

## ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CONTEXTO .....	1
1.1.1 El hidrógeno. Vehículos con cero emisiones de CO <sub>2</sub> .....	1
1.1.2 Evaluación de las carreteras españolas .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3. ALCANCE .....	3
2. NORMATIVA VIGENTE .....	5
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. ENSAYOS DE DAÑOS SUPERFICIALES (SIN PRESURIZACIÓN).....	6
2.3 ENSAYO DE CAÍDA DE IMPACTO (SIN PRESURIZACIÓN) .....	7
2.4. INTEGRIDAD DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE DESPUÉS DE UNA COLISIÓN .....	8
2.5. TIPOS DE DEPÓSITOS Y CLASIFICACIONES .....	10
2.5.1 Depósitos de tipo I.....	10
2.5.2. Depósito de Tipo II.....	11
2.5.3. Depósitos Tipo III.....	11
2.5.4. Depósitos Tipo IV .....	12
2.5.5. Depósitos Tipo V.....	12
3. METODOLOGÍA Y MATERIALES .....	13
3.1. ENSAYOS PROPUESTOS.....	13
3.2. DEFINICIÓN DE LAS PROBETAS .....	14
3.3. ENSAYO DE CHARPY MODIFICADO. DESCRIPCIÓN .....	16
3.4. MORDAZAS DE SUJECIÓN.....	18
3.5. PUNTAS DE INDENTACIÓN.....	19
3.6. ENSAYO DE TRACCIÓN. DESCRIPCIÓN .....	20
4. RESULTADOS .....	23
4.1. ENSAYO DE CHARPY MODIFICADO .....	23
4.1.1. Clasificación según la destrucción provocada en el material .....	23
4.1.2. Ensayos con punta cónica.....	24
4.1.3. Ensayos con punta roma de diámetro 5mm.....	26
4.1.4. Ensayos con punta roma de 10 mm de diámetro. ....	27
4.1.5. Análisis de los resultados del ensayo de Charpy modificado .....	28
4.2. ENSAYO A TRACCIÓN.....	28
4.2.1. Ensayo a tracción de la probeta completa.....	28
4.2.2. Ensayo a tracción en la capa de <i>composite</i> .....	29
4.2.3. Ensayo a tracción en el revestimiento de aluminio.....	29
4.3. DIAGRAMAS DE TENSIÓN DEFORMACIÓN DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN .....	30
5. CONCLUSIONES.....	32
5.1. DISCUSIÓN.....	32
BIBLIOGRAFÍA.....	34

### ÍNDICE ILUSTRACIONES Y TABLASCOMPORTAMIENTO A IMPACTO

<i>Ilustración 1-1 Evolución de los fallecidos en accidentes de tráfico con víctimas. Fuente [5]</i> .....	2
<i>Ilustración 1-2 Botella Dräger NANO tipo 3. HSE-AL-FW2 IS 31621. Contraseña: 02/FAJ-0004. Lote n° L6SN-17. Fuente [6]</i> .....	4
<i>Ilustración 2-1 Vista lateral del recipiente. Fuente [7]</i> .....	7
<i>Ilustración 2-2 Posiciones de caída. Fuente [7]</i> .....	8

<i>Ilustración 2-3 Depósitos Tipo I de hidrógeno comprimido. Fuente [9]</i> .....	11
<i>Ilustración 2-4 Depósitos Tipo II de H<sub>2</sub> comprimido. Fuente [9]</i> .....	11
<i>Ilustración 2-5 Depósitos Tipo III de H<sub>2</sub> comprimido. Fuente [9]</i> .....	12
<i>Ilustración 3-1 Péndulo de Charpy</i> .....	13
<i>Ilustración 3-2 Disposición de las capas de fibra de carbono</i> .....	14
<i>Ilustración 3-3 Detalle del PET sobre la fibra de vidrio</i> .....	15
<i>Ilustración 3-4 plano de la sección de una muestra</i> .....	15
<i>Ilustración 3-5 Detalle del indentador sujeto al martillo</i> .....	17
<i>Ilustración 3-6 Detalle de los componentes del péndulo de Charpy. Fuente [10]</i> .....	18
<i>Ilustración 3-7 Mordazas sujetando una probeta en el yunque</i> .....	19
<i>Ilustración 3-8 Plano de la mordaza de sujeción izquierda</i> .....	19
<i>Ilustración 3-9 Detalle de la geometría de los indentadores</i> .....	20
<i>Ilustración 3-10 Detalles de los componentes de la máquina de tracción. Fuente [11]</i> .....	22
<i>Ilustración 4-1 Rotura tipo A</i> .....	23
<i>Ilustración 4-2 Daño tipo B</i> .....	24
<i>Ilustración 4-3 Detalles de las deformaciones sufridas por los materiales</i> .....	25
<i>Ilustración 4-4 Detalle de la longitud de punta que perfora las muestras</i> .....	25
<i>Ilustración 4-5 Detalle de la perforación parcial con un ángulo de 30°</i> .....	26
<i>Ilustración 4-6 Roturas del material multicapas, producidas por punta roma</i> .....	26
<i>Ilustración 4-7 Comparativa entre muestras. A la izquierda resultados de los ensayos punta cónica, y a la derecha los de punta roma (de d= 5mm)</i> .....	27
<i>Ilustración 4-8 Detalle del ensayo con punta roma (d= 10 mm)</i> .....	28
<i>Ilustración 4-9 Detalle de la probeta sujeta en las mordazas de la máquina de tracción</i> .....	29
<i>Ilustración 4-10 Detalle de la rotura sufrida por la capa de aluminio</i> .....	30
<i>Ilustración 4-11 Grafica tensión/deformación</i> .....	31
<i>Ilustración 4-12 Ensayo de colisión trasera por alcance. Fuente [12]</i> .....	33
<i>Tabla 3-1 Espesores del composite</i> .....	14
<i>Tabla 4-1 relación del daño sufrido en las muestras en función de la energía aplicada</i> .....	28

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 CONTEXTO

Es un hecho: las reservas disponibles de combustibles fósiles están llegando a su fin. Y, mientras la ciencia intenta reproducir de forma segura y eficaz la fusión, se hace necesario un sistema energético renovable, seguro y no contaminante. El hidrógeno verde junto a la electricidad como vectores energéticos podrían dar respuesta a todas las necesidades energéticas actuales, con unas emisiones contaminantes casi nulas. Este objetivo no presenta barreras de tipo técnicas o científicas insuperables, tan solo hace falta actitud, y apoyo político, para tomar las decisiones necesarias que impulsen económicamente este desarrollo tecnológico. Si un escenario energético de este estilo llegara a implantarse, se podría afirmar que se ha producido la 'revolución del hidrógeno' y habríamos entrado en la era del hidrógeno. [1]

La Comisión Europea, en su propuesta de REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO en Bruselas a 14.7.2021 por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/631 en lo que respecta al refuerzo de las normas de comportamiento en materia de emisiones de CO<sub>2</sub> de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, en consonancia con la mayor ambición, pone como fecha límite a la fabricación de vehículos con emisiones de CO<sub>2</sub> el año 2035.[2]

A este respecto la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética en España, incluye, en su artículo 5, la estrategia de descarbonización a 2050, y en su Título IV, artículo 14, Promoción de movilidad sin emisiones, fija para el 2040 que los turismos y vehículos comerciales ligeros nuevos, excluidos los matriculados como vehículos históricos, no destinados a usos comerciales, reduzcan paulatinamente sus emisiones, de modo que no más tarde del año 2040 sean vehículos con emisiones de 0 gr de CO<sub>2</sub>/km.[3]

### 1.1.1 El hidrógeno. Vehículos con cero emisiones de CO<sub>2</sub>

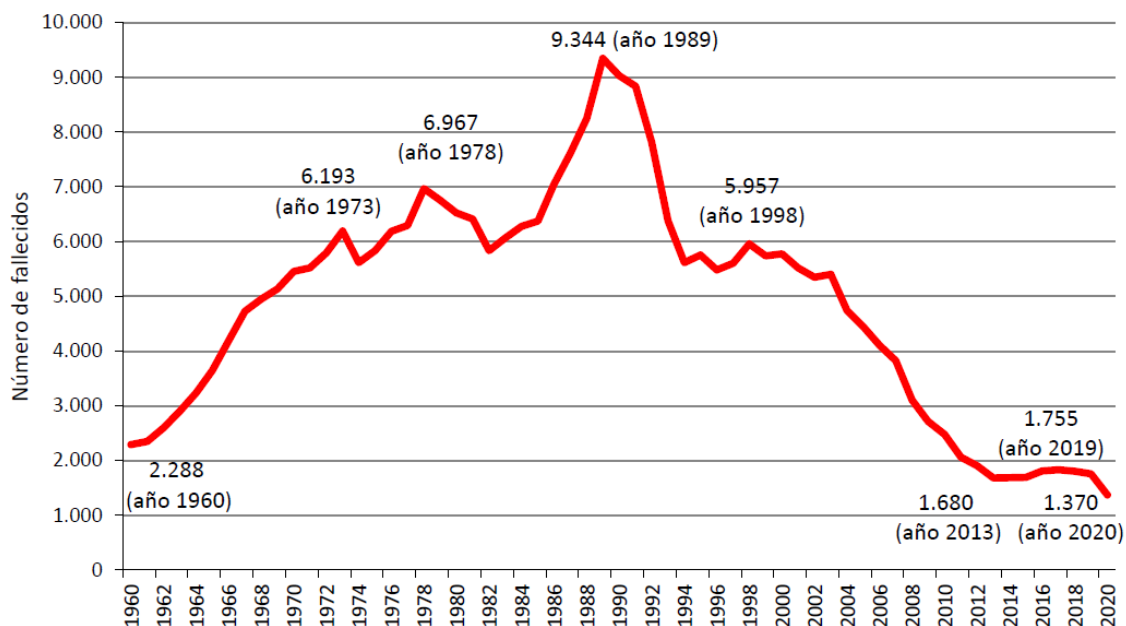
Los vehículos propulsados por pila de combustible de hidrógeno (PEMFC: pila de combustible de membrana de intercambio protónico), producen como único residuo, agua y calor. Y, en España, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia remitido a Bruselas en abril del 2021 por El Gobierno de España, prevé que para el 2030 circulen por las carreteras del estado entre 5000 y 7500 vehículos ligeros, pesados y autobuses impulsados por pila de hidrógeno renovable. Para lo cual se ha previsto movilizar inversiones por importes de 1.555 millones de euros (en el Título II punto 2.5.1 tabla 10 punto 9. Hoja de ruta del hidrógeno renovable y su integración sectorial), tanto para infraestructura como para investigación y desarrollo entre otros.[4].

### 1.1.2 Evaluación de las carreteras españolas

Los vehículos PEMFC, almacenan el hidrógeno de forma comprimido entre 300 y 700 bar. Esto genera un elevado estrés mecánico en los materiales de los depósitos del vehículo,

lo cual es tenido en cuenta a la hora de su diseño. Por otro lado, en caso de accidente por colisión, las tensiones máximas de estos materiales podrían verse sobrepasadas con el consiguiente peligro de rotura de los recipientes.

Como datos objetivos de la siniestralidad en las carreteras españolas, la DGT ofrece Los siguientes antecedentes: para el año 2020 se registraron 1370 víctimas mortales en accidentes de coche, y 6681 heridos hospitalizados y 87881 heridos no hospitalizados. En la gráfica, se observa la evolución de las víctimas desde 1960. [5]. Se observa que entre los años 1960 y 1989, hay un aumento progresivo de los siniestros. Desde la década de los 90 en adelante, y hasta la actualidad, el descenso es gradual, hasta situarse en mínimos históricos en el año 2020.



**Ilustración 1-1 Evolución de los fallecidos en accidentes de tráfico con víctimas. Fuente [5]**

Partiendo de la premisa de que un accidente donde haya fallecidos o heridos graves que necesiten hospitalización, se puede considerar como accidentes de alta energía, donde muy probablemente hay deformación del chasis del automóvil. Entonces, según los datos la cantidad de accidentes graves en España ascendió en 2020 a 8051.

Hoy por hoy, no hay matriculados, en el territorio español, coches impulsados por tecnología de hidrógeno, aunque las previsiones para 2030, indica que esto cambiara. Esto es distinto en Europa, donde si se está comercializando esta tecnología.

## 1.2 OBJETIVOS

Una vez acotada la situación del hidrógeno, su uso creciente y exponencial, con el consecuente problema de seguridad que supone en las carreteras, en caso de accidente. Con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de los depósitos de hidrógeno, del vehículo PEMFC, frente a impacto mecánico, al que podrían estar sometidos, en caso de colisión o vuelco, se propone el siguiente estudio. Para profundizar, en el comportamiento mecánico a impacto, se propone modificar el ensayo de tenacidad, en concreto el péndulo de Charpy, y para completar el estudio se realizará, también, el ensayo de tracción.

La finalidad del trabajo es evaluar los daños producidos en caso de accidente donde intervienen un automóvil con depósitos de hidrógeno, pero que es válido para otros

gases, como por ejemplo el metano. El ensayo modificado determina el daño producido en función de la energía de impacto, y de la geometría del objeto que golpea el depósito, es decir el indentador. El estudio permitirá profundizar en el conocimiento del comportamiento de materiales multicapa de los depósitos, así como directrices o recomendaciones para el diseño de los chasis y soportes de los vehículos de hidrógeno

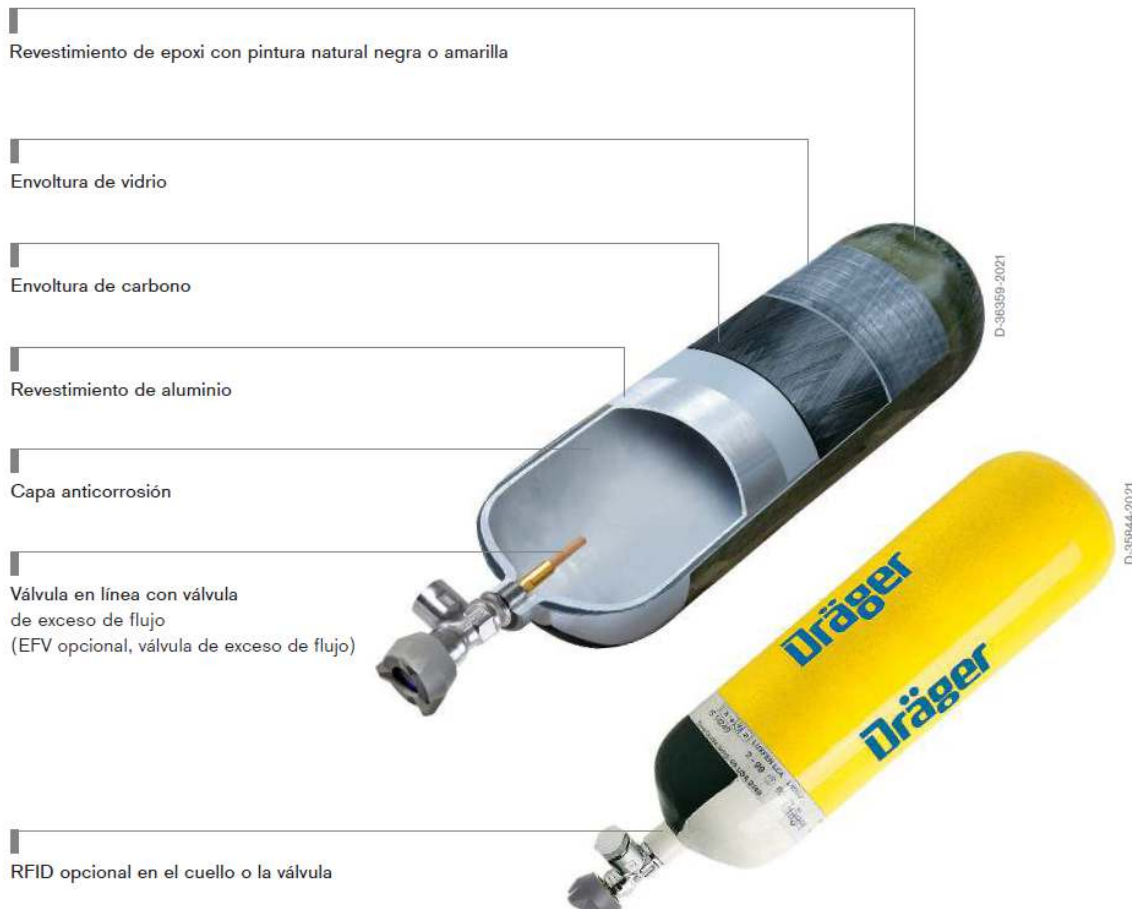
### 1.3. ALCANCE

Los ensayos se llevan a cabo en un tanque TIPO III, (Depósito formado por una capa metálica de espesor 3,8 mm, llamada *liner*, y reforzado por materiales compuestos como fibra de vidrio, fibra de carbono). La relación peso/capacidad es de 0,3-0,45 (kg/l). En estos depósitos el *liner* evita la difusividad del hidrógeno y los esfuerzos mecánicos los soportan los materiales compuestos. La presión de almacenamiento es entre: 300-700 bar o incluso superior según la aplicación.

Los ensayos se llevaron a cabo en una botella de composite de carbono Dräger NANO tipo 3, con peso de 4,0 kg de capacidad de 6.8 l y presión operativa de 300 bar, y presión de prueba máxima de 450 bar. Esta botella cuenta con un revestimiento interno de aluminio sin soldaduras, recubierto de fibras de carbono y con una capa exterior de fibra de vidrio. [6] Las capas de composite soportan la presión, mientras que la capa de aluminio confina el hidrógeno, evitando fugas. Además, al ser dúctil, el aluminio también protege el depósito en caso de impacto. Los ensayos se han realizado en su totalidad sin que las muestras estuvieran sometidas a tensión, o a presión.

Para la obtención de probetas, se ha cortado la botella en piezas longitudinales de 120 x 40 mm. Un total de 15 probetas, han sido sometidas al ensayo de Charpy modificado, para determinar la tenacidad de los materiales tras el impacto. Se han clasificado los tipos de rotura sufridos, y se ha cuantificado el daño respecto de la energía utilizada. Se han realizado ensayos de tracción de los materiales en su conjunto, y por separado, es decir, se ha sometido a tracción, por un lado, la capa de aluminio, por otro, los materiales compuestos, y finalmente, la probeta completa. Los resultados obtenidos son discutidos, y comparados con los resultados de los ensayos de impacto.

En la figura 1.2, se muestra la disposición de las distintas capas que forman el depósito.



**Ilustración 1-1 Botella Dräger NANO tipo 3. HSE-AL-FW2 IS 31621. Contraseña: 02/FAJ-0004. Lote n° L6SN-17. Fuente [6]**

## 2. NORMATIVA VIGENTE

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Se ha tenido en cuenta la normativa vigente en cuanto a ensayos de impacto para dichos depósitos, y, en lo referente a la colocación de los depósitos en los vehículos.

En la actualidad hay una reglamentación completa para instalaciones fijas de hidrógeno, pero existe un vacío legal en cuanto a los vehículos de hidrógeno.

A este respecto, en España Los reglamentos nº 94 y 95, de colisión frontal y lateral respectivamente, fijan los requisitos que han de cumplir los vehículos de hidrógeno, en caso de colisión. Estos requisitos se describen en el punto 3.4 de este documento. Por otro lado, el reglamento nº 134 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE). Disposiciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos de motor y sus componentes en relación con el rendimiento en cuanto a seguridad de los vehículos de hidrógeno [2019/795], tiene como objetivo comprobar la integridad de los depósitos, ante unas agresiones perfectamente definidas

En el punto 1. del reglamento se especifica su ámbito de aplicación, y se compone de tres partes, en las que se determinan las especificaciones de los sistemas de almacenaje y combustible.

- Parte I: Especificaciones del sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido
- Parte II: Especificaciones de los componentes específicos del sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido
- Parte III: Especificaciones del sistema de combustible de un vehículo que lleva incorporado el sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido

En el reglamento se describen los requisitos del ensayo de funcionamiento que han de cumplir los sistemas de almacenamiento de hidrógeno, y los requisitos de calificación para el servicio en carretera. Se citan a modo informativo los distintos ensayos, y se describen de forma completa los ensayos de, Daños superficiales, y caída de impacto, por ser estos los que se ajustan a los ensayos estudiados en este documento.

Los ensayos de verificación de las medidas de referencia comprenden los siguientes ensayos:

- Ensayos de verificación de las medidas de referencia
- Presión de ruptura inicial de referencia.
- Ciclos de presión inicial de referencia.

El ensayo de verificación de la durabilidad del rendimiento (ensayos secuenciales hidráulicos), comprende los siguientes ensayos:

- Ensayo de presión de prueba.
- Ensayo de caída (impacto).
- Daños superficiales.

- Ensayos de exposición a agentes químicos y a ciclos de presión a temperatura ambiente.
- Ensayo de presión estática a alta temperatura; Ciclos de presión a temperaturas extremas.
- Ensayo de presión de prueba residual.
- Ensayo de resistencia residual a la ruptura.

El ensayo de verificación del rendimiento esperado de los sistemas en carretera (ensayos secuenciales neumáticos), comprende los siguientes ensayos:

- Ensayo de presión de prueba.
- Ensayo de ciclos de presión a temperatura ambiente y a temperaturas extremas (ensayo neumático).
- Ensayo de fuga/permeabilidad a presión estática, a temperaturas extremas (ensayo neumático).
- Ensayo de presión de prueba residual.
- Ensayo de resistencia residual a la ruptura (ensayo hidráulico)

En el ensayo de verificación del funcionamiento del sistema de interrupción del servicio en caso de fuego, se especifican los siguientes ensayos:

- Ensayo de verificación del funcionamiento del sistema de interrupción del servicio en caso de fuego

En el ensayo de verificación de la durabilidad del rendimiento de los cierres principales, se especifican los siguientes ensayos:

- Requisitos aplicables a los dispositivos de cierre principales

Parte III: Los vehículos de hidrógeno de las categorías M y N que llevan incorporado el sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido, en relación con su rendimiento en cuanto a seguridad.

En cuanto a este estudio los ensayos de interés son los de verificación de la durabilidad del rendimiento, en concreto 'Ensayo de caída (impacto)' y el de 'Daños superficiales.

## 2.2. ENSAYOS DE DAÑOS SUPERFICIALES (SIN PRESURIZACIÓN)

El objetivo de este ensayo es someter a los recipientes a situaciones concretas, pero, que son diferentes de las de funcionamiento normal del depósito.

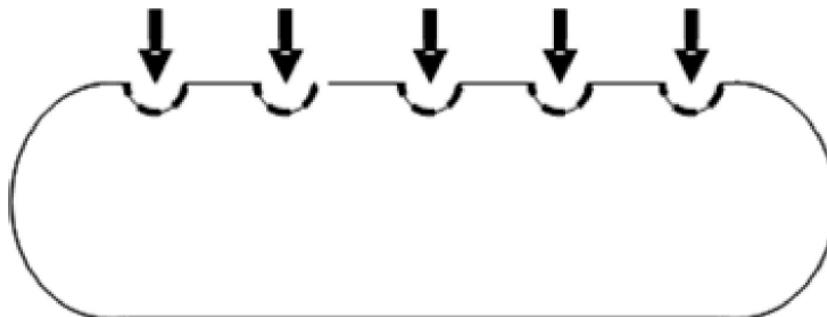
El recipiente de almacenamiento se somete a daños superficiales (procedimiento de ensayo del anexo 3, punto 3.3 del Reglamento nº 134)

- Cortes en la superficie: Se realizan dos cortes longitudinales en la superficie exterior inferior del recipiente de almacenamiento horizontal no presurizado, a lo largo de la parte cilíndrica, cerca de la zona redondeada, pero no en esa zona. El primer corte debe tener, como mínimo, 1,25 mm de profundidad y 25 mm de longitud hacia el extremo en el que se sitúa la válvula. El segundo corte debe tener, como mínimo, 0,75 mm de profundidad y 200 mm de longitud hacia el extremo opuesto a la válvula.
- Impactos de péndulo: La parte superior del recipiente de almacenamiento horizontal debe dividirse en 5 zonas distintas de 100 mm de diámetro cada una (que no se superpongan). Tras 12 horas de prea condicionamiento a  $\leq -40$  °C en una cámara de atmósfera controlada, el centro de cada una de las 5 zonas debe ser golpeado por un péndulo piramidal con las caras en forma de triángulo equilátero y la base cuadrada, y con la cúspide y los bordes redondeados con un radio de 3 mm. El centro de impacto del péndulo debe coincidir con el centro de gravedad de la pirámide. La energía del péndulo en el momento del impacto con



cada una de las 5 zonas marcadas en el recipiente debe ser de 30 J. El recipiente debe estar bien fijado durante los impactos del péndulo y sin presurizar.

En la figura 2.1, se caracterizan las marcas donde el recipiente ha de sufrir los impactos



*Ilustración 2-1 Vista lateral del recipiente. Fuente [7]*

### 2.3 ENSAYO DE CAÍDA DE IMPACTO (SIN PRESURIZACIÓN)

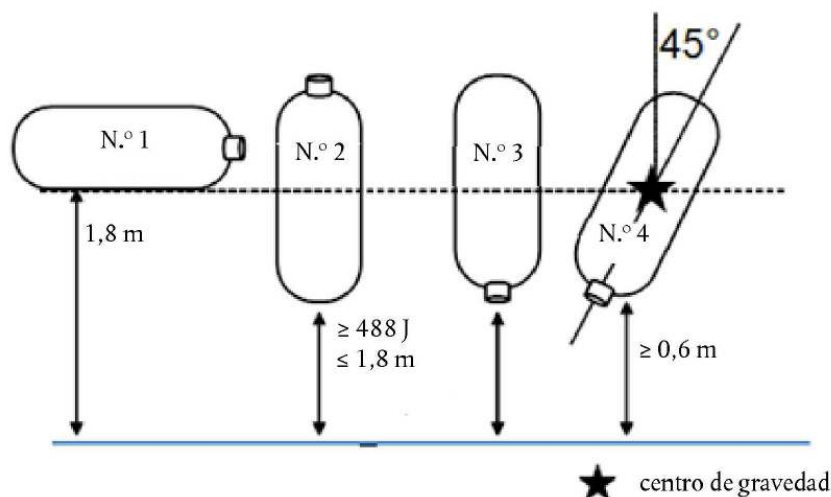
El objetivo de este ensayo es comprobar si el recipiente de estudio, sometido a una caída libre desde una altura y posición inicial determinadas, es capaz de absorber la energía del golpe, sin sufrir deformidad o alteraciones en su estructura que comprometan su integridad.

El recipiente de almacenamiento se somete al ensayo de caída a temperatura ambiente sin presurización interna ni válvulas instaladas. La superficie en la que se dejan caer los recipientes será un suelo de cemento horizontal liso u otro tipo de suelo de dureza equivalente. 17.5.2019 L 129/68 Diario Oficial de la Unión Europea.

La posición del recipiente que se deja caer (de conformidad con el requisito del apartado 5.2.2 del reglamento nº 134) se determinará de la manera siguiente: uno o varios recipientes adicionales se dejarán caer en cada una de las posiciones que se describen a continuación. Para las cuatro posiciones de caída podrá utilizarse un único recipiente o hasta cuatro.

- se deja caer una vez desde una posición horizontal con el fondo del recipiente 1,8 m por encima del suelo;
- se deja caer una vez sobre el extremo del recipiente desde una posición vertical, con el extremo de entrada hacia arriba, con una energía potencial mínima de 488 J y con el extremo situado hacia abajo a una altura no superior a 1,8 m;
- se deja caer una vez sobre el extremo del recipiente desde una posición vertical, con el extremo de entrada hacia abajo, con una energía potencial mínima de 488 J y con el extremo situado hacia abajo a una altura no superior a 1,8 m; si el recipiente es simétrico (extremos de entrada idénticos) esta posición de caída no es necesaria;
- se deja caer una vez con una inclinación de 45° desde la posición vertical, con el extremo de entrada hacia abajo y el centro de gravedad situado 1,8 m por encima del suelo; no obstante, si la distancia al suelo del extremo situado hacia abajo es inferior a 0,6 m, se modificará el ángulo de caída para mantener una altura mínima de 0,6 m y para que el centro de gravedad quede situado a 1,8 m del suelo.

En la figura 2.2 se caracterizan las cuatro posiciones de caída homologadas.



**Ilustración 2-2 Posiciones de caída. Fuente [7]**

No se podrá evitar que los recipientes reboten al caer, pero sí que se vuelquen durante los ensayos de caída vertical descritos.

Si se utiliza más de un recipiente para ejecutar todas las especificaciones de caída, los recipientes utilizados deberán ser sometidos a ciclos de presión de conformidad con el anexo 3, punto 2.2, del reglamento, hasta que se produzca una fuga o hasta 22 000 ciclos sin que se haya producido ninguna fuga. Hasta los 11 000 ciclos no deberá producirse ninguna fuga.

La posición del recipiente que se deja caer se determinará de la manera siguiente:

- si un único recipiente se somete a las cuatro posiciones de caída, el recipiente que se deja caer de conformidad con los requisitos de caída se dejará caer en las cuatro posiciones;
- si se utilizan varios recipientes para ejecutar las cuatro posiciones de caída y todos ellos llegan a los 22 000 ciclos sin que se produzca ninguna fuga, la posición de caída del recipiente que se deja caer será la inclinación de 45°, por lo que el recipiente deberá someterse además a los ensayos especificados en el apartado 5.2 del citado reglamento (Ensayo de verificación de la durabilidad del rendimiento (ensayos secuenciales hidráulicos)).
- si se utilizan varios recipientes para ejecutar las cuatro posiciones de caída y alguno de ellos no llega a los 22 000 ciclos sin que se produzca ninguna fuga, el nuevo recipiente se someterá a la posición o posiciones de caída que hayan dado lugar al menor número de ciclos antes de la fuga y, a continuación, a los ensayos especificados en el apartado 5.2. del citado

## 2.4. INTEGRIDAD DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE DESPUÉS DE UNA COLISIÓN

Estos requisitos fijan unos mínimos de calidad, en cuanto a la respuesta esperada del sistema de combustible, ante una colisión. El sistema ha de ser capaz de mantener su integridad mecánica frente a una colisión definida en cuanto, a aceleraciones, masas, y energías mínimas.

El sistema de combustible del vehículo cumplirá los requisitos siguientes tras los ensayos de colisión del vehículo de conformidad con los Reglamentos siguientes y la aplicación de los procedimientos de ensayo que figuran en el anexo 5 del presente Reglamento:

- Ensayo de colisión frontal de conformidad con el Reglamento n.o 12 o con el Reglamento n.o 94.

El presente Reglamento se aplica a los vehículos de la categoría M1 (vehículos para el transporte de pasajeros, con un máximo de 9 plazas incluida la del conductor) cuya masa total admisible no supera los 3 500 kg y a los vehículos de la categoría N1 (vehículos destinados al transporte de mercancías con una masa máxima autorizada de 3,5 toneladas) cuya masa total admisible no supera los 2 500 kg; podrán homologarse otros vehículos a petición del fabricante.

- Ensayo de colisión lateral de conformidad con el Reglamento n.o 95.

El presente Reglamento se aplica al comportamiento en caso de colisión lateral de la estructura del habitáculo de los vehículos de las categorías M1 y N1, en los que el punto R del asiento más bajo esté, como máximo, a 700 mm del nivel del suelo cuando el vehículo esté en las condiciones correspondientes a la masa de referencia (tara del vehículo más una masa de 100 kg, equivalente a la masa del maniquí de colisión lateral con su instrumental).

En caso de que uno de los ensayos de colisión del vehículo especificados no sea aplicable al vehículo, o ninguno de los dos lo sea, el sistema de combustible deberá someterse a las aceleraciones alternativas pertinentes que figuran a continuación, y el sistema de almacenamiento de hidrógeno deberá estar instalado en una posición que se ajuste a los requisitos de los puntos siguientes

Punto 2.4.1. Requisitos relativos a la instalación del sistema de almacenamiento de hidrógeno que no está sujeto al ensayo de colisión frontal El recipiente se instalará de manera que quede situado detrás de un plano vertical perpendicular al eje central del vehículo y 420 mm por detrás del borde delantero del vehículo.

Punto 2.4.2. Requisitos relativos a la instalación del sistema de almacenamiento de hidrógeno que no está sujeto al ensayo de colisión lateral El recipiente se instalará de manera que quede situado entre los dos planos verticales paralelos al eje central del vehículo situados a 200 mm, medidos hacia dentro, de los dos bordes exteriores del vehículo próximos al recipiente.

Las aceleraciones se medirán en el lugar en el que esté instalado el sistema de almacenamiento de hidrógeno. El sistema de combustible del vehículo deberá estar instalado y sujeto en la parte representativa del vehículo. La masa utilizada deberá ser representativa de un recipiente completamente equipado y lleno o de un conjunto de recipientes.

Aceleraciones para los vehículos de las categorías M1 y N1:

- a) 20 g en el sentido de la marcha (hacia adelante y hacia atrás);
- b) 8 g en dirección horizontalmente perpendicular al sentido de la marcha (a la izquierda y a la derecha).

Aceleraciones para los vehículos de las categorías M2 (vehículo destinado al transporte de pasajeros de más de 9 plazas y hasta 5 toneladas de masa máxima) y N2 (vehículos para el transporte de mercancías cuya masa máxima autorizada supera las 3,5 toneladas, hasta las 12 toneladas):

- a) 10 g en el sentido de la marcha (hacia adelante y hacia atrás);
- b) 5 g en dirección horizontalmente perpendicular al sentido de la marcha (a la izquierda y a la derecha).

Aceleraciones para los vehículos de las categorías M3 y N3:

- a) 6,6 g en el sentido de la marcha (hacia adelante y hacia atrás);
- b) 5 g en dirección horizontalmente perpendicular al sentido de la marcha (a la izquierda y a la derecha).

Nota:  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Requisitos relativos a la instalación del sistema de almacenamiento de hidrógeno que no está sujeto al ensayo de colisión frontal.

El recipiente se instalará de manera que quede situado detrás de un plano vertical perpendicular al eje central del vehículo y 420 mm por detrás del borde delantero del vehículo.

Requisitos relativos a la instalación del sistema de almacenamiento de hidrógeno que no está sujeto al ensayo de colisión lateral.

El recipiente se instalará de manera que quede situado entre los dos planos verticales paralelos al eje central del vehículo situados a 200 mm, medidos hacia dentro, de los dos bordes exteriores del vehículo próximos al recipiente.

## 2.5. TIPOS DE DEPÓSITOS Y CLASIFICACIONES

El hidrógeno presurizado se almacena en depósitos cilíndricos con casquetes esféricos, donde la mayoría constan de válvulas para la entrada/salida del flujo, válvulas de exceso de flujo, válvula de aislamiento manual, y dispositivos de descompresión con orificios de venteo entre otros.

Los requisitos de los depósitos en cuanto a sus propiedades mecánicas son muy exigentes debido a los inconvenientes que implica almacenar hidrógeno a tan altas presiones.

Los prototipos actuales se construyen y clasifican según distintas composiciones de fibra de vidrio, fibras de carbono y aluminio [5]

.

### 2.5.1 Depósitos de tipo I

Botellas cilíndricas de acero o aluminio, donde la relación peso/capacidad del depósito es 1/1,5 (kg/l). Se utilizan normalmente en procesos de soldadura y con presiones de 200 bar. No aptas para aplicaciones automovilísticas, debido a su peso que resulta excesivo.[8]

En la figura 2.3 se aprecia un conjunto de botellas de hidrógeno de tipo I, para aplicaciones industriales



*Ilustración 2-3 Depósitos Tipo I de hidrógeno comprimido. Fuente [9]*

### 2.5.2. Depósito de Tipo II

Depósitos cilíndricos de aluminio reforzado con fibra de vidrio o carbono, con lo que la relación de peso/capacidad de 0.65/1.3 (kg/l) mejora con respecto a las de Tipo I. Se utilizan en industria automovilística, o para vehículos que utilizan gas natural o GLP o similares. Las presiones de almacenamiento son de 350 bar.[8]

En la figura 2.4 se muestra el proceso de conformado de los materiales compuestos en un depósito de Tipo II



*Ilustración 2-4 -Depósitos Tipo II de H<sub>2</sub> comprimido. Fuente [9]*

### 2.5.3. Depósitos Tipo III

Depósito formado por una capa metálica de espesor reducido llamada *liner*, la cual está cubierta de materiales compuesto, como fibra de vidrio, fibra de carbono, etc. Con esta disposición de materiales se consigue una disminución considerable del peso. En estos depósitos el *liner* evita la difusividad del hidrógeno y los esfuerzos mecánicos los soportan los materiales compuestos. La presión de almacenamiento es de 700 bar o incluso superior según la aplicación.[8]

En la figura 2.5 se aprecia un depósito Tipo III, con el correspondiente orificio. Para las válvulas de llenado y seguridad.



*Ilustración 2-5 Depósitos Tipo III de H<sub>2</sub> comprimido. Fuente [9]*

#### **2.5.4. Depósitos Tipo IV**

En estos depósitos el *liner* es de materiales poliméricos, con lo que se reduce aún más el peso, pero la difusividad del hidrógeno a través del *liner* son algo mayores. Las presiones de trabajo son las mismas que para los tipos III pero soportan ciclos de carga/descargas menores [8]

#### **2.5.5. Depósitos Tipo V**

En estos depósitos se elimina el *liner* interior, y el depósito se fabrica íntegramente de materiales compuestos de alta densidad y matrices especiales, con lo que se consigue una difusividad muy baja, ahorrando peso al conjunto. [8]

### 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

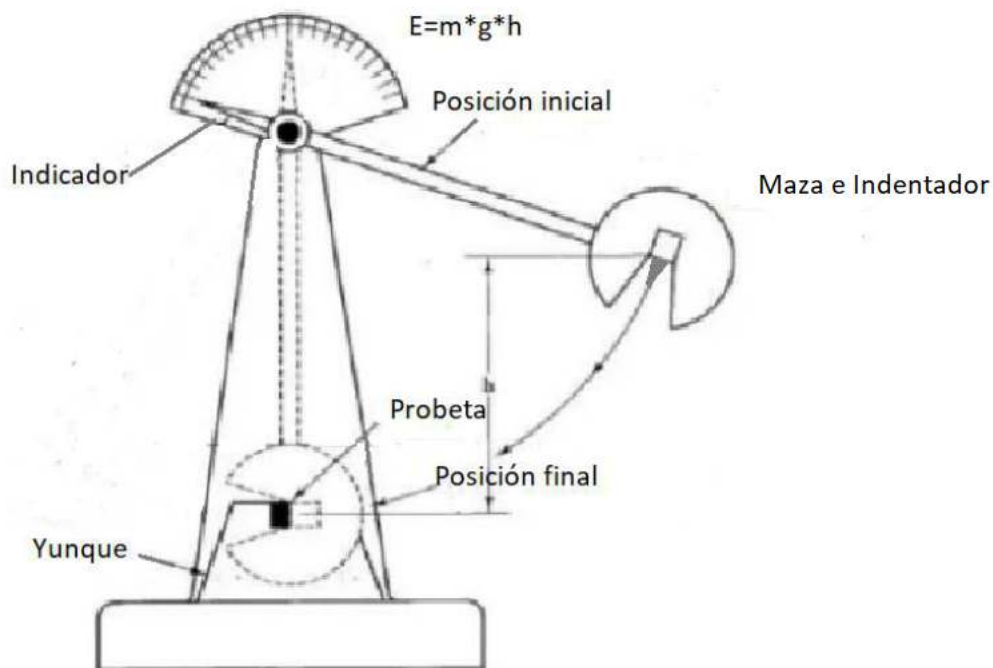
#### 3.1. ENSAYOS PROPUESTOS

Reseñados los tipos de depósitos para el almacenamiento de hidrógeno comprimido, y analizada la normativa en cuanto a los ensayos a los que deben ser sometidos dichos depósitos, se ha resuelto estudiar la dinámica en el comportamiento mecánico de los materiales multicapa que conforman un depósito de Tipo III. Las muestras de materiales compuestos se someterán a los ensayos de Charpy modificado, por un lado, con el fin de reconocer la relación de conducta entre los depósitos de almacenamiento de hidrógeno y el diseño de los soportes, así como el entorno del vehículo en el que se integran dichos recipientes. Por otro lado, se las someterá a ensayos de tracción, para secundar los estudios, de impacto, y obtener una relacionar de las pautas de conducta ante cargas para las que no han sido diseñados.

El ensayo de Charpy se ha modificado con el propósito de asemejarlo a los ensayos descriptos en el reglamento nº 134.

Se realizaron cinco ensayos de impacto variando el ángulo del péndulo, y tres ensayos de tracción a los materiales en su conjunto y por separado.

En la figura 3.1 se muestran las variables que intervienen en el ensayo del péndulo de Charpy



*Ilustración 3-1 Péndulo de Charpy.*

### 3.2. DEFINICIÓN DE LAS PROBETAS

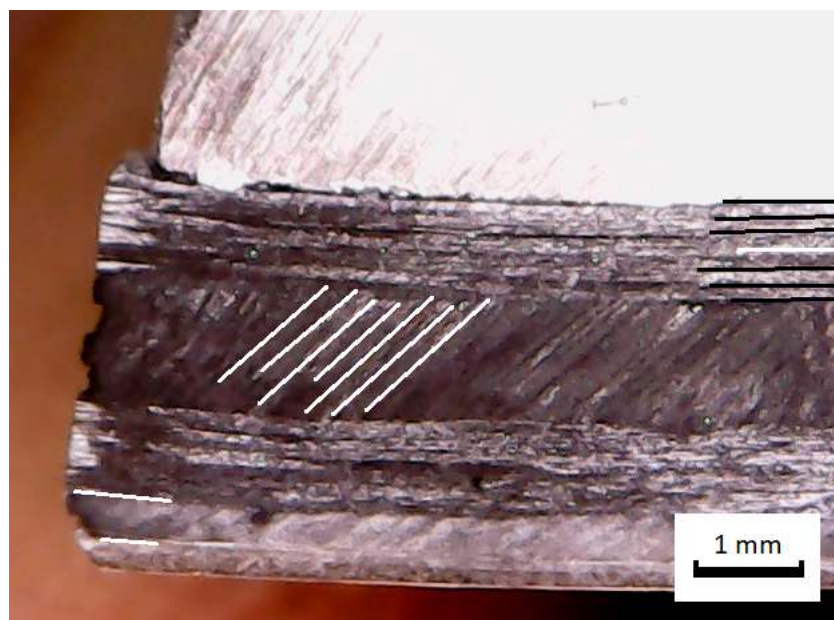
Para la obtención de las probetas se ha cortado el depósito Tipo III, botella de composite de carbono Dräger NANO, y se han obtenido un total de 18 muestras de 120 x 40 mm. Los cortes transversales se realizaron con una sierra de corte de movimiento alternativo, y los cortes longitudinales, se llevaron a cabo mediante una sierra de disco abrasivo con taladrina. El fin del procedimiento descrito, ha sido, mantener la integridad de los materiales compuestos, así como la salud, seguridad y protección del operario.

En la tabla 3.1 se especifican los espesores de los distintos materiales que componen las muestras, así como el número de capas de fibra de carbono.

	Espesor (mm)	nº de capas
fibra de vidrio	0,82	6
fibra de carbono	3,78	18
revestimiento aluminio	3,8	6

**Tabla 3-1 Espesores del composite**

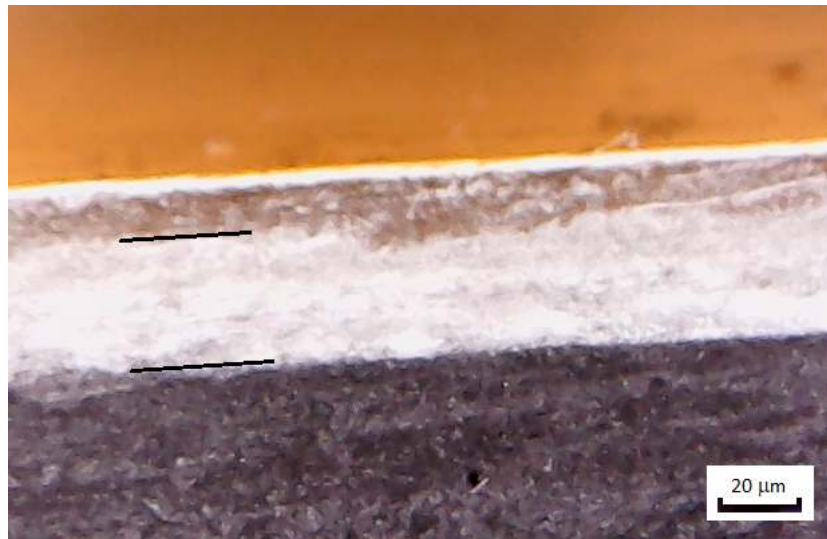
En la figura 3.2 se aprecia la distribución de las capas de fibra de carbono. En contacto con la capa de aluminio (porción superior de la foto), se distinguen las primeras 6 vueltas de fibra de carbono, tras las cuales se suceden las capas oblicuas, para finalizar con otras 6 vueltas transversales. En contacto con la última vuelta de fibra de carbono, se encuentra la capa de fibra de vidrio.



**Ilustración 3-2 Disposición de las capas de fibra de carbono**

En la figura 3.3 se advierte una zona gris en la capa de fibra de vidrio, o capa externa del composite. Esta zona es un material denominado PET (Polythylene terephthalate.). En la actualidad, este material de acabado acrílico uno de los termoplásticos más rígidos, resistentes del mercado.





**Ilustración 3-3 Detalle del PET sobre la fibra de vidrio**

Debido a la geometría curva, las probetas presentan un momento de inercia ( $I_c$ ) respecto de su eje de rotación, que relaciona la sección del material con su resistencia a la flexión. (a mayor momento de inercia, menor desviación bajo carga.)

$$I_c = \frac{1}{4} \cdot (R_1^4 - R_2^4) \cdot \alpha - \frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha$$

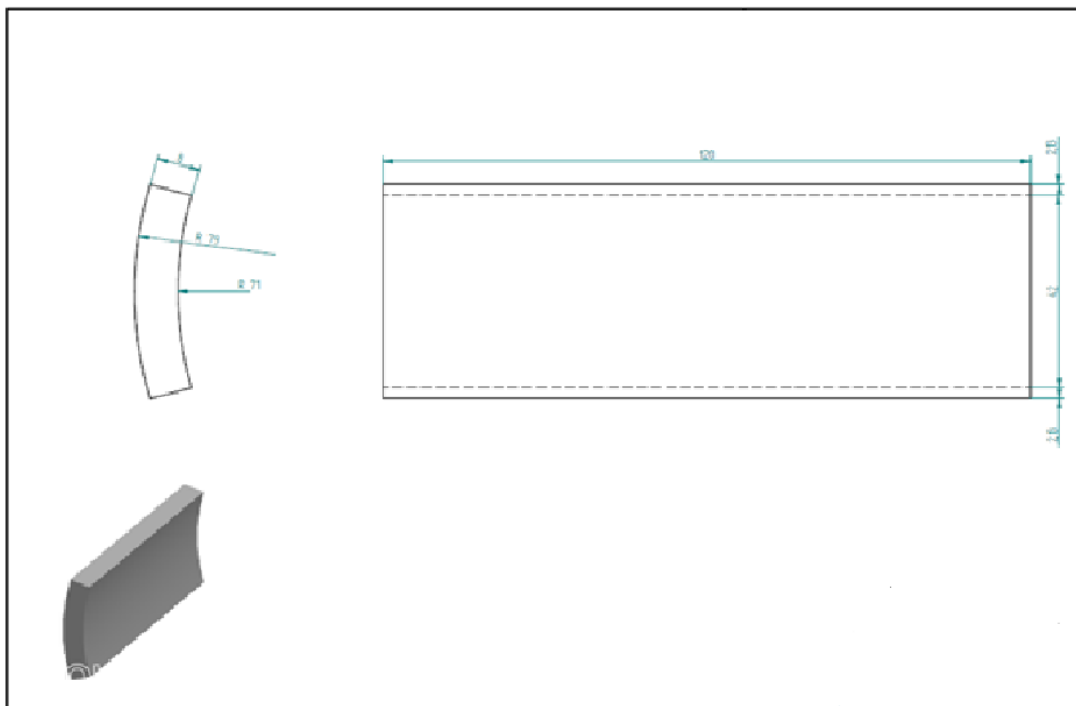
Donde:

$R_1$  es el radio exterior del cilindro

$R_2$  es el radio interior del cilindro

$\alpha$  es el ángulo desde el centro de la botella, que abarca la probeta.

La figura 3.4 representa en un plano la geometría de una probeta estándar.



**Ilustración 3-4 plano de la sección de una muestra.**

### 3.3. ENSAYO DE CHARPY MODIFICADO. DESCRIPCIÓN

El péndulo de Charpy es un dispositivo ideado para caracterizar, y determinar la tenacidad de un material, es decir la energía absorbida antes de la rotura.

En los siguientes ensayos se utiliza un péndulo de Charpy de la marca *HOYTOM*. El péndulo de resiliencia se compone de: dos montantes verticales unidos por debajo a una base rígida. Por la parte superior los montantes se unen por medio de un eje de rotación, sobre el que gira el brazo del péndulo de 800 mm. Sobre el otro extremo del brazo esta atornillada la masa con forma de C de 20 kg. La cuchilla de impacto, (pieza que golpea la muestra) se monta sobre la maza (en el caso de estudio esta cuchilla ha sido sustituida por un indentador, de geometría conocida).

Por medio de un tornillo sin fin y una corona dentada, accionados por un volante manual, el péndulo es elevado hasta la posición deseada. Al accionar la manilla de disparo (que posee un mecanismo de seguridad), el péndulo se deja caer por gravedad.

La probeta se coloca en la zona inferior entre los dos montantes, en un soporte destinado para ello, en posición horizontal, y perpendicular al plano de giro del péndulo.

Su funcionamiento es el siguiente: El péndulo cae sobre el dorso de la probeta y la parte (en el caso de estudio la perfora). La diferencia entre la altura inicial del péndulo ( $h$ ) y la final tras el impacto ( $h'$ ) permite medir la energía absorbida en el proceso de fracturar la probeta.

En el caso examinado, al no partirse la probeta, esta absorbe toda la energía del golpe.

La energía absorbida por la probeta durante el ensayo se muestra en una escala graduada en Julios y grados para su fácil lectura, o se aplica la siguiente formula:

$$E = m * g * h$$

Donde:

$E$  es la energía en julios;

$m$  es la masa en kilogramos;

$g$  es la aceleración de la gravedad en metros/segundos<sup>2</sup>;

$h$  es la altura en metros.

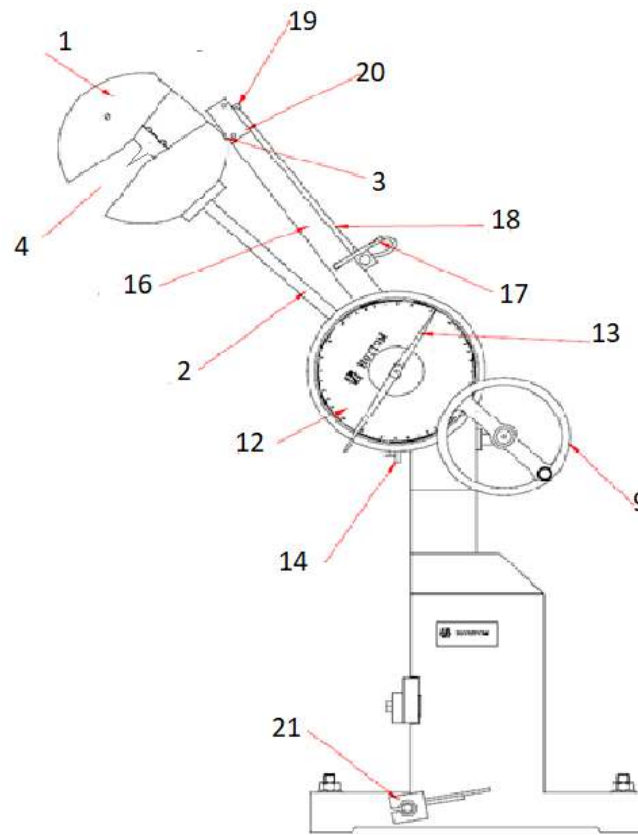
Para este ensayo el martillo de golpeo del péndulo ha sido sustituido por puntas de perforación, o indentadores, con el objetivo de perforar las muestras. El ensayo propuesto relacionará la energía de impacto y la geometría de la punta con el tipo de daño provocado en la probeta, como se aprecia en la ilustración 3.5.



**Ilustración 3-5 Detalle del indentador sujeto al martillo.**

A continuación, se detallan los componentes del péndulo de Charpy citados en la figura 3.6.

- 1 Maza o disco.
- 2 biela o brazo.
- 3 uña de sujeción de la maza.
- 4 indentador.
- 5 soportes de probetas.
- 6 apoyos de probetas.
- 7 tornillos de fijación apoyos.
- 8 regla separación apoyos.
- 9 volante de elevación manual.
- 10 corona dentada.
- 11 tornillo sin-fin.
- 12 escala graduada (Julios y Grados).
- 13 aguja indicadora.
- 14 tope aguja (regulable).
- 15 eje de rotación.
- 16 palanca de elevación de la maza.
- 17 manilla de disparo.
- 18 varilla-tirante de disparo.
- 19 biela fijación uña.
- 20 soporte de disparo.
- 21 pedal del freno.
- 22 freno de tambor.
- 23 placa para pernos de cementación.



*Ilustración 3-6 Detalle de los componentes del péndulo de Charpy. Fuente [10]*

### 3.4. MORDAZAS DE SUJECCIÓN

Se han diseñado las mordazas de sujeción a medida teniendo en cuenta la geometría curva de la probeta. Para ello se han mecanizado en aluminio con el objetivo de sostener la probeta a tracción durante el ensayo de Charpy modificado.

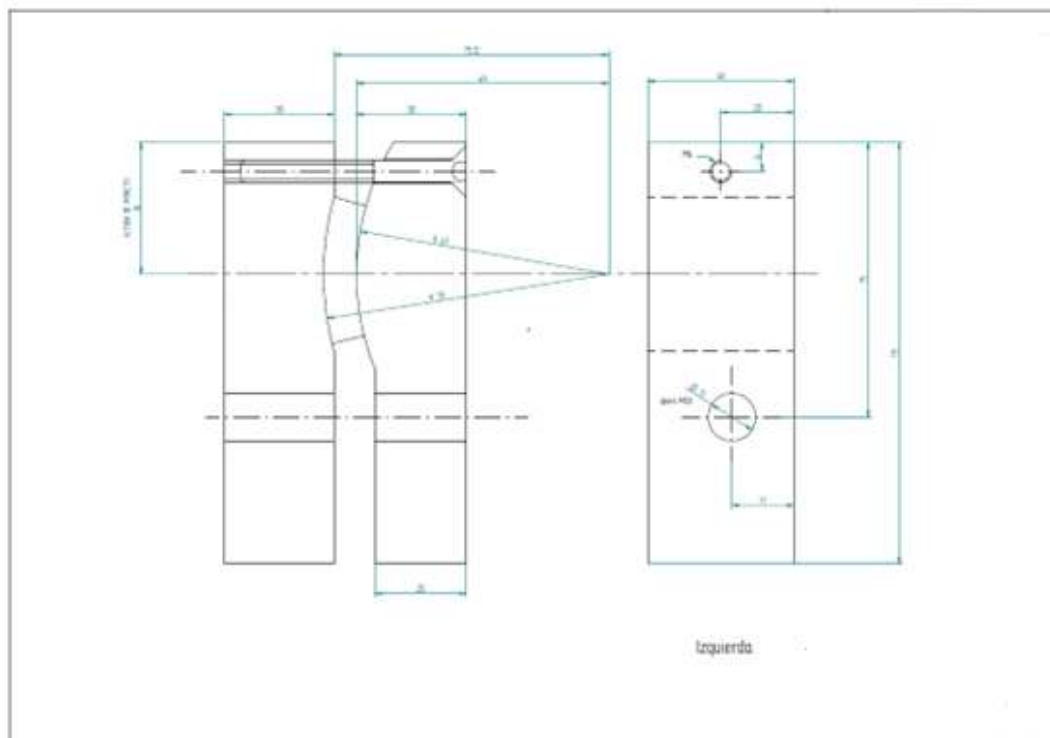
En la figura 3.7 se muestran los detalles del plano donde se caracteriza la mordaza izquierda, que consta de un apoyo trasero, y otro delantero, con dos roscas de fijación a la base del péndulo, tal y como se muestra en la imagen.

Los tornillos superior e inferior sujetan firmemente la probeta, mientras que el tornillo central de M12 (métrica externa de las roscas= 12 mm) une los soportes al banco de ensayo.



**Ilustración 3-7 Mordazas sujetando una probeta en el yunque**

En la figura 3.8 se aprecian los detalles del plano donde se caracteriza la mordaza izquierda. No se representa la mordaza derecha, ya que son simétricas.



**Ilustración 3-8 Plano de la mordaza de sujeción izquierda.**

### 3.5. PUNTAS DE INDENTACIÓN

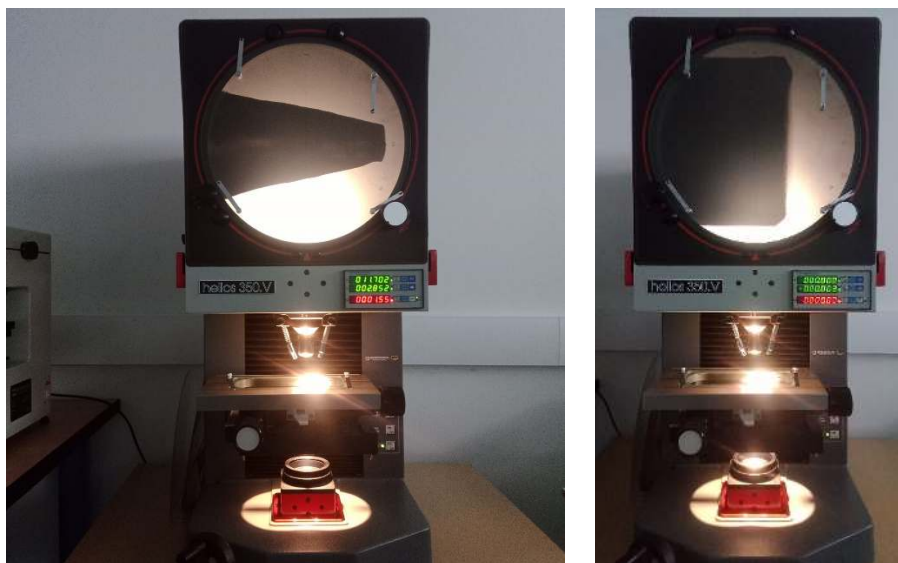
Se han utilizado diferentes puntas, para simular en caso de accidente, los daños que podrían sufrir los tanques de combustibles. Los componentes del vehículo que rodean a los depósitos pueden verse sometidos a deformaciones, tras un accidente de gran energía, y agredir a los depósitos.

El material de la punta es acero aleado templado, y revenido con una resistencia a la rotura de 1200 N/mm<sup>2</sup>, y un límite elástico de 900 N/mm<sup>2</sup>.

Las geometrías han sido definidas en un proyector de perfil modelo helios 350. V.

- Puntas cónicas: El ángulo del cono es de  $16.76^\circ$  y truncado a un diámetro de 0.61 mm. El diámetro del vástago es de 5 mm, y longitud 50 mm.
- Punta roma; Punta cilíndrica de diámetro,  $D_1 = 5$  mm, y largo = 50 mm. Siendo el material el definido para la punta cónica.
- Punta roma; Punta cilíndrica de diámetro,  $D_2 = 10$  mm, y largo = 50 mm. Siendo el material el definido para la punta cónica

En la Figura 3.9 Se muestran las geometrías de los indentadores, tanto cónico como roma, por medio de un proyector de perfiles óptico Helios 350 V. Solo se enseña una de las puntas romas, ya que el perfil es el mismo para las dos, y solo se distinguen en el diámetro de su superficie.



*Ilustración 3-9 Detalle de la geometría de los indentadores.*

### 3.6. ENSAYO DE TRACCIÓN. DESCRIPCIÓN

Los ensayos a tracción se realizaron para complementar los ensayos de impacto de Charpy modificados, y poder ampliar la recopilación de resultados obtenida en los ensayos de Charpy.

Los ensayos se llevaron a cabo en una Máquina de ensayos electrohidráulica HOYTOM TN-MD 100. La máquina cuenta con un componente hidráulico, que proporciona la fuerza en el ensayo. Un extensómetro y un dinamómetro envían las mediciones obtenidas durante el ensayo a una unidad de control.

Los componentes de fuerza y de control, poseen su interruptor propio de encendido/apagado.

Las probetas, se sujetan por sus extremos, en unas mordazas, que se abren, o cierran, mediante una palanca. La mordaza inferior, está asegurada sobre un elemento fijo, y la mordaza superior, está montada sobre un elemento móvil. La mordaza móvil, se lleva hasta la posición necesaria, girando una válvula de descarga, que permite el retorno del hidráulico al depósito.

La unidad hidráulica se pone en marcha mediante un pulsador. Esta comienza a bombear el líquido hidráulico, y la mordaza móvil comienza a subir. Para ello, la válvula descarga ha de estar cerrada, y la velocidad ha de ser distinta de cero. La velocidad de aumento de carga se controla de forma manual mediante un mando.

El funcionamiento de la máquina se detiene inmediatamente con un pulsador (de paro), que podría considerarse como seta de emergencia.

Para realizar los ensayos, se coloca la probeta entre las mordazas, y se mide su longitud inicial ( $L_0$ ) entre marcas, y su sección inicial ( $S_0$ ). Se accionan los interruptores de puesta en marcha de las unidades de fuerza y control, y se ponen a cero los indicadores de carga y de alargamiento.

Se meten los datos de la probeta en el software HOYWIN para que el ordenador pueda realizar las gráficas.

Se cierra la válvula de descarga, y se acciona el pulsador de marcha. De forma gradual se actúa sobre la velocidad de aumento de carga, observando en el monitor que la carga aumenta paulatinamente, hasta que los dientes de las mordazas se incrustan en la probeta, y el aumento de carga se produce con mayor rapidez. En el instante que ocurre esto, se actúa sobre el mando de velocidad, para que la velocidad de aumento de carga sea la correcta durante el ensayo.

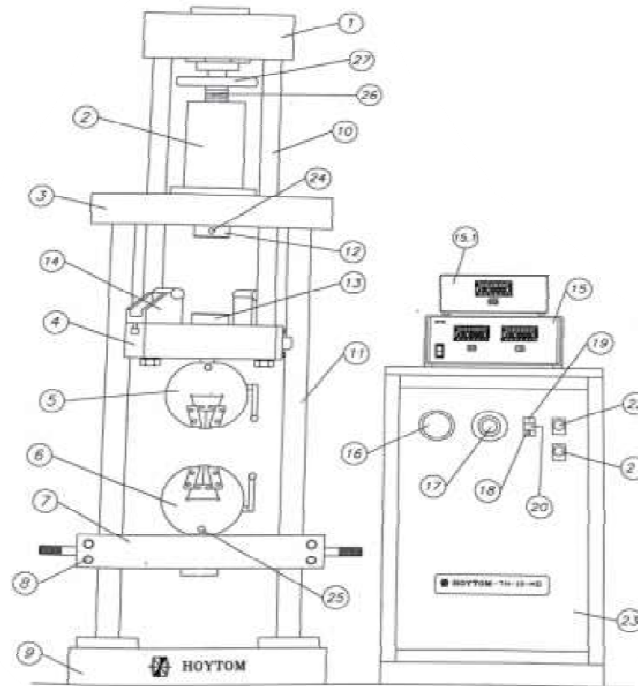
Esta velocidad, permanece constante durante todo el ensayo, hasta alcanzar el límite de rotura del material.

Tras la rotura, se detiene la máquina, se recuperan los trozos de probeta, se abre la válvula de descarga, para que la máquina vuelva a su posición inicial, y se pone a cero la válvula de velocidad.

Se detallan a continuación los elementos de la máquina de tracción numerados en la figura 3.10.

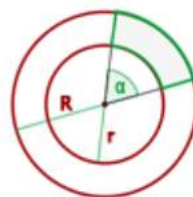
- 1-Puente móvil superior
- 2-pistón hidráulico
- 3-Montante superior fijo
- 4-Travesaño móvil
- 5-Mordaza superior
- 6-Mordaza inferior
- 7-Travesaño inferior de ajuste separación
- 8-Montante inferior móvil de ajuste de separación
- 9-Placa base de la máquina
- 10-Tirante
- 11-Columnas
- 12-Plato compresión superior
- 13-plato compresión inferior
- 14-Rodillos de Flexión
- 15-Electrónica medida (fuerza, desplazamiento)
- 16-Válvula descarga
- 17-Válvula control de velocidad
- 18-Pulsador paro máquina
- 19-Pulsador marcha máquina
- 20-Luz motor máquina en marcha
- 21-Interruptor general trifásico

- 22-Luz de maquina con tensión
- 23-Armario grupo hidráulico
- 24-Tornillo amarre (punzón doblado, plato de compresión, penetrador Brinell)
- 25-Bulón sujeción mordazas
- 26-Husillo de aproximación
- 27-Volante de aproximación



**Ilustración 3-10 Detalles de los componentes de la máquina de tracción. Fuente [11]**

Para el cálculo de la superficie de la probeta, se utilizó la formula del área de un trapecio circular.



$$S_0 = \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot \alpha}{360^\circ}$$

Donde:  $\alpha = 17.8^\circ$ ;  $R^2 =$ radio exterior(mm);  $r^2 =$  radio interior (mm)



## 4. RESULTADOS

### 4.1. ENSAYO DE CHARPY MODIFICADO

#### 4.1.1. Clasificación según la destrucción provocada en el material

Se cataloga el tipo de daño sufrido por las probetas con el fin de integrar tanto el patrón de rotura, así como la devastación sufrida por las muestras en función de la energía aplicada.

Daño tipo A: Se refiere a cuando la muestra sufre una perforación completa, como se observa en la figura 4.1, de todas sus capas, y puede decirse, que dicha perforación se sucede sin devastación aledaña (perforación limpia)



*Ilustración 4-1 Rotura tipo A*

A su vez, se subdivide el tipo A en cuanto al recorrido de la punta dentro del material, de la siguiente manera:

- A1: los 50 mm de longitud de la punta han atravesado la probeta;
- A2: parte de la punta (30 mm de su longitud) ha atravesado la probeta;
- A3: parte de la punta (20 mm de su longitud) ha atravesado la probeta;
- A4: la muestra ha sido atravesada por 10 mm de longitud de la punta;

Daño tipo B: Se refiere a cuando la probeta sufre una perforación completa de todas sus capas, y dicha perforación se acompaña de gran destrucción y arrastre de material aledaño. En la figura 6.2 se aprecia la destrucción.



**Ilustración 4-2 Daño tipo B**

A su vez, se subdivide el tipo B en cuanto al recorrido de la punta dentro del material, de la siguiente manera:

- B1: los 50 mm de longitud de la punta han atravesado la probeta;
- B2: parte de la punta (20 mm de su longitud) ha atravesado la probeta;
- B3: parte de la punta (10 mm de su longitud) ha atravesado la probeta;
- B0: se incluye esta categoría debido a que, aun no habiendo perforación de las capas de la probeta, si se observa destrucción superficial.

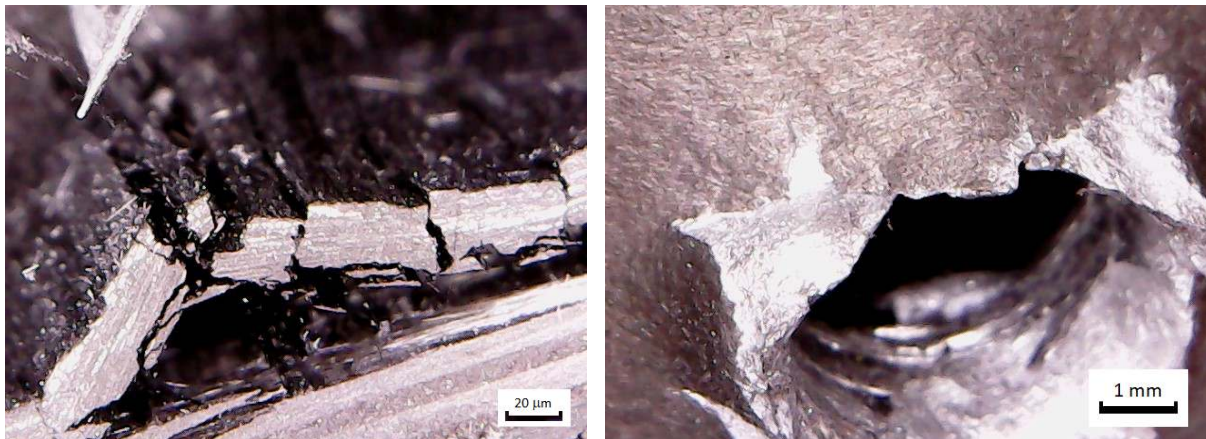
Daño tipo C: Hay perforación parcial (solo afecta a la fibra de vidrio, y carbono), y limpia de las capas;

Daño tipo D: No hay perforación de la muestra. Gran deformación de la probeta, y destrucción en toda la superficie de la capa de fibra de carbono.

#### **4.1.2. Ensayos con punta cónica**

En el primer caso el péndulo fue elevado a un ángulo de  $150^\circ$ , que se corresponde con una energía de 300 Julios, la muestra alojada en las mordazas fue colocada en el soporte de la máquina para tal fin. Al liberar el péndulo, la muestra fue atravesada en su totalidad por la punta. Toda la punta, paso a través de la muestra.

En la figura 4.3, se observa rotura frágil en las capas de fibra de vidrio y fibra de carbono, concretamente en la matriz termoestable del composite, donde, se observa la propagación de la grieta, sin presencia de deformación plástica, y los hilos de fibra de carbono mutilados. El revestimiento de aluminio presenta una rotura dúctil, donde se observó una deformación plástica considerable.



**Ilustración 4-3** Detalles de las deformaciones sufridas por los materiales.

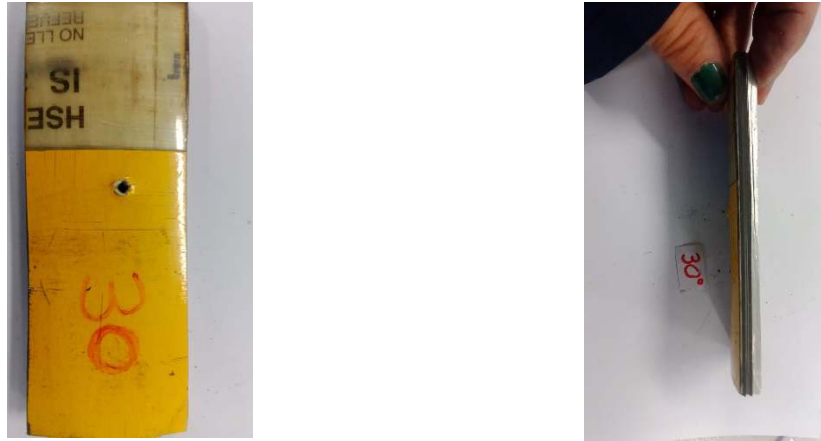
Para los siguientes ángulos de:  $120^\circ$ ;  $90^\circ$ , y  $60^\circ$ , con unas energías respectivas de: 74.3 J; 62.7 J, y 51 J. El procedimiento siguió el mismo desarrollo descrito en el apartado anterior. Los resultados fueron similares en cuanto a la perforación total de la muestra y el tipo de roturas.

En la figura 4.4 se aprecian las diferencias en cuanto a la cantidad de energía aplicada, pues la longitud de punta que atraviesa las muestras difiere en función de la energía aplicada a las mismas. Asimismo, se denota que la deformación del revestimiento de aluminio fue disminuyendo a medida que el ángulo del péndulo era menor.



**Ilustración 4-4** Detalle de la longitud de punta que perfora las muestras.

En la figura 4.5 se observa, que para el ángulo de  $30^\circ$ , la pieza la punta solo afecto a la capa de fibra de vidrio, sin llegar a atravesarla por completo.

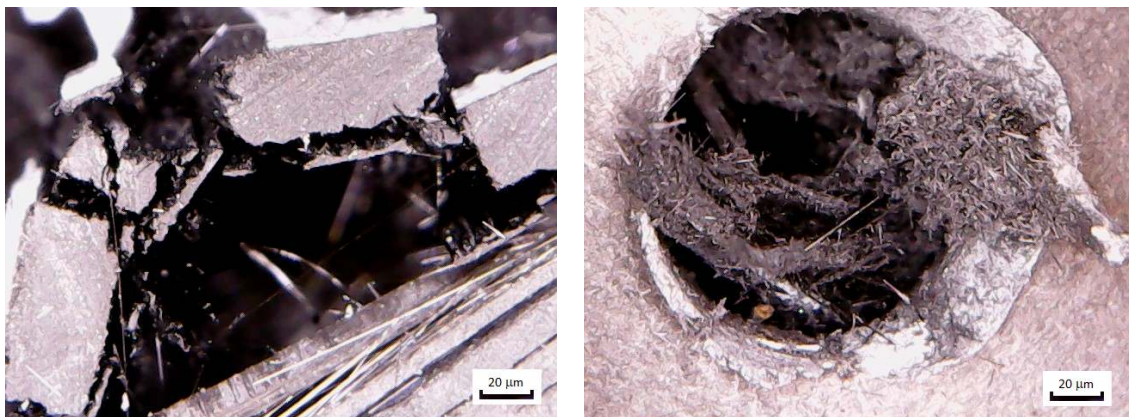


*Ilustración 4-5 Detalle de la perforación parcial con un ángulo de 30°*

#### **4.1.3. Ensayos con punta roma de diámetro 5mm**

El procedimiento fue idéntico al de los casos anteriores. En cuanto al tipo de roturas, los resultados fueron similares, produciéndose fracturas frágiles en la matriz del composite y rotura dúctil en el revestimiento de aluminio.

En la figura 4.6 se advierte la desigualdad en cuanto a la violencia de las roturas. Para la punta de superficie plana circular de 5 mm, la devastación en la matriz del composite de la muestra, con un ángulo de 150° fue mucho más destructiva que la rotura producida por la punta cónica con el mismo ángulo. En la foto de la derecha se aprecia material del composite arrastrado.



*Ilustración 4-6 Roturas del material multicapas, producidas por punta roma.*

En la figura 4.7 se comparan los resultados de los ensayos, tanto de punta cónica, como los de punta roma ( $d= 5\text{mm}$ ). Al contrario, de lo que sucede con la punta cónica, con la punta roma, para los mismos ángulos de elevación del péndulo, las deformaciones en el aluminio se denotaron menores, aunque se observa arrastre del material de la capa predecesora. En el caso de punta roma, con el ángulo de 60° la probeta no fue atravesada por completo.



**Ilustración 4-7 Comparativa entre muestras. A la izquierda resultados de los ensayos punta cónica, y a la derecha los de punta roma (de  $d=5\text{mm}$ ).**

#### **4.1.4. Ensayos con punta roma de 10 mm de diámetro.**

Se sigue el mismo método que en los ensayos anteriores. En ningún caso la punta llega a atravesar la probeta, sino que solo penetra apenas en la capa de fibra de vidrio.

La figura 4.8 muestra la característica más llamativa en estos ensayos. Además de sufrir una rotura frágil en la capa de composite, esta se desplazó por completo siguiendo la deformación del aluminio. Esta deformación desaparecía, al desaparecer la fuerza causante de la misma. En la figura también se observa la matriz termo estable del composite, totalmente fracturada en toda la superficie de la muestra. La deformación plástica del revestimiento de aluminio es considerablemente mayor para el mismo ángulo que en los casos anteriores.



*Ilustración 4-8 Detalle del ensayo con punta roma (d= 10 mm).*

#### 4.1.5. Análisis de los resultados del ensayo de Charpy modificado

En la tabla 4.1 se registran los tipos de daño provocados en las muestras en función de la energía empleada en el ensayo y el tipo de indentador utilizado.

Identador	Energía (Julios-ángulo sexagesimal)				
	300-150	74,4-120	62,7-90	51-61	25,5-30
Punta cónica	A1	A2	A3	A4	C
Punta Roma (d=5 mm)	B1	B2	B3	B0	-
Punta Roma (d=10 mm)	B0	B0	B0	-	-

*Tabla 4-1 relación del daño sufrido en las muestras en función de la energía aplicada.*

Estos resultados demuestran que, en el caso de las botellas para el almacenamiento de gases comprimidos de Tipo III, con aplicaciones de energía superiores 65 J, el estropicio producido en los depósitos es inadmisibles, en cuanto a la seguridad. En depósitos sometidos a presiones de entre 300-700 bar, una pequeña grieta, fisura o corte, imposibilita la presurización, en el mejor de los casos.

Para energías de impacto entre 25-60 J, en los casos de que no sufriera perforación, la deformación de los materiales, también se consideran inadmisibles en cuanto a la seguridad, ya que estas deformaciones pueden evolucionar a fisuras o grietas con consecuencias nefastas en cuanto a la integridad de los depósitos.

## 4.2. ENSAYO A TRACCIÓN

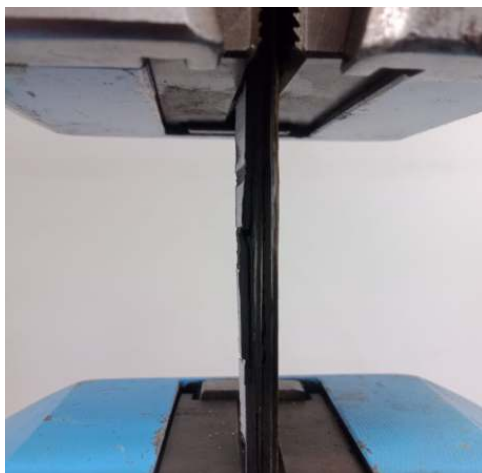
Se realizaron tres ensayos. El primer ensayo de tracción, se estudia el comportamiento de la probeta completa. Para el segundo, y tercer ensayo, se examina, la conducta de los materiales por separado. Por un lado, se ensaya el material compuesto, y, por otro lado, el revestimiento de aluminio

### 4.2.1. Ensayo a tracción de la probeta completa

Se realiza el ensayo siguiendo los pasos descritos en el apartado 5.6.

Los datos iniciales son:  $L_0 = 70$  mm;  $e$  (espesor) = 8,4 mm. La  $S_0 = 186,4$  mm<sup>2</sup>;  $R^2 = 79$  mm<sup>2</sup>;  $r^2 = 71$  mm<sup>2</sup>.

La figura 4.9 muestra el resultado del ensayo, donde la capa de material compuesto, concretamente la matriz termoestable del composite sufrió una rotura frágil en toda su superficie, después de aplicarle una fuerza máxima de 22877 N, por el contrario, en el revestimiento de aluminio no se produjo rotura, y apenas sufrió deformación.



*Ilustración 4-9 Detalle de la probeta sujeta en las mordazas de la máquina de tracción*

#### **4.2.2. Ensayo a tracción en la capa de *composite***

Se sigue la metodología descrita en el apartado "Descripción".

Los datos iniciales son:  $L_0 = 55$  mm;  $e = 4.6$  mm;  $R^2 = 79$  mm<sup>2</sup>;  $r^2 = 74.4$  mm<sup>2</sup>;  $S_0 = 109.6$  mm<sup>2</sup>.

La rotura se produjo al llegar la carga a 18112.3 N. La fractura de tipo frágil (no se observa deformación en la grieta), al igual que en el caso anterior se produce en toda la superficie de la matriz del composite.

#### **4.2.3. Ensayo a tracción en el revestimiento de aluminio**

Se aplica idéntico procedimiento que en los casos anteriores.

Datos iniciales:  $L_0 = 51$  mm;  $e = 3.8$  mm;  $R^2 = 74.8$  mm<sup>2</sup>;  $r^2 = 71$  mm<sup>2</sup>;  $S_0 = 83.2$  mm<sup>2</sup>. En este experimento la fuerza máxima aumenta hasta los 41232,7 N, momento en que se produce la rotura de la probeta.

En la figura 4.10 se observa la rotura del revestimiento de aluminio, que presenta una deformación plástica del material. Lo que determina, que se trata de una rotura dúctil.



*Ilustración 4-10 Detalle de la rotura sufrida por la capa de aluminio.*

### 4.3. DIAGRAMAS DE TENSIÓN DEFORMACIÓN DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN

Para realizar los diagramas de tensión ( $\tau$ ) deformación ( $\epsilon$ ), se ha utilizado la información registrada por el software, sobre la fuerza (F) aplicada a las probetas, y el alargamiento ( $\delta$ ) sufrido por estas, de acuerdo con su sección (A)

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad \epsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

La figura 4.11 muestra la gráfica con las deformaciones sufridas por las muestras en función de la tensión aplicada a las mismas.

En azul, se representa, el comportamiento del revestimiento de aluminio. Este sufre una deformación plástica importante, un 25%, antes de llegar a su límite de rotura, soportando en ese momento unos  $550 \cdot 10^3$  MPa.

En verde se describe la conducta del material compuesto, bajo tensión. Este material por sí solo fue el que menos deformación sufrió antes de la rotura, pero soportó más tensión que la probeta al completo, antes de llegar a su límite de rotura. Unos  $175 \cdot 10^3$  MPa, frente a los casi  $125 \cdot 10^3$ , tolerados por la probeta (en amarillo).

La tensión soportada por la probeta fue menor debido a que su sección era el doble de la del material compuesto, así como la del aluminio, y como demuestra la gráfica, llegó a deformarse hasta un 19% de su longitud.



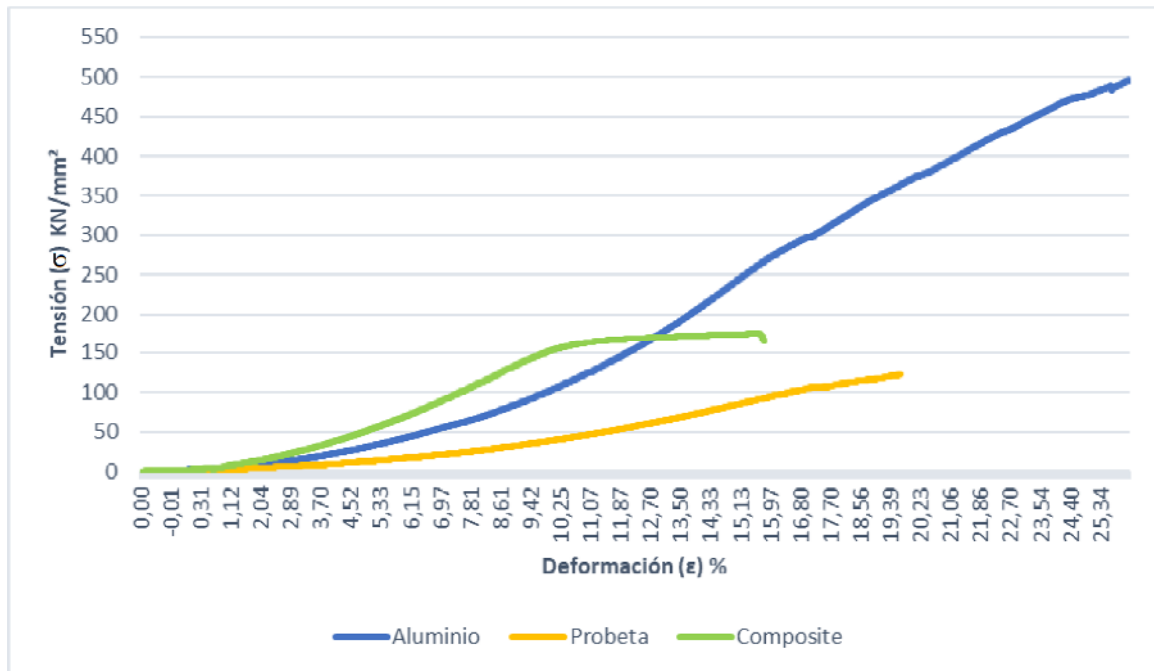


Ilustración 4-11 Grafica tensión/deformación

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1. DISCUSIÓN

El comportamiento de los materiales multicapa, sometidos, tanto a los ensayos de impacto, así como a los ensayos de tracción, ha demostrado que efectivamente la capa de composite aporta resistencia mecánica al conjunto, gracias a la rigidez de los estos materiales, que, como contrapartida, han demostrado durante los ensayos, tener un comportamiento frágil ante el impacto, así como ante la tracción.

Por otro lado, el revestimiento de aluminio ha demostrado después de someterlo a los ensayos de impacto, tener una alta capacidad de deformación, y presentar características dúctiles ante la rotura en los ensayos de tracción. Esto le confiere gran capacidad para absorber energía, tanto en caso de impacto, así como en caso de verse sometido a tracción.

El ensayo de Charpy se modificó con el objetivo de poder asemejarlo en la medida de lo posible a los ensayos de 'Caída de impacto', y de 'Daños superficiales descritos en la normativa vigente. Aunque los ensayos descritos en el reglamento nº 134, se llevan a cabo con depósitos enteros, ya que lo que se estudia es el comportamiento a impacto de toda la estructura del depósito, en el ensayo de Charpy modificado, se ha estudiado el comportamiento a impacto de los materiales que conforman el depósito. Siendo este estudio de sumo interés, ya que puede complementar los ensayos de la normativa.

Los materiales de los depósitos de hidrógeno comprimido en los vehículos PFEM, están diseñados para soportar grandes tensiones, debido a la condición intrínseca de contener un gas a altas presiones. En caso de accidente, las tensiones de trabajo, y los límites de rotura de los materiales, podrían verse comprometidos.

Los ensayos de impacto revelan, que, con tan solo una energía de 50 Julios, una pieza aguzada, podría perforar un depósito de TIPO III. Un componente del vehículo, eventualmente, podría presentar esta forma, debido al accidente.

Los tipos de daños sufridos durante los ensayos son inadmisibles para el correcto funcionamiento de un depósito de hidrógeno comprimido a 300 bar. Aun siendo un daño del tipo B o C0, la normativa vigente en cuanto a botellas de gases comprimido no tolera el uso, si estas presentan algún tipo de arañazo, rayadura, corte, decoloración, etc. o señal de impacto. Según el punto 4.4.2 del manual de instrucciones de la botella, que se adjunta en el anexo de este documento.

En cuanto a las tensiones sufridas por los materiales, en accidentes a más de 24 km/h, las deformaciones sufridas por el vehículo suelen ser exorbitantes. Es decir, a bajas velocidades es posible sufrir tensiones importantes por la deformación de los componentes del vehículo, que pueden ser transmitidas a los depósitos de hidrógeno.

Para terminar, el ensayo Charpy modificado ha demostrado su valía y sencillez para evaluar los daños y la seguridad de los depósitos de hidrógeno. Es capaz de analizar el efecto del impacto en función de la geometría del indentador y la energía de impacto. Se

presenta como una sólida alternativa a los ensayos de ensayo de daños superficiales y de caída de impacto propuestos por la normativa actual.



**Ilustración 5-1 Ensayo de colisión trasera por alcance. Fuente [12]**

La normativa vigente estipula la colocación y distribución de estos depósitos dentro de los vehículos. Los fabricantes han de tomar muy en consideración los elementos deformables de absorción de energía que rodean a los depósitos, ya que no existe por el momento, reglamentación específica a este respecto.

Aunque se trata de una tecnología emergente, los vehículos PFEM, son una gran apuesta de cara a carreteras con 0 emisiones de CO<sub>2</sub>. Posiblemente en un futuro cercano, estas tecnologías no resulten tan lejanas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] HORTAL, Mario Aguer; BARRERA, Ángel Luis Miranda. *El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado*. Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [2] Comisión Europea. *Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo. Por el que se modifica el Reglamento (UE 2019/631)*. [En línea]. Disponible en: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0004.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF)
- [3] Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>
- [4] Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. [En línea]. Disponible en: [https://www.lamoncloa.gob.es/temas/fondos-recuperacion/Documents/30042021-Plan\\_Recuperacion\\_%20Transformacion\\_%20Resiliencia.pdf](https://www.lamoncloa.gob.es/temas/fondos-recuperacion/Documents/30042021-Plan_Recuperacion_%20Transformacion_%20Resiliencia.pdf)
- [5][6] [https://www.draeger.com/es\\_es/Products/Compressed-Air-Breathing-Cylinders](https://www.draeger.com/es_es/Products/Compressed-Air-Breathing-Cylinders)
- [7] <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2019-80822>
- [8] GARRIDO GRUESO, Ismael. *Diseño y cálculo de un depósito de almacenamiento de hidrógeno para un vehículo industrial*. 2020
- [9] O. Santiago, "Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanque," 22-Oct-2017. [En línea]. Disponible en: <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>
- [10] péndulo características técnicas] <https://dokumen.tips/download/link/manual-pendolo-charpy>
- [11] <https://www.upm.es/recursosidi/infraestructura/maquina-de-ensayos-universal-modelo-tn-md-200-de-hoytom/>
- [12] Programa Europeo de evaluación de automóviles nuevos. [En línea]. Disponible en: <https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-de-ocupantes-adultos/rescate-y-extracci%C3%B3n/#>

### 1 Para su seguridad

Estas instrucciones están destinadas a usuarios competentes y cualificados de equipos de protección respiratoria y de sistemas de suministro de aire respirable. El documento proporciona instrucciones de uso, manipulación y mantenimiento seguro de botellas de aire comprimido de acero, aluminio y compuesto de carbono suministradas por Dräger.

#### 1.1 Indicaciones generales de seguridad

- Leer detenidamente estas instrucciones de uso antes de utilizar este producto.
- Respetar rigurosamente las instrucciones de uso. El usuario debe entender completamente estas instrucciones y atenerse a ellas estrictamente.
- El producto debe emplearse según el uso especificado en la sección de Uso Previsto de este documento.
- No eliminar las instrucciones de uso. Asegurarse de que el usuario las guarda y las utiliza adecuadamente.
- Solo los usuarios competentes y cualificados están autorizados a utilizar este producto.
- Cumplir con todas las leyes y regulaciones asociadas a este producto.
- Solo el personal competente y cualificado está autorizado a inspeccionar, reparar y mantener el producto.
- Dräger recomienda cerrar un contrato de servicio con Dräger para todas las actividades de mantenimiento y que todas las reparaciones sean llevadas a cabo por Dräger.
- Solo el personal de servicio cualificado debe inspeccionar y mantener este producto como se indica en la sección Mantenimiento de este documento.
- Utilizar solo piezas de repuesto y accesorios exclusivos de Dräger. En caso contrario, el funcionamiento correcto del producto podría verse afectado.
- No utilizar un producto dañado o incompleto, ni tampoco modificarlo.
- Contactar con Dräger si hubiera algún componente defectuoso o avería.
- El suministro de aire debe cumplir los requisitos de aire respirable de acuerdo con la norma EN 12021.

#### 1.2 Definiciones de símbolos de alerta

Los símbolos de alerta se usan en este documento para llamar la atención al usuario sobre elementos a los que debe prestar atención. A continuación se define cada símbolo:

**ADVERTENCIA**  
Indica una situación potencialmente peligrosa que, si no se evita, puede ocasionar la muerte o lesiones graves.

**ATENCIÓN**  
Indica una situación potencialmente peligrosa que, si no se evita, puede provocar lesiones personales o daños en el producto o el medio ambiente. También puede utilizarse para indicar prácticas inseguras.

**NOTA**  
Indica información adicional sobre cómo usar el producto.

## 2 Descripción

### 2.1 Resumen del producto

Las botellas de aire comprimido se han diseñado y fabricado de acuerdo con los requisitos de la Directiva sobre equipos a presión (PED). Las botellas tienen la marca de conformidad CE para indicar que se han sometido a una valoración de conformidad por parte de un organismo notificado pertinente. La botella tiene un valor nominal de presión de trabajo de 200 bares o 300 bares, y el cuerpo y la válvula de la botella se etiquetan según el rango de presión (véase la Sección 2.5).

Las botellas de Dräger, por lo general, se suministran completamente cargadas, a no ser que las normativas de envío y transporte lo impidan. Las botellas completamente cargadas se rellenan con aire respirable (de acuerdo con la norma EN 12021) a la presión de trabajo a 15 °C.

#### 2.1.1 Válvula de botella

La botella está equipada con uno de los tipos de válvulas de botellas disponibles, entre los que se incluyen las válvulas rectas, de ángulo recto o de flujo transversal (Fig. A). La válvula de la botella tiene la misma presión de trabajo que la botella. La salida de la válvula de la botella normalmente es un conector de equipo G5/8", según EN144-2, aunque también hay disponibles otros tipos de conectores.

Las opciones disponibles de la válvula de la botella incluyen una rueda manual de tipo estándar (no trinquete) o tipo trinquete, una válvula de exceso de flujo (EFV) y un manómetro integral, que se describirán a continuación.

La rueda manual es de color negro, a no ser que la válvula contenga una válvula de exceso de flujo, en cuyo caso será gris o azul (véase la Sección 2.1.3).

#### 2.1.2 Ruedas manuales de tipo trinquete y no trinquete

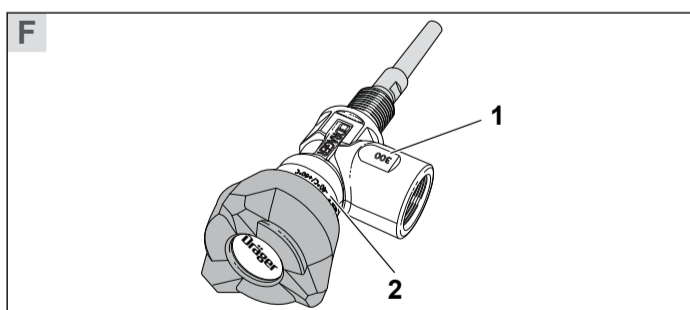
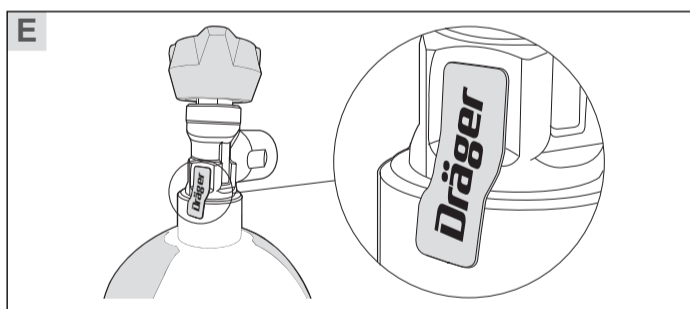
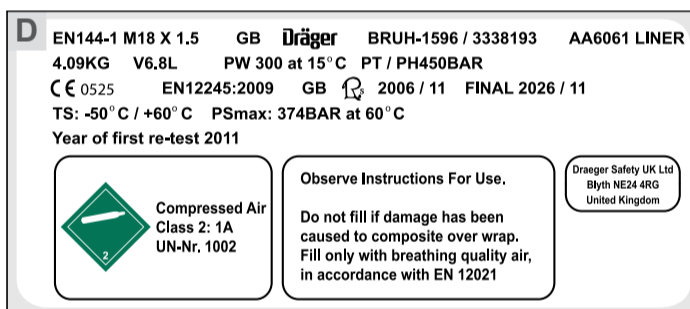
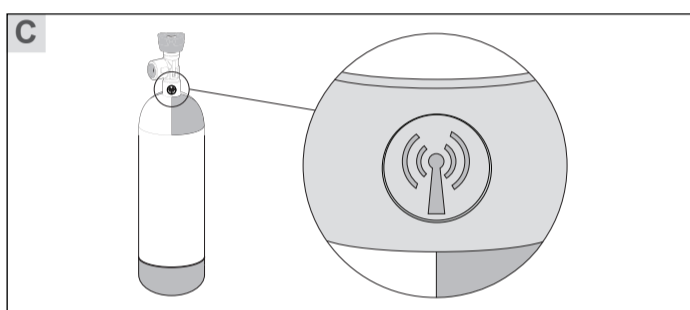
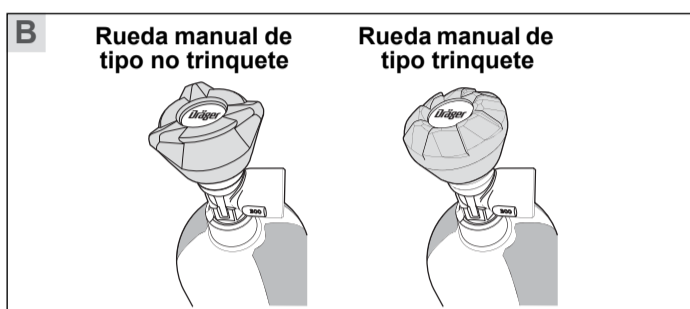
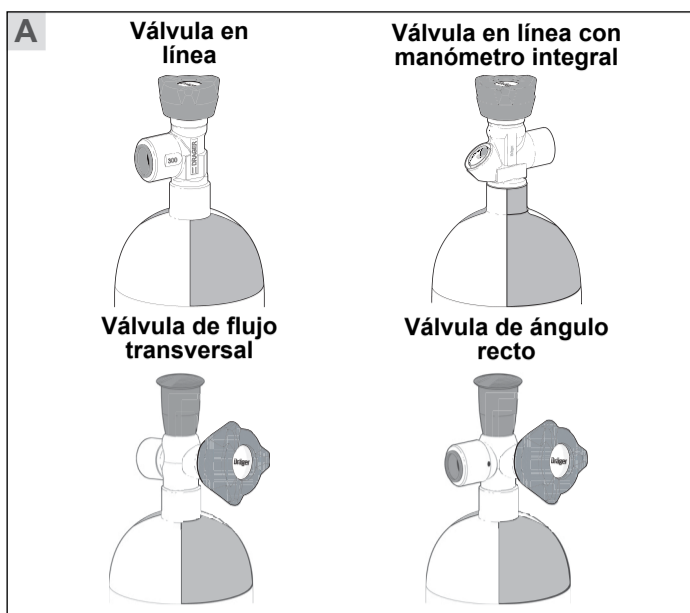
La válvula de la botella tiene una rueda manual de tipo trinquete y no trinquete (Fig. B).

- En un tipo de no trinquete, la rueda manual gira libremente en cada dirección.
- En una rueda manual de tipo trinquete, el mecanismo de trinquete se ha diseñado para evitar que la válvula se cierre de manera involuntaria. La rueda manual gira libremente al abrir la válvula, pero el mecanismo de trinquete restringe el giro al cerrar la botella. Para cerrar la válvula es necesario levantar la rueda manual por encima del trinquete, contra la fuerza de resorte, y girarla en el sentido de las agujas del reloj simultáneamente.

#### 2.1.3 Válvula de exceso de flujo

Una válvula de exceso de flujo (EFV) es una opción disponible para las botellas de aire. Una vez montada, la válvula de exceso de flujo es un dispositivo de seguridad que evita la liberación incontrolada de aire de alta presión en caso de que la válvula de la botella o una tubería de aire de alta presión resulten dañadas. La válvula de exceso de flujo también se activa si la válvula de la botella se abre cuando la salida de esta válvula está abierta a la atmósfera.

La válvula de exceso de flujo se activa cuando sea necesario para reducir la tasa de aire que se escapa, pero no afecta al rendimiento durante el uso normal.



Las válvulas de las botellas que contienen una válvula de exceso de flujo tienen una rueda manual gris en la mayoría de los países, pero también puede ser azul en algunos países (p. ej., Suiza), para cumplir con las normativas nacionales.

#### 2.1.4 Manómetro integral

Algunas válvulas de botella están equipadas con manómetros integrales para indicar la presión de aire de la botella. El manómetro se conecta al lado de la botella de la válvula para proporcionar una lectura de presión constante, incluso cuando la válvula de la botella está cerrada.

#### 2.1.5 RFID

RFID (identificación por radiofrecuencia) es una opción disponible para las botellas de aire que permite la gestión y seguimiento electrónicos de los recursos que utilizan un lector de radiofrecuencia. Si se incluye esta opción, se coloca una etiqueta de RFID en un collar de goma en el cuello de la botella (Fig. C).

### 2.2 Uso previsto

Las botellas de aire comprimido Dräger están diseñadas para suministrar aire respirable a los equipos de protección respiratoria y a los sistemas de suministro de aire respirable de Dräger, homologados por uno de los siguientes estándares técnicos: EN137, EN402 o EN1146. Cuando se monta en un dispositivo de protección respiratoria homologado de Dräger, la botella proporciona al usuario protección respiratoria para trabajar en entornos contaminados o con deficiencia de oxígeno.

Para conocer el rango de temperatura de funcionamiento de la botella, consultar las instrucciones de uso del equipo de respiración correspondiente. Los rangos de temperatura de la botella, el revestimiento y la válvula de botella en las etiquetas de los productos y en este documento son información destinada únicamente a fabricantes.

### 2.3 Limitaciones de uso

Las botellas de aire comprimido de Dräger no están homologadas para bucear y no deben sumergirse en agua dulce o salada.

### 2.4 Homologaciones

Las normas, directrices y directivas europeas según las cuales está aprobado este producto se especifican en la declaración de conformidad (ver declaración de conformidad o [www.draeger.com/product-certificates](http://www.draeger.com/product-certificates)).

Los usuarios tienen que cerciorarse de que las botellas cumplan cualquier norma nacional pertinente en el país de uso. Póngase en contacto con Dräger, una agencia de homologación nacional o una estación de pruebas acreditada para recibir asesoramiento si fuera necesario.

### 2.5 Explicación de marcas y símbolos

#### 2.5.1 Marcas de las botellas

Las botellas se han diseñado solo para contener aire respirable y están etiquetadas y tienen códigos de colores de acuerdo con las normas europeas. El código de color de la botella está pintado en el hombro de la misma.

En la Fig. D se muestra un ejemplo de la información que aparece en la etiqueta de una botella de compuesto de carbono de Dräger, y este se explica en la siguiente tabla.

Marcas	Explicación
EN144-1 M18 X 1,5	Estándar de la rosca y tamaño
GB	País de fabricación
Dräger	Nombre del fabricante
BRUH-1596 / 3338193	Número de serie único / Número de plano del diseño homologado
AA6061 LINER	Especificación de la aleación del revestimiento de la botella
4,09 KG	Peso sin presión nominal en kilogramos, sin la válvula
V 6,8 L	Capacidad mínima de agua en litros
PW 300 at 15 °C	Presión máxima de trabajo en bares, con una temperatura de referencia de 15 °C
PT / PH 450 BAR	Presión de prueba
CE 0525	Marca de CE y número de identificación del organismo notificado
EN12245:2009	Estándar que especifica el diseño, las pruebas y la producción de la botella
GB	País de homologación y marca del organismo notificado
2006/11	Fecha de la primera prueba de presión hidrostática. También se muestra en formato de mes/año (03/2014 o 03/14)
FINAL 2026/11	Final del periodo de vida útil previsto, después del cual la botella no debería utilizarse. También se muestra como FIN 2026/11
TS: -50 °C / +60 °C	Rango de temperatura de funcionamiento
PSmax: 374 BAR at 60 °C	Presión máxima de la botella desarrollada a 60 °C
Year of first re-test 2011	Esta fecha refleja las normativas nacionales relacionadas con la revisión periódica de la botella aplicables en el país de uso. La botella debe volver a certificarse antes del final del mes de la primera prueba de presión hidrostática (noviembre, en este caso)
	Indica un gas comprimido no comburentes

Cuando la válvula se monta durante la fabricación, se coloca una etiqueta adhesiva (Fig. E) en la junta entre el cuello y la válvula de la botella. La etiqueta indica que la junta está sujeta a homologación de acuerdo con la Directiva sobre equipos a presión (PED), e identifica la botella como un auténtico producto de Dräger.

La etiqueta debe estar presente e intacta cuando se reciba la botella. Si no es así, se debe contactar con Dräger o con el proveedor. La etiqueta puede romperse o desprenderse durante la vida útil de la botella, pero esto no tendrá ningún efecto perjudicial en la misma.

#### 2.5.2 Marca de la válvula de la botella

La marca de la válvula de la botella (Fig. F, elemento 2) se graba en el cuerpo de la válvula; la presión de trabajo (Fig. F, elemento 1) se marca en el cuerpo de la válvula o en el puerto de salida. A continuación, se muestra un ejemplo de la marca de válvulas y su explicación:

#### K800-502.0-S8 EN144 TT-0589 XX/XX M18 F -40 °C/+60 °C

Marcas	Explicación
K800-502.0-S8	Tipo de válvula
EN144	Estándar aplicado
π	Indica que la válvula cumple con los requisitos de la Directiva sobre equipos a presión transportables (TPED)
0589	Número de identificación del organismo notificado
XX/XX	Año y mes de fabricación
M18	Rosca de la botella
F	De acuerdo con la norma EN137
-40 °C/+60 °C	Rango de temperaturas

### 3 Uso

#### 3.1 Manipulación de la botella

- Las botellas de aire comprimido son pesadas y moverlas puede ser complicado y tedioso. Una manipulación inadecuada puede provocar lesiones o la muerte. Al manejar las botellas, se deben tomar todas las medidas de precaución necesarias para evitar accidentes.
- Solo personal competente y cualificado, que esté familiarizado con las técnicas de manipulación correctas y con los peligros relacionados con las botellas de aire comprimido, debe manipular las botellas.
- Advertir al personal no cualificado de los peligros relacionados con la manipulación, el transporte y el almacenamiento de las botellas de aire comprimido y no permitirles manipularlas.
- Sujetar el cuerpo de la válvula o el cuerpo de la botella para transportarla. No transportar la botella sujetando la rueda manual de la válvula.

#### 3.2 Preparación y uso de la botella

##### 3.2.1 Indicaciones generales

- Llevar a cabo una inspección visual de la botella (véase la Sección 4.4).
- Asegurarse de que la botella se encuentra dentro del periodo de vida útil previsto y de la revisión periódica indicada por la fecha de prueba de la botella.
- Antes de colocar la botella en el equipo de protección respiratoria, eliminar el tapón de cierre de la salida de la válvula de la botella. Sujetar el tapón para volver a colocarla.
- Colocar la botella y llevar a cabo pruebas de fugas y de funcionamiento, tal y como se describe en las instrucciones de uso que se proporcionan con el equipo de protección respiratoria.
- No comenzar ninguna operación con una botella que tenga menos del 90 % de su capacidad total (o más, cuando las normativas nacionales así lo requieran). Si la botella tiene menos del 90 % de su capacidad total, cargar por completo la botella a la presión de trabajo nominal (véase la Sección 4.3).
- La duración de la protección depende de la cantidad de aire disponible en la botella y del ritmo respiratorio del usuario.

##### 3.2.2 Poner en funcionamiento la válvula de la botella

**ADVERTENCIA**  
No abrir la válvula de la botella a menos que esté conectada a un equipo de protección respiratoria o a un manómetro.

**ATENCIÓN**  
No aplicar una fuerza excesiva o utilizar herramientas para abrir o cerrar la válvula de la botella.

- Para abrir la válvula, gire completamente la rueda en el sentido contrario a las agujas del reloj (hasta que mire hacia la parte superior de la rueda manual).
  - Una rueda manual de tipo trinquete se elevará sobre los enganches del trinquete durante la apertura.
  - Una vez que la rueda manual de tipo trinquete esté completamente abierta, se debe girar en el sentido de las agujas del reloj menos de 60°, hasta que el primer trinquete encaje, para evitar que la válvula se cierre de manera involuntaria.
- Para cerrar la válvula, se debe girar la rueda manual totalmente en el sentido de las agujas del reloj.
  - En una rueda manual de tipo trinquete, elevar simultáneamente la rueda manual sobre los enganches del trinquete y girar en el sentido de las agujas del reloj.
- Para abrir o cerrar completamente la válvula, se debe girar hasta que se note que hay resistencia y que no se puede girar más. Esto garantiza que:
  - No hay ninguna limitación del aire cuando se abre la válvula.
  - La liberación de aire se evita cuando la válvula está cerrada.
- Se requieren más de dos vueltas completas de la rueda manual para que la posición de la válvula pase de estar completamente cerrada a completamente abierta.

#### 3.3 Después del uso

- Inmediatamente después de su uso, se debe cerrar la válvula de la botella para evitar que entre humedad en la misma.
- Si es necesario, retirar la botella del equipo de protección respiratoria tal y como se describe en las instrucciones de uso proporcionadas con el equipo. Si la botella se retira, volver a colocar inmediatamente el tapón de cierre en la salida de la válvula de la botella.

### 4 Mantenimiento

#### 4.1 Tabla de mantenimiento

Mantener y probar la botella, incluidas las botellas que estén fuera de uso, de acuerdo con la tabla de mantenimiento. Registrar todos los detalles del mantenimiento y pruebas. Podría ser necesaria la realización de inspecciones y pruebas adicionales en el país en el que vaya a utilizarse el dispositivo para garantizar el cumplimiento de la normativa nacional.

Componente/Sistema	Tarea	Antes del uso	Después del uso	Cada mes
Botella	Inspeccionar y limpiar si es necesario	○	○	○
	Comprobar la fecha de prueba de la botella	○		○
	Comprobar la presión cargada	○		○
	Cargar a la presión de trabajo (véase la Sección 4.3)	○		
	Inspección periódica (véase la nota 1 a continuación)	De acuerdo con las regulaciones nacionales del país en cuestión		
Válvula de botella	Revisión (véase la nota 1 a continuación)	Durante la inspección periódica de la botella		

#### Nota

○ Recomendaciones Dräger

- Estas tareas de mantenimiento solo las puede llevar a cabo un técnico competente especialista en botellas. Los propietarios o usuarios de las botellas deben ponerse en contacto con Dräger o con una estación de prueba o reparación acreditada cuando sea necesario realizar dichas tareas.

#### 4.2 Limpieza

**ATENCIÓN**  
La limpieza con granallado de granalla redondeada o de aristas vivas, productos químicos de limpieza, decapantes y disolventes podría dañar la botella o la válvula. No utilizar métodos o materiales de limpieza que puedan provocar daños.

Cuando sea necesario, limpiar la botella con detergente a base de jabón neutro. Contactar con Dräger u otro personal de servicio competente si se requieren tareas de limpieza adicionales.

#### 4.3 Recarga de botellas de aire

**ADVERTENCIA**  
La calidad del aire de las botellas de aire comprimido debe cumplir los requisitos de la norma EN 12021.

- Las botellas de Dräger están diseñadas únicamente para su uso con equipos de protección respiratoria de aire comprimido. Cargar las botellas solo con aire adecuado para la respiración; no se permiten otros gases o mezclas.
- Consultar las instrucciones adjuntas a la unidad de carga para recargar la botella.
- Llevar a cabo una inspección visual de la botella (véase la Sección 4.4).
- Solo cargar botellas de aire comprimido que:
  - Cumplan con las normativas nacionales.
  - Incluyan la fecha de la última inspección periódica, así como el símbolo de identificación o el nombre de la estación de prueba acreditada.
  - Se encuentren dentro del periodo de vida útil previsto y no tengan atrasada la siguiente revisión periódica.
  - No estén dañadas ni corroídas.
- Para evitar la entrada de humedad en la botella, es necesario asegurarse de que la válvula de la botella permanece cerrada hasta que se conecte a la unidad de carga.
- Para prevenir la sobrecarga de la botella, Dräger recomienda utilizar un dispositivo de limitación de la presión en el compresor de carga.
- Dräger recomienda una tasa de carga máxima de 27 bares/minuto (la carga rápida incrementará la temperatura, provocando una carga incompleta).
- Recargar a la presión de trabajo nominal (indicada como PW en la etiqueta de la botella):
  - El aumento de la temperatura de la botella durante la carga resulta en un aumento de la presión de la botella. Si se carga la botella a la tasa de carga máxima, el aumento de la presión por encima de la presión de trabajo puede ser significativo. El aumento de presión permisible máximo es del 10 % de la presión de trabajo. Por ejemplo, una botella de 300 bares puede llegar como máximo a 330 bares.
  - Una vez finalizada la carga, permitir que la botella se enfríe y, a continuación, volver a comprobar la presión. La presión de la botella a 15 °C no debe superar la presión de trabajo nominal máxima que está marcada o estampada en la botella; aumentar o liberar la presión si es necesario.

#### 4.4 Inspección de botellas

##### 4.4.1 Inspección visual

Si la botella está equipada con una cubierta protectora, se debe retirar dicha cubierta antes de inspeccionar la botella.

Inspeccionar minuciosamente la botella y la válvula, y garantizar que no presentan ningún daño. Las típicas señales de daños que pueden afectar a la botella incluyen impacto, abrasión, corte, corrosión y decoloración. Informar sobre los daños al personal de servicio o a Dräger, y no utilizar la botella a menos que sea seguro.

##### 4.4.2 Botellas de compuesto de carbono de Dräger

Todos los daños que se produzcan en las botellas de compuesto de carbono de Dräger requieren inspección por parte de expertos para garantizar que la botella es segura para uso continuado. Contactar con el personal de servicio o con Dräger si se producen daños.

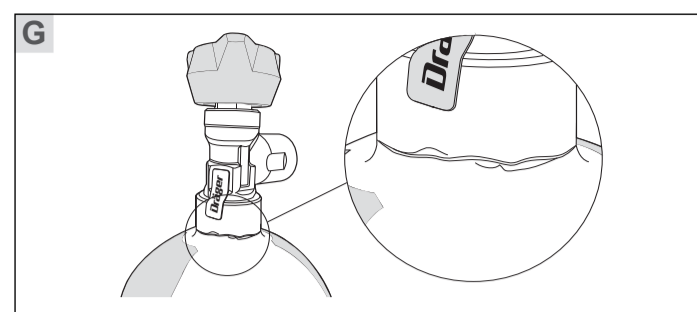
En el manual de inspección y el cartel se incluyen consejos sobre los daños provocados por cortes, abrasión, impactos, altas temperaturas o fuego, y productos químicos. El manual y el cartel están orientados al personal de servicio cualificado y están disponibles en Dräger a petición.

##### Etiqueta de botella ilegible

La etiqueta de la botella debe ser legible, ya que contiene información de seguridad importante. Si la etiqueta es ilegible, se debe devolver la botella a Dräger para su evaluación. Si Dräger puede identificar la botella, se puede sustituir la etiqueta y se devolverá la botella al propietario. En caso contrario, no se permitirá el uso de la botella.

##### Hueco en el cuello de la botella

Algunas botellas de compuesto de carbono tienen un pequeño hueco entre el material compuesto y el cuello de la botella (Fig. G). Aparece como un hueco en el recubrimiento de gel o una grieta en la pintura, y puede parecer mayor cuando la botella está completamente cargada. Este hueco no es un fallo, se produce en algunas botellas debido a la expansión/contracción a medida que la botella se carga y se descarga. El hueco del cuello no reduce la seguridad de funcionamiento de la botella y no supone un motivo para inutilizar la botella o solicitar una reparación.



#### 4.5 Inspección periódica de la botella

La inspección periódica es una comprobación de la botella que se debe llevar a cabo en una estación de prueba acreditada. La comprobación incluye una inspección visual y una prueba de presión hidrostática para garantizar que la botella sigue siendo segura y para volver a certificarla para su uso continuado.

La fecha de la primera prueba de presión hidrostática (realizada durante la fabricación) y de la primera inspección periódica necesaria se marcan en la botella durante la fabricación. La estación de prueba que realice las siguientes inspecciones periódicas marcará la fecha de las mismas en la botella.

Se deben realizar inspecciones periódicas de las botellas de Dräger de acuerdo con los estándares europeos o las regulaciones nacionales aplicables en el país de uso. Actualmente, la frecuencia de dichas inspecciones corresponde a cinco años para los países de la Unión Europea. Cuando venza la inspección periódica, la botella se debe certificar de nuevo antes del final del mes que aparece en la fecha de la primera prueba de presión hidrostática.

#### 4.6 Final del periodo de vida útil previsto

Para las botellas que tengan una vida limitada, el final del periodo de la vida útil previsto es la fecha tras la cual no se debe utilizar la botella. Generalmente, se registra en la botella como FINAL o FIN con una fecha. Las botellas de compuesto con vida limitada tienen un periodo de vida útil de 15, 20 o 30 años como se indica en la etiqueta de la botella.

Algunas botellas tienen una vida útil ilimitada. Para indicar que una botella de compuesto tiene una vida útil ilimitada se incluye la marca NLL. Todas las botellas de acero y aluminio tienen una vida útil ilimitada y, por tanto, no incluyen ninguna marca para indicar el final de ese periodo.

El periodo de vida útil previsto de una botella solo es válido si se llevan a cabo las inspecciones periódicas necesarias y la botella no está dañada.

#### 4.7 Reparación de botellas

No intentar ninguna reparación en la botella o la válvula. No extraer la válvula de la botella. Contactar con el personal de servicio o con Dräger si es necesario realizar alguna reparación.

Hay un manual técnico disponible de Dräger para los técnicos competentes especialistas en botellas. En el manual se incluye una descripción y los procedimientos de mantenimiento y reparación de las botellas y las válvulas. Contactar con Dräger para más información.

### 5 Transporte y almacenamiento

Dräger recomienda seguir estas medidas durante el transporte y el almacenamiento para proteger las botellas frente a daños y reducir el riesgo de contaminación interna.

- Cerrar la válvula de la botella por completo y colocar un tapón de cierre para la válvula.
- Comprobar que la botella no esté completamente descargada. Dräger recomienda mantener una presión mínima de 2 bares en la botella.
- Inspeccionar las botellas almacenadas para comprobar la presión y si presentan daños regularmente (al menos una vez al mes).
- Transportar y almacenar las botellas en instalaciones diseñadas con tal fin y tener en cuenta las siguientes recomendaciones:
  - No exponer las botellas al fuego o temperaturas que puedan causar daños. El rango de temperaturas de almacenamiento para botellas cargadas es de -30 a +60 °C.
  - No exponer las botellas a contaminación por polvo o arena.
  - No exponer las botellas a sustancias corrosivas.
  - Fijar las botellas durante el transporte para evitar que se produzcan daños por impactos y asegurarse de que no sobresalen por los lados o la parte trasera del vehículo de transporte.
  - Transportar y almacenar las botellas en su embalaje original si es posible.
  - Separar las botellas llenas de las vacías e identificar claramente las áreas de almacenamiento.

### 6 Desecho

**NOTA**  
No desechar la botella de acuerdo con las regulaciones habituales de eliminación de residuos.

Una botella que sobrepase el final de su periodo de vida útil previsto o para la que, durante una inspección, se determine que está dañada y no se puede reparar, se debe destruir. Solo Dräger o una estación de prueba o reparación acreditada puede llevar a cabo la destrucción de la botella, lo que supone dañar la botella lo suficiente para evitar que contenga gas a presión. Contactar con el personal de servicio o con Dräger si se necesita destruir la botella.