Figura 2-12) o en los huecos interiores disponibles en los mismos como la rueda de repuesto o maletero.

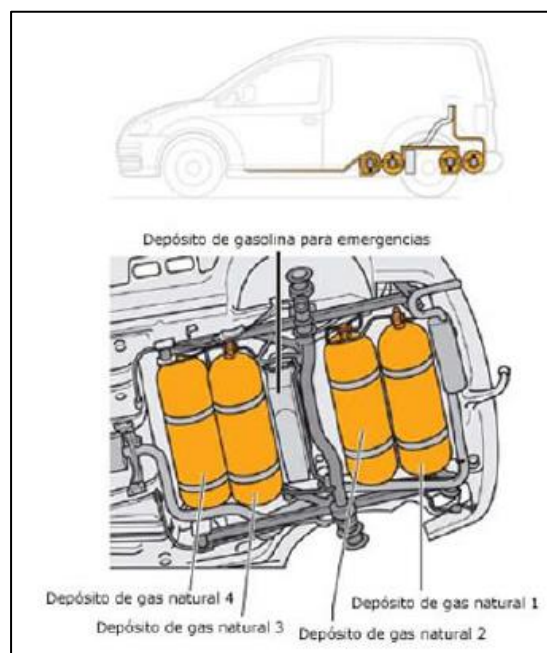


Figura 2-12. Depósitos GNC en los bajos del coche.

El principal inconveniente de estos depósitos es el reducido espacio del que disponen los vehículos para su colocación. Además de un aumento de peso (entre un 10-15 %) y una disminución de potencia (aproximadamente un 10-12 %).

2.2.3. Gas natural adsorbido (GNA)

Quizás los dos modos de almacenamiento descritos hasta ahora (licuado y comprimido) sean los más conocidos, sin embargo, hay otra tecnología en desarrollo que es la de adsorción.

La adsorción es un proceso físico-químico reversible [4] en el cual, un gas es fijado a la superficie de un sólido poroso, como si de un imán se tratase (Figura 2-13). El material sobre el que se deposita el gas es el adsorbente y el gas, en este caso, es el adsorbato.

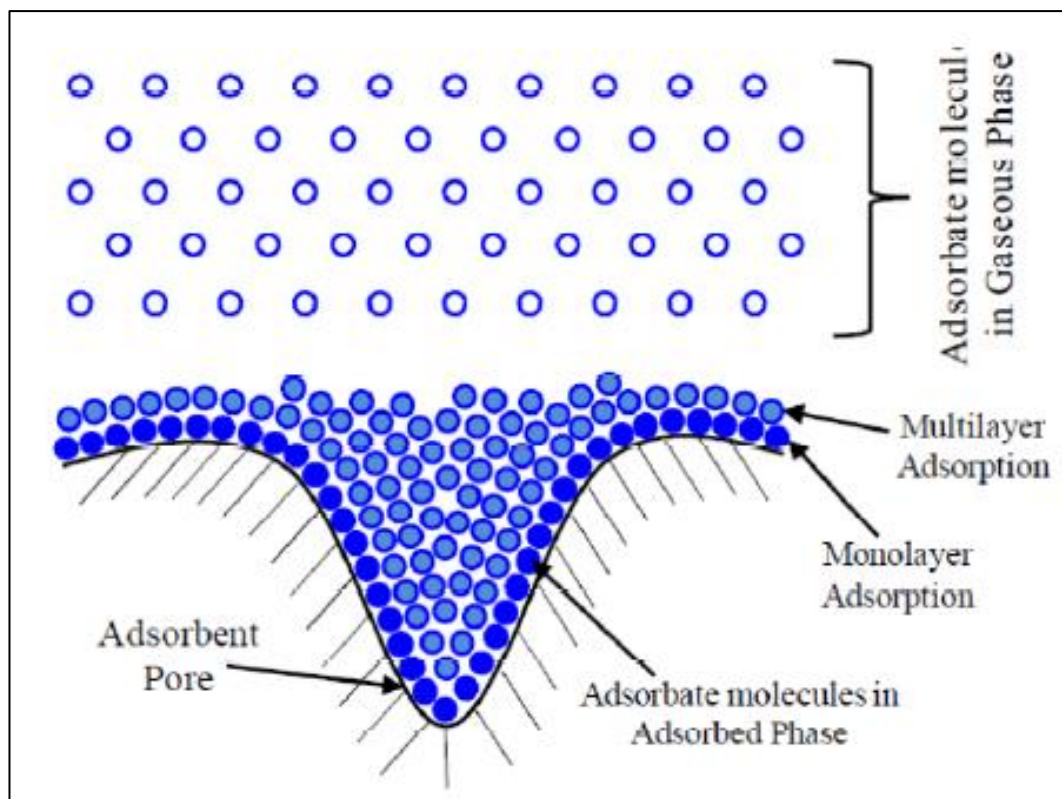


Figura 2-13. Fenómeno de adsorción.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Se trata de un proceso exotérmico, donde el calor liberado es debido a la condensación del adsorbato sobre el adsorbente, más la energía generada en el proceso de unión de ambos elementos. En el caso inverso, el proceso es endotérmico, es decir, necesita energía para producirse.

Según el proceso de adsorción, puede ser:

- Adsorción por intercambio: en este caso el adsorbato y el adsorbente se atraen por fuerzas electrostáticas.
- Adsorción química: también denominada quimisorción, se produce cuando las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie del adsorbente, en los que se forman y se rompen enlaces. La unión adsorbente-adsorbato es una unión química fuerte, por lo que cuesta bastante energía en revertir el proceso de adsorción (desorción).
- Adsorción física: también denominada fisisorción, entre el adsorbente y el adsorbato solo se producen fuerzas de Van der Waals, es decir, que las moléculas de gas están débilmente ligadas a la superficie del adsorbente (Figura 2-14).

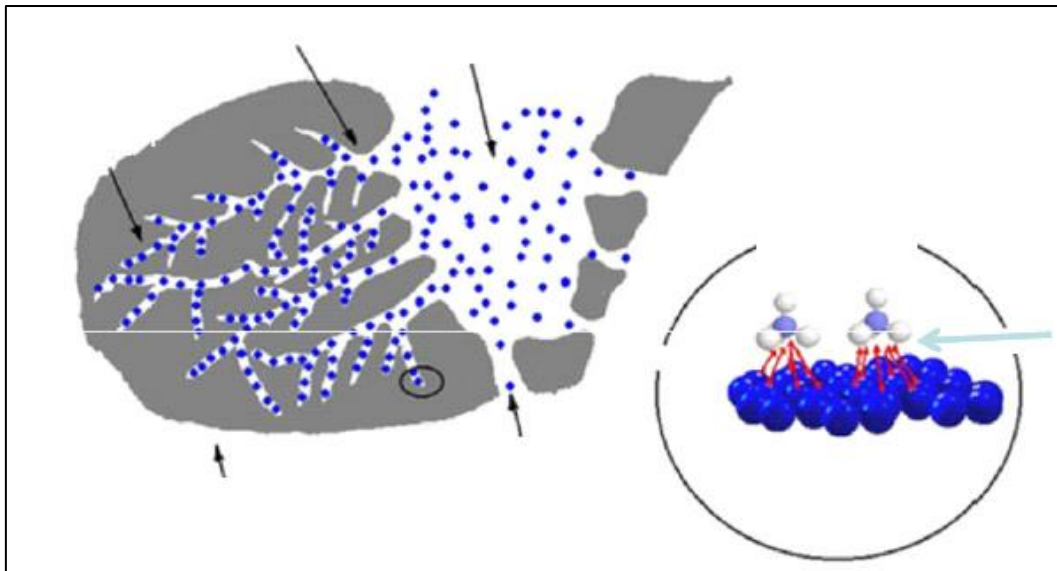


Figura 2-14. Fenómeno de adsorción.

2.2.4. Características de los materiales adsorbentes

Al ser la acumulación por unidad de superficie muy pequeña [5], la adsorción se hace necesaria en materiales de elevada superficie específica y gran cantidad volumétrica de poros. La superficie específica (a_s [cm^2/g]) se define como la superficie de la estructura porosa del material sumada con la superficie externa las partículas de adsorbente por unidad de masa de este. El volumen de poros (V_p [cm^3/g]) de un adsorbente, es el volumen de adsorbato por unidad de masa que se puede retener. Ambos parámetros están relacionados con el tamaño del poro del adsorbente que, en función del material a adsorber, deberá tener un determinado diámetro para lograr una adsorción óptima.

Aparte del tamaño del poro, un buen material adsorbente tiene que ser fácilmente regenerable, es decir, que la capacidad para adsorber no se vea afectada en gran medida por el número de ciclos que haya sido utilizado. Esta regeneración se puede llevar a cabo mediante la ayuda de un disolvente que tenga mayor afinidad que el adsorbente por el adsorbato. Aunque también puede efectuarse mediante un gas inerte caliente o haciendo el vacío.

Otro aspecto importante es la cinética de transferencia de materia. Resulta crucial ya que controla los tiempos de adsorción y desorción de un ciclo. Todo esto, complementado con la necesidad de que el material adsorbente tenga una resistencia mecánica adecuada, si este se va a utilizar en un lecho fijo, y una buena resistencia a la abrasión en caso de que el lecho será móvil.

Algunos de estos adsorbente son: tamices de tipo zeolítico, alúmina activada, gel de sílice, adsorbentes poliméricos y, más recientemente, adsorbentes mesoporosos silíceos y carbonosos, nanotubos de carbono.

Tipos de materiales adsorbentes:

- Inorgánicos

- Zeolitas: son sólidos microporosos de estructura microcristalina de aluminio y silicio hidratados, principalmente de los grupos Ia y IIa del sistema periódico (Na, K, Ca, Mg, Sr, Ba) de gran interés industrial, tanto en adsorción como en catálisis. La naturaleza iónica de las zeolitas hace que sus aplicaciones como adsorbente sean retención de agua y de otras sustancias con carácter polar como son el dióxido de carbono o el sulfuro de hidrogeno, por lo que para el caso de gas natural no sería eficiente.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- Gel de sílice: es una forma parcialmente deshidratada del ácido silícico coloidal. Su naturaleza es polar y se utiliza en la adsorción de agua a bajas temperaturas. En estas condiciones su capacidad de adsorción es superior a la de las zeolitas o la alúmina activada.

- Alúmina activada: es un material poroso de elevada área superficial. Su comportamiento es más polar que el gel de sílice a altas temperaturas, por lo que se utiliza para secado de corrientes.

- Carbonosos

- Tamices moleculares de carbono: poseen un tamaño de poro de 0.4-0.9 nm. Una de las formas de obtenerlo consiste en la carbonización de polímeros, como el cloruro de polivinilideno, la celulosa o la cascara de coco. No se utilizan por razones económicas.

- Nanotubos de carbono: al igual que los tamices, su coste es elevado. Se pueden describir como una o varias láminas de grafito enrolladas sobre sí mismas dando lugar a nanotubos de una pared o múltiple (Figura 2-15).

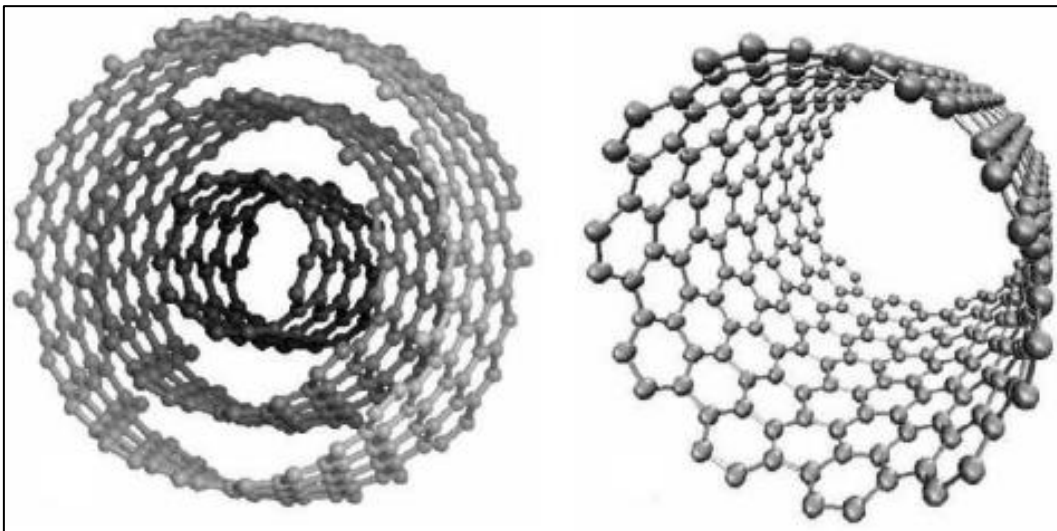


Figura 2-15. Nanotubos de carbono enrollados.

- Carbón activo (Figura 2-16): han sido los materiales más estudiados en las últimas décadas. Su estructura es microcristalina y no grafitica, de materiales basados en carbón amorfo, fabricado de tal manera que se consiga

una elevada porosidad y superficie específica. Esa estructura porosa del carbón activo es el resultado de la conformación tridimensional de láminas de grafeno.



Figura 2-16. Monolitos de carbón activo.

Estos monolitos de carbón activo tienen baja capacidad de adsorción, sin embargo, su precio de fabricación es bajo. Presentan elevada conductividad y buena compactación por lo que pueden adquirir cualquier forma.

Existe una gran variedad de tamaños de poro (tabla 2-4), aunque algunos se encuentran tan asilados que resultan inalcanzables para las moléculas de adsorbato.

tabla 2-4. Comparación tamaño de poros y superficie específica.

	<i>microporos</i>	<i>mesoporos</i>	<i>macroporos</i>
V_p (cm^3/g)	0,15-0,5	0,02-0,1	0,2-0,5
a_s (m^2/g)	100-1000	10-100	0,5-2

El control del tamaño del poro y de su distribución hace que los procesos de fabricación se hayan diversificado, ofreciendo productos muy específicos en función del propósito.

Para el caso del gas natural, estudios realizados demuestran que el tamaño óptimo del poro tiene que ser de unos 0.8 nm (espacio que ocupan dos

moléculas de metano) con el fin de maximizar la cantidad de gas liberado a presión atmosférica.

En relación a esto, también se ha demostrado que, a mayor volumen de microporos, la cantidad de metano adsorbido aumenta de manera prácticamente lineal (Figura 2-17.); eso sí, siempre dentro del tamaño óptimo mencionado anteriormente.

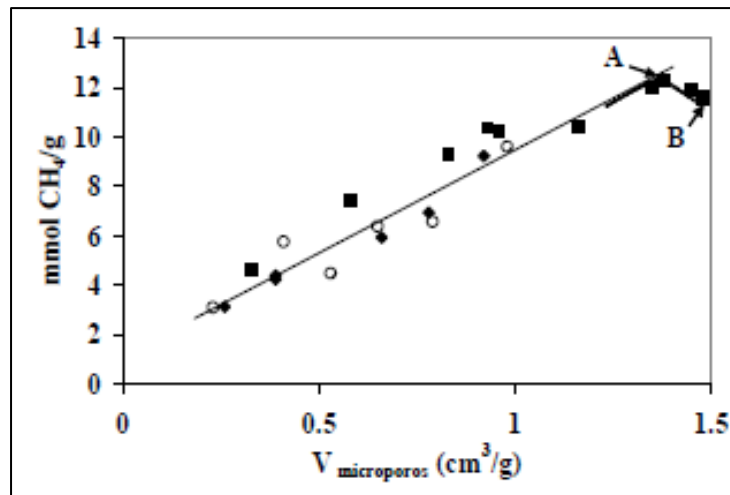


Figura 2-17. Relación lineal de adsorción de carbones activos

2.3. Comparación entre gas natural comprimido y adsorbido

La principal diferencia entre ambos es el modo de almacenamiento (Figura 2-18) como ya se ha comentado antes. Otro aspecto importante es la presión a la que se encuentra el gas en su interior. En el caso de GNC la presión óptima es de 3600 psi (≈ 250 bar) mientras que en GNA son 900 psi (≈ 62 bar).

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

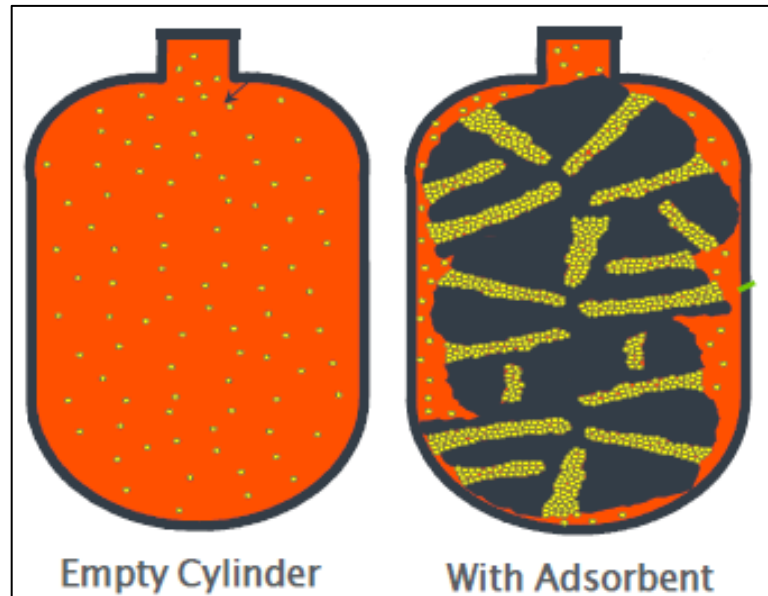


Figura 2-18. GNC - GNA.

La relación entre el volumen de gas almacenado y la presión a la que se encontraría en el depósito es lineal en el caso de GNC, sin embargo, para el caso de GNA no, tiene un comportamiento del estilo parabólico (Figura 2-19):

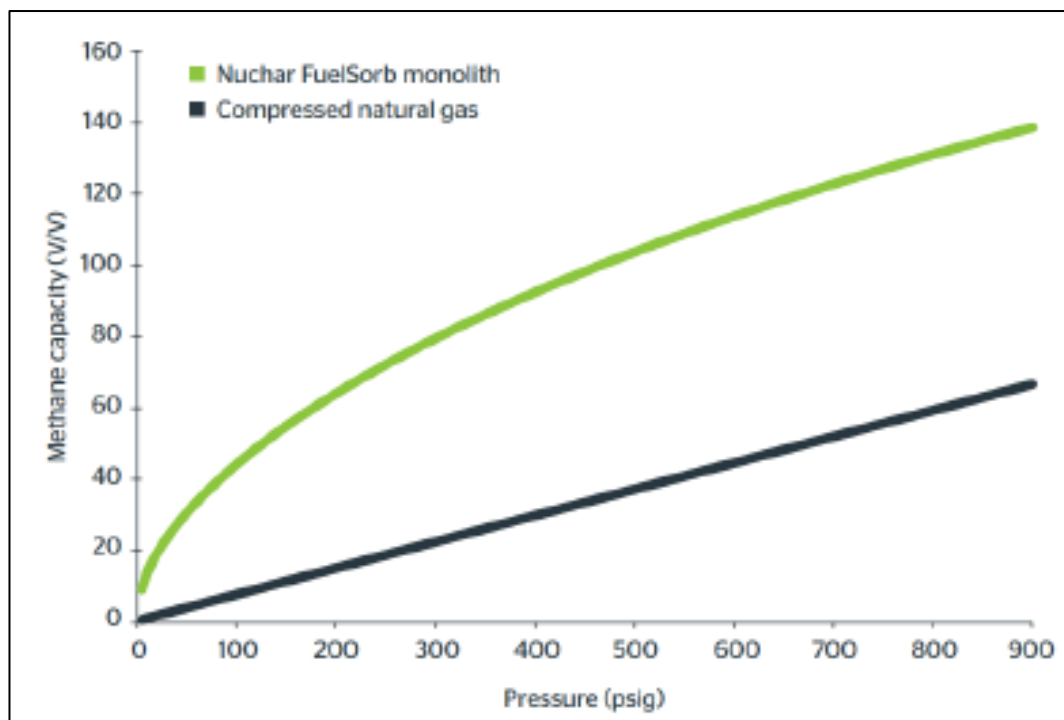


Figura 2-19. Comparación capacidad de almacenamiento entre GNA y GNC.

Esta importante diferencia de presiones entre ambos modos es lo que va a permitir cambiar la geometría del depósito. En GNC su diseño se limita a cilíndrico con un factor de conformabilidad menor de 0,55, mientras que en GNA, esa forma se puede adaptar a los diferentes huecos disponibles consiguiendo así un factor de forma mayor de 0,65.

En cuanto al coste de la compresión específico, en GNA es un 25 % menor que en GNC (0,13 € frente a 0,22 €).

Resumiendo todos los aspectos en una tabla comparativa (tabla 2-5):

tabla 2-5. Comparación gas natural comprimido y adsorbido.

GNC	GNA
Presión de almacenamiento 250 bar	Presión de almacenamiento 62 bar
Depósitos cilíndricos (factor de conformabilidad <0,55)	Formas adaptables (factor de conformabilidad > 0,65)
Coste específico de compresión: 0,18-0,22 €	Coste específico de la compresión: 0,089-0,13 €.

2.4. Recipientes a presión

Sin entrar demasiado en detalle, el presente capítulo está enfocado en los requisitos de diseño definidos en la sección VII del código ASME (la normativa más usada mundialmente es la de la *American Society of Mechanical Engineering* de Estados Unidos) para calderas y recipientes de presión.

En ella se establecen los requerimientos generales para los recipientes sometidos a presión, así como sus métodos de fabricación (materiales soldados, tipos de soldadura con los diferentes materiales de aporte, y forjado) y materiales con los que son fabricados.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Estas indicaciones están fijadas para depósitos cuya presión de operación sea menor de 200 kg/cm^2 ($1 \text{ kg/cm}^2 = 0.980665 \text{ bar}$), lo que equivale a unos 196 bar. En el caso de que esa presión sea mayor habría que complementar con las reglas de diseño para depósitos de alta presión.

Durante el diseño de estos, se deben tener en cuenta las condiciones extremas en las que se podrían encontrar, al igual que la variación de cargas dinámicas y presiones anormales por errores de operación, tolerancias de fabricación, etc.

En general el espesor mínimo es de unos 2 mm, sin tener en cuenta el sobreespesor producido debido a la corrosión.

2.4.1. Tipos de depósitos

La mayoría de los depósitos instalados son de acero, aunque los hay de diferentes tipos en función del material del que están hechos [6]:

- Cilindros tipo I: tienen una relación promedio de 1.15 kg/litro y están fabricados en acero al molibdeno, aunque también contienen níquel y magnesio (Figura 2-20). Están tratados térmicamente mediante procesos de templado para mejorar su resistencia mecánica hasta unos 430 N/mm^2 .

Son los más utilizados y pueden resistir hasta impactos de armas de fuego y tanto temperaturas como presiones muy altas.



Figura 2-20. Depósito tipo I.

- Cilindros tipo II: también son de acero, pero estos están recubiertos exteriormente en la zona cilíndrica por una fibra de resina especial. Con esto conseguimos que el espesor interno necesario para resistir los esfuerzos sea

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

menor y, consecuentemente, reducir el peso, aunque por otro lado su fabricación es más cara.

- Cilindros tipo III: son de aluminio y recubiertos en su totalidad de fibras de carbono con resina epoxi, por lo que su peso se reduce aún más que los dos anteriores.



Figura 2-21. Depósito tipo III.

- Cilindros tipo IV: fabricados íntegramente de fibras plásticas con resina epoxi (Figura 2-22). Son los más caros de fabricar. Pueden presentar deformaciones a muy altas temperaturas que modifiquen su estructura, aunque estas son muy pequeñas.

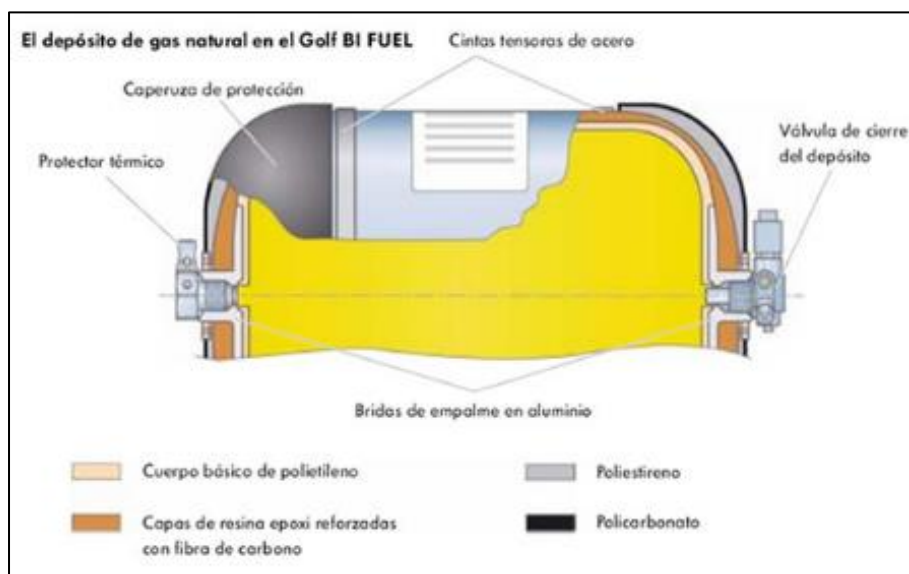


Figura 2-22. Depósito tipo IV.

Algunos modelos, como el Audi A4 Avant g-tron, poseen varios depósitos interconectados de diferentes tamaños con una localización específica aprovechando los huecos del propio vehículo (Figura 2-23).

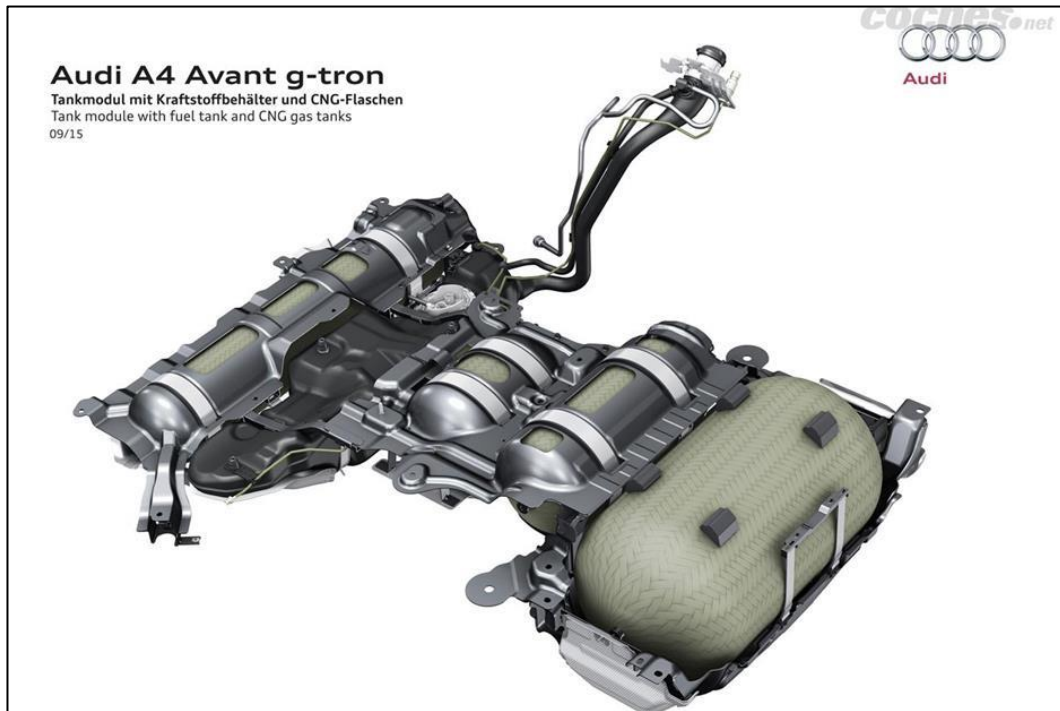


Figura 2-23. Depósitos tipo 4 Audi A4 Avant.

El factor más importante para la selección del tipo de depósito es el de la relación peso/volumen, es decir, lo que pesa el depósito por capacidad de almacenamiento de gas que tiene.

2.4.2. Tipos de cierres

En su mayoría estos depósitos son cilíndricos con cierres semiesféricos o tipo casquete, sin embargo, existen una gran variedad de formas quizás menos utilizadas cuyo uso depende de otros factores como el coste del material, métodos de fabricación, restricciones de las dimensiones donde se vayan a instalar, función para la cual está diseñado, etc.

Algunos ejemplos de tipos de cierres son:

- Planos (Figura 2-24): usados en situaciones en las que las presiones interiores son bajas como en depósitos de gasolina y calderas, aunque también pueden ser utilizados para presiones más elevadas, pero de diámetro pequeño.

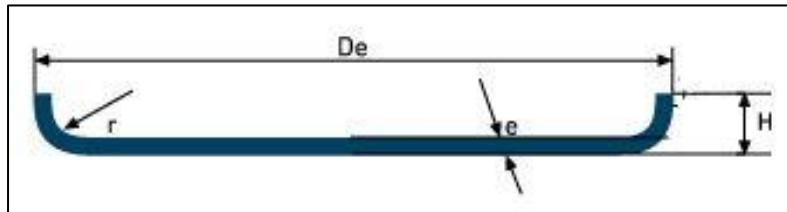


Figura 2-24. Cierre plano.

Donde la unión cuerpo-cierre puede efectuarse de diferentes maneras [7]. Algunos ejemplos de ellos son (Figura 2-25):

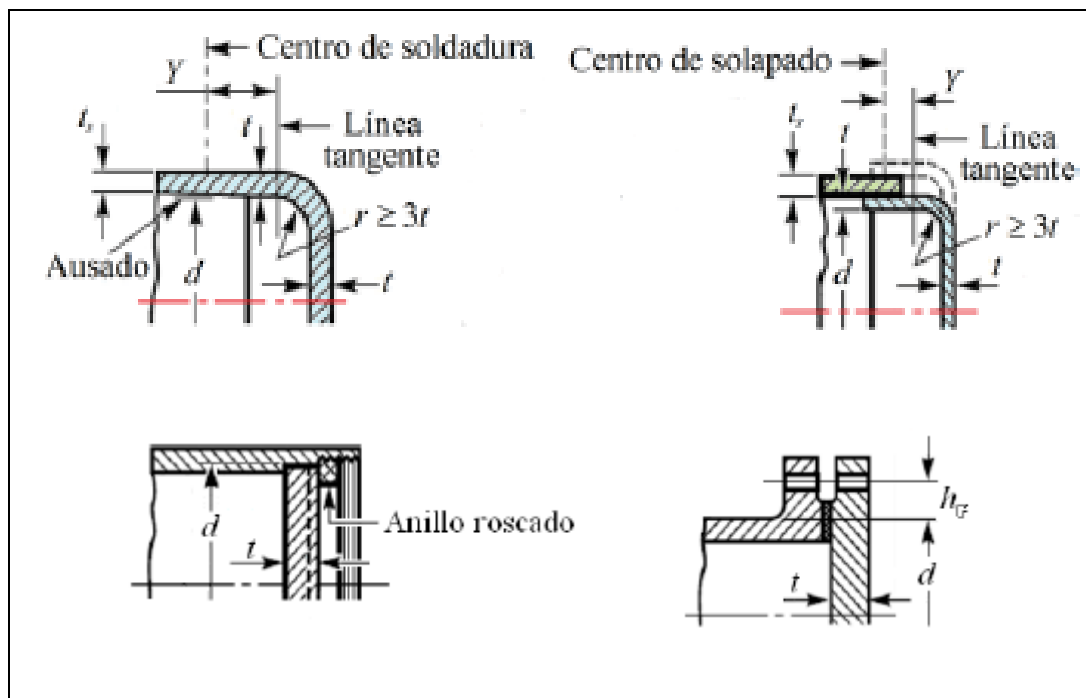


Figura 2-25. Ejemplos de soldadura cabezal plano.

En cuanto al tipo de unión soldada permitida, hay ocho permitidas (Figura 2-26):

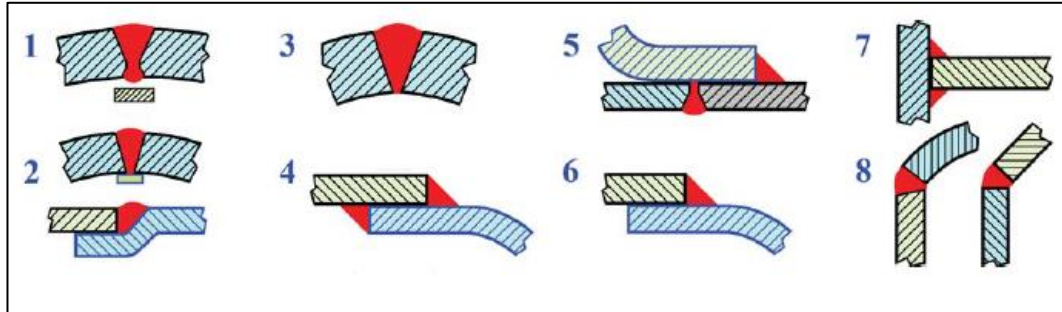


Figura 2-26. Tipos de soldaduras permitidas.

- Tipo 1: juntas de doble arco de soldadura, (con depósito de material tanto en la superficie interna como en la externa). No tienen limitaciones y se aplican en todas las categorías de uniones.
- Tipo 2: juntas a tope de simple arco de soldadura con respaldo.
- Tipo 3: iguales que las de tipo dos, pero en este caso sin respaldo. Se aplican únicamente en soldaduras circunferenciales, donde el espesor es inferior a 16 mm y el diámetro exterior máximo es de 600 mm.
- Tipo 4: juntas a filete completas de doble solape. Empleadas en uniones longitudinales con espesor máximo de 10 mm, mientras que para las circunferenciales el máximo es de 16 mm.
- Tipo 5: son juntas a filete completas de simple solape con soldaduras tipo enchufada. Aplicadas a uniones circunferenciales donde los valores máximos permitidos de espesor y diámetro son, respectivamente, 13 mm y 600 mm.
- Tipo 6: juntas a filete completas de simple solape.
- Tipo 7: juntas de esquina.
- Tipo 8: juntas en ángulo.

- Semiesféricos (Figura 2-27): para este tipo de cierres, el espesor necesario es la mitad que para la parte cilíndrica. Son rentables cuando los materiales con los que están hechos son de elevado coste (níquel y titanio), no siendo tan económicas en comparación con los toriesféricos cuando se construyen de acero debido al coste del proceso de conformado.

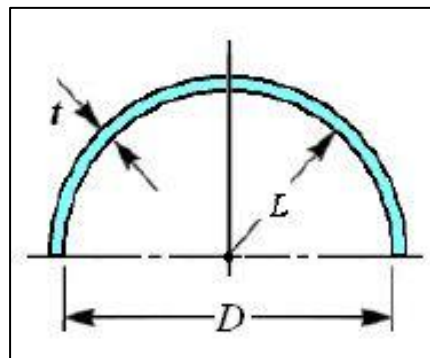


Figura 2-27. Cierre semiesférico.

- Elípticos y toriesféricos (Figura 2-28): es el más usado en los recipientes a presión ya que el espesor necesario es igual a los cilindros a los que se encuentran unidos reduciendo así los efectos de discontinuidad y soldaduras a realizar.

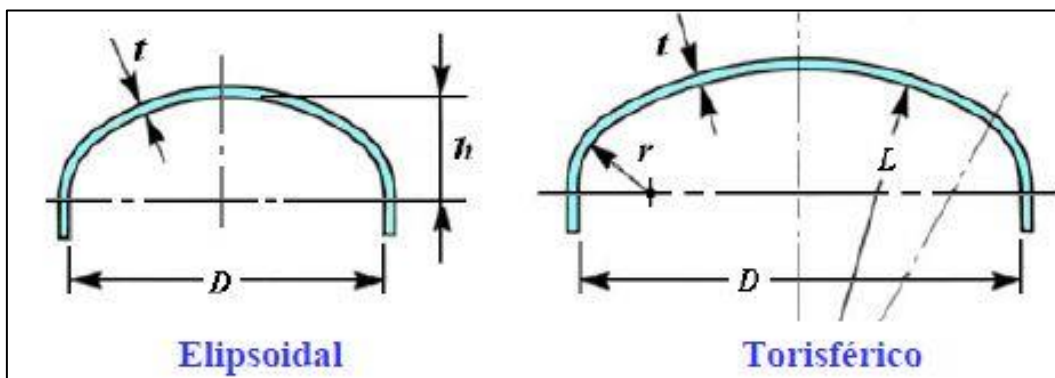


Figura 2-28. Cierres elíptico y torisférico.

- Cónicos y torocónicos (Figura 2-29): en este tipo de cierres, la unión cono-cilindro debe considerarse parte del diseño del cono ya que existen importantes fuerzas entorno a las discontinuidades.

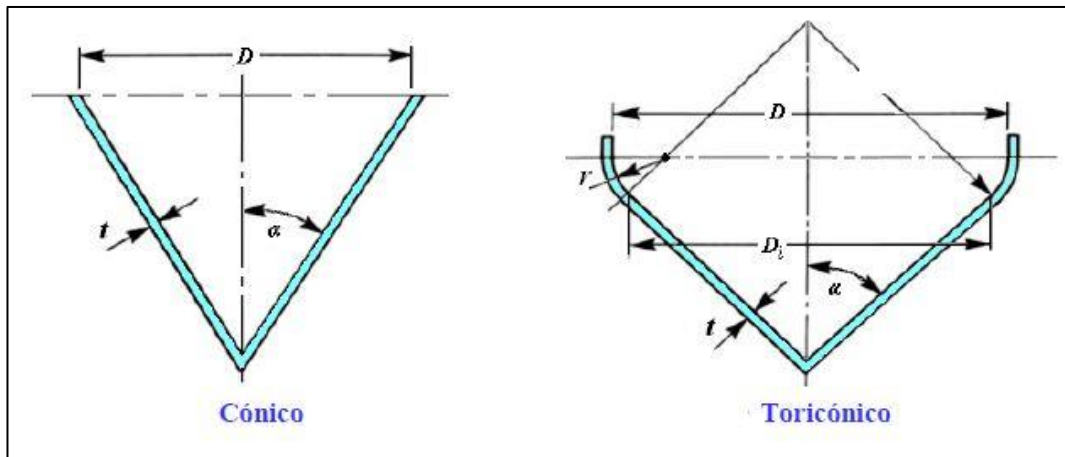


Figura 2-29. Cierres cónico y torocónico.

- Otras formas especiales (Figura 2-30): requieren diseños específicos para usos concretos. La fabricación de este tipo de cierres es realmente complicada ya que no existen métodos simplificados para su cálculo, siendo necesarios métodos analíticos y ensayos experimentales.

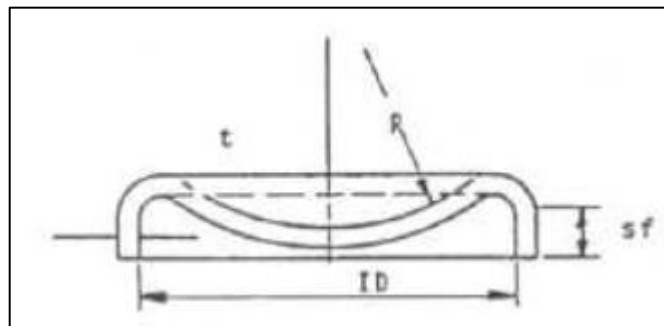


Figura 2-30. Cierre especial.

Las secciones de transición deben ser diseñadas de tal forma que se minimicen los efectos de discontinuidad. Para ello se debe reducir el espesor en las uniones entre la parte cilíndrica y el cierre.

2.4.3. Bridas

La brida es un elemento de unión [8] entre dos componentes de un sistema de tuberías unidos por espárragos. Teniendo como ventaja la posibilidad de ser rápidamente montado y desmontado de manera sencilla, sin operaciones destructivas. Aunque la mayoría son metálicas, algunas son de plástico reforzado, vidrio o aceros revestido con vidrio.

Existen diferentes tipos de bridas, con resaltes, junta solapada, planas, de doble acoplamiento, macho-hembra, plana-hembra, de anillo, etc. En general, todas estas conexiones de bridas atornilladas son circulares, selladas con una junta o con soldaduras, son empleadas en la fabricación de recipientes sometidos a presión y deben diseñarse de acuerdo con la misma norma o conjunto de requisitos.

Además, pueden utilizarse bridas de acuerdo a una norma para tubos como recipientes a presión sin realizar ningún cálculo, siempre que se cumplan una serie de escenarios:

- En condiciones normales de funcionamiento, la presión de cálculo no exceda la presión nominal dada en las tablas de la norma correspondiente.
- En condiciones de ensayo o en condiciones excepcionales, la presión de cálculo no exceda 1,5 veces la presión nominal dada en las mismas tablas, a la temperatura apropiada.
 - Las juntas sean las que están permitidas por la norma.
 - Los tornillos poseerán una determinada resistencia.
- El número equivalente de ciclos de presión a plena amplitud sea igual o menor que 500.
- La diferencia entre las temperaturas de la brida y los tornillos no excedan 50 °C en ningún caso.
- Que los coeficientes de dilatación térmica a 20 °C entre tornillos y brida no excedan del 10 %.

En relación con su mecanizado, la superficie de apoyo de las tuercas debe ser paralela a la cara de la brida. Cualquier repaso de esa cara no debe reducir el espesor de la brida por debajo de unos valores establecidos. El acabado superficial de la cara de contacto de la junta ha de cumplir con las recomendaciones del fabricante o basarse en la experiencia propia.

2.5. Vehículos de gas natural

En función de la adaptación del tipo de motor podemos encontrar [9]:

- Motores de encendido provocado (MEP)

- Vehículos mono-fuel, monovalentes o dedicados: son motores MEP optimizados para funcionar con gas natural como combustible. Tienen emisiones muy bajas y rendimientos elevados.

- Vehículos bi-fuel o bivalentes: pueden funcionar tanto con gas natural como con gasolina y, obviamente, poseen dos depósitos y sistemas de alimentación diferenciados para cada uno de los combustibles. La adaptación de estos motores de gasolina a gas solo requiere un avance del encendido, así que, si por algún motivo se desea que el vehículo solo trabaje con gasolina siempre, se retira la alimentación de gas natural y el coche volvería a su estado inicial.

- Motores de encendido por compresión (MEC)

- Vehículos dual-fuel o de combustible dual: estos vehículos utilizan una mezcla de gas natural y gasóleo. Primeramente, el gasóleo se inyecta en la cámara de combustión como iniciador del proceso de quemado, y seguidamente se introduce una mezcla de aire y gas en la admisión mediante un carburador o sistema de inyección.

En estado de ralentí el vehículo trabaja únicamente con gasóleo, mientras que cuando se encuentra a regímenes de giro y carga alto puede oscilar entre el 5 y 20 % del total de la mezcla.

Su adaptación se puede conseguir fácilmente con solo reducir la relación de compresión y sin necesidad de adaptarle sistema de ignición, aunque a la hora de repostar se hace necesario un sistema que tenga los dos tipos de combustible al igual que en el caso bi-fuel de los MEP.

- Vehículos de inyección directa de alta presión (HPDI): estos vehículos utilizan la tecnología dual-fuel inyectando en la cámara de combustión tanto gasóleo como gas a la vez. Siendo el primero el responsable de que se produzca

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

la combustión. Esto está siendo desarrollado en Canadá en vehículos pesados por Westport Innovations.

El uso de gas natural como fuente de energía en motores de combustión interna tiene ventajas frente al resto: mayor duración tanto de las bujías como del lubricante empleado y, en general, del motor entero.

Todos estos tipos de vehículos poseen los mismos componentes [9] representados esquemáticamente (Figura 2-31):

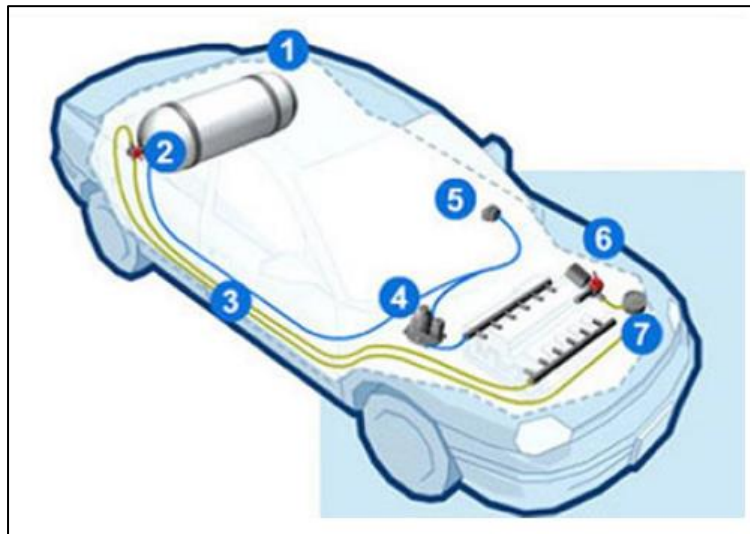


Figura 2-31. Esquema de los componentes del sistema de gas natural

- Elemento 1: depósito de gas natural comprimido. Normalmente ubicado en el maletero con lo que hace disminuir su capacidad o en la parte inferior del vehículo; fabricado, usualmente, en acero sin costuras.
- Elemento 2: válvula del depósito. Dispositivo de seguridad que se activa cuando la presión del interior supera un valor y para la apertura y cierre rápido del circuito completo.
- Elemento 3: tubos de conexión. Tubos de alta presión por los que circula el gas natural hasta llegar al motor. Son de acero contra la corrosión y poseen uniones soldadas y filtros en determinados puntos.
- Elemento 4: regulador de presión. Válvula que regula la presión desde los 200 bar a los que se encuentra el depósito hasta una presión de utilización del motor de unos 3 bar.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- Elemento 5: indicador de nivel de gas disponible y selector de combustible. Es la pantalla por la que se muestra el nivel de gas disponible y presión de su interior.

- Elemento 6: válvula de llenado. Localizada en el compartimento del motor o en algún lugar exterior del coche cuya boquilla está estandarizada en toda Europa, siendo el modelo NGV1 para turismos y NGV2 para vehículos pesados.

- Elemento 7: manómetro. Instalado entre el depósito y el regulador, tiene la función de indicar continuamente el nivel de gas ya que existe una relación entre la presión del depósito y la cantidad de gas restante.

2.5.1. Modelos de vehículos de gas existentes en el mercado

Actualmente, según NGVA [10], la cantidad de vehículos que operan con gas natural no es especialmente elevada. Sin embargo, las previsiones para 2030 son esperanzadoras (Figura 2-32):

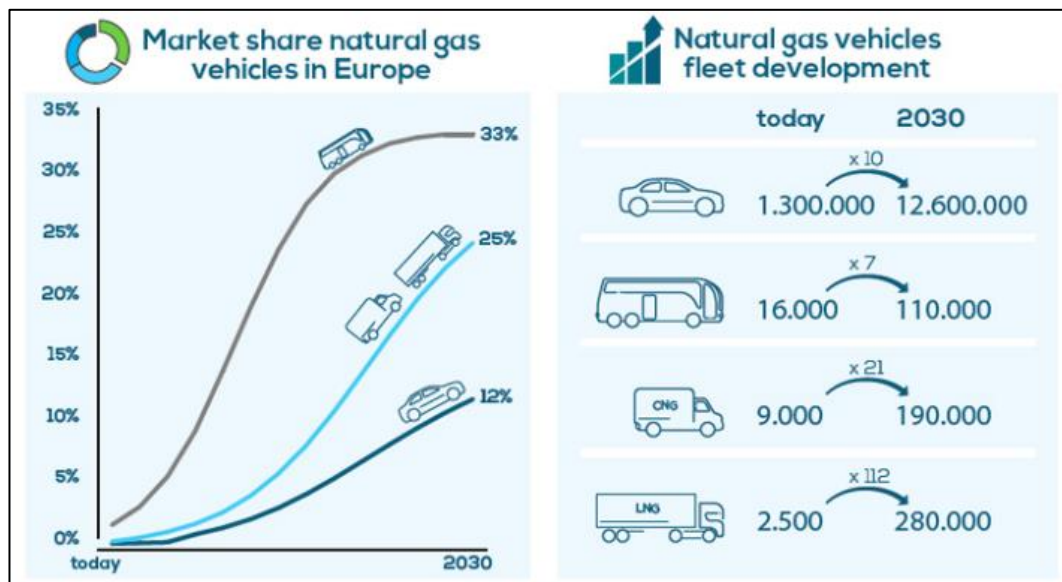


Figura 2-32. Evolución prevista de los vehículos de gas.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Algunos modelos de los que se encuentran actualmente en el mercado [2] son:

- FIAT
 - Fiorino

	
Almacenamiento	2 bombonas
Capacidad	Gas: 77 litros = 33 kg Gasolina: 45 litros
Colocación	1 longitudinalmente en el centro 1 transversalmente en la parte trasera
Autonomía	314 con gas 646 con gasolina
Consumo	4,2 kg/100km

- Fiorino Cubo


	
Almacenamiento	2 bombonas
Capacidad	Gas: 77 litros = 13,2 kg Gasolina: 45 litros
Colocación	1 longitudinalmente en el centro 1 transversalmente en la parte trasera
Autonomía	314 km gas 960 km gasolina
Consumo	4,6 kg/100km

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

○ Panda

	
Almacenamiento	2 bombonas
Capacidad	12 kg = 72 litros 35 litros de gasolina
Colocación	Bajo el piso del maletero
Autonomía	300 km gas
Consumo	3,1 kg /100km

- Ducato

	
Almacenamiento	5 bombonas
Capacidad	218 l = 36 kg
Colocación	Debajo del vehículo
Autonomía	410 con gas 100 con gasolina
Consumo	8,6 kg/100km

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- IVECO
 - Daily


	
Almacenamiento	5 bombonas + gasolina de 14 litros
Capacidad	42,46 kg
Colocación	Debajo del vehículo Longitudinales 2 izquierdo 1 en el derecho 2 más pequeños transversalmente en la parte de atrás
Autonomía	420 con gas condiciones reales vehículo cargado 100 con gasolina
Consumo	7,9 kgs de GNC/100 kms

- Audi
 - A3 sportback g-tron

	
Almacenamiento	2-3 bombonas
Capacidad (restan espacio al maletero)	Gas: 2 bajo el piso del maletero 7 kg Otro de 4kg Gasolina: 9 litros
Colocación	2 bajo el piso del maletero 1 bajo la banqueta de asientos traseros
Autonomía	400 con gas
Consumo	3,2 kg/100km

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- A4/A5 Avant g-tron

	
Almacenamiento	4 bombonas
Capacidad (restan espacio al maletero)	Gas: 19 kg Gasolina: 25 litros
Colocación	En la parte de atrás diferentes tamaños
Autonomía	500 con gas 450 con gasolina
Consumo	Gas: Automático: 3,8 / manual 4,4 Gasolina: 5,5 automático/6,4 manual

- SEAT

- Mii eco fuel

	
Almacenamiento	1 depósito
Capacidad	Gas: 11 kg Gasolina: 10 litros
Colocación	Bajo el suelo del maletero
Autonomía	380 con gas 220 con gasolina
Consumo	Gas 3,1 kg Gasolina 4,5 litros

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

○ León

	
Almacenamiento	2/3 depósito
Capacidad	Gas: 15 kg/17,7kg Gasolina: 9 litros
Colocación	Bajo el suelo del maletero
Autonomía	500 con gas 150 con gasolina
Consumo	Combinado:3,6 kg/100km Urbano:4,8 kg/100km extraurbano:2,9 kg/100km

○ Ibiza

	
Almacenamiento	2 depósitos
Capacidad	Gas: 13 kg Gasolina: 40 litros
Colocación	Rueda de repuesto
Autonomía	394 gas 800 gasolina
Consumo	3,3 kg/100 km con gas

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- VOLKSWAGEN
 - Cadi

	
Almacenamiento	4-5 bombonas 1 gasolina reserva
Capacidad	37 kg de gas 13 litros de gasolina
Colocación	Parte trasera
Autonomía	760 con gas 180 con gasolina
Consumo	5,5 kg/100km con gas 6,1 l/100km con gasolina

- Golf

	
Almacenamiento	3 depósitos
Capacidad	Gas: 15 kg Gasolina: 50 litros
Colocación	Rueda de repuesto
Autonomía	415 gas
Consumo	3,3 kg/100 km gas 5,6 l con gasolina

Una vez analizados los anteriores vehículos se llega a la conclusión de que:

- Los turismos llevan unos 13 kg de gas y 40 litros de gasolina.
- Los deportivos unos 19 kg de gas y 25 litros de gasolina
- Las furgonetas pequeñas 13 kg de gas y 45 litros de gasolina.
- Furgonetas grandes 40 kg de gas y gasolina a modo de reserva.

3. Validación

Antes de comenzar a simular el depósito final, primeramente, hay que validar que lo implementado con el software ANSYS es correcto. Para ello, se recurrirá a las ecuaciones de la elasticidad para obtener las tensiones y los desplazamientos ocasionados tanto en un cilindro de pared delgada sometido a una presión interna constante determinada como a una esfera sometida también a esa presión interna.

Para el caso del conjunto cilindro-esfera ensamblado no hay ecuaciones analíticas explícitas por lo que se tendrá que recurrir a ANSYS para analizar los resultados ocasionados en el cuerpo.

La geometría del cilindro con el que realizar la validación (Figura 3-1) posee unos cierres semiesféricos de 160 mm de radio interno y la longitud de la parte cilíndrica son 360 mm, lo que hace una longitud interna total de 680 mm. El espesor es constante en toda la geometría y de valor 2.5 mm.

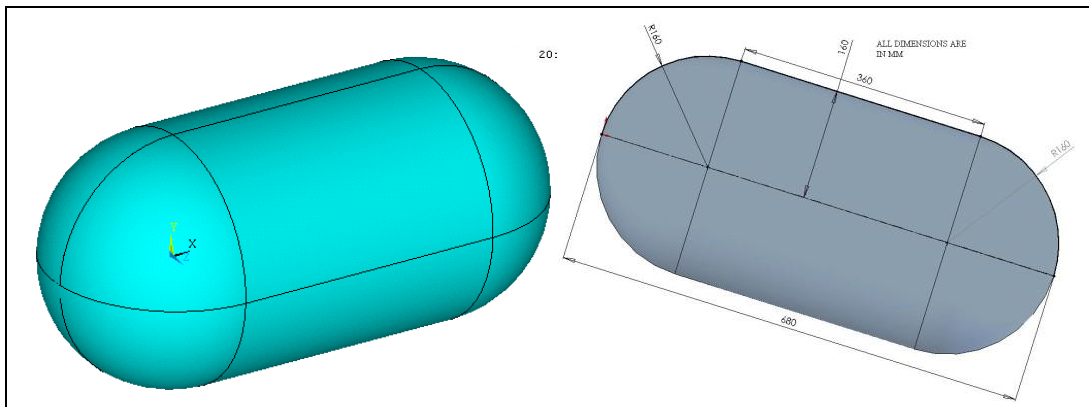


Figura 3-1. Modelo de referencia

En todos los casos descritos se utilizó acero como material y se aplicaron las siguientes propiedades (tabla 3-1):

tabla 3-1. Propiedades del material empleado.

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad (ρ)	kg/m ³	7800
Módulo de Young (E)	GPa	207
Coefficiente de Poisson (ν)	-	0.3
Límite elástico (σ_e)	MPa	480
Tensión de rotura (σ_r)	MPa	800
Presión interna	MPa	1,2

3.1. Cálculos analíticos

Para comprobar que lo simulado posteriormente es correcto, primeramente, se recurre a las ecuaciones de resistencia de materiales aplicadas a los casos de cilindro sin tapas sometido a presión interna y a esfera sometida a presión interna:

- Cálculo de tensiones en parte cilíndrica del depósito (Figura 3-2):

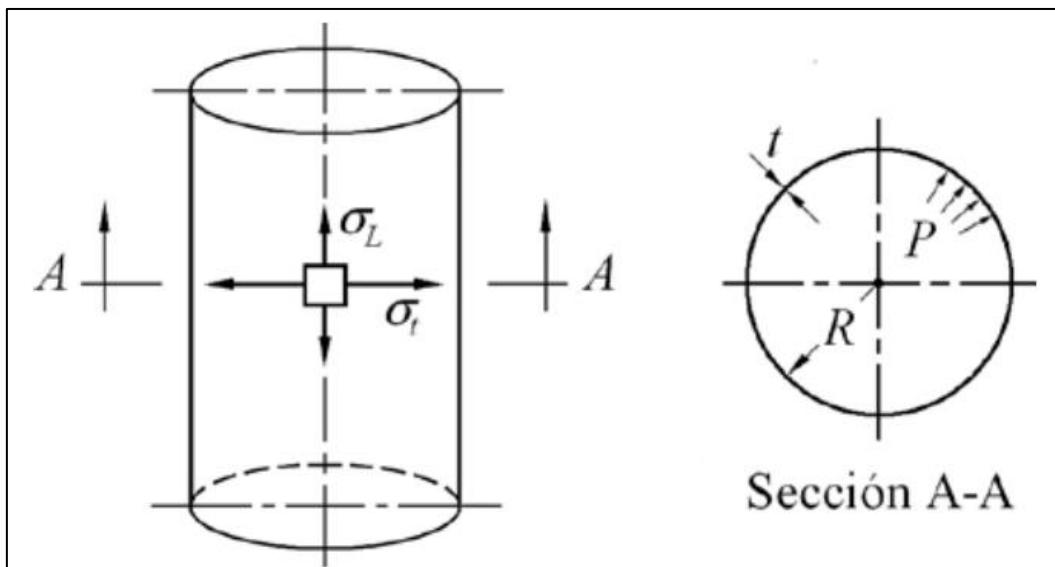


Figura 3-2. Representación tensiones cilindro sometido a presión interna.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Planteando el equilibrio en la dirección longitudinal (Ecuación 3-1):

$$\sigma_L \cdot \left[\frac{\pi \cdot (d + 2e)^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right] = P \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (\text{Ecuación 3-1})$$

Donde:

- d: es el diámetro interno del cilindro
- e: es el espesor empleado
- P: es la presión aplicada en la superficie interna del cilindro.

Despreciando términos de segundo orden y despejando σ_L :

$$\sigma_L = \frac{P \cdot r}{2 \cdot e} \quad (\text{Ecuación 3-2})$$

Mientras que para la dirección tangencial:

$$P \cdot d = 2 \cdot \sigma_t \cdot e \quad (\text{Ecuación 3-3})$$

Despejando σ_t :

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r}{e} \quad (\text{Ecuación 3-4})$$

Por último, para calcular la tensión equivalente de Von Mises:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_L^2 - \sigma_t \cdot \sigma_L} \quad (\text{Ecuación 3-5})$$

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

La tercera componente de la tensión, al considerar el cilindro de pared delgada, es despreciable frente a las otras dos. Tampoco se ha tenido en cuenta el peso de la envolvente ni el del gas que pudiera existir en su interior.

Utilizando las anteriores ecuaciones para calcular tanto la tensión longitudinal (Ecuación 3-2) como la tensión tangencial (Ecuación 3-4) y sustituyendo las variables de las ecuaciones por los valores del cilindro de referencia se obtiene:

$$\sigma_L = \frac{1,2 \text{ MPa} \cdot 160 \text{ mm}}{2 \cdot 2,5 \text{ mm}} = 38,4 \text{ MPa} ; \sigma_t = \frac{1,2 \text{ MPa} \cdot 160 \text{ mm}}{2,5 \text{ mm}} = 76,8 \text{ MPa}$$

Para la tensión equivalente de Von Mises (Ecuación 3-5):

$$\sigma_e = \sqrt{38,4^2 + 76,8^2 - 38,4 \cdot 76,8} = 66,51 \text{ MPa}$$

Simulando ahora un cilindro en ANSYS e imponiendo las condiciones de simetría tanto en desplazamientos como en giros se obtiene un cuarto de cilindro (Figura 3-3):

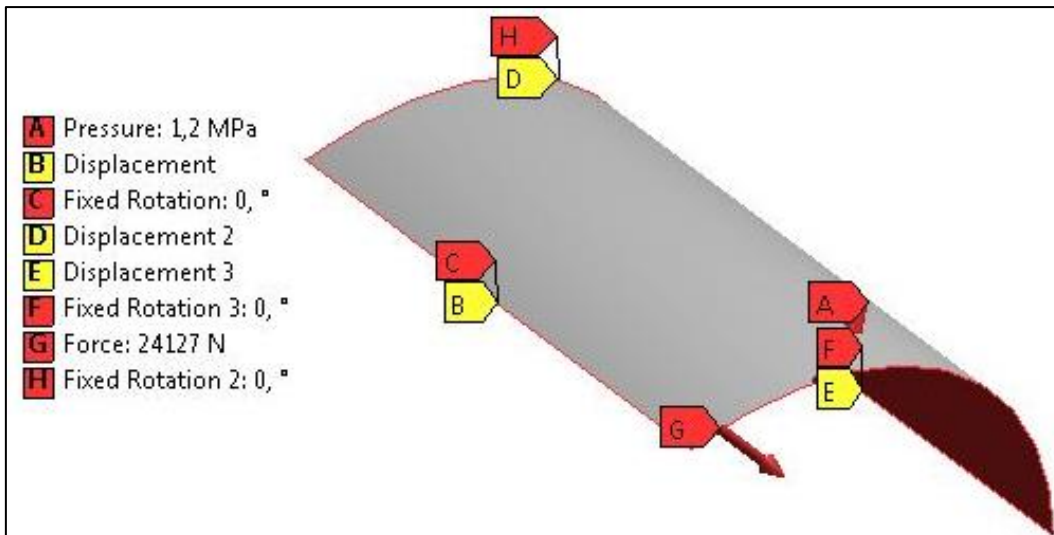


Figura 3-3. Cuarto de cilindro con condiciones de contorno.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

La fuerza G se ha integrado en el modelo para simular la fuerza producida por el supuesto cierre que se encontraría en dicho extremo. Para hallar su valor:

$$F = P \cdot S = P \cdot \pi \cdot R^2 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \pi \cdot (160 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 = 96509,72 \text{ N}$$

Como está representado un cuarto de cilindro, la fuerza final impuesta será la cuarta parte de la total, es decir, 24127,43 N. Observando las tensiones resultantes (Figura 3-4):

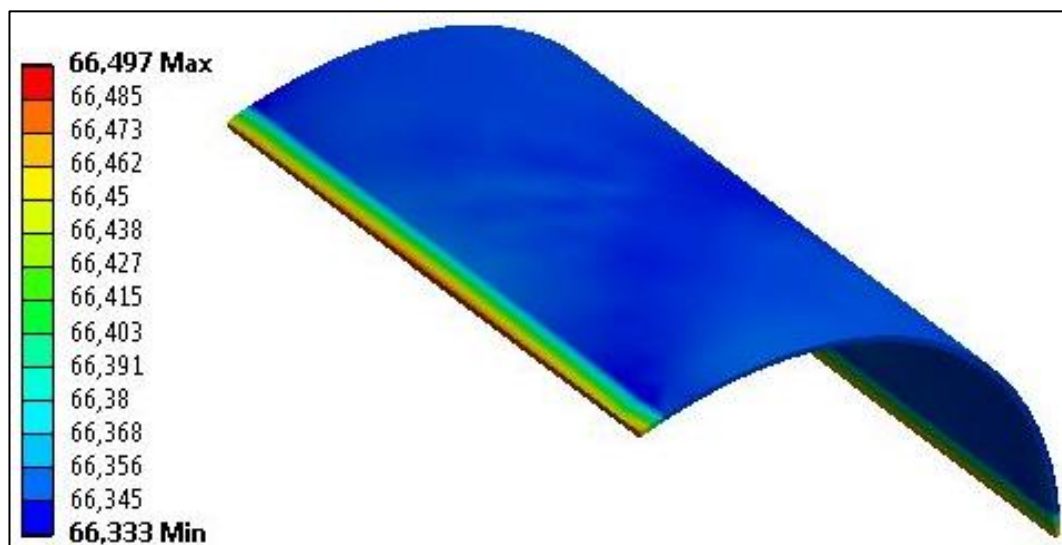


Figura 3-4. Resultado simulación tensiones cilindro.

Evidentemente, la tensión producida en la superficie del cilindro debería de ser uniforme en toda ella, sin embargo, a pesar de que existan zonas con diferentes tensiones (representadas por colores) debido al mallado, la variación entre ellas es mínima, pudiendo concluir que el valor de la tensión obtenido es de unos 66,35 MPa, prácticamente igual a los 66,51 MPa del resultado analítico.

En cuanto a los desplazamientos, existen tanto en la dirección radial (debida al efecto de la presión interna) como en la longitudinal (por la presión resultante del cierre existente). Por lo tanto, el desplazamiento final del extremo del cilindro será la superposición de ambos. En este caso, se considerará despreciable el efecto poisson.

Primeramente, analizando el cilindro únicamente sometido a presión interna (Figura 3-5):

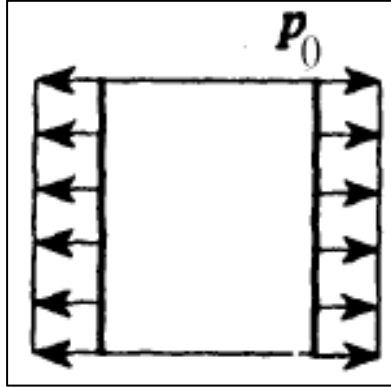


Figura 3-5. Cilindro sometido a presión interna.

La expresión analítica para el cálculo de los desplazamientos [11] en dirección radial es:

$$\delta = \frac{P \cdot R^2}{E \cdot t} \quad (\text{Ecuación 3-6})$$

Donde:

P = presión interna aplicada.

R = radio interno del cilindro.

E = módulo de elasticidad del material.

t = espesor del material.

Sustituyendo los valores de referencia (Ecuación 3-6) se obtiene:

$$\delta = \frac{1,2 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot (160 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{207 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 0,05936 \text{ mm}$$

Este desplazamiento radial será constante en toda la superficie y de valor 0,05936 mm según la expresión analítica. Comparándolo con la simulación (Figura 3-6) se obtiene 0,059348 mm y se demuestra que ambos prácticamente coinciden:

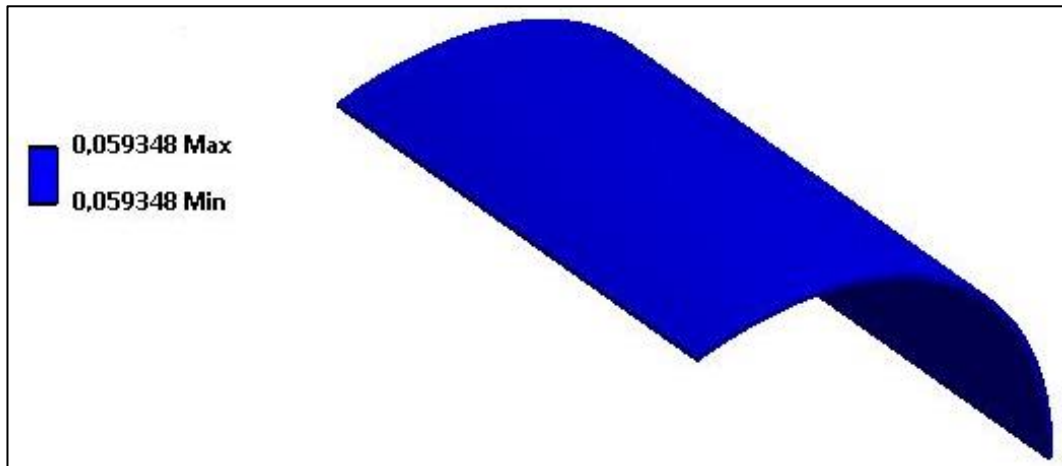


Figura 3-6. Desplazamientos radiales de un cilindro sometido a presión interna.

Por último, comprobando los desplazamientos longitudinales, la expresión que relaciona el desplazamiento longitudinal de un extremo de una barra sometida a tracción con la fuerza aplicada en la misma es:

$$\delta = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad \text{Ecuación 3-7}$$

Donde

F: es la fuerza aplicada.

L: longitud de la parte cilíndrica.

E: módulo de elasticidad del material.

A: sección donde está aplicada la fuerza F (en este caso una corona circular de espesor 2,5 mm).

Sustituyendo los valores diferentes valores en la ecuación anterior:

$$\delta = \frac{96509,72 \text{ N} \cdot 0,18 \text{ m}}{207 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot \pi \cdot (0,1625^2 - 0,16^2) \text{ m}^2} = 0,03313 \text{ mm}$$

Ese desplazamiento longitudinal será constante en todo el contorno del extremo y de valor 0,03313 mm. Comprobando con lo simulado (Figura 3-7), se obtiene un valor de 0,033397; resultados totalmente compatibles.

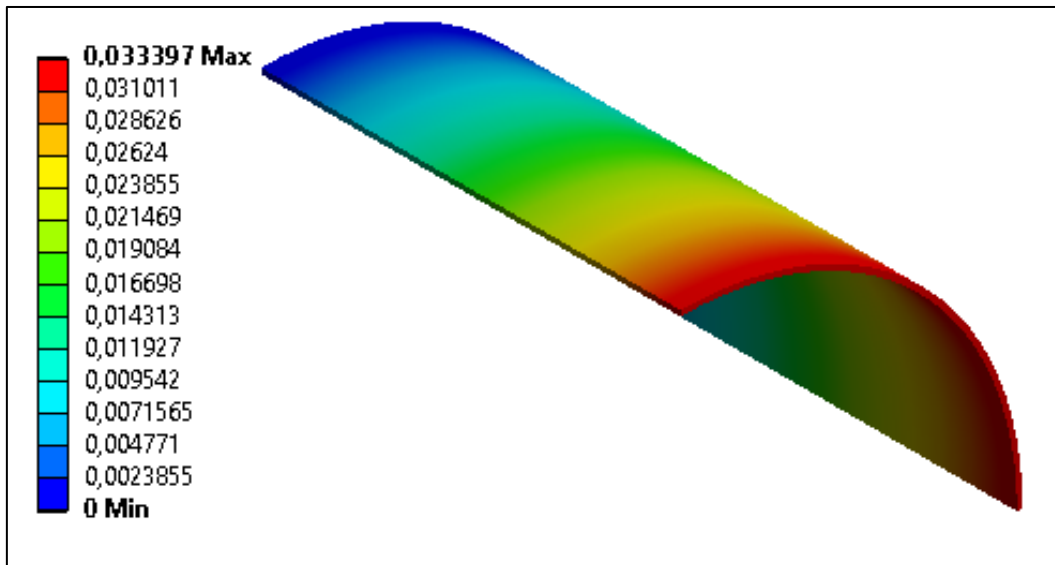


Figura 3-7. Desplazamientos longitudinales cilindro sometido a tracción.

Como se ha comentado antes, despreciando el efecto poisson, el cilindro se desplazará 0,059348 mm en dirección radial, por el efecto de la presión interna, y 0,03313 mm en dirección longitudinal, por acción de la fuerza resultante al incluir el cierre en el cilindro.

- Cálculo de tensiones de la parte esférica del depósito (Figura 3-8):

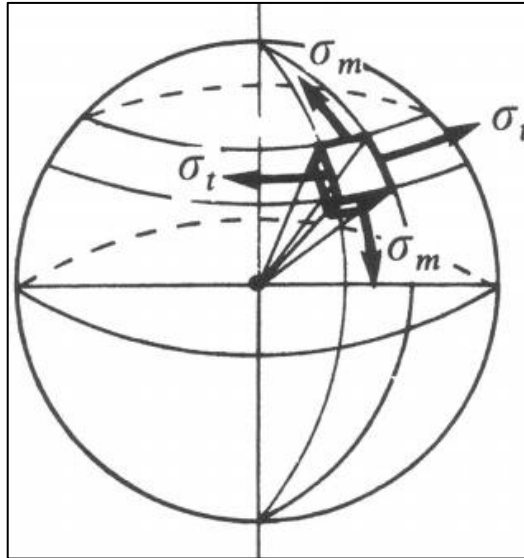


Figura 3-8. Tensiones en esfera.

Debido a la simetría, tanto σ_t como σ_m son iguales:

$$\frac{\sigma_m}{r} + \frac{\sigma_t}{r} = \frac{P}{e} \rightarrow \sigma = \frac{Pr}{2e} \quad \text{Ecuación 3-8}$$

La sola aplicación de Laplace (Ecuación 3-8), proporciona el siguiente resultado:

$$\sigma = \frac{1,2 \text{ MPa} \cdot 160 \text{ mm}}{2 \cdot 2,5 \text{ mm}} = 38,4 \text{ MPa}$$

Que, lógicamente, será igual que la tensión equivalente de Von Mises.

Al igual que con la parte cilíndrica, implementando la esfera en ANSYS y cortando por simetría se obtiene un octavo de esfera (Figura 3-9):

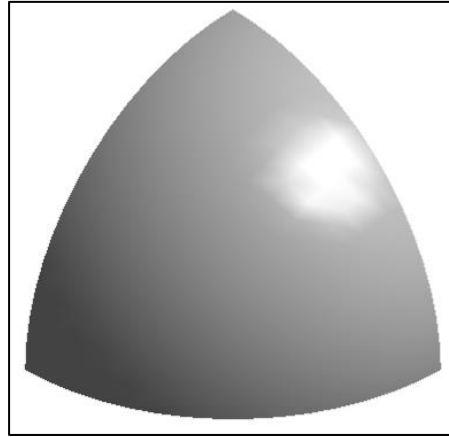


Figura 3-9. Esfera cortada por simetrías.

Con la presión interna fijada a 1,2 MPa se alcanzan las siguientes tensiones (Figura 3-10):

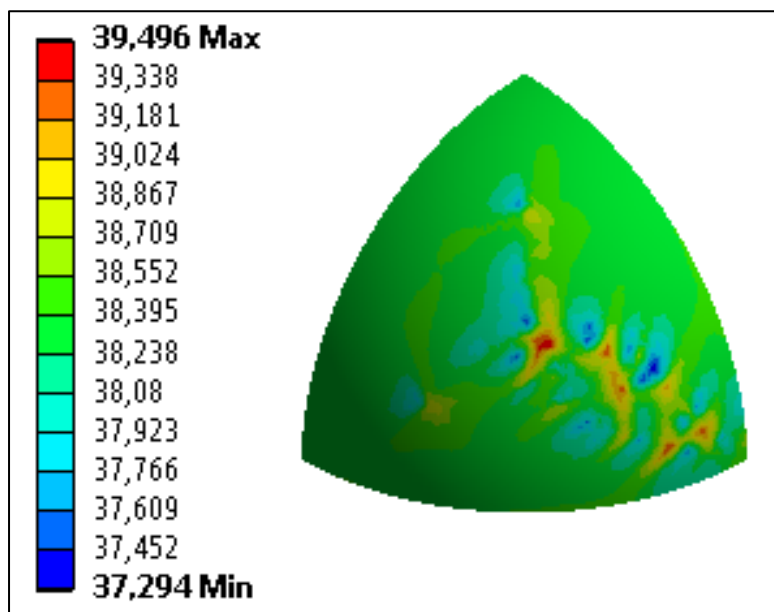


Figura 3-10. Resultado simulación tensiones esfera.

La variación de tensiones (colores) observada en su superficie es debido al mallado empleado (complicada de implementar en este tipo de geometría). Sin embargo, se puede apreciar como hay un color predominante en toda la superficie cuyo valor es 38,395 MPa (exactamente igual a los 38,4 MPa del resultado analítico).

En cuanto a los desplazamientos simulados (Figura 3-11) se obtienen:

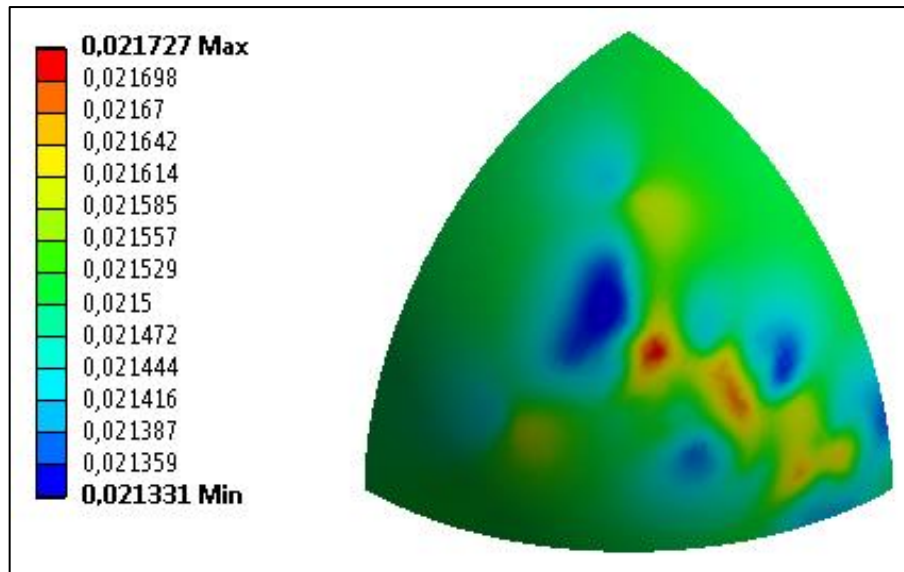


Figura 3-11. Resultado simulación desplazamientos esfera.

Al igual que con las tensiones en el cilindro, a pesar de las diferencias de desplazamientos obtenidos, estos son prácticamente uniformes en la esfera, pudiendo tomar como valor 0.0215 mm. Comparándolo con el resultado analítico (0,02077 mm) podemos determinar que los resultados son correctos.

Una vez comprobado que los resultados de ambas partes por separado se corresponden con las ecuaciones de la elasticidad descritas anteriormente, se procede a analizar el conjunto cilindro-cierre, tanto el modelo mallado con elementos 3D como tipo *shell*, directamente en ANSYS debido a la carencia de expresiones analíticas para este caso como se ha comentado anteriormente.

3.2. Modelo 3D

Para simularlo correctamente, se han impuesto una presión interna de 1,2 MPa, como en los anteriores casos, y condiciones de simetría en desplazamiento, impidiendo el movimiento de los puntos fuera de los planos de corte, convirtiéndolo así en un octavo de cilindro (Figura 3-12).

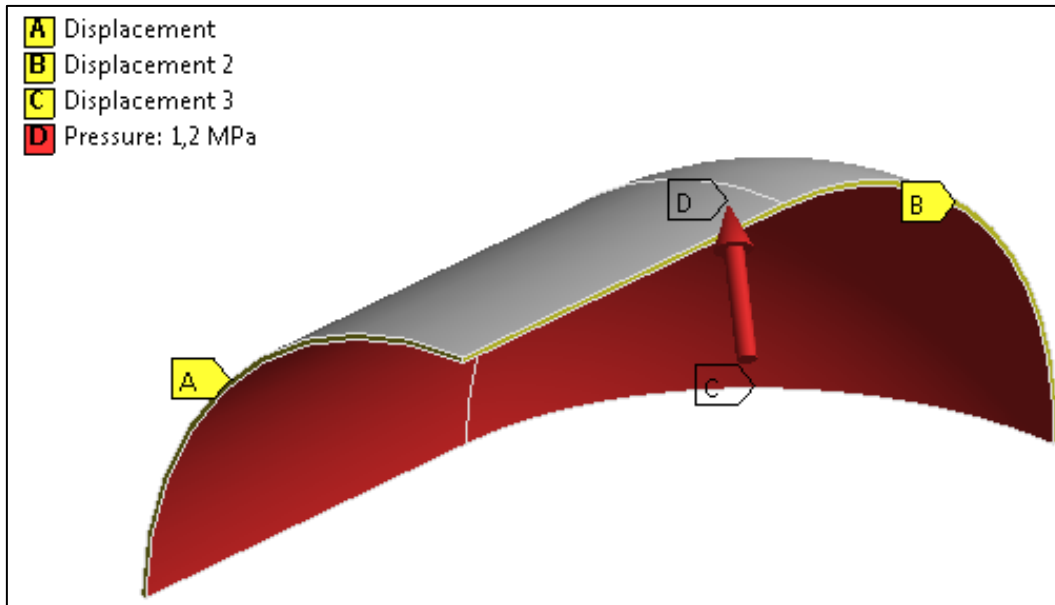


Figura 3-12. Octavo de cilindro con condiciones de contorno modelo 3D.

Tras esto, se obtiene un octavo de cilindro de una masa igual a 1.6472 Kg, lo que hace un total de 13.1776 Kg (resultado de multiplicarlo por ocho). El cuerpo mallado tiene 13245 elementos de forma tetraédrica y realizando una simetría en las tres direcciones del espacio se obtiene (Figura 3-13):

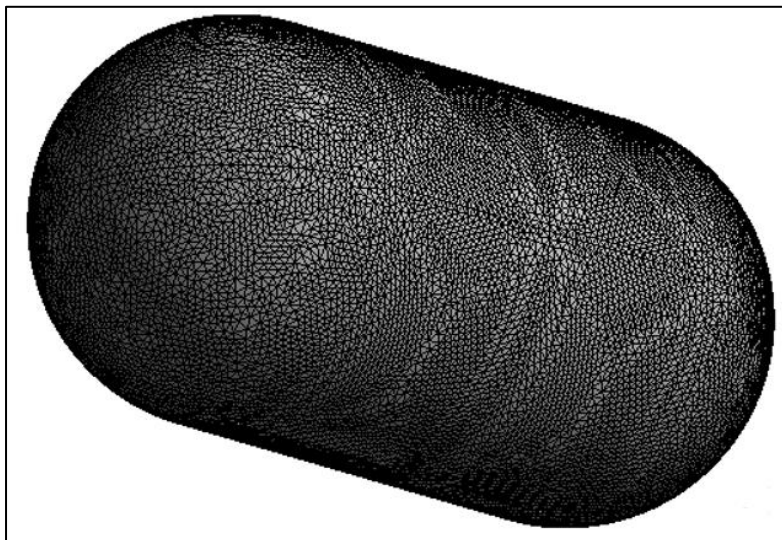


Figura 3-13. Modelo 3D mallado.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Para ver la convergencia de los resultados en función del número de elementos del modelo, se ha modificado su tamaño en la malla (tabla 3-2) y, así, poder comprobar la aproximación de estos.

tabla 3-2. Variación de las tensiones y desplazamientos en función del tamaño de malla en modelo 3D.

Número de elementos	Tensión (MPa)	Desplazamientos(mm)
1835	69,133	0,032612
2274	69,741	0,0327232
3671	68,609	0,032679
6019	68,314	0,032727
6636	68,283	0,03272
7014	68,331	0,032721
8870	68,13	0,032725
9907	67,984	0,032732
10802	67,953	0,032729
13245	68,064	0,032729

Representando los resultados tanto de las tensiones (Figura 3-14) como de los desplazamientos (Figura 3-15) obtenemos:

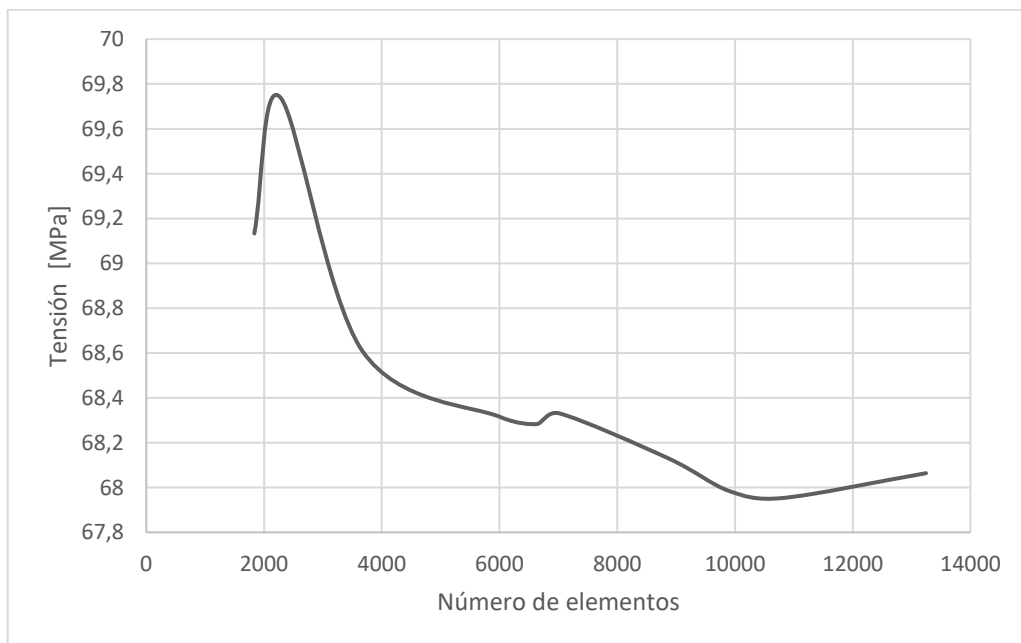


Figura 3-14. Variación de la tensión en función del número de elementos en modelo 3D.

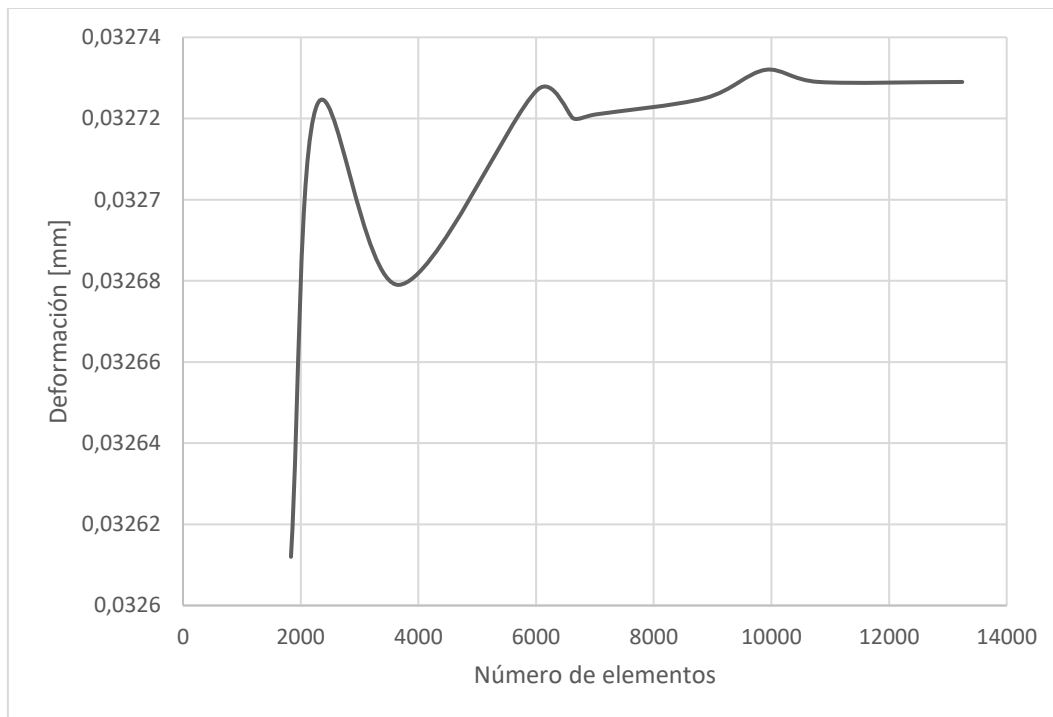


Figura 3-15. Variación del desplazamiento longitudinal en función del número de elementos en modelo 3D.

A pesar de que el modelo cuenta con casi 14000 elementos la gráfica de tensión-número de elementos todavía no ha llegado a estabilizarse del todo, aunque las diferencias entre el valor máximo y mínimo no sean muy distantes entre sí. En cambio, en los desplazamientos, aunque se aprecie variabilidad, las diferencias entre los valores máximos obtenidos son mínimas.

Observando los resultados de las tensiones tras la simulación (Figura 3-16), la tensión máxima fue de 68.064 MPa, localizada en la misma zona de transición cilindro- cierre:

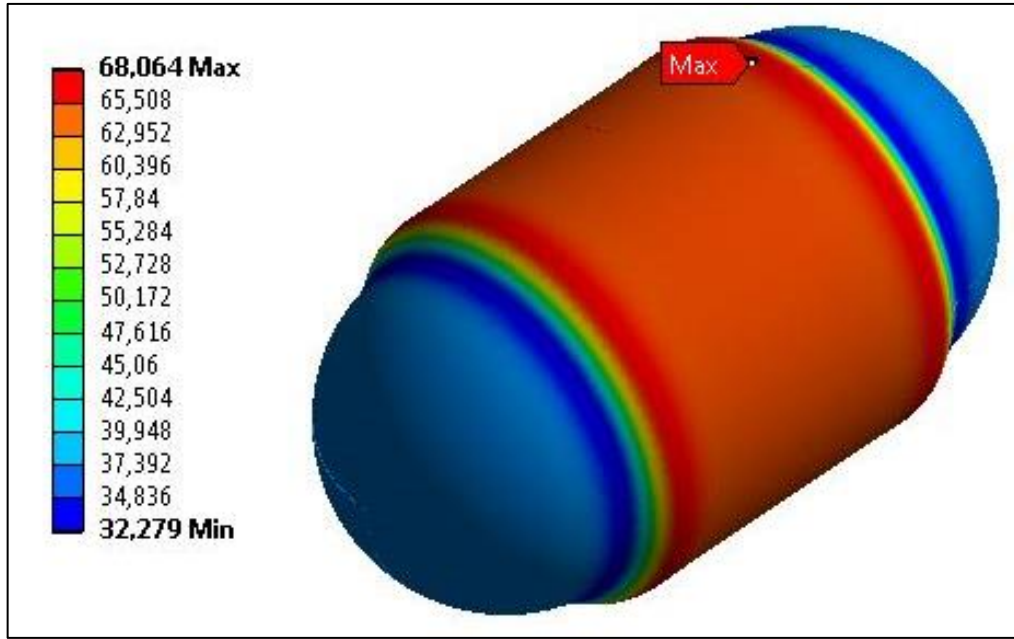


Figura 3-16. Distribución de tensiones modelo 3D.

Nótese que, tanto en el cierre como en la parte central de la parte cilíndrica, las tensiones equivalentes son del mismo valor como si se estuvieran simulando de manera independiente.

Y respecto a los desplazamientos longitudinales (Figura 3-17), el máximo valor obtenido de un extremo fue de 0.032729 mm:

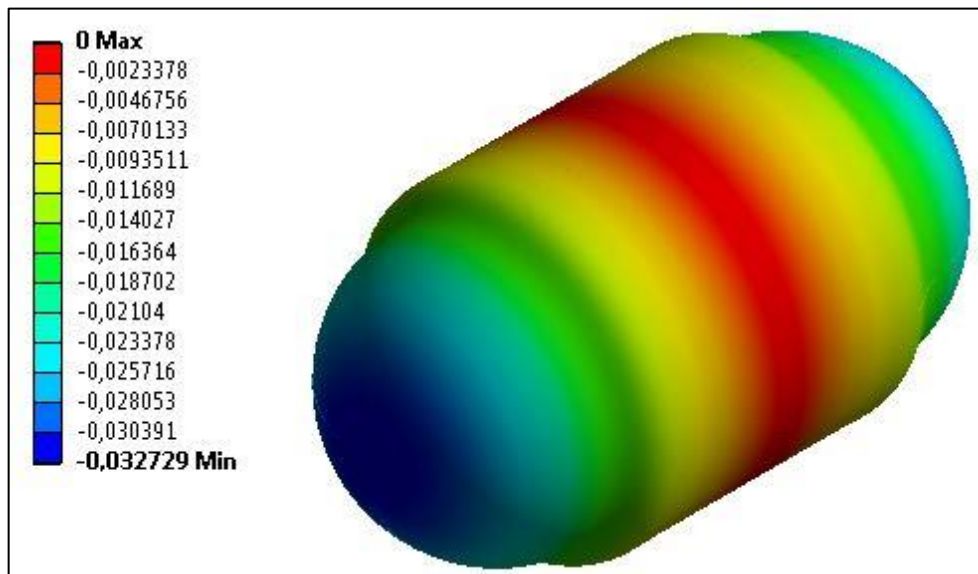


Figura 3-17. Distribuciones desplazamientos longitudinales modelo 3D.

3.3. Modelo tipo Shell

En este caso el modelo es de tipo *shell*, es decir, un elemento tipo lámina. Una superficie del cuerpo es extraída y, posteriormente, mallada con elementos bidimensionales, en lugar de tridimensionales, como en el caso anterior. Lógicamente las propiedades del material son las mismas que en los casos anteriores y la presión interna también.

Respecto a las condiciones de contorno aplicadas (Figura 3-18), las de simetría siguen siendo igual que en el modelo 3D, sin embargo, en este caso hay que añadir condiciones de rotación nulas en los contornos de la superficie cortada por los planos de simetría.

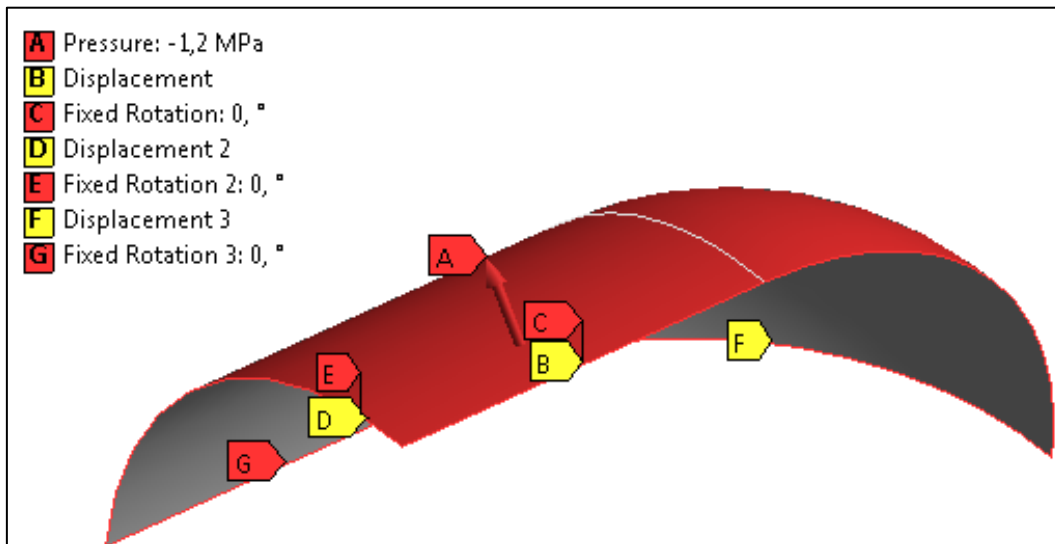


Figura 3-18. Condiciones de contorno aplicadas en el modelo shell.

En cuanto al modelo mallado analizado se observa que es bastante fino y uniforme en toda la superficie (Figura 3-19):

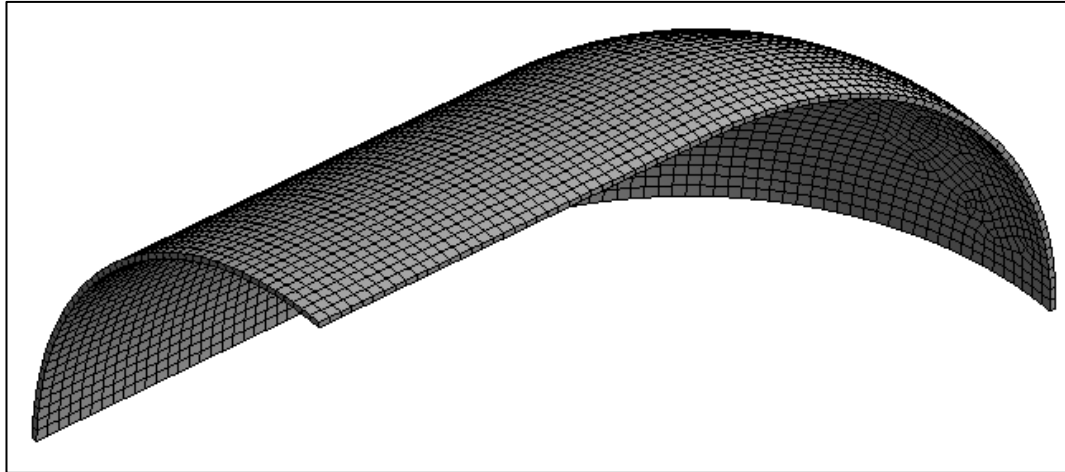


Figura 3-19. Mallado modelo tipo shell.

Al igual que en el modelo 3D, variando el tamaño de malla para comprobar la convergencia de los resultados (tabla 3-3):

tabla 3-3. Variación de las tensiones y desplazamientos en función del tamaño de malla en modelo tipo shell.

<i>Número de elementos</i>	<i>Tensión (MPa)</i>	<i>Desplazamientos (mm)</i>
145	68,898	0,032627
234	69,796	0,035006
401	69,669	0,033355
885	69,092	0,03308
1090	69,057	0,033506
1342	68,897	0,033198
1727	68,935	0,033262
2286	68,831	0,033415
3481	68,778	0,033386
5408	68,782	0,033343
9258	68,771	0,033366

En este caso, representando la convergencia de los resultados en tensión (Figura 3-20) y desplazamiento (Figura 3-21), se obtiene:

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

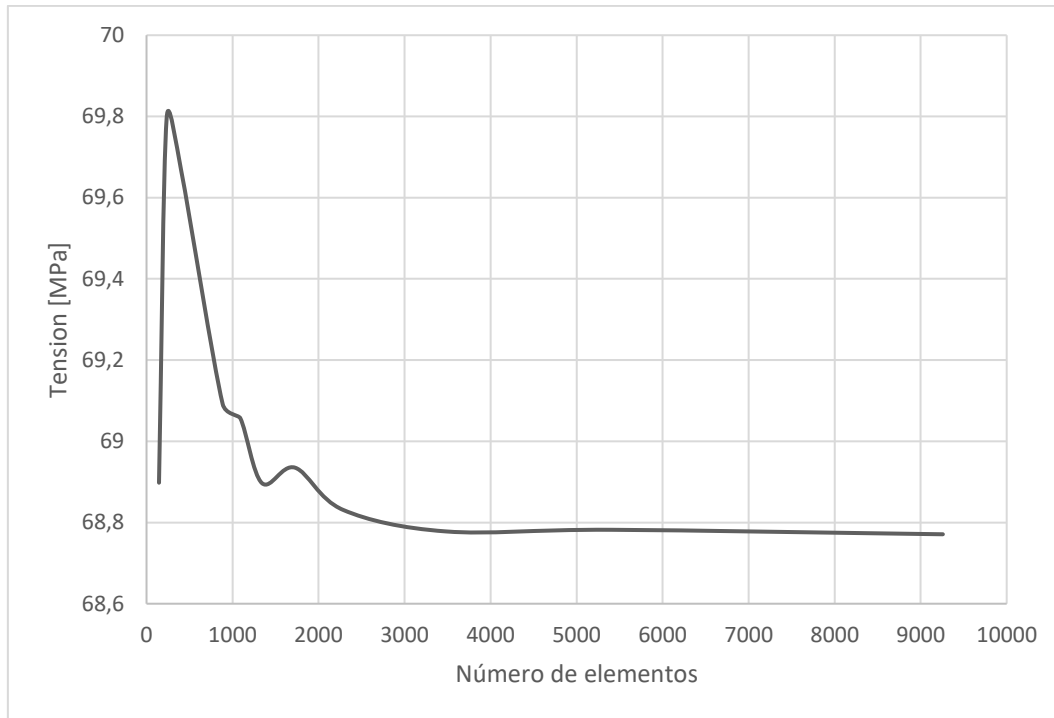


Figura 3-20. Variación de la tensión en función del número de elementos en modelo tipo shell.

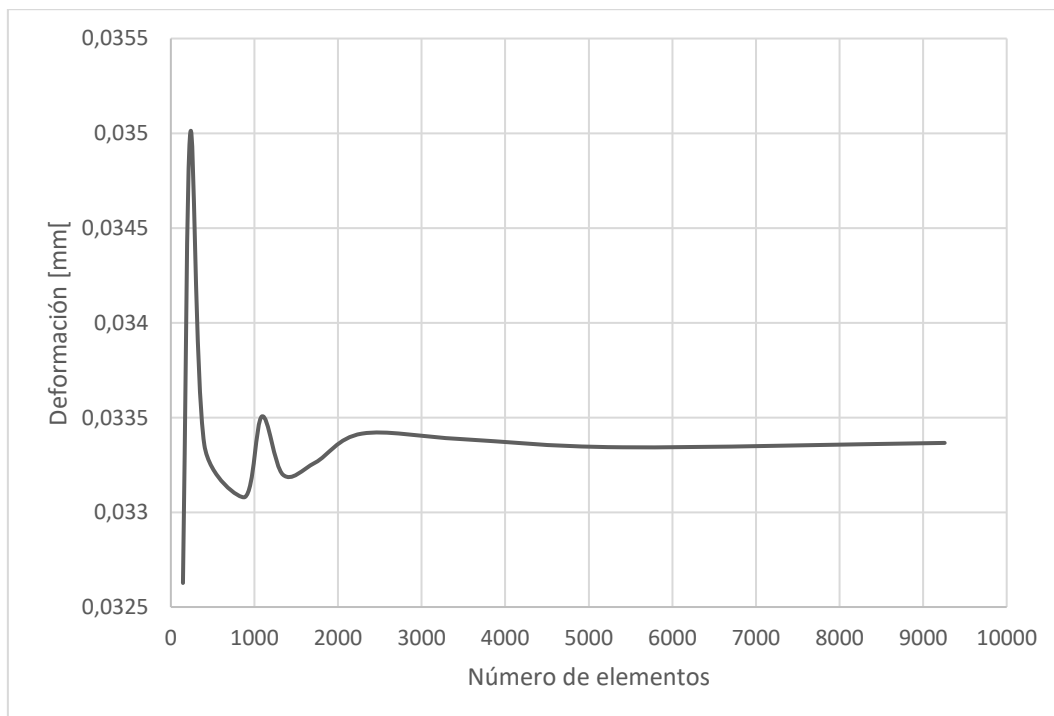


Figura 3-21. Variación del desplazamiento longitudinal en función del número de elementos en modelo tipo shell.

A pesar de la oscilación inicial con el empleo de un número bajo de elementos, se observa la poca disparidad en los valores obtenidos. La convergencia es realmente buena llegándose a la estabilización aumentando ligeramente la cantidad de elementos empleados.

Tras todo esto, se obtienen las siguientes tensiones (Figura 3-22) y desplazamientos longitudinales (Figura 3-23):

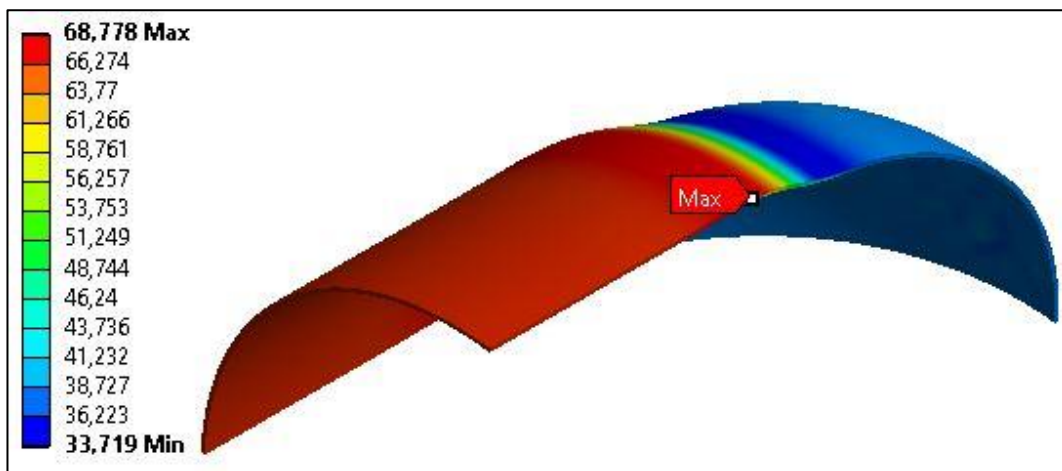


Figura 3-22. Tensiones modelo tipo shell.

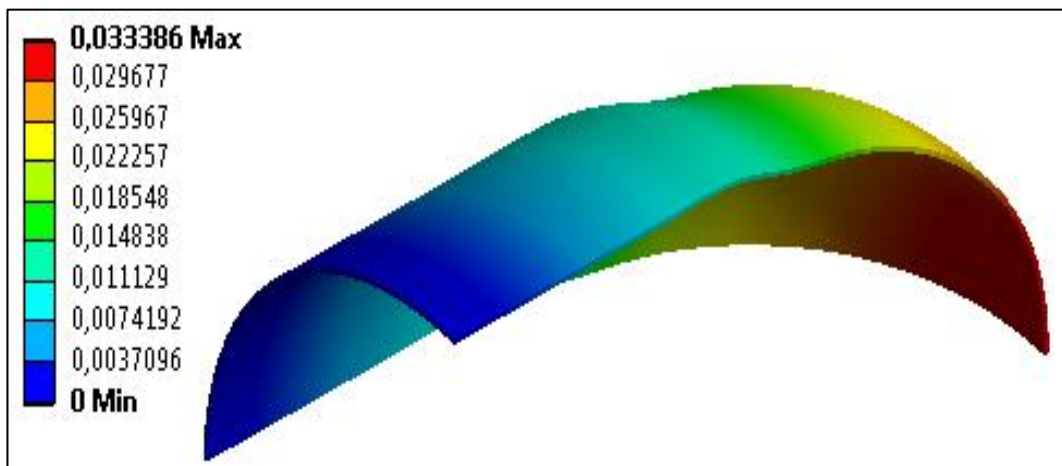


Figura 3-23. Desplazamientos modelo tipo shell.

La localización de las máximas tensiones y desplazamientos coinciden, obviamente, con las obtenidas en el modelo 3D.

3.4. Comparación de resultados

Tras los cálculos y las simulaciones, y plasmando los resultados obtenidos en una tabla comparativa entre los modelos 3D y tipo shell (tabla 3-4):

tabla 3-4. Comparación resultados simulaciones.

	Referencia	Modelo 3D		Modelo Shell	
		Valor	Error	Valor	Error
Von Mises (MPa)	68,442	68,064	0,55%	68,778	0,49%
Desplazamiento (mm)	0,033285	0,032729	1,67%	0,033386	0,30%

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que ambos modelos se podrían ajustar perfectamente a las ecuaciones anteriormente descritas, sin embargo, con el modelo tipo *shell*, además de conseguir mejores resultados que en el 3D, se logra con un menor número de elementos lo que se traduce en un menor esfuerzo computacional a la hora de realizar la simulación.

Con esto, se puede dar por bueno el modelo tipo *shell* y comenzar a modificarlo para alcanzar el objetivo final de este proyecto.

4. Dimensionado

Es momento ahora de comenzar a optimizar el depósito de partida obtenido en el apartado anterior. Factores como volumen interno, tensiones y desplazamientos producidos en función del tipo de cierre seleccionado, espesor necesario y coste de fabricación del depósito son tenidos en cuenta en este capítulo.

Resulta evidente que el modelo anterior es un modelo ideal y que, independientemente de las dimensiones del depósito final, será inevitable que éste posea una válvula de carga/descarga para la entrada y salida del gas natural (en este proyecto no se ha incluido debido a los múltiples estudios existentes) y una brida por la cual poder introducir/reemplazar el carbón activo de su interior.

Así que el esquema del depósito elegido (Figura 4-1) tendrá un plano de simetría central y constará de una parte cilíndrica, una brida y un tipo de cierre.

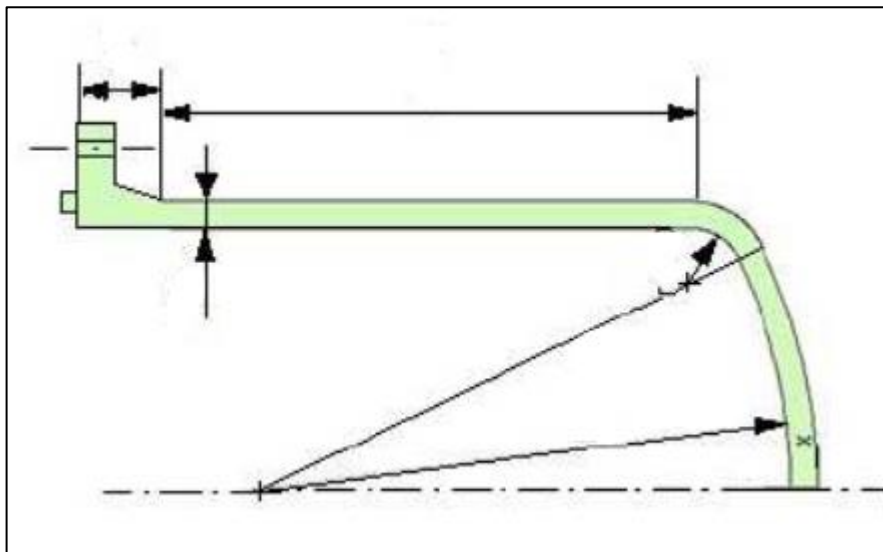


Figura 4-1. Esquema del depósito final.

Las condiciones de diseño establecidas son:

- Vehículo de referencia escogido: para la realización de este proyecto, se selecciona el furgón *IVECO Daily GNC* [12]. Almacena un total de unos 40 kg de gas repartidos en 5 depósitos situados bajo el piso de este y sus dimensiones vienen determinadas por la compañía.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- El depósito a elaborar será de tipo I, es decir, íntegramente fabricado en acero estructural S275. Sus propiedades son: una densidad $\rho = 7800 \text{ Kg/m}^3$ y una tensión máxima de rotura $\sigma_r = 275 \text{ MPa}$. Este valor será minorado utilizando un coeficiente de seguridad igual a 2,5 por lo que la tensión máxima permitida en el depósito será de 110 MPa.
- La presión de almacenamiento óptima es de 62 bar.
- La temperatura de almacenamiento será la ambiente: en este caso se ha tomado 288 K (15 °C).

4.1. Volumen interno necesario

En este capítulo se determinará el volumen interno necesario que deberá tener el depósito para conseguir mantener la misma autonomía que la inicial, es decir, lograr almacenar esos 40 kg de gas natural en los nuevos depósitos de adsorción.

Haciendo uso de la ecuación de la densidad se obtendría ese volumen de que ocuparían los 40 kg de gas necesarios:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \quad \text{(Ecuación 4-1)}$$

Para calcular la densidad, calculada en condiciones de presión de 1 atm y temperatura de 288 K, utilizando la ecuación de los gases ideales (Ecuación 4-2):

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{(Ecuación 4-2)}$$

Y expresándolo en función de la densidad y despejando:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow \rho = \frac{P}{R_{gas} \cdot T} = \frac{10^5 Pa}{\frac{8,3145 \frac{J}{k \cdot mol} \cdot 288 K}{0,01854 \frac{kg}{mol}}} = 0,7742 kg/m^3$$

*Nota: donde la masa molecular empleada es la del gas natural [13].

Finalmente, sustituyendo los valores obtenidos de masa y densidad en la Ecuación 4-1 y operando, se conoce el volumen de gas natural necesario:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{40 kg}{0,7742 kg/m^3} = 51,66 Nm^3$$

Para saber cuánto gas es capaz de ser adsorbido, se aplica la relación obtenida anteriormente (Figura 2-19) de volumen de metano adsorbido por volumen de adsorbente disponible en función de la presión a la que se almacene. Como el carbón activo es fácilmente conformable con cualquier diseño, se supondrá que la totalidad del interior del depósito final estará ocupado por material adsorbente:

$$V_{adsorbente} = V_{depósito necesario} = \frac{51,66 Nm^3 de Gas Natural}{145 \frac{Nm^3 de Gas Natural}{m^3 de adsorbente}} = 0,35 m^3$$

Por lo tanto, se necesitarán 350 litros a repartir entre 5 depósitos, es decir 70 litros en cada depósito.

4.2. Elección del tipo de cierre

Una vez conocido el volumen interno necesario, es hora de simular los diferentes tipos de cierres y analizar las tensiones y desplazamientos producidos en ellos.

En este apartado se compararán los resultados de la simulación tanto en tensiones como en desplazamientos de los cierres de tipo plano, semiesférico,

elipsoidal y toriesférico. En el caso del semiesférico, aunque ya haya sido presentado en capítulos anteriores, esta vez se analizará con la inclusión de la correspondiente brida, observándose ligeros cambios en el comportamiento de este.

Tanto las dimensiones de la mitad de la parte cilíndrica (180 mm) como del diámetro del cilindro (320 mm), así como el espesor del depósito (2,5 mm constante en toda la geometría) se consideran iguales para todos los casos a fin de poder comparar todos los resultados entre sí y determinar el que mejor se adecúa.

a) Cierre plano

En este caso, existe una gran diferencia entre las tensiones soportadas por la parte cilíndrica y el cierre. El cambio brusco de geometría produce una zona de concentración de tensiones elevadísima, llegando a unos 3050 MPa (Figura 4-2 , Figura 4-3). Es el peor caso posible de todos ellos, ya que las tensiones más altas se concentran íntegramente en el cierre:

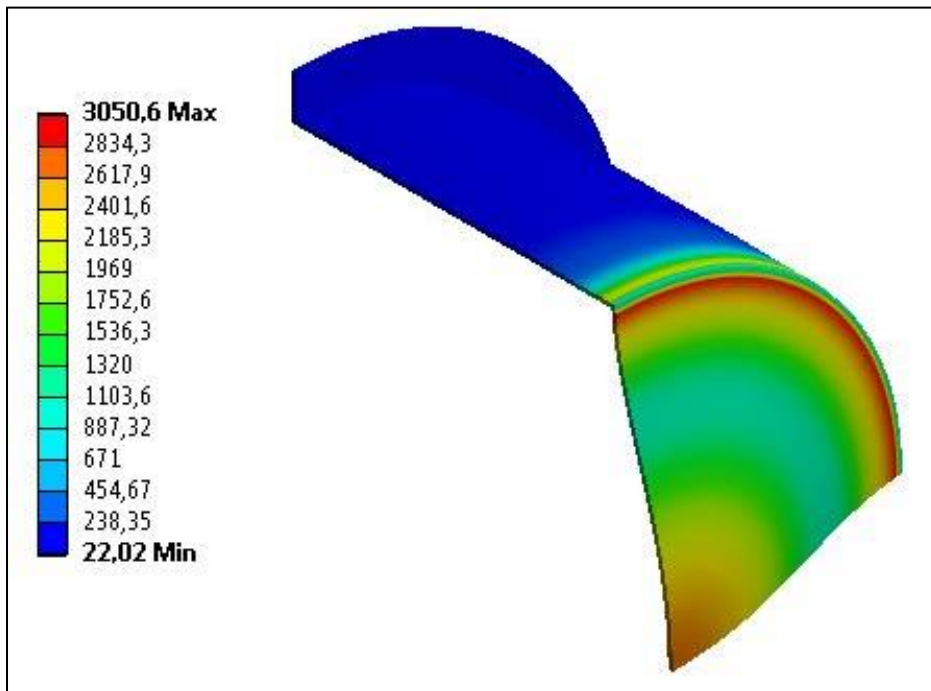


Figura 4-2. Tensiones cierre plano vista isométrica.

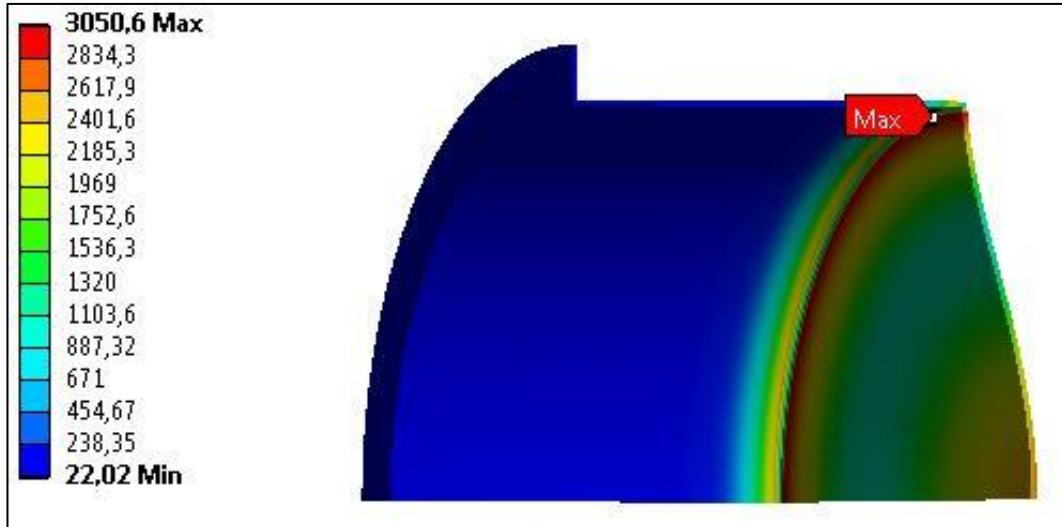


Figura 4-3. Tensiones cierre plano parte interior.

Referente a los desplazamientos (Figura 4-4 , Figura 4-5), representando simultáneamente tanto la deformada como la indeformada (silueta línea negra), se observa que el máximo, en dirección longitudinal, son 48,473 mm.

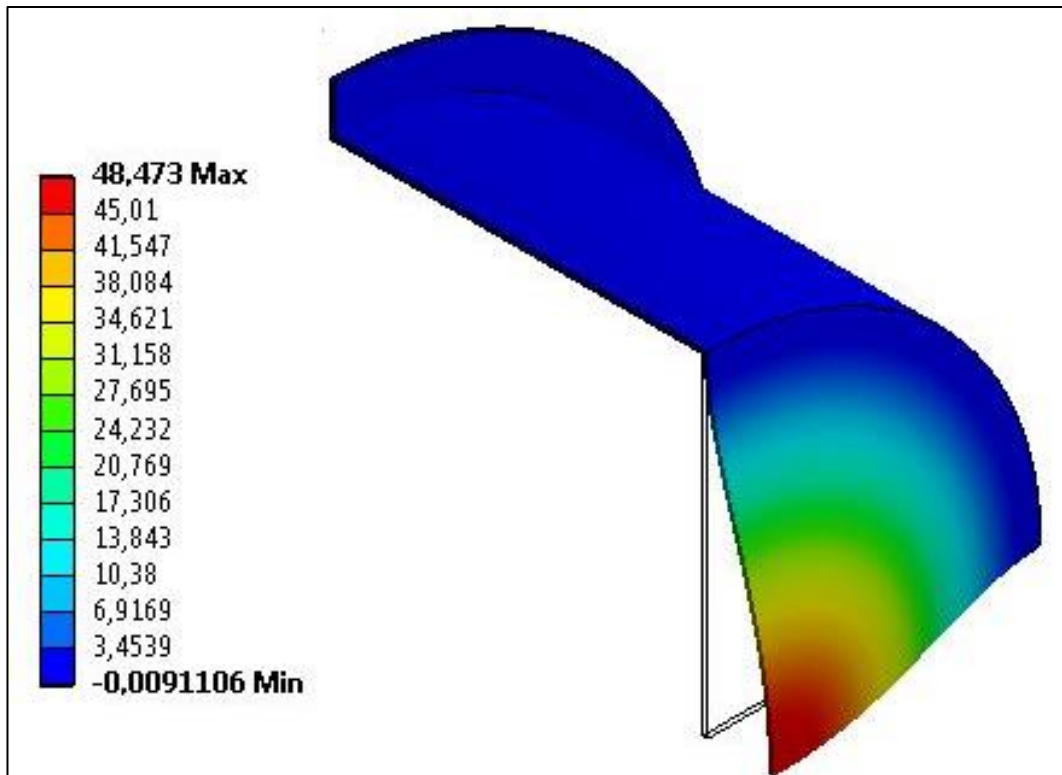


Figura 4-4. Desplazamientos longitudinales vista isométrica.

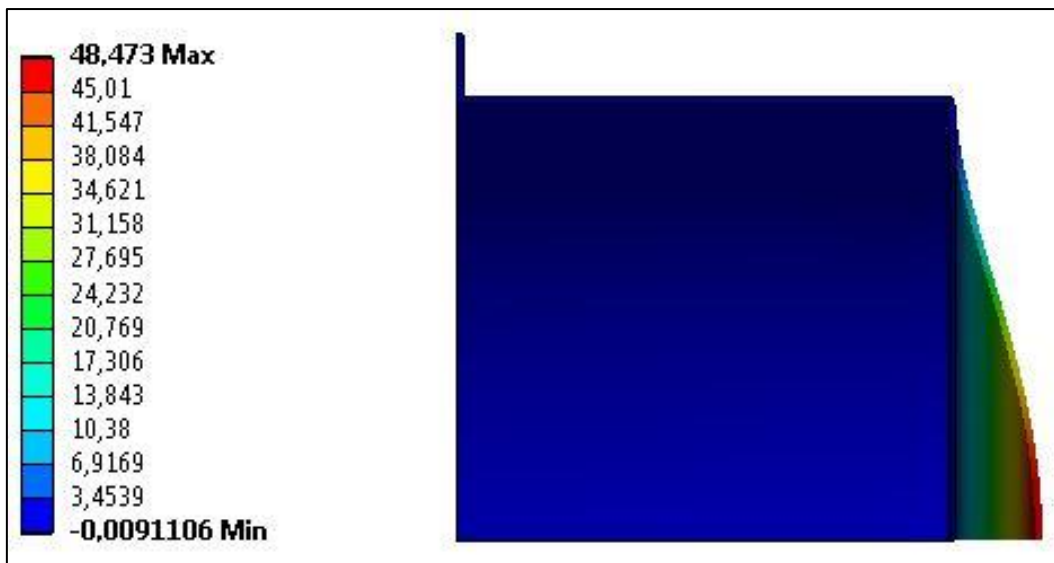


Figura 4-5. Desplazamientos longitudinales vista perfil.

La simulación confirma, lo que a priori era lo esperado, el rechazo de este cierre para la aplicación de este proyecto.

b) Cierre semiesférico

En este caso simulado, la inclusión de la brida genera resultados ligeramente diferentes a los obtenidos en el apartado de validación.

Observando las tensiones generadas (Figura 4-6, Figura 4-7), la máxima, de valor 69 MPa, se produce en la transición cilindro-brida lo que podría ocasionar problemas en la junta de ambas mitades del depósito. Destacar también que, en la transición cilindro-cierre, la concentración de la tensión alcanzada podría provocar problemas en el cordón de soldadura (si existiera).

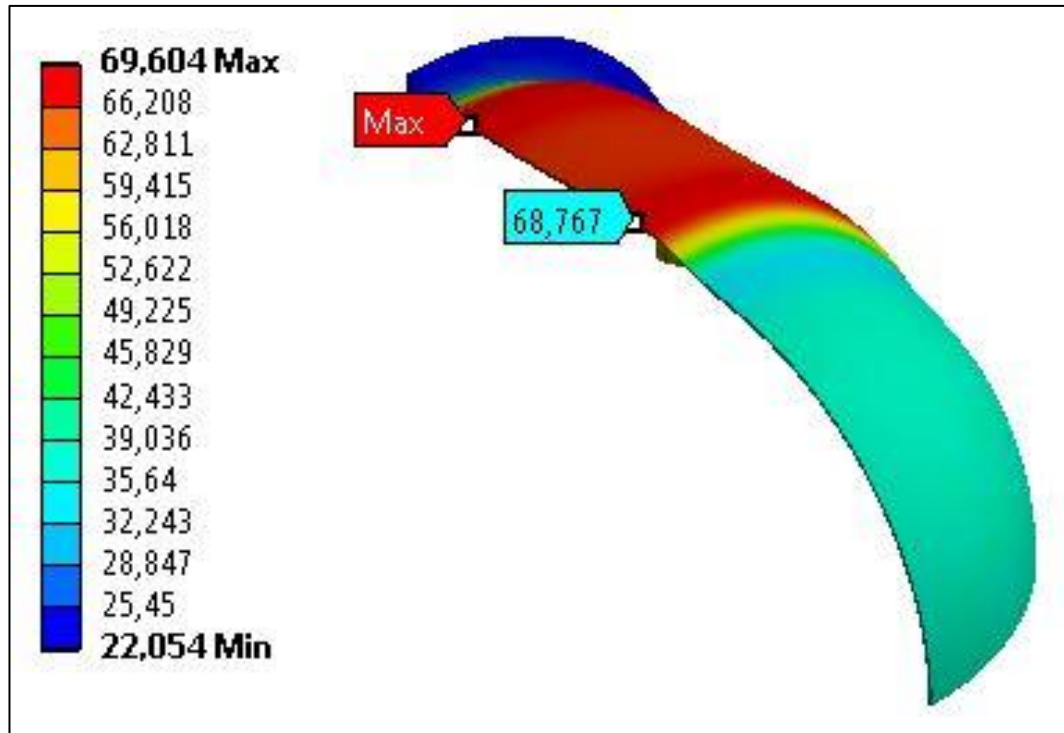


Figura 4-6. Distribución de tensiones cierre semiesférico vista isométrica.

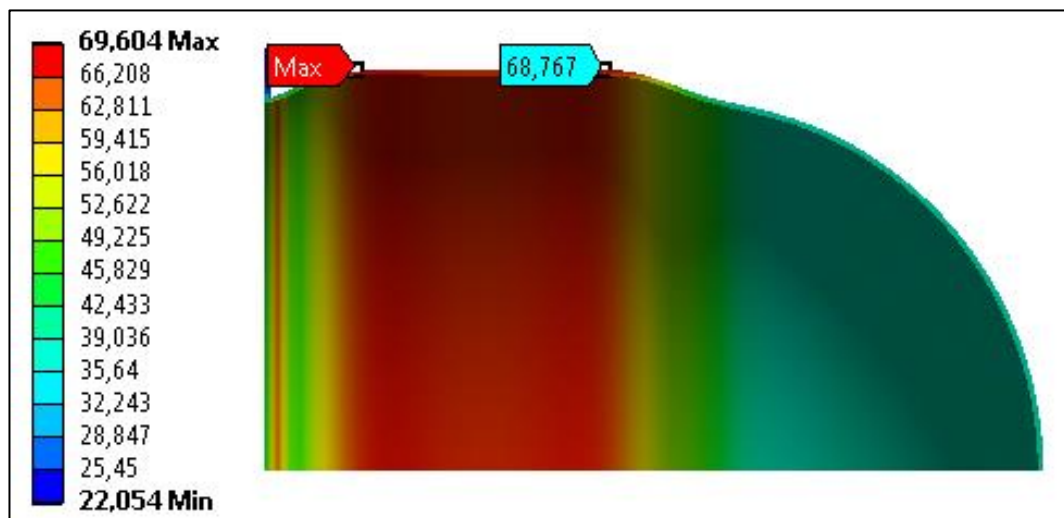


Figura 4-7. Distribución de tensiones cierre semiesférico vista perfil.

En cuanto a los desplazamientos longitudinales (Figura 4-8 , Figura 4-9):

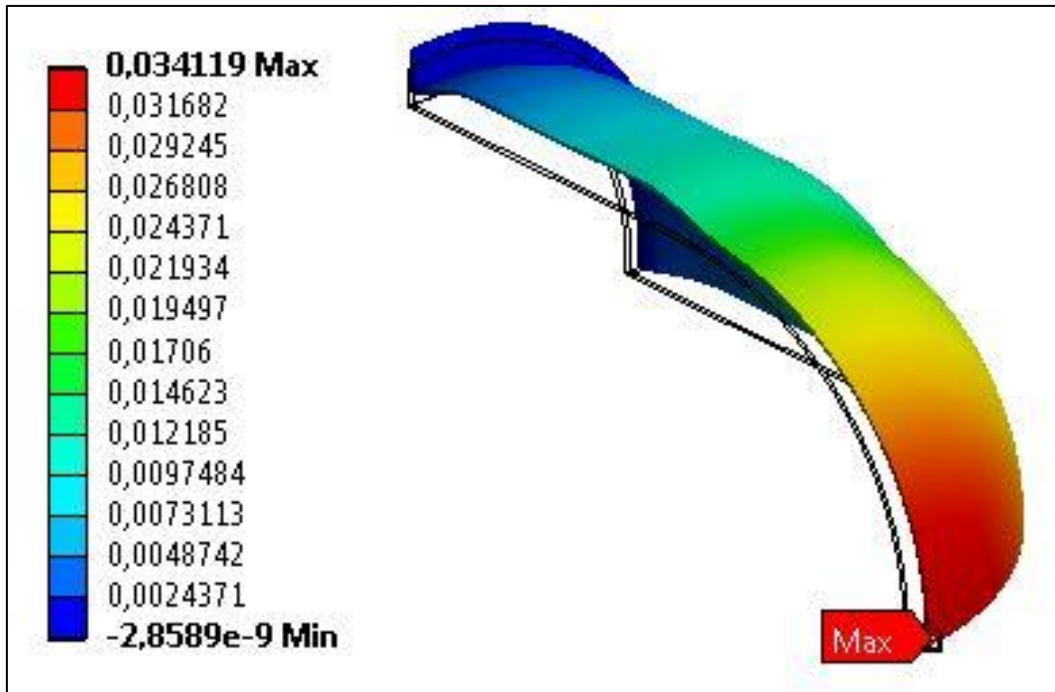


Figura 4-8. Distribución de desplazamientos del cierre semiesférico vista isométrica.

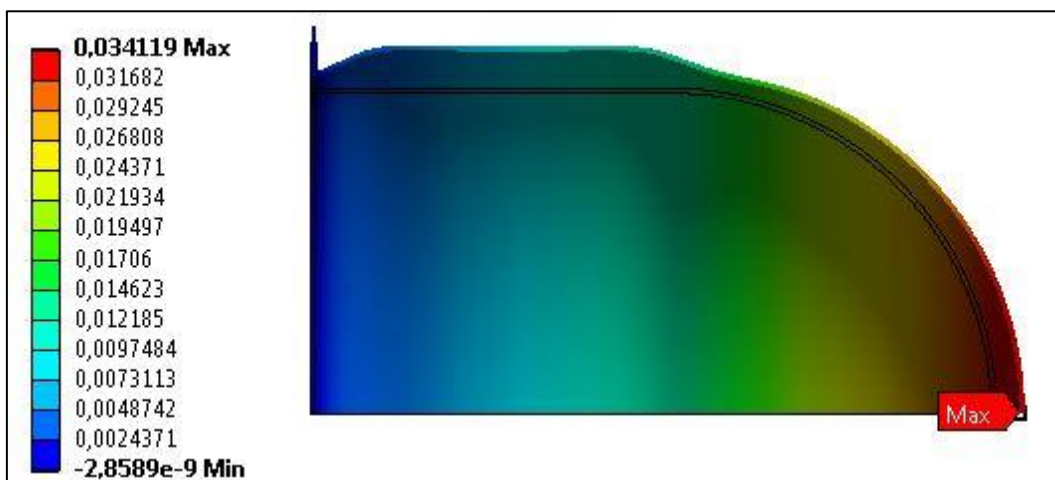
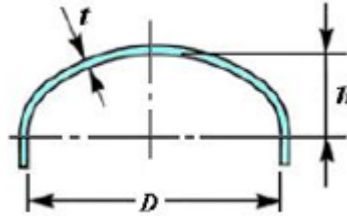


Figura 4-9. Distribución de desplazamientos cierre semiesférico vista perfil.

El máximo valor obtenido en dirección longitudinal se produce en su extremo y de valor 0,034119 mm. Los desplazamientos radiales se han despreciado en todos los casos por presentar valores incluso más pequeños que los longitudinales.

c) Cierre elíptico

Cambiando el cierre semiesférico por uno, en este caso, elíptico, de acuerdo con los valores estándar de fabricación, [14] se obtiene la siguiente geometría:



Con $D_i = 320$ mm y $h = D_i/4 = 80$ mm, y representando las tensiones obtenidas (Figura 4-10, Figura 4-11):

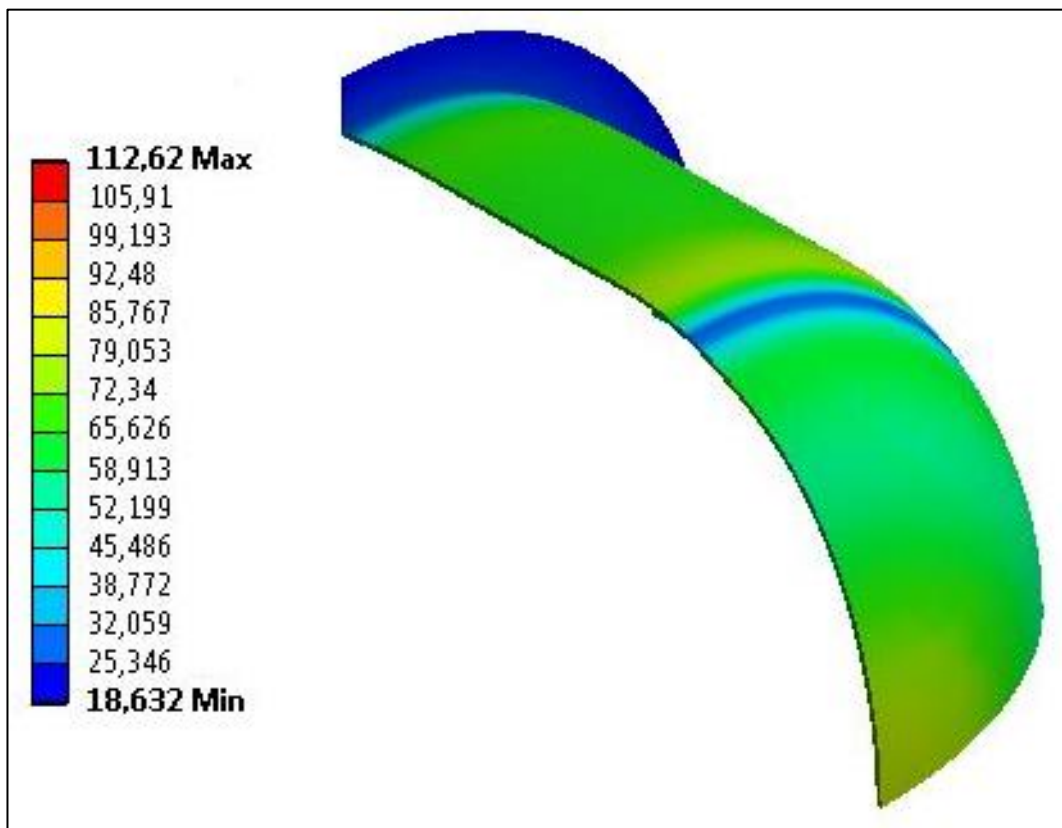


Figura 4-10. Tensiones cierre elíptico parte exterior.

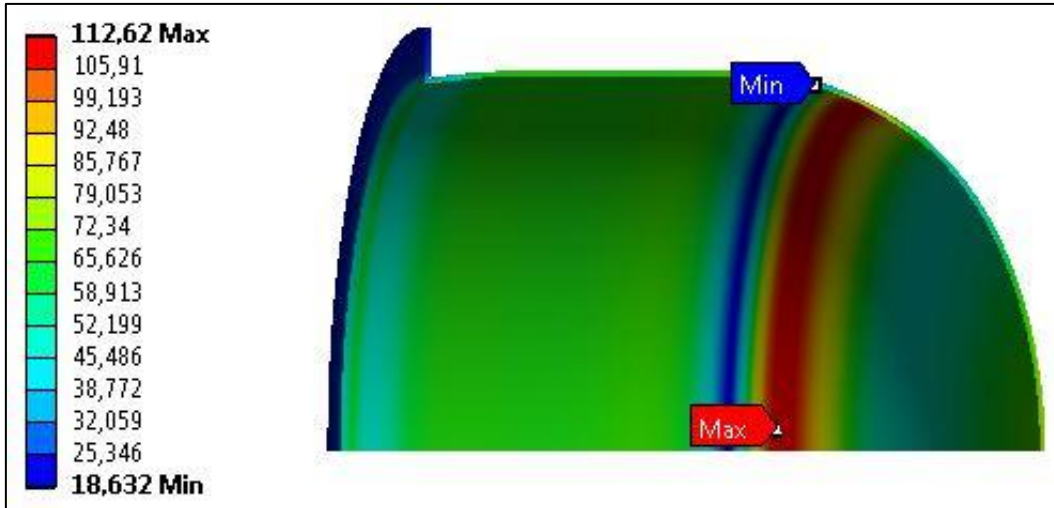


Figura 4-11. Tensiones cierre elíptico parte interior.

La tensión máxima se produce en la cara interna del depósito, poco después de la zona de transición entre la zona cilíndrica y la elíptica, alcanzándose casi los 113 MPa. Destacar que, en este caso, la tensión mínima se encuentra justamente en la transición cilindro-brida, lo que, claramente, es una ventaja en el supuesto de que en la unión hubiera cordón de soldadura.

Respecto a los desplazamientos longitudinales, mostrando tanto la deformada como la indeformada simultáneamente (Figura 4-12, Figura 4-13):

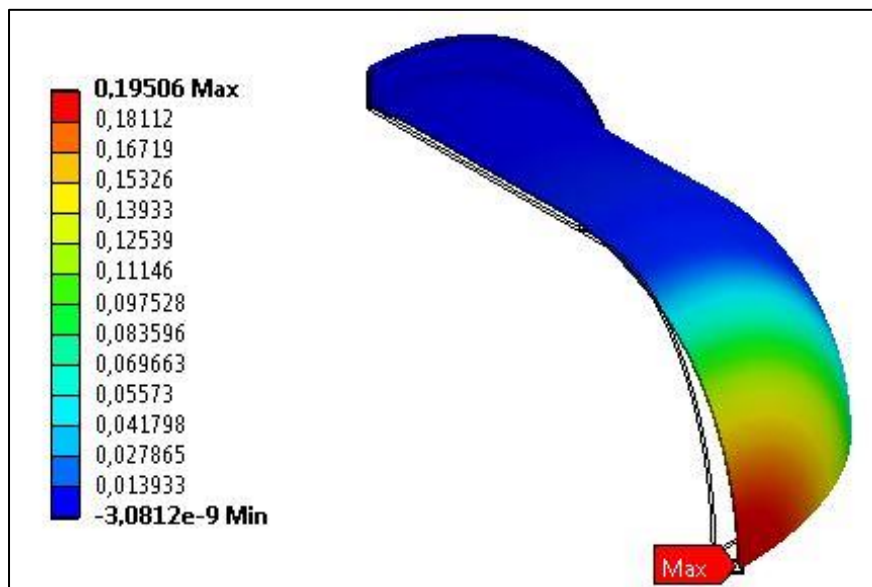


Figura 4-12. Desplazamientos cierre elíptico vista isométrica.

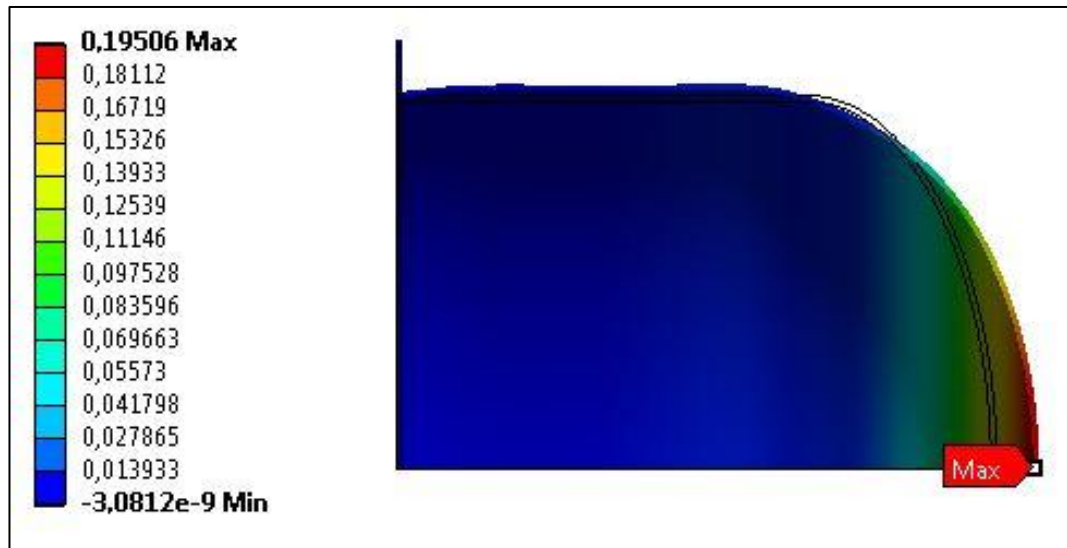
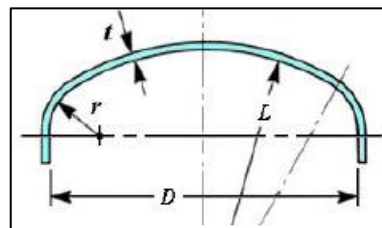


Figura 4-13.Desplazamientos cierre elíptico vista perfil.

Al igual que en el cierre plano y semiesférico, el máximo desplazamiento se encuentra en el eje de simetría y presenta un valor de 0,19506 mm.

d) Cierre toriesférico:

Al igual que en el anterior cierre, las dimensiones estándar del cierre (Figura 2-28) vienen determinadas por el fabricante, siendo, en este caso:



Con $R = D_i = 320 \text{ mm}$; y $r = 0,1 D_i = 32 \text{ mm}$

Mostrando las tensiones obtenidas tras la simulación (Figura 4-14 , Figura 4-15):

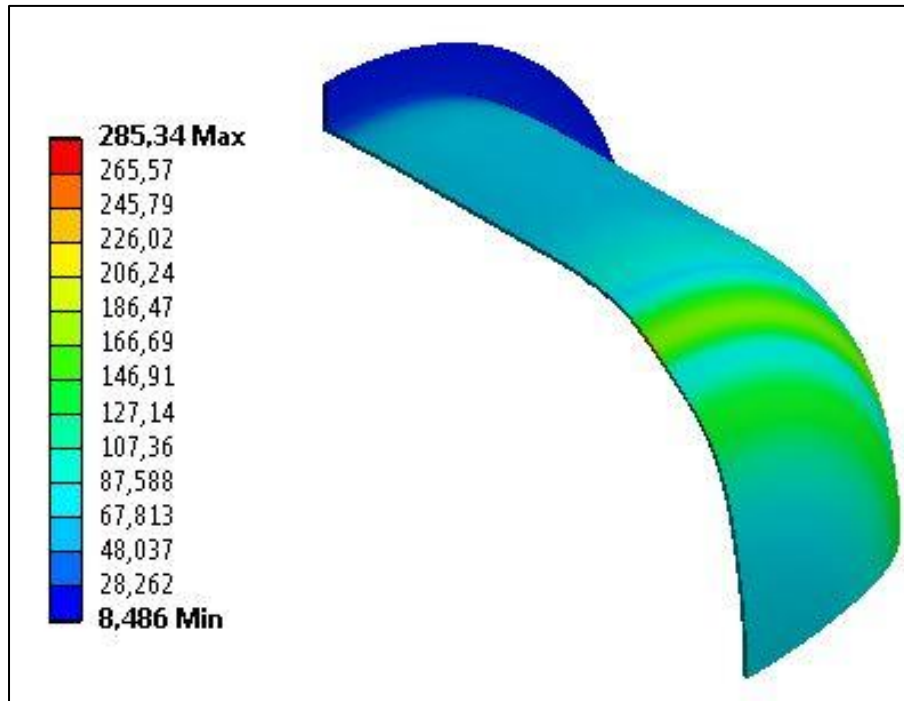


Figura 4-14. Tensiones cierre toriesférico parte exterior.

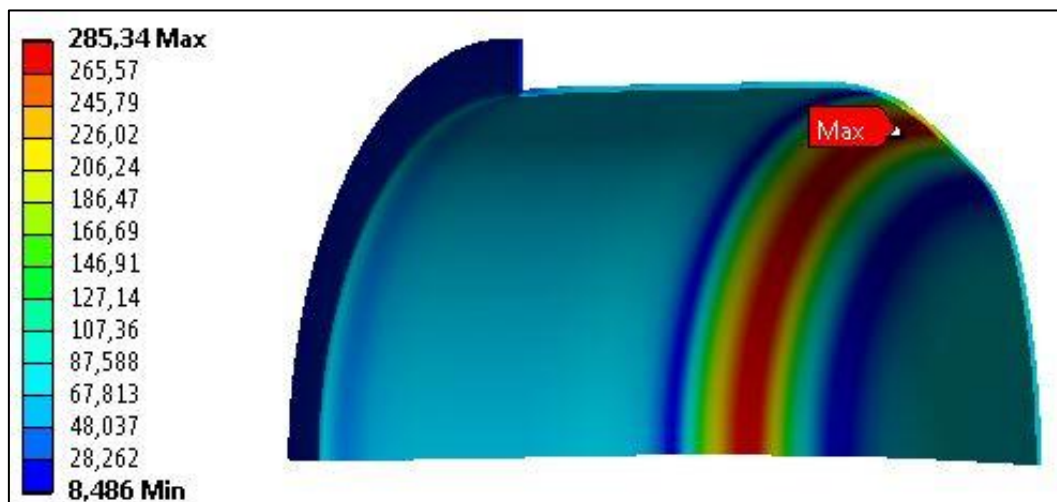


Figura 4-15. Tensiones cierre toriesférico parte interior.

Al igual que ocurre en el cierre elíptico, la máxima tensión, cuyo valor es 285,34 MPa, se produce en la cara interior del depósito y no se localiza en la zona de transición cilindro-cierre como en los casos plano y semiesférico, sino que se produce en el cambio de curvatura entre los dos arcos de circunferencia.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Los desplazamientos longitudinales provocados en esta geometría son (Figura 4-16, Figura 4-17):

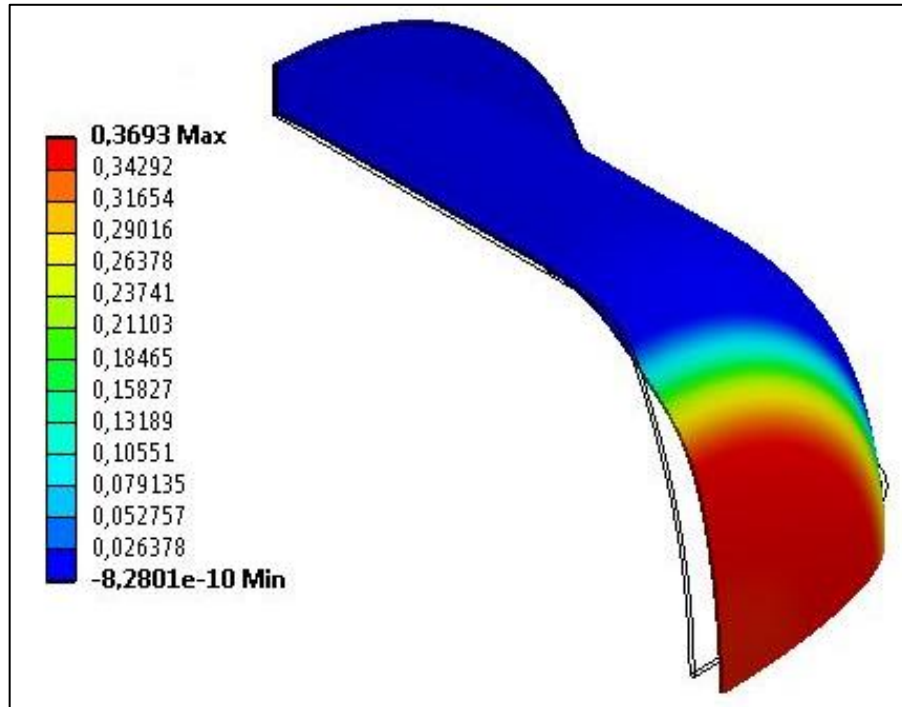


Figura 4-16. Desplazamientos cierre toriesférico vista isométrica.

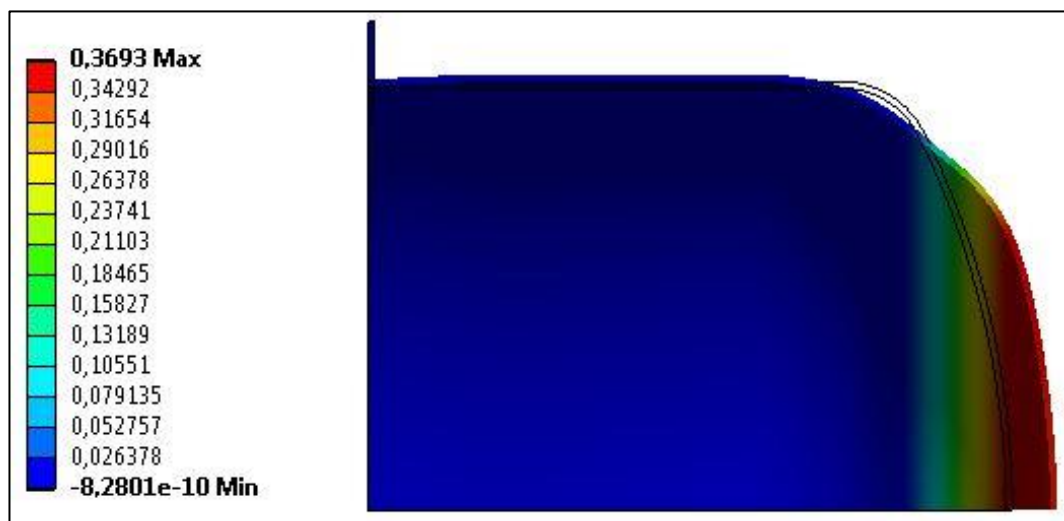


Figura 4-17. Desplazamientos cierre toriesférico vista perfil.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

El máximo valor obtenido en la dirección longitudinal es 0,3693 mm.

Recogiendo los datos simulados de los diferentes tipos de cierres empleados en la tabla 4-1:

tabla 4-1. Comparación resultados tipos de cierre simulados.

	Tensión (MPa).	Localización	Desplazamiento (mm)
<i>plano</i>	3050,6	Transición cilindro-cierre	48,473
<i>semiesférico</i>	69,604	transición cilindro-brida	0,03372
<i>elíptico</i>	112,62	Posterior transición cilindro-cierre	0,19477
<i>toriesférico</i>	285,34	cambio de curvatura cierre	0,369

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- El cierre plano es el que presenta mayores tensiones y desplazamientos, descartándose completamente para esta aplicación.
- El cierre semiesférico ostenta las mejores prestaciones, sin embargo, presenta desventajas como un menor factor de forma, su geometría es difícil de construir además de caro y la localización de las máximas tensiones en zonas críticas de transición. Por lo que este tipo de cierres se limitan exclusivamente a situaciones especiales en las que los depósitos son de grandes dimensiones.
- Por último, comparando el cierre elíptico con el toriesférico ambos tienen la máxima tensión fuera de la zona crítica de transición entre el cuerpo y el cierre. Además, el cierre elíptico posee menores tensiones y desplazamientos menores para la misma relación L/D empleada. Por lo que este último será el elegido para esta aplicación.

4.3. Relación longitud/diámetro óptima

En este último apartado, se realiza un estudio de las dimensiones óptimas del depósito con el objetivo de conseguir un menor coste de fabricación, o lo que es lo mismo, reducir la cantidad de material empleada al máximo posible. Todo ello sujeto a unos criterios de funcionalidad (cabida en el vehículo) y de resistencia (tensión máxima ocasionada por debajo de límite establecido)

Como se ha mencionado antes en las condiciones de diseño, el vehículo seleccionado es el furgón *IVECO Daily GNC*. Sus dimensiones (Figura 4-18) están establecidas por el fabricante, así como la localización de los depósitos de gas natural comprimido (bajo el piso del propio vehículo).

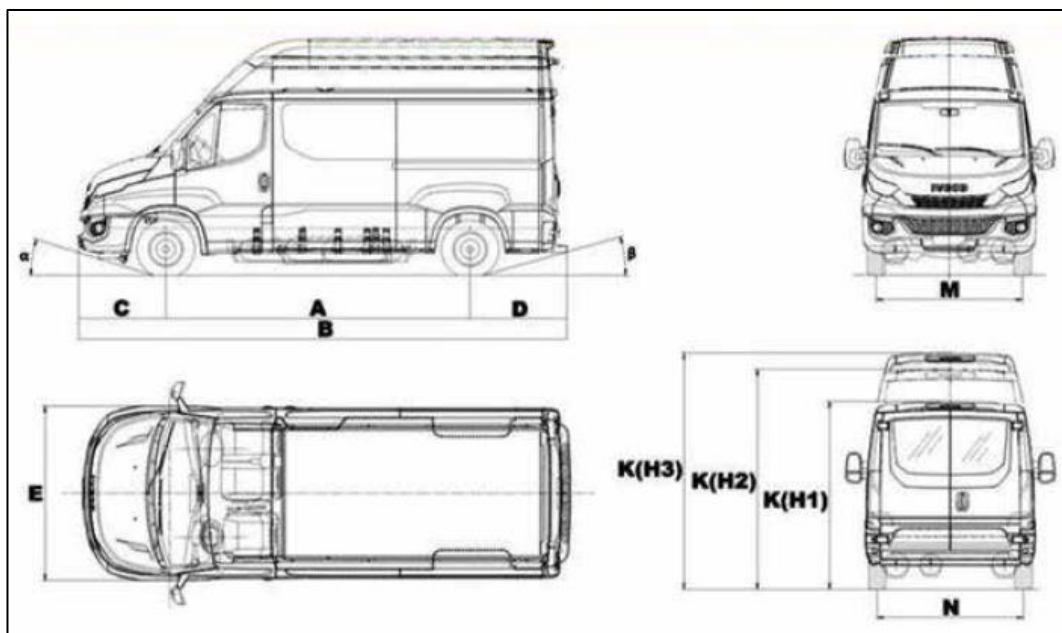


Figura 4-18. Dimensiones furgón IVECO Daily GNC.

Los nuevos depósitos irán instalados en la misma localización de los antiguos de gas comprimido, bajo el piso del vehículo. Por lo tanto, las dimensiones máximas a tener en cuenta para el dimensionamiento de estos serán: la distancia entre ejes ($A=3520$ mm) y la trocha (anchura) trasera ($N=1704$ mm).

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Este modelo lleva instalados neumáticos del tipo 225/65 R16. El primer valor indica la anchura de la rueda (225 mm) mientras que el segundo número (65) proporciona la relación existente entre el flanco (espesor del neumático) y el ancho de la rueda ($225 \cdot 65 / 100 = 146.25$ mm). R significa la rueda es de tipo radial y que se monta sobre llantas de 16 pulgadas de diámetro (1 pul=2,54 cm), es decir, 40,64 cm. Por lo tanto, la longitud máxima permitida de cada depósito coincidirá con la distancia entre los ejes (A) minorada por el radio de la rueda para que éstas puedan maniobrar (el desplazamiento longitudinal se considerará despreciable):

$$L_{m\acute{a}x} = A - \text{radio de la rueda}$$

Donde el radio de la rueda es igual al radio de la llanta más el espesor del neumático: $40,64 \text{ cm} / 2 + 14,625 \text{ cm} = 34,945 \text{ cm}$. Todo ello hace una longitud máxima admisible de 3170,55 mm.

Para la dimensión del diámetro se ha de cumplir la condición de que la trocha trasera del furgón (N) minorada por el ancho de las ruedas traseras, sea mayor o igual que la suma total del diámetro de todos los depósitos con sus correspondientes espesores (el desplazamiento radial se considerará despreciable):

$$\text{Trocha trasera} - \text{ancho neumático} \geq \sum_{i=1}^5 D_i + 2 \cdot e_i$$

Al ser los cinco depósitos idénticos:

$$\text{Trocha trasera} - \text{ancho neumático} \geq 5 \cdot (D + 2 \cdot e)$$

Una vez conocidas las condiciones que han de reunir los depósitos (volumen interno de 70 litros, resistencia máxima permitida 110 MPa y cabida en el vehículo), se procede a determinar cuál de todas las combinaciones posibles de diámetro y longitud de la parte cilíndrica es la que reúne un menor coste de fabricación.

Para ello, se implementan en ANSYS diferentes puntos de diseño en los que se varía el radio interno desde un valor mínimo de 80 mm hasta un máximo de 170 mm en intervalos de 10 mm. El semieje menor de la elipse es un 25% del

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

diámetro y la longitud de la parte cilíndrica se ajusta para que el volumen interno sean 70 litros. Esto hace un total de 10 depósitos analizados. Sin embargo, el espesor mínimo necesario (diferente para cada relación longitud/diámetro) para aguantar los 110 MPa todavía se desconoce.

En primer lugar, con todos los depósitos a analizar teniendo un espesor inicial de 2,5 mm y una presión interna de 62 bar, se observan las tensiones y desplazamientos producidas en cada uno de ellos:

tabla 4-2. Resultados simulación diferentes relaciones L/D con espesor constante.

Nº	Diámetro Cilindro (mm)	Longitud Parte Cilíndrica (mm)	Semieje Menor Elipse (mm)	Desplazamiento Máximo (mm)	Tensión Máxima (mm)	Relación L/D
1	160	3428,18	40	0,557	278,973	21,426
2	180	2690,82	45	0,580	314,891	14,949
3	200	2161,50	50	0,618	351,939	10,808
4	220	1768,12	55	0,670	392,676	8,037
5	240	1467,34	60	0,734	431,311	6,114
6	260	1231,78	65	0,808	470,200	4,738
7	280	1043,48	70	0,891	507,779	3,727
8	300	890,30	75	0,984	545,529	2,968
9	320	763,72	80	1,085	581,708	2,387
10	340	657,66	85	1,197	617,468	1,934

Nota: el desplazamiento máximo obtenido es el de un extremo del cilindro, lógicamente, el total será el doble.

La relación lineal existente entre el espesor y la tensión producida en él, permite obtener ese espesor mínimo necesario para soportar los 110 MPa establecidos:

$$\sigma_{\text{producida}} \cdot e_{\text{del depósito}} = \sigma_{\text{máxima permitida}} \cdot e_{\text{requerido}}$$

Representando ese espesor mínimo requerido frente a la tensión que ha de soportar (Figura 4-19):

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

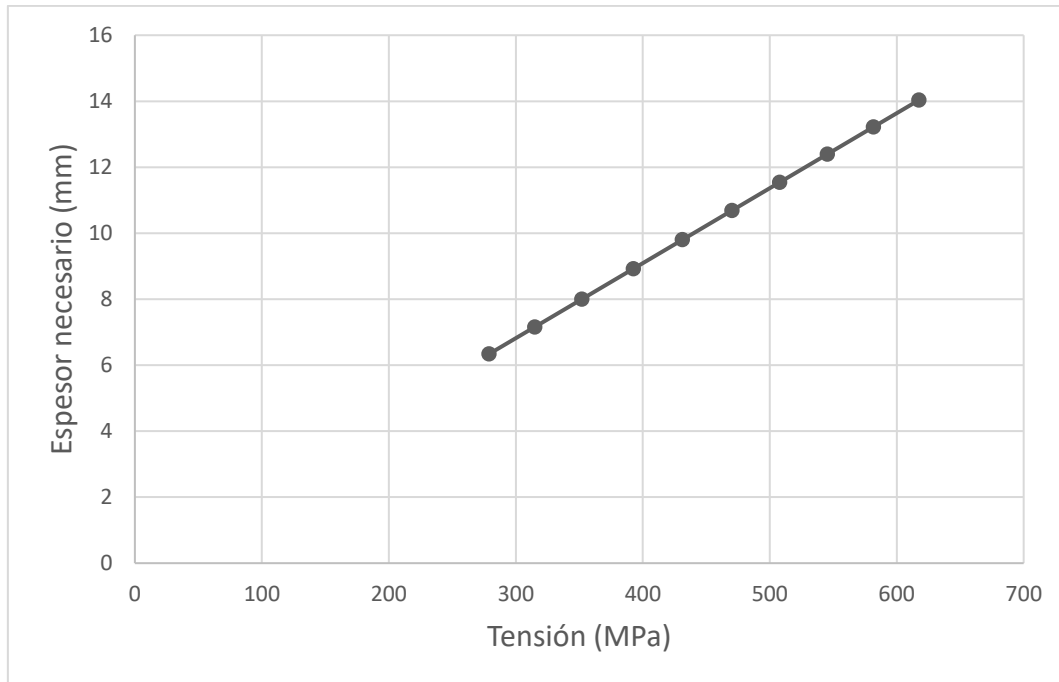


Figura 4-19. Espesor requerido en función de la tensión ocasionada.

Despejando el espesor requerido de la expresión anterior y simulando en ANSYS cada depósito con su relación longitud-diámetro (tabla 4-3):

tabla 4-3. Espesor mínimo requerido en función de L/D

Diámetro cilindro (mm)	L/D	Espesor requerido (mm)	Tensión producida (MPa)
160	21,42625	6,340	110,12
180	14,94889	7,156	110,51
200	10,808	7,998	109,96
220	8,036909	8,920	108,72
240	6,113917	9,800	108,14
260	4,737615	10,600	108,23
280	3,726714	11,600	106,91
300	2,967667	12,390	107,13
320	2,386625	13,200	107,16
340	1,934294	14,000	107,31

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Representando los resultados en la Figura 4-20 se observa como ese espesor no disminuye de manera lineal al aumentar la relación L/D:

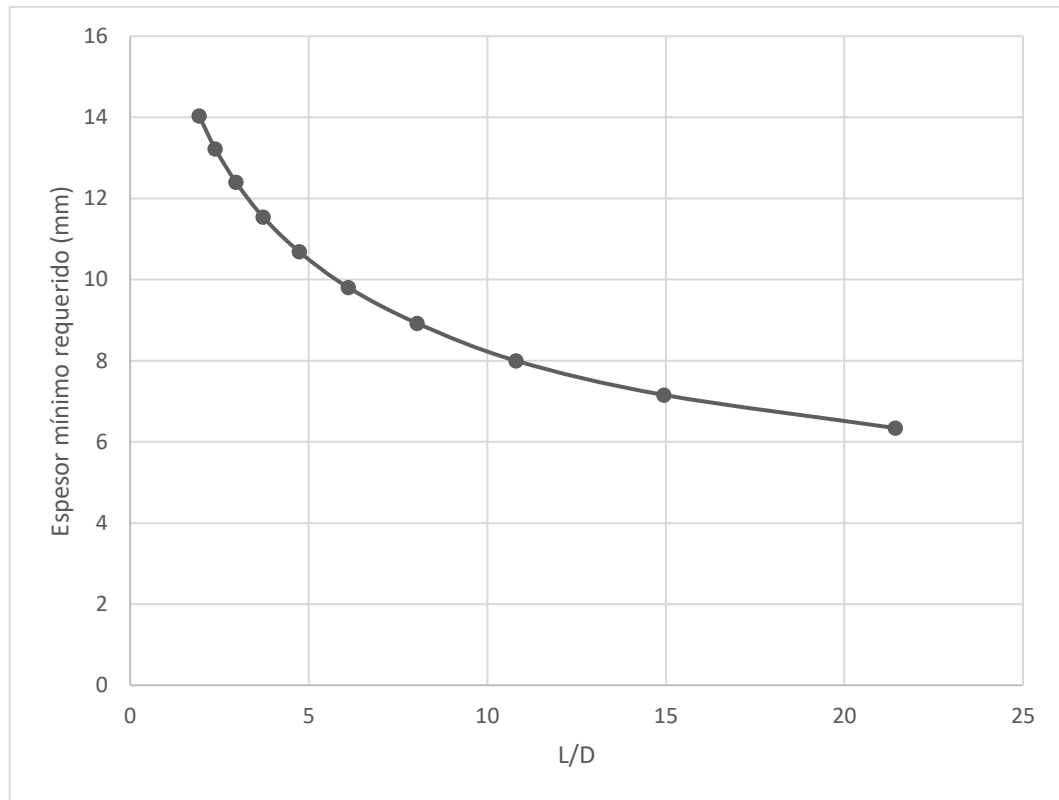


Figura 4-20.. Espesor mínimo requerido en función de la relación L/D.

Una vez determinado el espesor mínimo requerido y comprobado que, efectivamente, la tensión soportada por cada depósito es alrededor de unos 110 MPa, se procede a comprobar la masa que tendría cada depósito, así como su cabida en el vehículo (con sus dimensiones y espesor establecido) y los desplazamientos máximos producidos (tabla 4-4):

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

tabla 4-4. Dimensiones finales teóricas para cada relación L/D.

Diámetro o Cilindro (mm)	Espesor Requerido (mm)	Masa Cilindro (kg)	Desplazamiento o Máximo (mm)	Longitud Total depósito (mm)	Anchura Total de Los depósitos (mm)
160	6,34	11,175	0,2118	3520,88	863,4
180	7,156	11,331	0,1936	2795,112	971,56
200	7,998	11,543	0,1827	2277,596	1079,98
220	8,92	11,875	0,1753	1895,96	1189,2
240	9,8	12,162	0,1727	1606,94	1298
260	10,6	12,376	0,1743	1382,98	1406
280	11,6	12,846	0,1738	1206,68	1516
300	12,39	13,110	0,1787	1065,08	1623,9
320	13,2	13,436	0,1841	950,12	1732
340	14	13,793	0,1904	855,66	1840

Nota: al igual que en la tabla 4-2, el desplazamiento máximo obtenido es el de un extremo del cilindro y la masa es la correspondiente a un octavo de cilindro.

Una vez simulados todos ellos y representando el desplazamiento en función de la relación L/D, se observa (Figura 4-21) que se produce un mínimo en torno a una relación de 5. Aunque el desplazamiento de todos ellos no difiere demasiado.

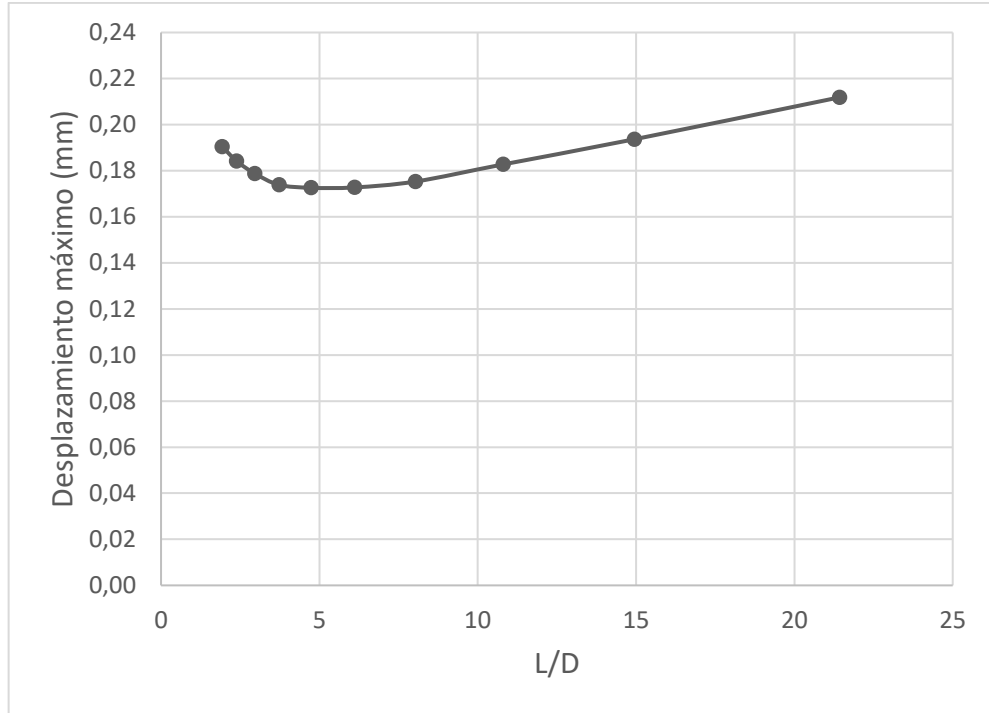


Figura 4-21. Desplazamiento máximo en función de la relación L/D.

En cuanto al factor determinante, en este caso la masa, disminuye de manera no lineal también (Figura 4-22), por lo que, a mayor relación, menor masa de depósito. Evidentemente la relación final propuesta será aquella que haga que la masa sea mínima y se pueda instalar en el habitáculo del vehículo.

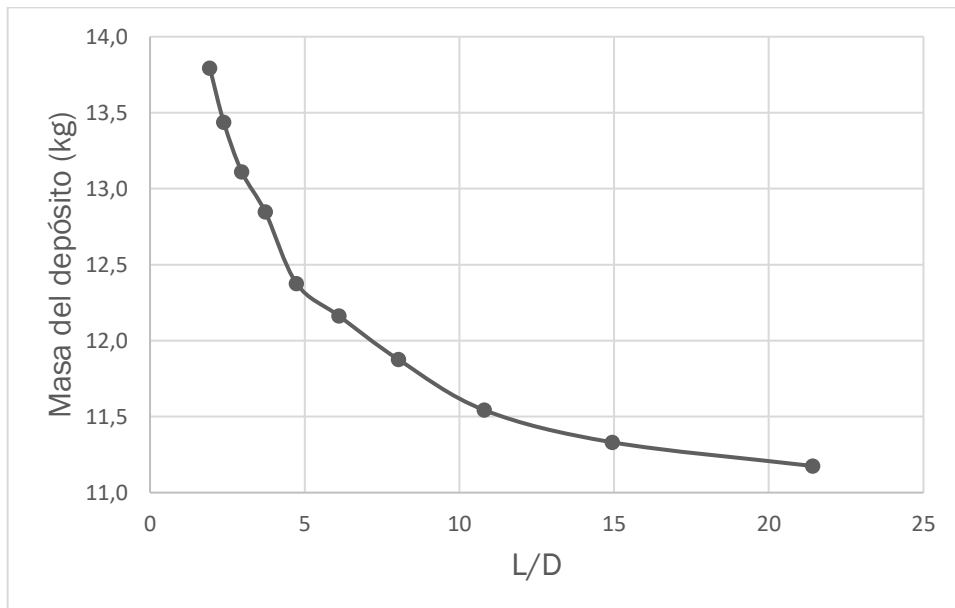


Figura 4-22. Masa de octavo de depósito en función de la relación L/D.

A la vista de los resultados obtenidos, el depósito con mayor relación L/D sería el idóneo puesto que presenta la menor masa, sin embargo, su longitud son 3520,88 mm, excediendo la dimensión máxima permitida (3170 mm). Por lo que queda descartado para esta aplicación.

El siguiente depósito con menor masa ya cumple la condición máxima de longitud (2795,112 mm < 3170 mm). Ahora solo quedaría comprobar que la condición en cuanto al diámetro se cumple:

$$1704 - 225 \text{ mm} \geq 5 \cdot (180 \text{ mm} + 2 \cdot 7,156 \text{ mm}) = 971,56 \text{ mm}$$

Se verifica, por lo tanto, el depósito final elegido tendría una longitud total de 2795,112 mm, un diámetro interno de 180 mm y un espesor de 7,156. Sin embargo, como ese espesor no está tabulado por los fabricantes, se elegirá el espesor superior, es decir, 7,5 mm. Rehaciendo los anteriores cálculos con el nuevo espesor:

tabla 4-5. Resultado depósito espesor 8 mm.

Diámetro Cilindro (mm)	Espesor (mm)	Tensión Máxima (MPa)	Desplazamiento (mm)	Masa (kg)	Longitud Total (mm)	Anchura Total Cilindros (mm)
180	7,5	106,08	0,18353	11,876	2795,8	975

La longitud máxima no excede el máximo permitido, al igual que se cumple la condición de que anchura total de los depósitos colocados en paralelo es menor que la anchura máxima permitida. Esto daría un total de 95 kg (resultado de multiplicar la masa de un octavo de depósito simulado).

No obstante, la no inclusión de los taladros en la brida simulada se traduce en una reproducción no exacta de lo que sería el depósito final (los taladros realizados provocarían otro tipo de respuesta en la misma). Debido a eso, se supondrá el triple de espesor en la brida que en el resto del depósito con el fin de garantizar su resistencia.

La masa final del depósito varía ligeramente, sólo hay que añadir lo correspondiente a una corona circular de espesor 15 mm y multiplicarlo por dos por la condición de simetría:

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

$$\begin{aligned} \text{Masa}_{\text{final}} &= \text{Masa}_{\text{actual}} + 2 \cdot [\pi \cdot (Re^2 - Ri^2) \cdot e \cdot \rho] = \\ 95 \text{ kg} + 2 \cdot \{\pi \cdot [(0,23 \text{ m})^2 - (0,18 \text{ m})^2]\} \cdot 0,015 \text{ m} \cdot \frac{7800 \text{ kg}}{\text{m}^3} &= 110 \text{ kg} \end{aligned}$$

Nota: la altura de la brida empleada son 25 mm.

Por último, para finalizar el diseño completo, se realiza un cálculo rápido de los pernos a utilizar en la brida para la unión de ambas partes simétricas del depósito. La presión ejercida sobre la brida es de unos 24 MPa, que habrá que multiplicar por dos por la condición de simetría empleada, y la superficie en la que se aplica es una correa circular:

$$\begin{aligned} F &= P \cdot S = P \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (De^2 - Di^2) = \\ &= 48 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [(0,23 \text{ m})^2 - (0,18 \text{ m})^2] = 772,7 \text{ kN} \end{aligned}$$

Se dispondrá de un total de 20 pernos equiespaciados (cuya masa no se tendrá en cuenta) y de diámetro 12 mm. Para determinar la resistencia mínima necesaria que ha de tener cada uno, asumiendo la hipótesis de que la fuerza la resiste íntegramente el perno, se recurre a ecuaciones de resistencia de materiales [15]:

$$S_p = \frac{F_i}{A_t} = \frac{772,7 \cdot 10^3 \text{ N}}{20 \text{ pernos}} = 415,877 \text{ MPa}$$

Donde:

S_p = resistencia límite

F_i = fuerza soportada por el perno

A_t = área transversal del esfuerzo de tensión. En este caso, para un diámetro nominal de 12 mm, acudiendo a tablas, le corresponde un valor de 92,9 mm².

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

Empleando un factor de seguridad de 2,5, al igual que en el cálculo del depósito, da lugar a una fuerza final de 1039,69 MPa. Con ayuda de las tablas y la nomenclatura de la norma [15], se concluye que el perno ha de ser de clase 10.9 y el material de estos es acero martensítico de bajo contenido en carbono.

5. Conclusiones

Tras el estudio de las componentes que influyen en el desarrollo de este proyecto, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

- Técnicas:
 - En cuanto al material adsorbente empleado, es carbón activo. La cantidad de volumen de poros es la máxima posible y de un tamaño aproximado de 0,8 nm de diámetro (distancia que ocupan dos moléculas de metano).
 - El depósito de tipo I, tiene un volumen interno de 70 litros, debido a la condición de diseño de igualar la autonomía del furgón propuesto.
 - El cierre empleado es de tipo elíptico al haber tenido en cuenta las tensiones y desplazamientos producidos, así como su coste de fabricación.
 - Analizando la relación de la longitud de la parte cilíndrica entre el diámetro del depósito, se ha llegado a la conclusión de que las dimensiones óptimas para el empleo de la menor masa posible y cabida en el vehículo son:
 - Una longitud total de 2795,8 mm.
 - Un diámetro interno de 180 mm.
 - Un espesor del cuerpo de 7,5 mm.
 - Un espesor de brida de 22,5 mm.
 - El peso de un depósito final son 110 kg.
 - El número de pernos empleados son 20 y de acero martensítico de bajo contenido en carbono.
- Competentes:
 - Empleo de ecuaciones y prontuario de resistencia de materiales hasta el momento desconocidas.

PROPUESTA DE DEPÓSITO DE GAS NATURAL ADSORBIDO PARA AUTOMOCIÓN

- El desarrollo, de forma autónoma, de nuevas competencias del software ANSYS.

Con todas las conclusiones extraídas se puede concluir que se ha cumplido el objetivo del proyecto.

6. Líneas futuras

Para concluir este proyecto se propone continuar el presente estudio variando el espesor del depósito, tanto de la parte cilíndrica como de la brida y del cierre seleccionado. De esta manera, rebajando el espesor en aquellas zonas en las que las tensiones sean menores, se optimizaría, aun mas, el peso del depósito. Aunque por razones de fabricación, siempre existirá la limitación de usar chapas de espesores comerciales.

En esa misma línea, sería de especial interés conseguir que el depósito fuera de tipo IV, es decir, íntegramente fabricado en fibras. La consecución de ese objetivo sería clave para la extensión de este tipo de tecnología al resto de vehículos.

Ensayos a fatiga de carga y descarga de gas para observar cómo se modifican tanto las características del adsorbente como del material del depósito sería de gran importancia también, ya que, obviamente, al estar instalado en un vehículo, necesitará repostar combustible con una alta periodicidad.

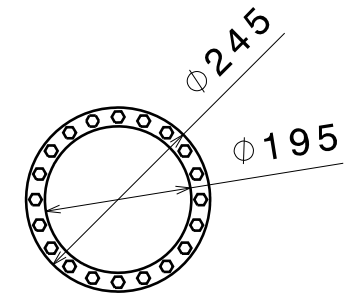
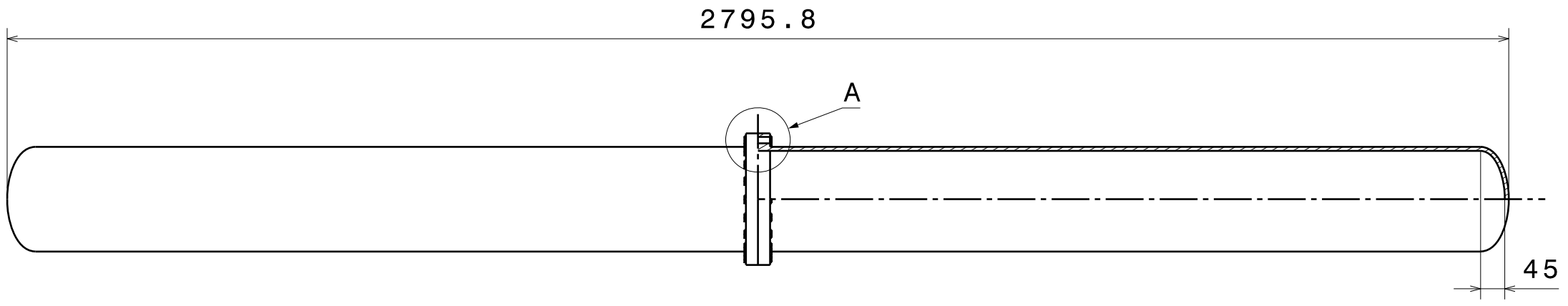
En lo relativo al espacio necesario para su implantación, utilizar otro perfil del cuerpo diferente a la cilíndrica, tipo hexagonal o, incluso, cuadrada, daría la oportunidad de conseguir un mayor factor de forma. Además, proponer otro tipo de formas que no sea un cuerpo longitudinal, sino que se adapte a los diferentes habitáculos del vehículo, proporcionaría un mejor aprovechamiento de estos.

Anexo: **PLANO DEL DEPÓSITO**

H G F E D C B A

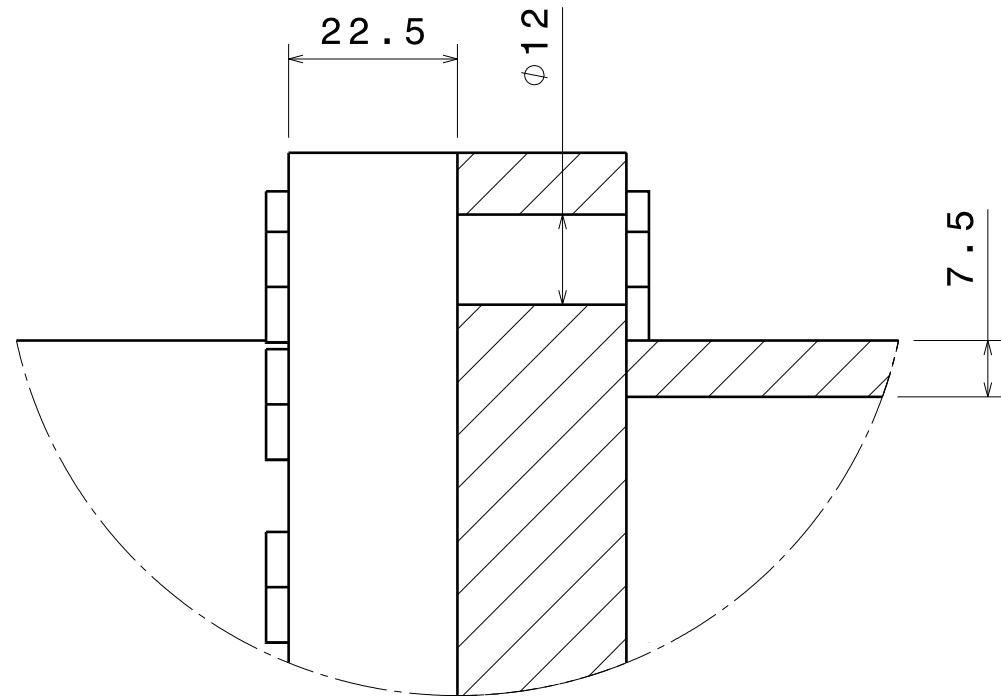
4

4



3

3



2

2

Detalle A
Escala 1:1

Diseñado por Víctor de Santos		Depósito de gas natural adsorbido para automoción		I	-
Fecha: 09/07/2019				H	-
Revisado por Víctor de Santos		Ingeniería Mecánica		G	-
Fecha: 09/07/2019				F	-
Tamaño A3	Masa (kg) 110	Plano Nº1	Hoja 1/1	E	-
Escala 1:10				D	-
				C	-
				B	-
				A	-

1

1

H G B A

Referencias

- [1] «nedgia grupo naturgy,» [En línea]. Available: <https://www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/>.
- [2] «gasnam,» [En línea]. Available: <https://gasnam.es>.
- [3] F. Sanchez Sanz, Análisis, diagnóstico y aplicación del cambio a gas natural vehicular como combustible alternativo en una empresa de paquetería a nivel nacional, 2016.
- [4] «Análisis de los sistemas de refrigeración por adsorción. Capítulo 3.,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/Capítulo3+Sistema+d e+adsorción.pdf>.
- [5] «Adsorción. Capítulo 2.,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70358/fichero/CAPITULO2.pdf>.
- [6] W. R. Granja C. y W. R. Molina P., ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA APLICACIÓN DEL “GAS NATURAL COMPRIMIDO GNC” VEHICULAR COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES A GASOLINA EN EL ECUADOR., Latacunga, Ecuador, 2006.
- [7] J. Massa, G. Juan y A. Giudici, Compendio de Cálculo estructural para ingeniería mecánica y aeronáutica, Córdoba, 2017.
- [8] I. Martín-Javato González, Cálculo de recipientes a presión mediante DBF y DBA según EN-13445-3, Sevilla, 2009.
- [9] J. J. Moreno León, «Gas natural como combustible alternativo para vehículos,» Barcelona, España, 2011.
- [10] «Bioenergy international,» [En línea]. Available: <https://bioenergyinternational.com/opinion-commentary/g-mobility-could-drive-the-circular-economy-in-european-transport>.
- [11] W. D. Pilkey, Formulas for stress, strain and structural matrices, 2004.

[12 «IVECO,» [En línea]. Available:

] <https://www.iveco.com/argentina/Producto/Documents/technical-sheets/New%20Daily%20Furgon%20GNC.pdf>.

[13 Á. Benavides Brasil, Dimensionado de un vehículo convencional para el

] empleo de gas natural comprimido como combustible, Valladolid, 2016.

[14 «Fondeyur,» [En línea]. Available: <http://www.fondeyur.com>. [Último

] acceso: 2019].

[15 M. Herráez y L. del Val, Apuntes diseño de máquinas. Escuela de Ingenierías

] Industriales, Valladolid.