



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad Zaragoza**

---

PROYECTO FIN DE CARRERA

# DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UN REMOLQUE PARA EL TRANSPORTE DE BOTELLAS DE HIDRÓGENO

Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica

Universidad de Zaragoza

AUTOR: Alberto Curieses Fernández

DIRECTOR: Ramón Miralbés Buil

CONVOCATORIA: Junio 2012



Para comenzar, deseo expresar mi gratitud a Ramón Miralbés, profesor del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, y a los docentes de dicho departamento, tanto por la atención prestada durante la realización del proyecto como por el ofrecimiento de esté.

A mis padres, por su apoyo incondicional, a mis hermanos y al resto de mi familia, por vuestra confianza en mí.

A todos mis profesores, desde el colegio hasta la universidad, porque llegar hasta aquí también se debe a su esfuerzo y dedicación.

ÍNDICE:

1.- INTRODUCCIÓN.....	6
1.1.- OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	8
1.2.- METODOLOGÍA .....	8
2.- FASES DEL PROYECTO .....	9
2.1.- MODELADO CAD MEDIANTE PATRAN .....	9
2.2.- DISCRETIZACIÓN MEF MEDIANTE PATRAN.....	9
2.3.- ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES Y MATERIALES .....	9
2.4.- CASOS DE CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO .....	9
2.5.- CÁLCULO MEDIANTE ÁBAQUS .....	10
2.6.- POSTPROCESO MEDIANTE ABAQUS .....	10
2.7.- REDISEÑO ESTRUCTURAL.....	10
2.8.- CÁLCULO DE UNIONES ATORNILLADAS .....	10
3.- DATOS INICIALES.....	12
3.1.- SITUACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y REQUERIMIENTOS INICIALES.....	12
3.2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS BOTELLAS DE HIDROGENO.....	13
3.3.- DISTRIBUCIÓN DE LOS APOYOS DE LAS BOTELLAS .....	14
3.4.- DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA.....	14
3.4.1.- VISTA ISOMÉTRICA.....	14
3.4.2.- VISTA EN PLANTA.....	15
3.5.- MATERIAL Y SUS PROPIEDADES .....	15
3.6.- UNIONES .....	15
3.7.- CARGAS .....	16
3.8.- CRITERIOS DE RIGIDEZ Y DISEÑO UTILIZADOS .....	16
4.- REALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	18
4.1.- IMPORTACIÓN DEL ARCHIVO, DIVISIÓN EN PARTE TRASERA Y DELANTERA.....	18
4.2.- CREACIÓN DE SUBGRUPOS PARA CADA ELEMENTO Y CONVERSIÓN DE VOLÚMENES A SUPERFICIES .....	19

4.3.- SIMETRÍA, ESTUDIO DEL CORTE POR PLANOS PARA EL POSTERIOR MALLADO, CAMBIO DE ESCALA.....	22
4.4.- MALLADO Y VERIFICACIÓN DEL MALLADO .....	24
4.5.- DEFINICIÓN MATERIAL Y SUS PROPIEDADES, APLICACIÓN DE ESPESORES EN LA ESTRUCTURA Y EMPOTRAMIENTOS.....	26
4.6.- IMPORTACIÓN DEL ARCHIVO A ABAQUS.....	28
4.7.- ENSAYOS .....	28
4.7.1.- ENSAYO CON IMPACTO 2G DELANTE .....	30
4.7.2.- ENSAYO CON IMPACTO 2G DETRÁS.....	33
4.8.- VERIFICACIÓN.....	36
4.8.1.- VERIFICACIÓN ESPESORES DELANTE 2MM.....	36
4.8.2.- VERIFICACIÓN ESPESORES DETRÁS 4MM.....	36
4.9.- CÁLCULO TORNILLERÍA .....	37
4.10.- ANÁLISIS.....	40
4.10.1.- ANÁLISIS DE TENSIONES MÁS DESFAVORABLES EN LOS TORNILLOS .....	40
4.10.2.- ANÁLISIS DE TENSIONES MÁS DESFAVORABLES EN LAS BARRAS.....	41
4.10.3.- REEDISEÑO ESTRUCTURAL.....	45
5.- CONCLUSIONES.....	46
5.1.- BIBLIOGRAFÍA.....	47
5.2.- CONSULTAS WEB .....	47
ANEXOS .....	48
CÁLCULO DE UNIONES ATORNILLADAS A FLEXIÓN.....	49
PERFILES DE TORNILLOS.....	52
LA TEORÍA DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	53
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO GASEOSO.....	56
CONFINAMIENTO DEL HIDRÓGENO.....	58
PREVENCIÓN Y EXTINCIÓN DE INCENDIOS DE HIDRÓGENO.....	61
TABLA DE ESPESORES BARRAS.....	63

ACUERDO INTERNACIONAL SOBRE EL TRANSPORTE DE MERCANCIAS PELIGROSAS POR CARRETERA (ADR) .....	65
IMÁGENES ENSAYO ESTRUCTURA DETRÁS 2MM .....	67

## 1.- INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo el cálculo, diseño y optimización de la estructura, (comúnmente conocida como testero), utilizada en un semirremolque para el transporte de botellas de hidrógeno, y cuya finalidad es proteger al resto de usuarios de la vía en caso de accidente y desprendimiento de la carga. Señalar aquí que estas estructuras se rigen por la normativa básica de cálculo de estructuras y por el Acuerdo Europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR).

Se trata de un proyecto de investigación llevado a cabo por el departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza.

La motivación a la realización de este proyecto se debe a que la mayor fracción de la combustión procede hoy día de los combustibles fósiles lo cual no es sostenible a muy largo plazo por la limitación de sus reservas, algunas de las aplicaciones energéticas podrán sustituirse por otro tipo de fuentes energéticas, como la eléctrica de origen renovable, pero muchas otras, particularmente para el transporte, necesitarán un combustible químico.

El combustible idóneo en este caso es el hidrógeno, que puede producir energía tanto por llama (combustión, bien en motores de explosión interna, bien en turbinas) como por oxidación electroquímica en pilas de combustible.

En el mercado del transporte están surgiendo proyectos innovadores relacionados con automóviles, camiones, autobuses y aviones que emplean el hidrógeno para su propulsión lo que supone sin duda alguna un paso hacia delante en la difusión del hidrógeno dentro de nuestra sociedad.

El hidrógeno se utiliza también en el sector de la alimentación para la hidrogenación de los aceites y grasas vegetales y animales, tiene aplicación en el campo metalúrgico por su habilidad para reducir los óxidos metálicos y prevenir la oxidación en tratamientos térmicos de ciertos materiales y aleaciones. Además, tiene uso en el corte y la soldadura de metales. Por otro lado, el hidrógeno es extensamente empleado en la síntesis del amoníaco y en las operaciones de refinado del petróleo. A su vez el hidrógeno líquido se emplea como combustible primario de los cohetes espaciales junto con oxígeno o fluoruros y como combustible en los cohetes de propulsión nuclear y los vehículos espaciales.

Visto la importancia que está tomando, ha aparecido la necesidad de desarrollar estructuras capaces de soportar además de la masa de las botellas, impactos en caso de accidente. Nuevas gasolineras impulsan este sector, demandando un transporte en estado gaseoso y a alta presión, deberemos estar atentos a la normativa que obliga a las empresas a manipular estas botellas tanto vacías como llenas con precaución.

Es por ello que resulta necesario dimensionar los testeros de los semirremolques de forma que sean capaces de soportar las cargas que puedan aparecer y transmitirlos eficazmente a la estructura básica del remolque.

Las herramientas de diseño en ingeniería usadas para el desarrollo de nuevos productos han experimentado recientemente una evolución muy positiva, obteniendo estructuras nuevas óptimas en comparación a las obtenidas por medios tradicionales.

### 1.1.- OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

Con este proyecto se busca aplicar los conocimientos adquiridos en asignaturas como Elasticidad y Resistencia de Materiales, Diseño de Máquinas y Estructuras, al mundo real. Para ello, seremos capaces de usar las fórmulas apropiadas en cada situación y ayudarnos de los programas informáticos de ingeniería para las operaciones complejas.

El alcance de este proyecto va dirigido para fomentar y facilitar a todas esas empresas que quieran impulsar un sector de energías limpias y generar el menor impacto ambiental posible adelantándose a la futura demanda y cada vez mas presente de nuevos combustibles, explotando un mercado en auge.

Se buscará, el diseño de un testero acondicionado a la normativa vigente, con el objetivo de cumplimiento de todos los ensayos, así como de los requisitos de seguridad.

### 1.2.- METODOLOGÍA

En este proyecto se partirá de las medidas normalizadas de un testero para el transporte de botellas de hidrógeno, por lo que la distribución de las vigas no variará en gran medida de la planteada.

Con estos datos iniciales, se desarrollará el diseño de la estructura mediante el programa Patran. Se discretizarán las estructuras dotándolas de un espesor adecuado para los cálculos resistivos, se realizarán ensayos de impacto con el programa Abaqus y en función de los resultados obtenidos, optimizaremos dicho diseño de las vigas para posteriormente facilitar la situación de los puntos más críticos. Las uniones atornilladas de los apoyos serán calculadas mediante las herramientas del anexo A.

Los apoyos y la estructura se convertirán en superficies para ser discretizadas mediante el Método de los Elementos Finitos (anexo C) para un mejor análisis de su comportamiento. Para ello, se dará uso de los programas MSC Patran. Una vez analizadas y posteriormente realizado el ensayo de choque, se podrán calcular los espesores necesarios de las barras y soportes para la fijación de la estructura a la base del remolque del camión, teniendo siempre en cuenta los parámetros de seguridad.

## **2.- FASES DEL PROYECTO**

### **2.1.- MODELADO CAD MEDIANTE PATRAN**

En primer lugar, se exportará el archivo .igs al programa Patran con la estructura en Patran, se convertirán todos los volúmenes en superficies, será necesario crear diferentes grupos para las barras, soportes y chapas e ir uno a uno modificando con cuidado, por último, se modificarán las esquinas redondas de las chapas por esquinas en ángulo recto para poder unir las entre sí en un posterior mallado.

Mediante el programa Patran se cortará por planos las superficies para obtener una malla uniforme en las uniones, y se continuará con la discretización.

### **2.2.- DISCRETIZACIÓN MEF MEDIANTE PATRAN**

Después de modelarlo, será discretizado con el programa MSC Patran, se discretizará de forma manual cada una de las barras, placas de anclaje y chapas de refuerzo mediante elementos tipo lámina (o Shell) y se aplicarán condiciones al mallado para que exista equivalencia en las zonas de unión de los diversos elementos entre si.

### **2.3.- ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES Y MATERIALES**

En tercer lugar, con el programa Patran se asignarán tanto el material como las propiedades a los diferentes elementos, así como espesores, así mismo en el ( Anexo G ) constan unas tablas con los espesores de las barras, apoyos y chapas para los distintos ensayos.

### **2.4. CASOS DE CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO**

En cuarto lugar, se tendrá en cuenta el impacto de la botella que causa el caso más desfavorable en nuestra estructura (en este caso la botella central). Se discretizará la cabeza de la botella de forma que tenga un espesor y unas propiedades equivalentes de forma que el peso de la cabeza sea el mismo que el de la botella completa y llena de gas. Para ello se ha calculado la densidad equivalente.

Con ello se realiza un impacto de acuerdo a las condiciones impuestas por el ADR (ACUERDO INTERNACIONAL SOBRE EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS POR CARRETERA) por lo que se impone a todo el modelo una aceleración longitudinal al vehículo de 2g en ambas direcciones para ensayar cada uno de los testers.

Se definen las condiciones de contorno, en los apoyos debido al propio peso se fijará en la dirección Y. Los nodos limítrofes a los tornillos se empotrarán en todas las direcciones.

Tras esto se exportará el modelo a abaqus.

## 2.5 CÁLCULO MEDIANTE ABAQUS

Se importará el archivo .inp ya modificado y, mediante este programa se procederá a realizar el cálculo del choque de la botella central de hidrógeno contra los testeros delantero y trasero.

## 2.6. POSTPROCESO MEDIANTE ABAQUS

Se analizarán los resultados obtenidos en el vehículo para obtener la respuesta del mismo atendiendo a criterios de rigidez y resistencia en la estructura; además se analizarán las gráficas de la energía cinética y de la energía total y los esfuerzos y tensiones en cada una de las piezas para cualquier momento del impacto de la botella y, con ello, se compararán con los criterios de diseño impuestos a la estructura tanto para la tensión como para la deformación.

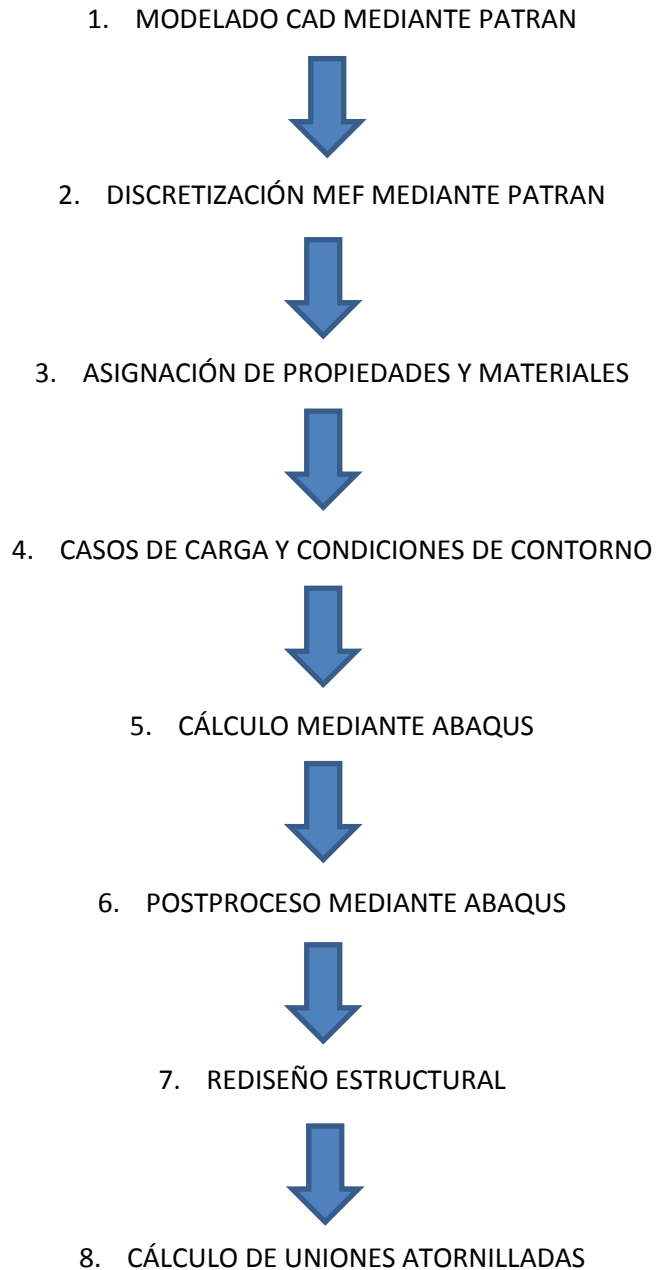
## 2.7 REDISEÑO ESTRUCTURAL

Cuando la gráfica de la energía cinética no se hace cero, o algún elemento sobrepasa los esfuerzos de rotura, se rediseñará la estructura en este caso se aumentará el espesor, para que soporte el ensayo de carga de la parte trasera dado que las barras se deforman y permiten que la bombona pase entre ellas, en el caso delantero, ocurre lo mismo pero la chapa anexa termina por detener la botella tras el impacto.

## 2.8. CÁLCULO DE UNIONES ATORNILLADAS

Partiendo de los datos de las mayores reacciones producidas en los apoyos y tras verificar que el diseño cumple con los criterios de diseño impuestos se analizan las uniones atornilladas de los testeros con el vehículo semirremolque.

# Esquema



### **3.- DATOS INICIALES**

#### **3.1.-SITUACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y REQUERIMIENTOS INICIALES**

Se quiere construir la estructura del remolque de un camión, de dimensiones de 2.4m x 12m (ancho/largo), y en la que se quiere transportar botellones de hidrógeno. Los apoyos de la estructura estarán a: 0.7,1.5 y 2.3 metros.



*Figura 1: Vista de la estructura del camión.*

Características del camión de botellones:

- Botellones de gran capacidad posicionados en forma piramidal.
- Armario de dispositivos para el control completo del camión.
- Testeros de protección delantero y trasero.
- Sujeción de los botellones con sirgas de refuerzo y protección.

### 3.2.-CARACTERÍSTICAS DE LAS BOTELLAS DE HIDRÓGENO

Las botellas empleadas en la estructura, son de acero con un  $E:2.1 \cdot 10^{11}$   $\nu=0.3$   $\rho=7800$  su espesor es de 15 mm. En el (Anexo H) se definen los ensayos a soportar. Su masa es de 3300kg.

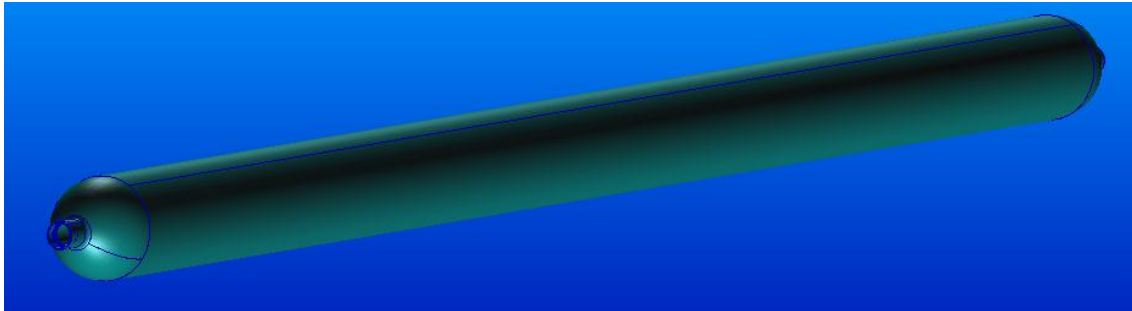


Figura 2: Vista de la botella de hidrogeno

Posteriormente para el ensayo se ignorará la parte central se dispondrá de los extremos los cuales impactaran en los ensayos de choque con nuestra estructura.

<b>Marcado</b>		<b>Propiedades esenciales</b>	
<b>Número-CAS</b>	1333-74-0	Gas incoloro, inodoro, inflamable, comprimido, mucho más ligero que el aire	
<b>Caracterización ADR</b>	UN 1049, Hidrógeno, comprimido, 2.1 Clase 2, 1F	<b>Simbología de Riesgo</b>	 altamente inflamable
<b>Marcado de la Botella</b>	 ojiva: rojo	<b>Características Físicas</b>	Peso molecular: 2,0158 kg/kmol Densidad del gas a 0°C y 1,013 bar: 0,0899 kg/m³ Densidad relativa al aire: 0,0695

Para información adicional de seguridad ver Hoja de Seguridad del producto **FS-538 (Hidrógeno)**

---

**Válvulas / Reguladores**

<b>Conexiones de válvulas</b>	RAP ITC MIE-AP7 M 21,7 x 1,814 MÉTRICO (IZQUIERDAS) W 21,7 - 14 HILOS/PULGADA (IZQUIERDAS) 300 bar CEN Nr. 4: W 30 x 2 LH	
<b>Reguladores recomendados</b>	Spectrotec	

Especificaciones / Botellas				
		técnico	4.0	
<b>Composición</b>				
H <sub>2</sub>	>	99,5	99,99	Vol.-%
<b>Impurezas</b>				
H <sub>2</sub> O	<	-	20	ppmv
O <sub>2</sub>	<	-	2	ppmv
N <sub>2</sub>	<	-	50	ppmv
<b>Botellas / Contenidos</b>				
B 10 200 bar		1,8	1,8	m <sup>3</sup>
B 20 200 bar		3,6	3,6	m <sup>3</sup>
B 50 200 bar		8,9	8,9	m <sup>3</sup>
B 50 300 bar		12,6	12,6	m <sup>3</sup>
CV 12* B 50 200 bar		107,0	107,0	m <sup>3</sup>
CV 12* B 50 300 bar		151,2	151,2	m <sup>3</sup>

Figura 3: Propiedades Hidrogeno/Especificaciones de las botellas.

### 3.3.-DISTRIBUCIÓN DE LOS APOYOS DE LAS BOTELLAS DE HIDRÓGENO

Como se observa en el siguiente dibujo, las botellas se apoyarán en la parte inferior, debido a su propia masa, para el ensayo de choque la fuerza pasara a las barras por el impacto debido a la aceleración 2g. de la bombona más desequilibrante.

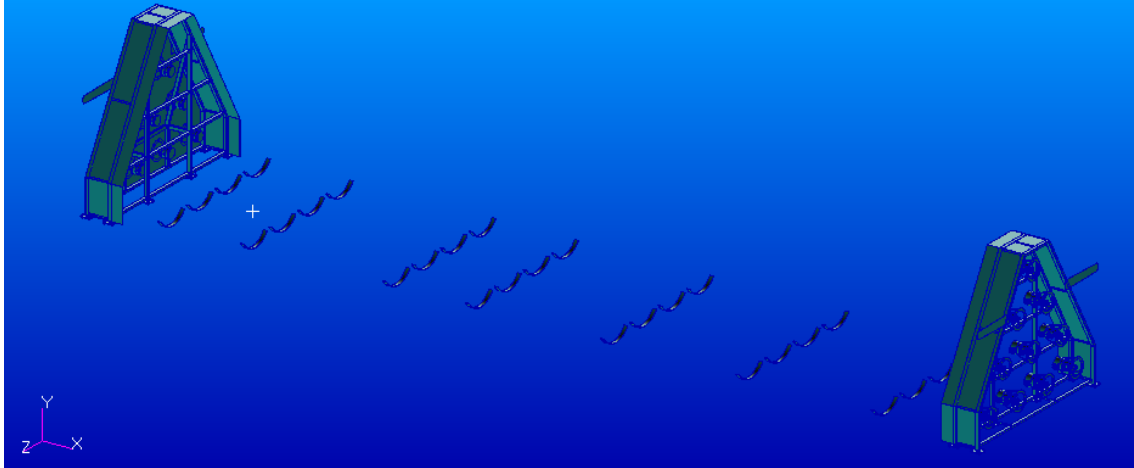


Figura 4 : Vista de la distribución de los apoyos de las botellas.

### 3.4.-DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA

La estructura debe ir apoyada sobre el remolque de un camión, esto se tendrá en cuenta a la hora de diseñar el ancho-largo máximo para poder circular con normalidad, las dimensiones están el 3.1.

#### 3.4.1.-VISTA ISOMÉTRICA

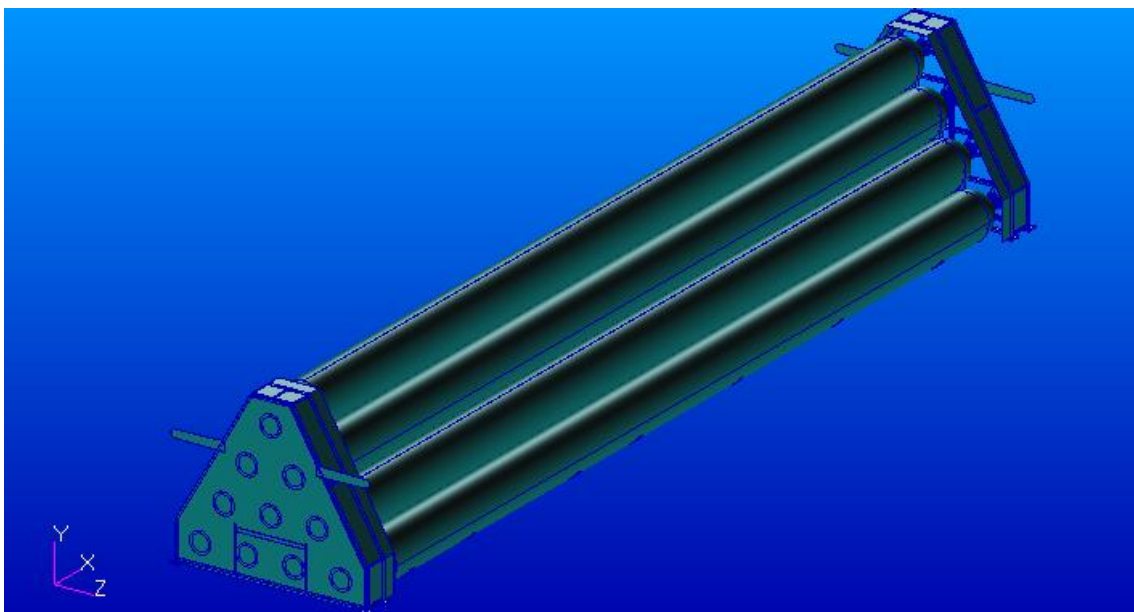


Figura 5 : Vista de la estructura en Isométrica

### 3.4.2.-VISTA EN PLANTA



Figura 6 : Vista de la estructura en Planta

### 3.5.-MATERIAL Y SUS PROPIEDADES

El material elegido es acero ST-52, su modulo elástico es  $E=2.1 \cdot 10^{11}$  Coeficiente. Poisson  $\nu=0.3$  Densidad  $\rho=7800$ .

Tabla Propiedades		Acero st52 (s355)
E	Módulo elástico	210000MPa
$\nu$	Coeficiente de Poisson	0,3
$\rho$	Densidad	7,8Kg/m3
$\sigma_f$	Límite elástico	360MPa
$\sigma_r$	Tensión de Rotura	520MPa

Tabla 1: propiedades mecánicas del acero

Se parte de un tornillo hexagonal M12x60 mg 6.8 DIN 633, el cual tiene un diámetro de 12mm, el cual tiene un paso de 1,75 en la tabla (ver anexo B)  $\sigma_f = 480\text{MPa}$  y  $\sigma_r = 600\text{Mpa}$ .

### 3.6.-UNIONES

El asentamiento de la estructura estará fijado mediante tornillos comerciales y serán dimensionados a partir de los resultados obtenidos del ensayo de choque, calculado por Abaqus.

Toda la estructura y en especial la unión de los apoyos con el remolque se discretizará por el método de los elementos finitos usando el programa MSC Patran.

Toda la estructura estará unida. La estructura transmitirá los esfuerzos a los apoyos y éstos a los tornillos.

### 3.7.-CARGAS

No se tendrá en cuenta la masa de las botellas, dado que estas apoyarán en los apoyos repartidos en nuestro remolque.

A continuación, se definirá una aceleración horizontal de 2g en la botella más desfavorable como viene establecido en la normativa del A.D.R. ver (ANEXO H). Se pasará a la pestaña de cargas, en la pestaña input data se creará una aceleración nodal, definida como, <18.6, 0., 0.>.

Este paso habrá que hacerlo tanto para el archivo de la parte delantera de la estructura como la parte trasera, se tendrá que tener en cuenta que tienen la misma dirección y modulo pero sentidos contrarios en cada uno de los casos.

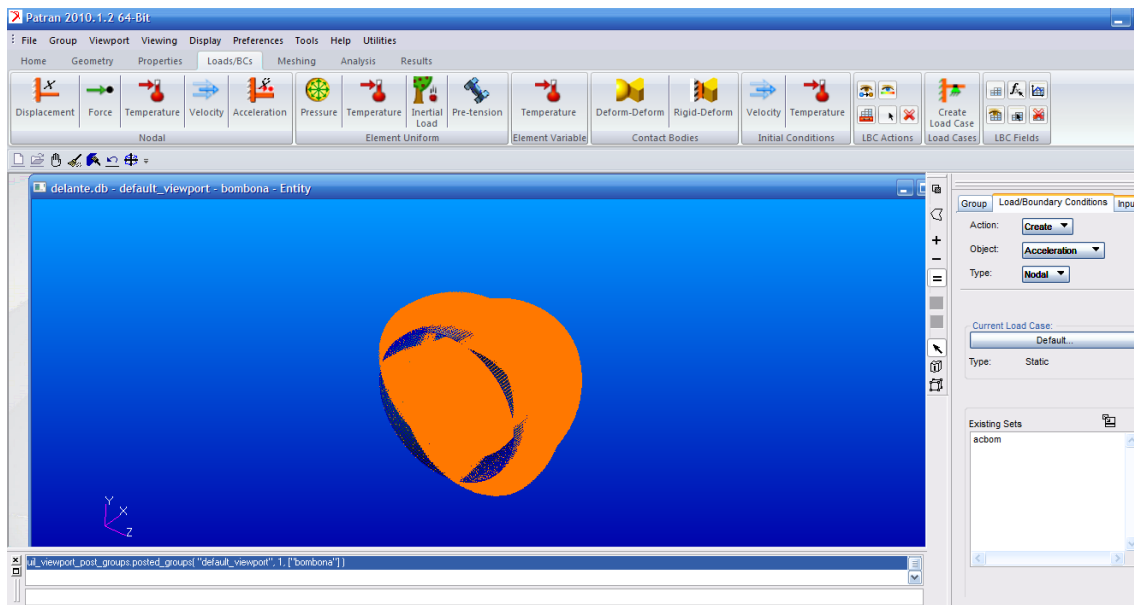


Figura 7 :Vista de la botella con la aceleración ya definida.

### 3.8.- CRITERIOS DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA UTILIZADOS

Para los cálculos de límite elástico, el criterio de diseño es el cálculo a resistencia del material, que, en el caso propuesto se calculará según las siguientes ecuaciones:

Barras, Apoyos y Chapas:

$$\sigma_{\text{barra}} \leq \sigma_r / 1.1$$

Tornillos:

$$\sigma_{\text{tornillo}} \leq \sigma_e / 2$$

Donde  $\sigma_e$  es el límite elástico del material y  $\sigma_p$  el límite de rotura medios.

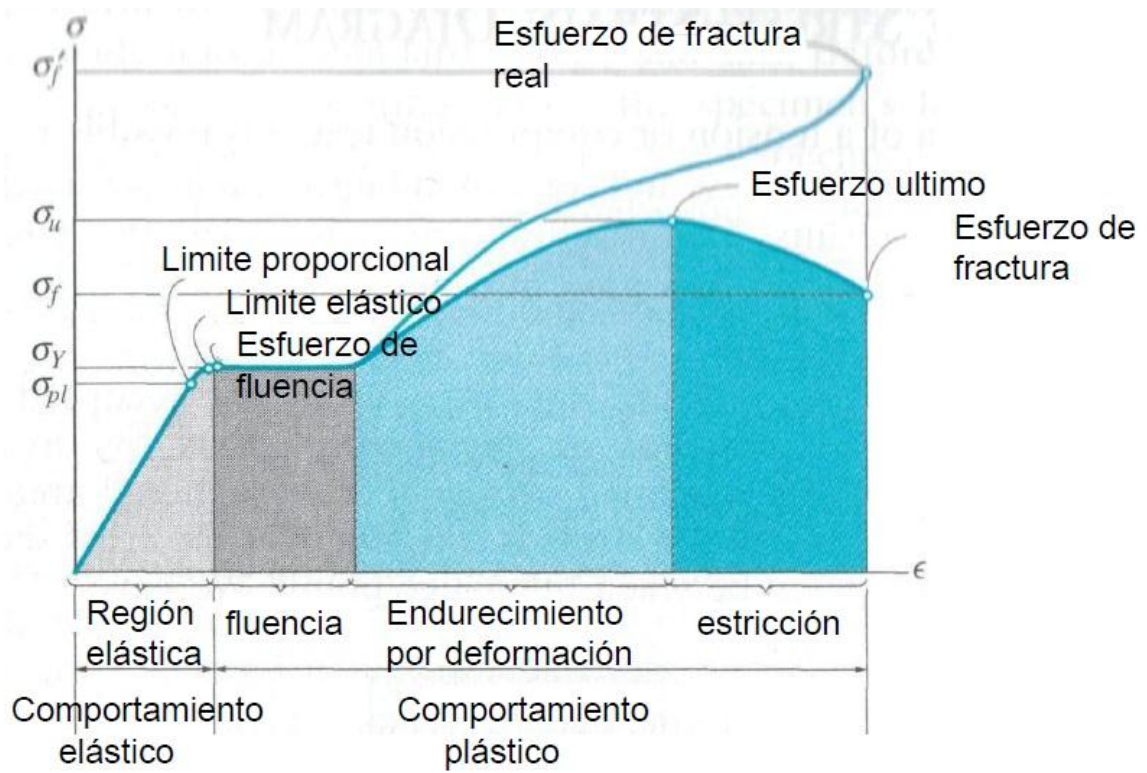


Tabla 2: gráfica tensión-deformación del acero

## 4.- REALIZACIÓN DEL PROYECTO

### 4.1.-IMPORTACIÓN DEL ARCHIVO, DIVISIÓN EN PARTE TRASERA Y DELANTERA

Para empezar se creará una nueva base de datos (.db) y se importará el archivo .igs de la estructura con la ayuda del programa Patran. Sus herramientas permiten ahorrar mucho tiempo a la hora de dibujar y rectificar, con respecto a otros programas de diseño.

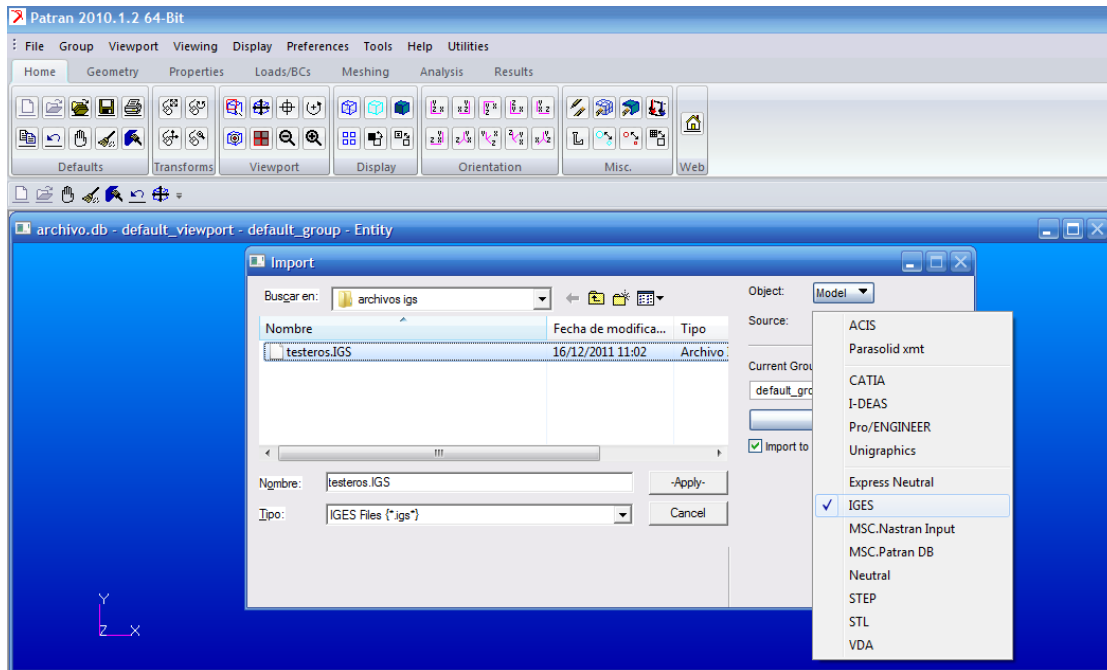


Figura.8.:Selección de archivo .igs a importar

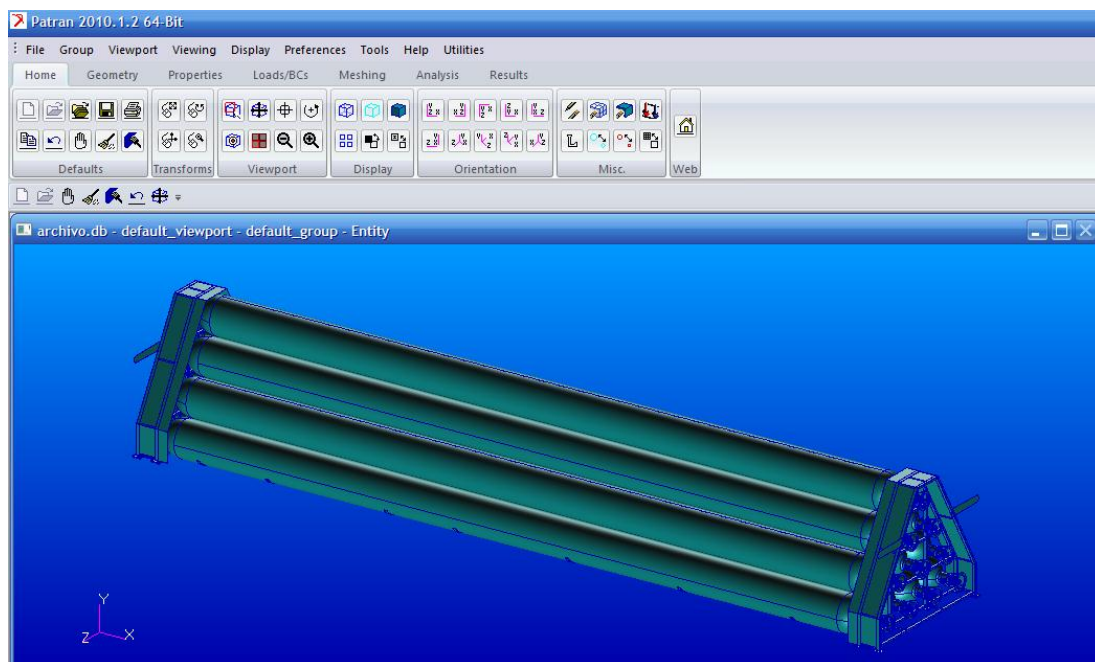
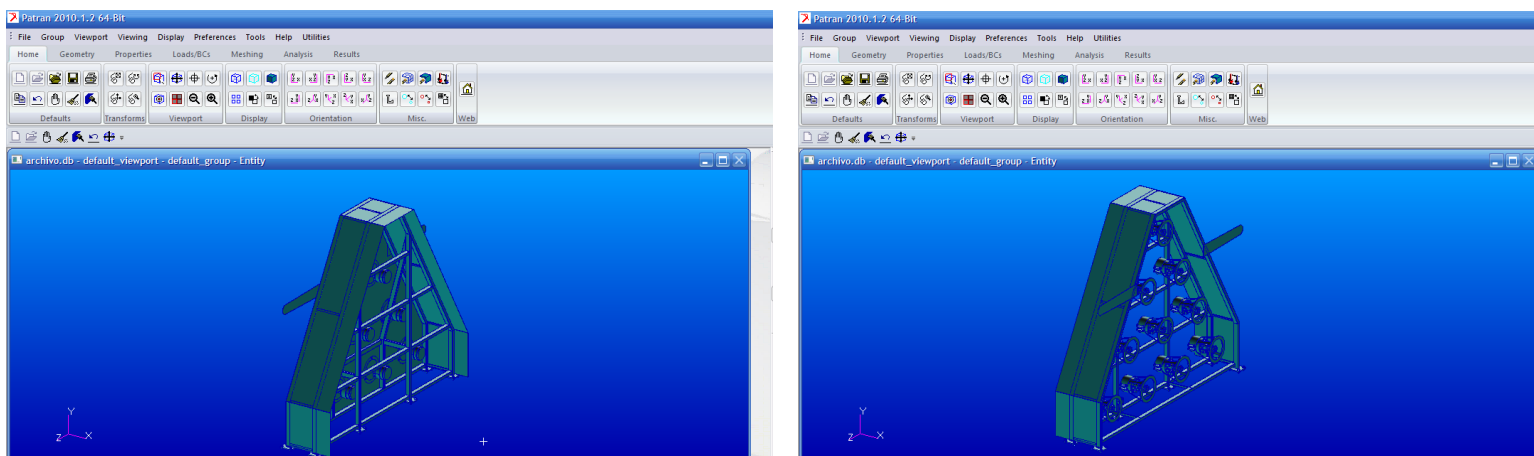


Figura.9.:Vista del archivo importado de .igs

Se tendrá en cuenta el sistema de coordenadas para que al exportarlo a Patran se pueda trabajar con las coordenadas por defecto con comodidad.

Se dividirá la estructura en parte delantera y parte trasera para una mayor manejabilidad tanto para modificar los elementos a las condiciones iniciales, como la posterior realización de sus respectivos ensayos.

A partir de aquí se trabajará con dos archivos diferentes.



*Figura 10 :Vista de parte delantera-parte trasera*

#### 4.2.-CREACIÓN DE SUBGRUPOS PARA CADA ELEMENTO Y CONVERSIÓN DE VOLÚMENES A SUPERFICIES

Se eliminarán todos aquellos elementos que no sean relevantes para los cálculos y que no intervienen en nuestros ensayos: racores, soportes de intermitentes, latiguillos, etc.

Tras esto se subdividirá cada elemento de la estructura, en barras, apoyos y chapas, se crearán los respectivos grupos para cada uno.

Hay que tener en cuenta que se creará un grupo especial para el cabezal de la bombona.

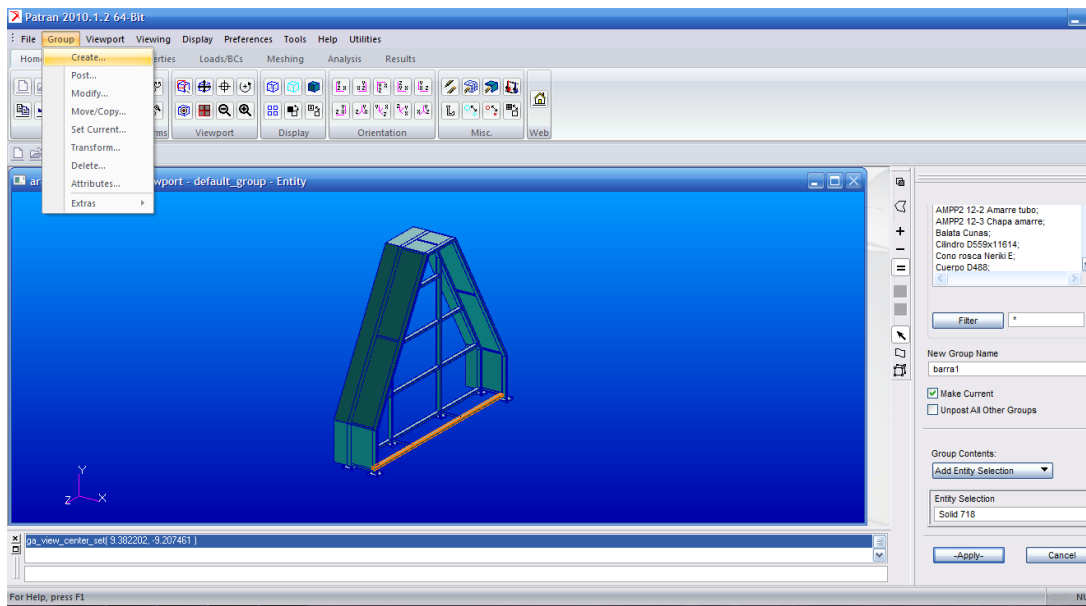


Figura 11 :Vista de la creación de un grupo

Esto dará lugar a una gran cantidad de elementos por lo que se deberá llevar un control cuidadoso para no cometer un error.

A continuación se exponen dos imágenes con la numeración de barras llevada a cabo.

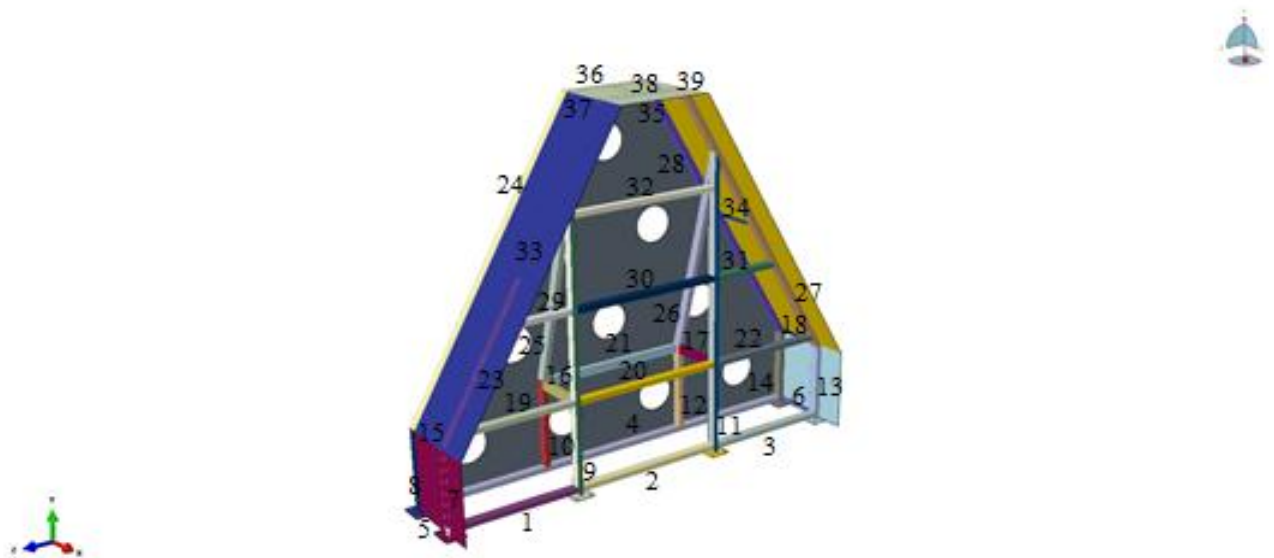


Figura 12 :Vista de la numeración de elementos barras en la parte delantera

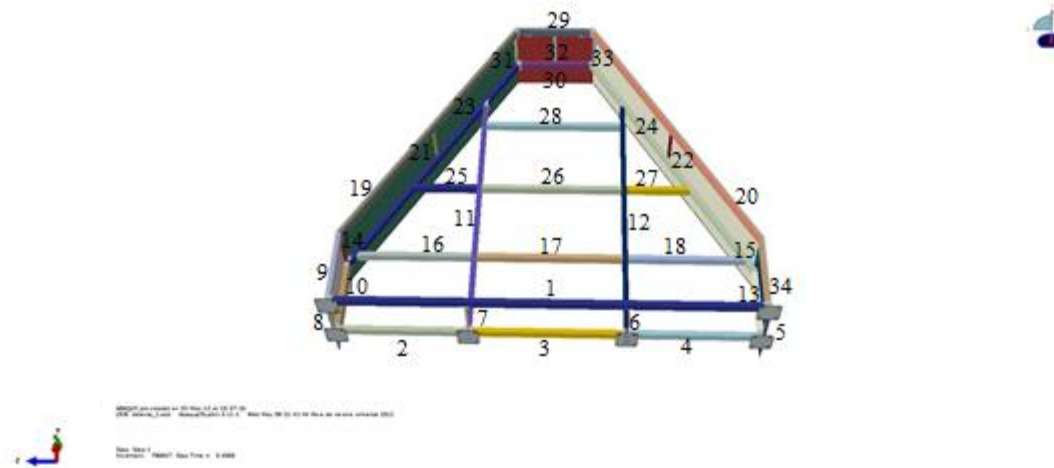


Figura 13: Vista de la numeración de elementos barras en la parte trasera

En el siguiente paso se seleccionará grupo a grupo los respectivos elementos con la opción:

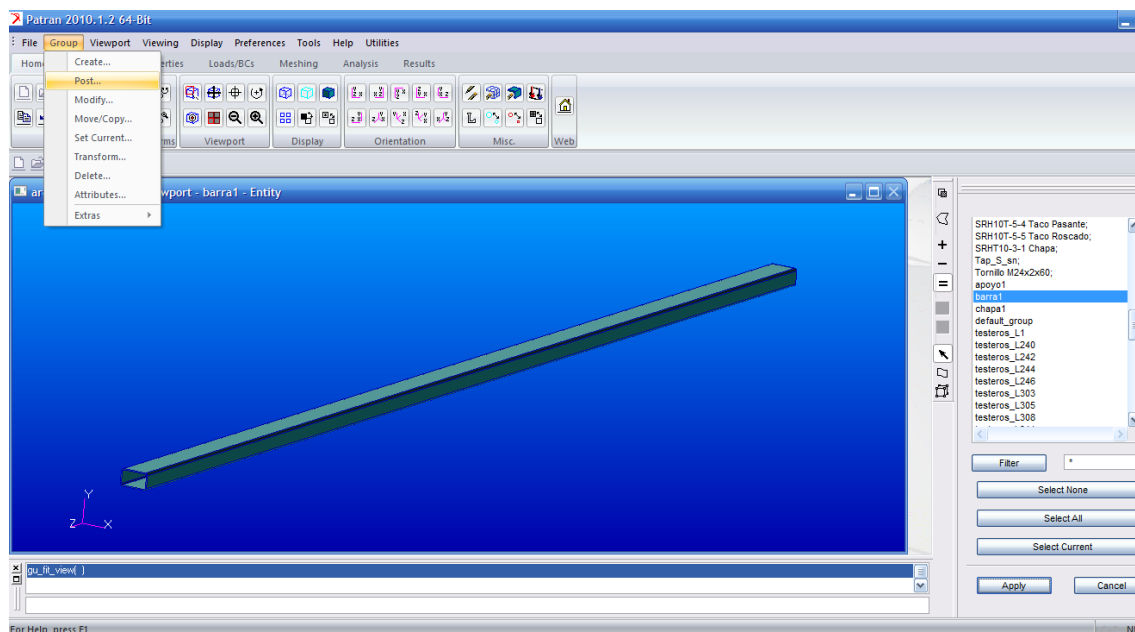


Figura 14 : Vista de la selección de grupos para cada elemento

Se pasa a la pestaña de Geometry y se selecciona en action → edit, en objec → solid, en method → disassemble, con el icono delete original solids, se indica el solido y con esta acción todos los volúmenes pasarán a ser superficies, líneas y puntos, para poder ser discretizadas posteriormente.

Posteriormente para los grupos compuestos por barras se borra con la opción delete → surface las superficies internas de las barras, que no tengan contacto, y las superficies curvas para poder extenderlas hasta su punto de contacto con la opción extend.

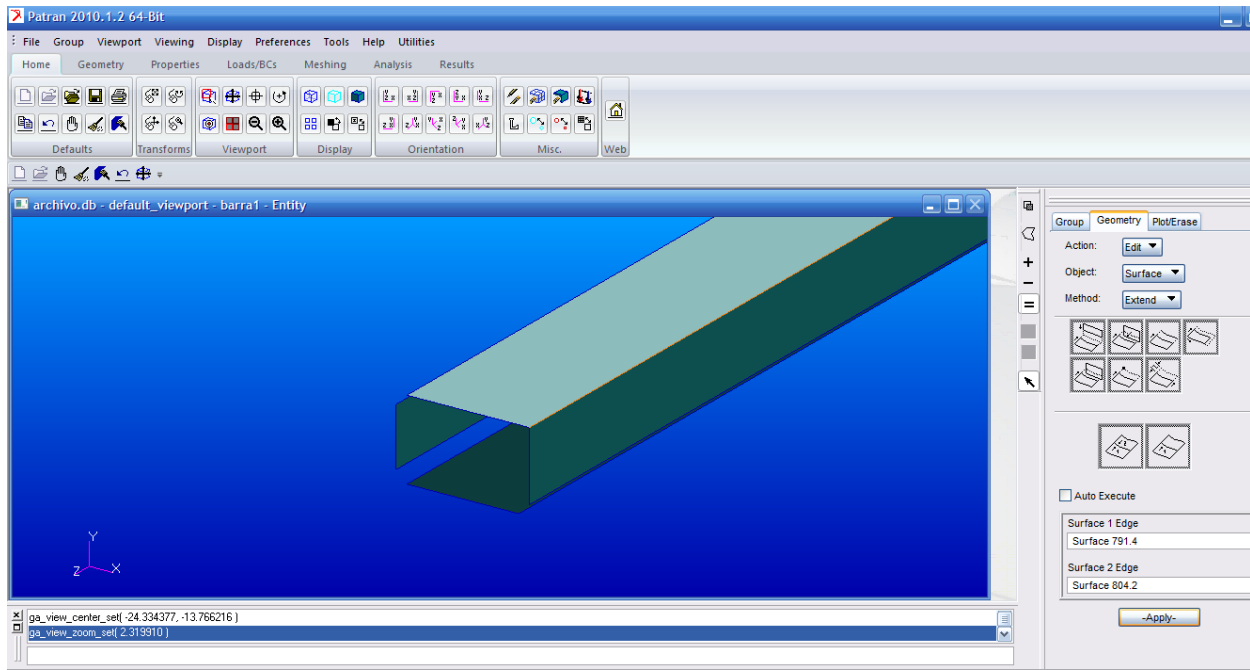


Figura 15 :Vista de la opción extend para el contacto de superficies

En los grupos compuestos por chapas se borrarán las superficies que no son de contacto, dado que las esquinas son redondeadas seguiremos los siguientes pasos.

1. Se creará un punto con la opción geometry→create→point→intersect, se selecciona entre dos curvas, se repite la acción en las otras esquinas.
2. Se creará dos curvas con la opción geometry→create→curve→point, se seleccionan dos puntos y para la otra curva los otros dos puntos.
3. Por último, se creará una superficie entre las dos curvas.

Todo esto se lleva a cabo para poder extender las chapas y tener una malla uniforme.

#### 4.3.-SIMETRÍA, ESTUDIO DEL CORTE POR PLANOS PARA EL POSTERIOR MALLADO, CAMBIO DE ESCALA

Con un vistazo se verá que tanto el archivo de delante como el de detrás son estructuras simétricas, se aprovechará esto y se cortará la estructura por un plano para trabajar con la mitad y posteriormente duplicarla.

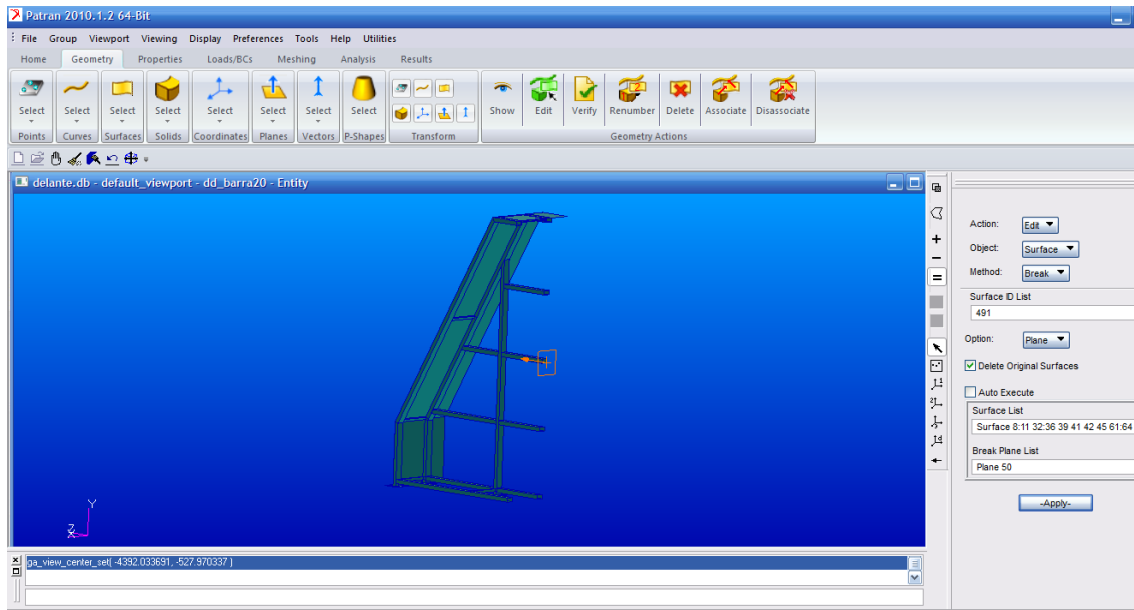


Figura 16 :Vista del corte por el plano de la parte trasera

Se continúa con el estudio del corte por planos, en el cual se cortarán por los planos de unión las barras, chapas y apoyos para obtener una malla simétrica.

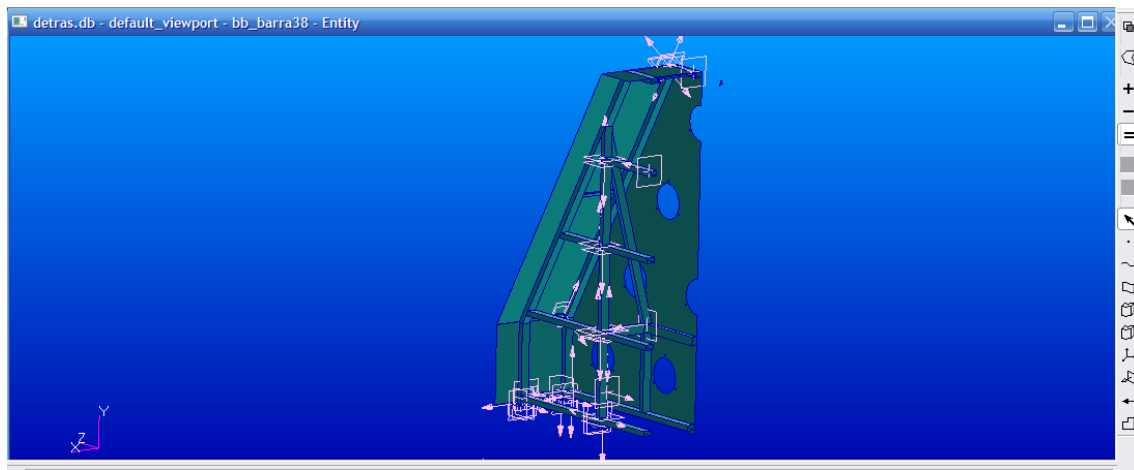


Figura 17:Vista de los cortes por los planos de la parte trasera

Se da la estructura en pulgadas y se pasa la estructura a metros, para tener todo en las mismas unidades y poder trabajar correctamente. Esto es posible desde la ventana group→Transform→scale, en escale parameters se indica el factor de conversión en este caso 0,0254 en las tras direcciones de los ejes y se selecciona apply, es importante tener

seleccionada toda la estructura, junto con la bombona para que estén definidos en la misma escala.

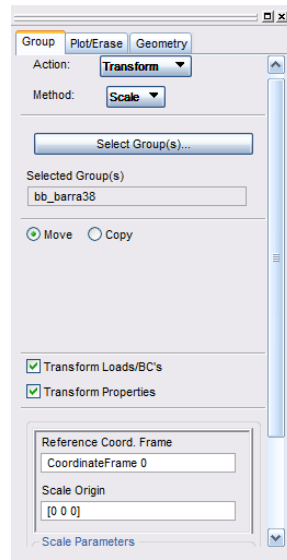


Figura 18 :Vista del cambio de escala

#### 4.4.- MALLADO Y VERIFICACIÓN DEL MALLADO

La estructura estará dividida en un número elevado regiones o subdominios, los cuales están determinados por unos puntos representativos llamados nodos.

El conjunto de varios nodos formarán elementos estos pueden ser en la malla triangulares y cuadráticos, el conjunto de todos los elementos definirá la malla, mediante la cual, el programa será capaz de analizar los esfuerzos internos producidos en la estructura debido a las cargas.

Para la realización de la malla, se debe pasar a la pestaña de meshing, y en create→mesh→surface se indica el tipo de malla y el valor que se le dará para que todas nuestras superficies tengan el mismo valor

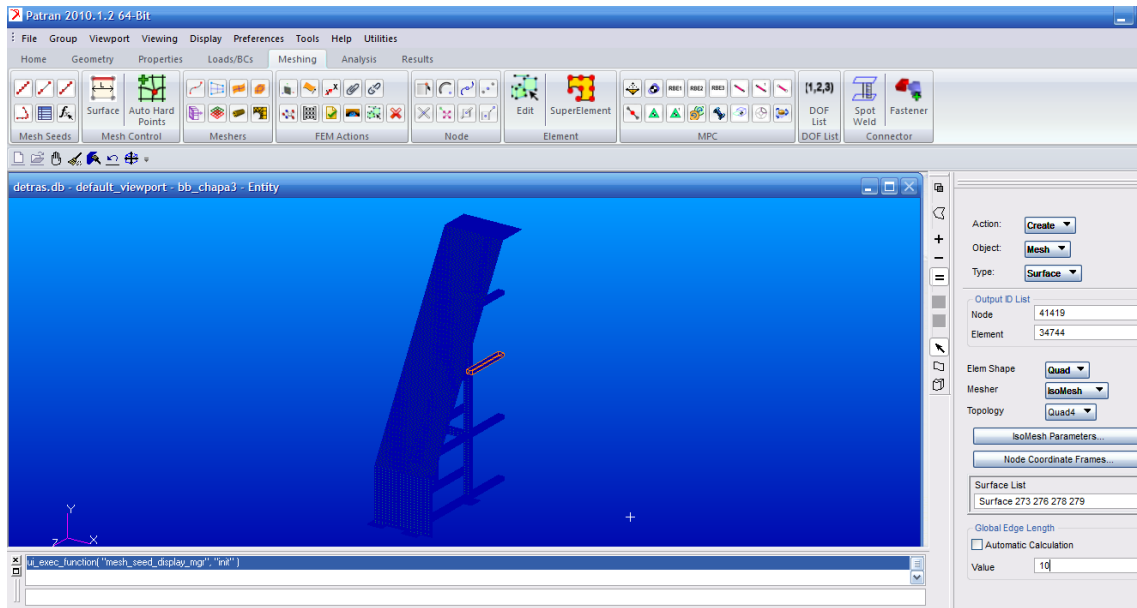


Figura 19 :Vista de la creación de la malla.

Se puede presentar que en el contacto entre superficies una defina un número mayor de nodos que otra, en ese caso se recurre a la herramienta mesh seed, en créate→mesh seed→uniform si se conoce el número de nodos de contacto o es una malla simple, si la malla es más complicada se puede utilizar mesh seed→tabular y seleccionar node and point esta opción seleccionara todos los nodos creados en otras superficies y creará nodos equivalentes en el contacto con las demás superficies.

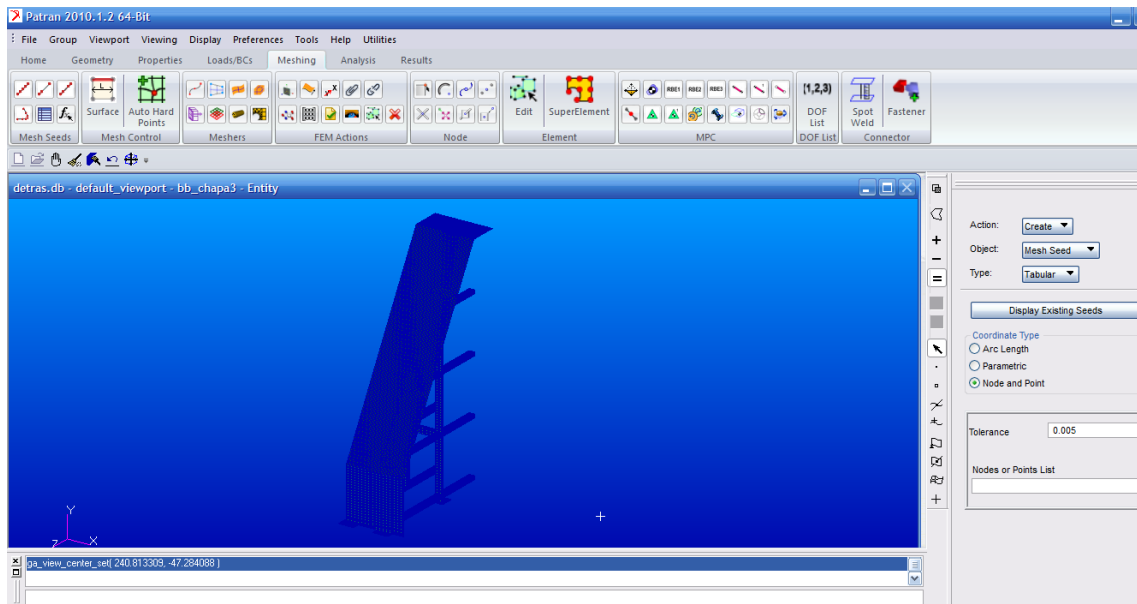


Figura 20 :Vista de la creación de la mesh seed

El siguiente paso será mirar las equivalencias entre los nodos de distintas superficies para crear una sola malla uniforme se realizará con la secuencia meshing → equivalence→all→ Tolerance Cube y en equivalencing tolerance se le da el rango de equivalencia entre nodos que se vea oportuno.

Tras la realización de la equivalencia queda un último paso que será verificar que las equivalencias están bien hechas y no queda ningún nodo dispar, en cuyo caso se vería una raya amarilla como se verá en los extremos de la malla.

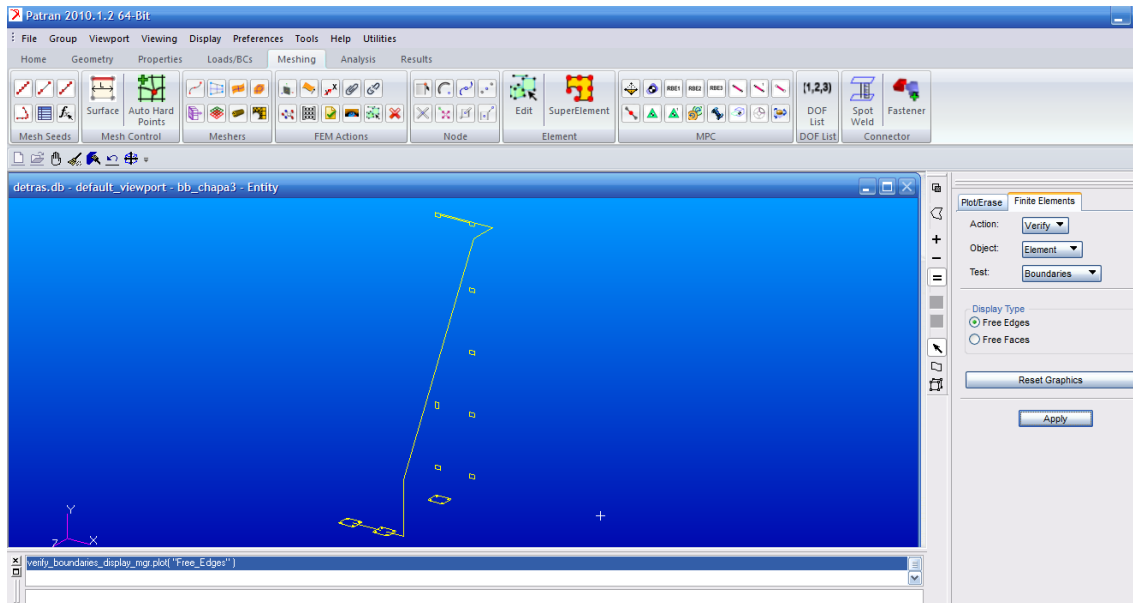


Figura 21 : Vista de la verificación de la malla

#### 4.5.- DEFINIR MATERIAL Y SUS PROPIEDADES, APLICACIÓN DE ESPESORES EN LA ESTRUCTURA, ACELERACIÓN 2G DE LA BOMBONA Y EMPOTRAMIENTOS.

En este apartado se considera un material capaz de resistir tanto la masa de la estructura con las botellas de hidrogeno como el impacto de la botella más desfavorable con una aceleración de 2g., para ello se define un acero con las propiedades:

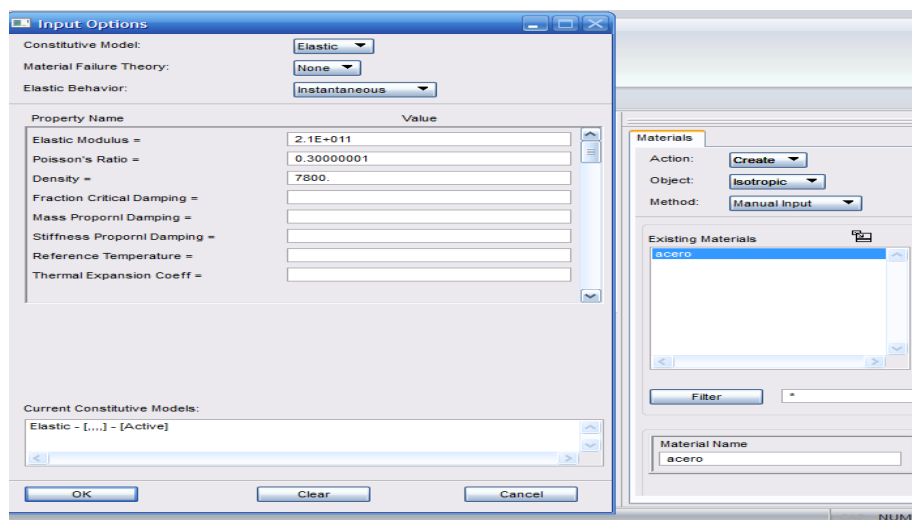


Figura 22 : Vista de la creación de un material

Para definir las propiedades continuando en la pestaña *properties*, se le asigna a cada superficie o región un material antes definido y un espesor, se utilizarán los antes definidos en la estructura volumétrica ver (Anexo G)

Estos serán; Apoyos → 10mm, Barras → 1.5, 2 y 4mm, Chapas → 2mm, Bombona → 15mm aunque posteriormente se modificará para representar el peso de toda la bombona con una regla de 3, se obtendrá de esta forma un espesor de 0.78500003m.

Se tendrá en cuenta que habrá que definirlo en las mismas unidades es decir metros.

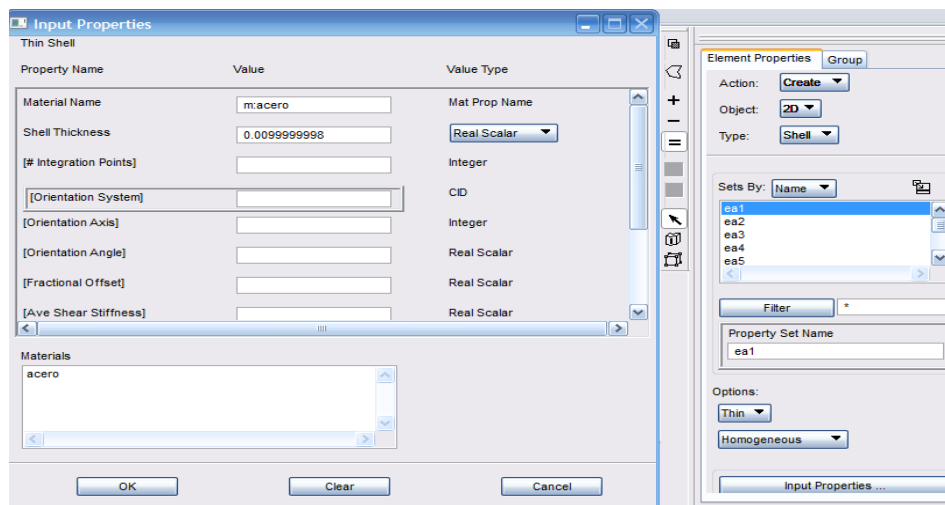


Figura 23: Vista de la definición de una propiedad

Para la definir los empotramientos se selecciona en los apoyos la pestaña de cargas *create* → *displacement* → *nodal* y se fijan indicaremos las condiciones de empotramiento:

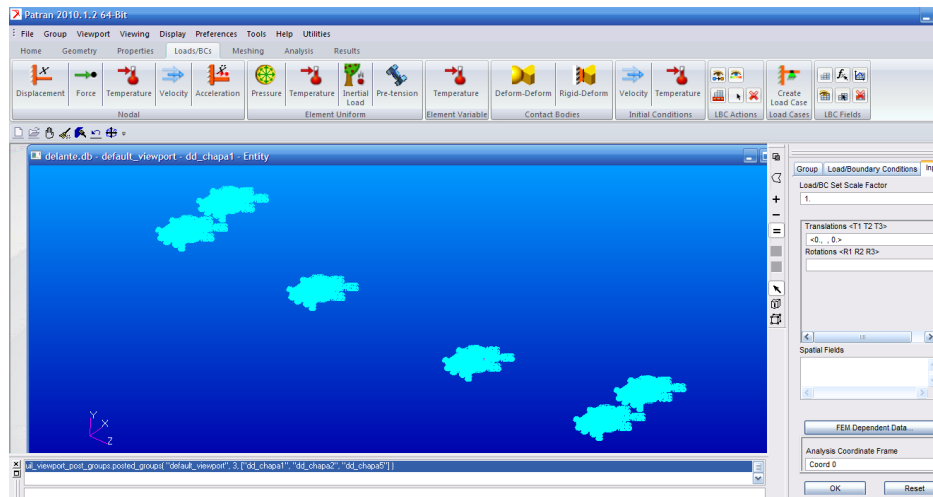


Figura 24 : Vista del empotramiento de los apoyos

Se realizará la misma secuencia para cada uno de los tornillos en cada uno con los nodos que los confluyen, en los tornillos se impedirán todos los desplazamientos y rotaciones.

#### 4.6.-IMPORTACION DEL ARCHIVO A ABAQUS

Tras la realización de los empotramientos y con todas las propiedades definidas, se pasará a analizar el archivo para exportarlo a abaqus como inp. En este archivo se modificará el step. , se introducirá el comportamiento plástico del material, el contacto y el end step.

Tras estos pasos se lanzará el archivo en abaqus pasando al apartado de ensayos.

#### 4.7. ENSAYOS

Se pasará a trabajar con abaqus y, con este programa se calcularán los ensayos, los mayores esfuerzos y tensiones en cada barra utilizando el criterio de Von Mises y los esfuerzos a los que son sometidos los tornillos a través de los apoyos.

Para obtener las máximas tensiones en cada grupo, se seleccionará el grupo y se comprueba la mayor tensión en todos los frames obtenidos.

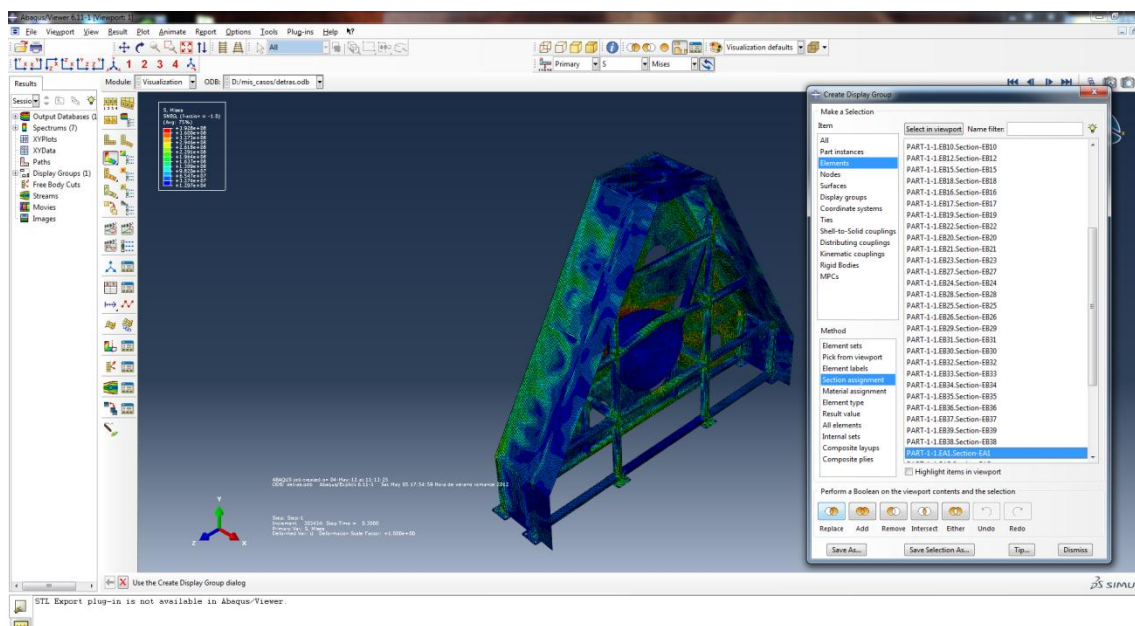


Figura 25 : Vista de la selección de grupo en abaqus

Para obtener los esfuerzos a los que están sometidos los tornillos se sigue una serie de pasos tras seleccionar cada uno de los apoyos con el paso anterior.

Tras esto se indica la dirección en la cual se calcula la reacción, se selecciona los nodos de cada tornillo

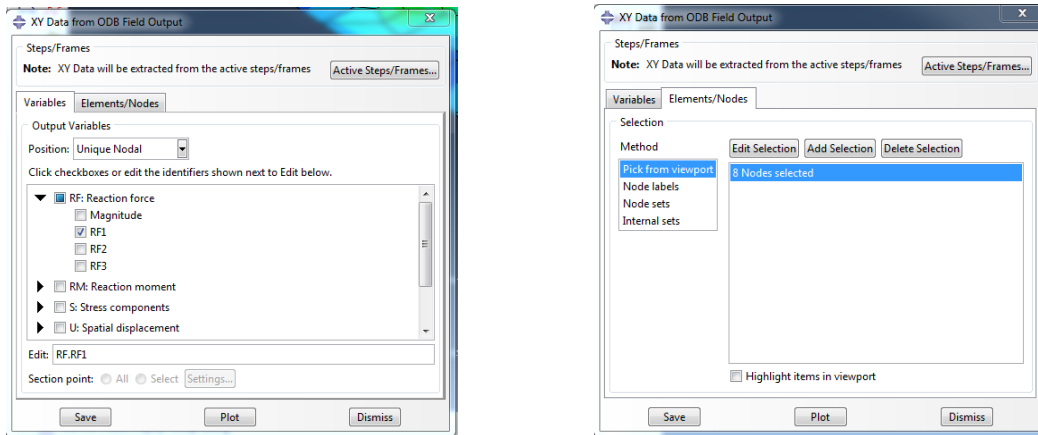


Figura 26 :Calculo de reacción en abaqus(1)

Después se indica que queremos operar con la función suma y se indican todos los nodos.

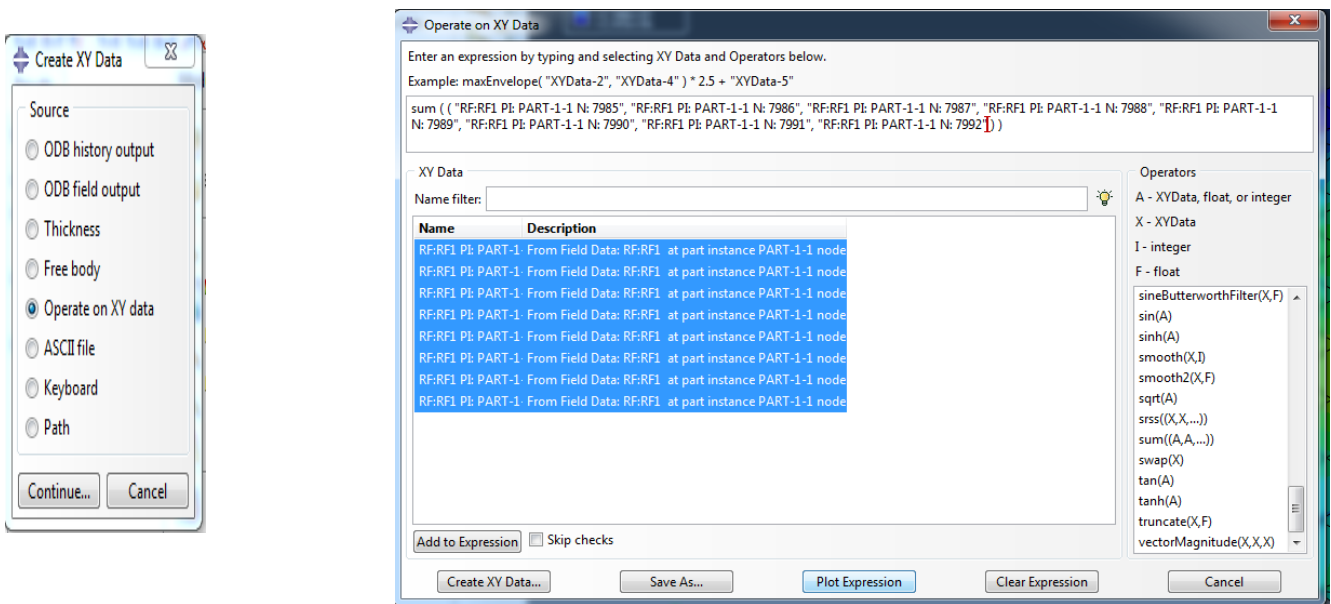


Figura 27 :Calculo de reacción en abaqus(2)

Se Obtendrá tras darle a la opción de plot expresión la grafica que se representa a continuación con la opción tools → query → prove values, se seleccionan los picos que son las reacciones máximas en el consiguiente tornillo y en la dirección del eje indicado.

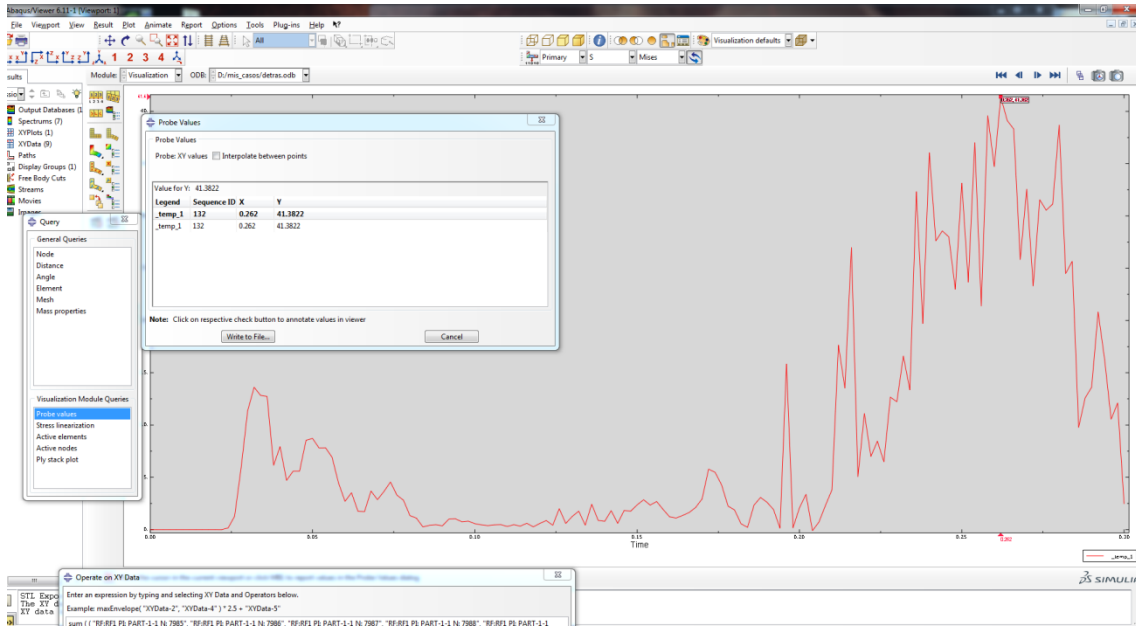
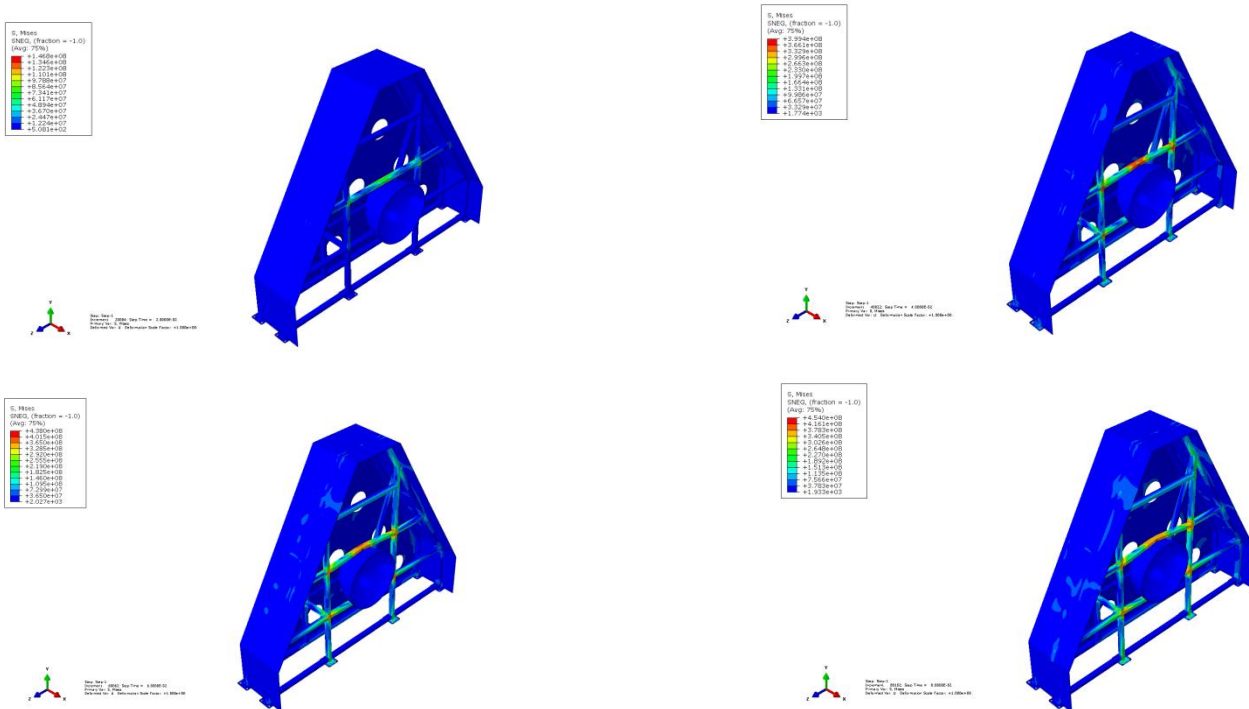


Figura 28 :Grafica de la reacción en un eje en función del tiempo en un tornillo

#### 4.7.1.- ENSAYO CON IMPACTO 2G DELANTE

Se procederá a lanzar los archivos para su cálculo. Se obtendrá la siguiente secuencia de imágenes que describen los esfuerzos producidos en el choque:



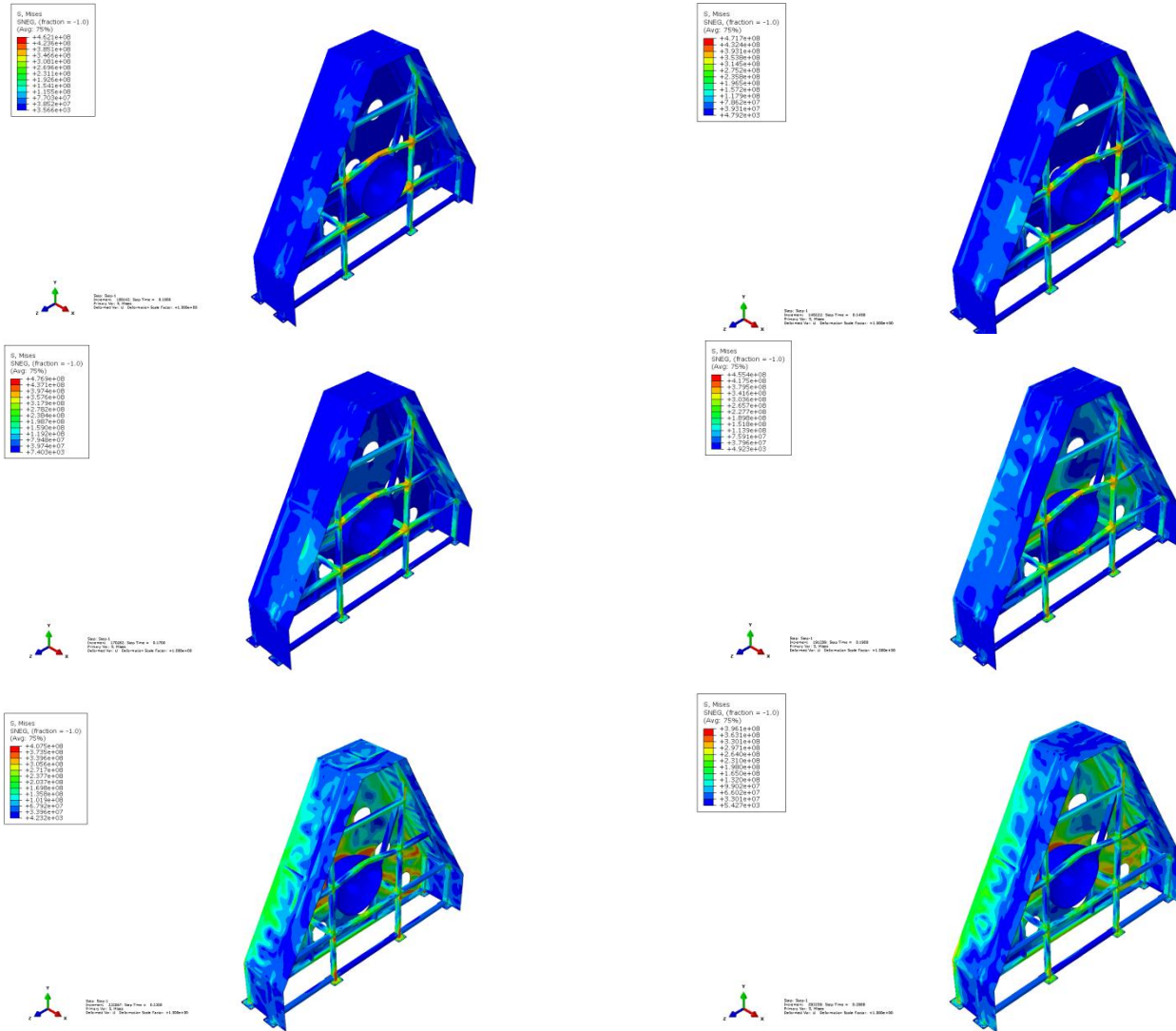


Figura 29 :Secuencia de imágenes que describen el ensayo(cada 2 segundos)

Se observa en el ensayo que las barras se doblan ante la carga de la botella y esta acaba impactando en la chapa delantera que consigue frenarla y hacer que rebote como se muestra en la grafica de aceleración cinética a continuación, las unidades están en J/s.

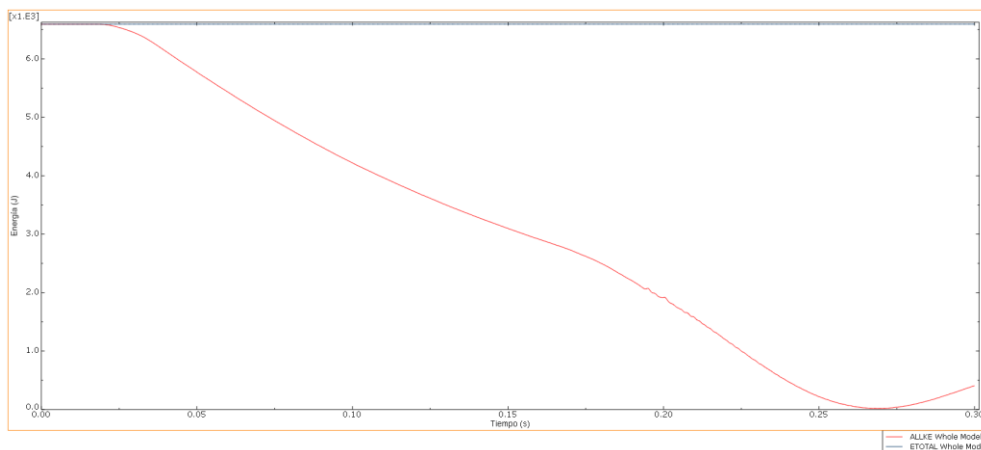


Figura 30 :Gráfica de la energía cinética de la botella en el ensayo de delante

Para la estructura obtendremos la tabla con las siguientes tensiones máximas:

DELANTE 2MM									
	Tensiones		Tensiones		Tensiones		Tensiones		Tensiones
Barra 1	3,60E+08	Barra 11a	3,98E+08	Barra 21	3,99E+08	Barra 32	2,12E+08	Apoyo 4	3,64E+08
Barra 2	2,93E+08	Barra 11b	3,85E+08	Barra 22	3,66E+08	Barra 33	1,60E+08	Apoyo 5	3,60E+08
Barra 3	3,59E+08	Barra 12	3,80E+08	Barra 23	3,61E+08	Barra 34	1,52E+08	Apoyo 6	3,60E+08
Barra 4	3,49E+08	Barra 13	3,61E+08	Barra 24	3,73E+08	Barra 35	3,60E+08	Chapa 1	3,64E+08
Barra 5	1,61E+08	Barra 14	3,74E+08	Barra 25	3,71E+08	Barra 36	3,61E+08	Chapa 2	3,60E+08
Barra 6	1,64E+08	Barra 15	1,58E+08	Barra 26	3,71E+08	Barra 37	1,24E+08	Chapa 3	2,55E+08
Barra 7	1,64E+08	Barra 16	3,71E+08	Barra 27	3,61E+08	Barra 38	1,93E+08	Chapa 4	3,60E+08
Barra 8	3,74E+08	Barra 17	3,72E+08	Barra 28	3,73E+08	Barra 39	1,20E+08	Chapa 5	3,64E+08
Barra 9a	3,98E+08	Barra 18	1,59E+08	Barra 29	3,62E+08	Apoyo 1	3,60E+08	Chapa 6	4,21E+08
Barra 9b	3,85E+08	Barra 19	3,66E+08	Barra 30	4,81E+08	Apoyo 2	3,61E+08		
Barra 10	3,79E+08	Barra 20	4,78E+08	Barra 31	3,62E+08	Apoyo 3	3,64E+08		

Se muestra la numeración llevada a cabo para la clasificación de los tornillos:

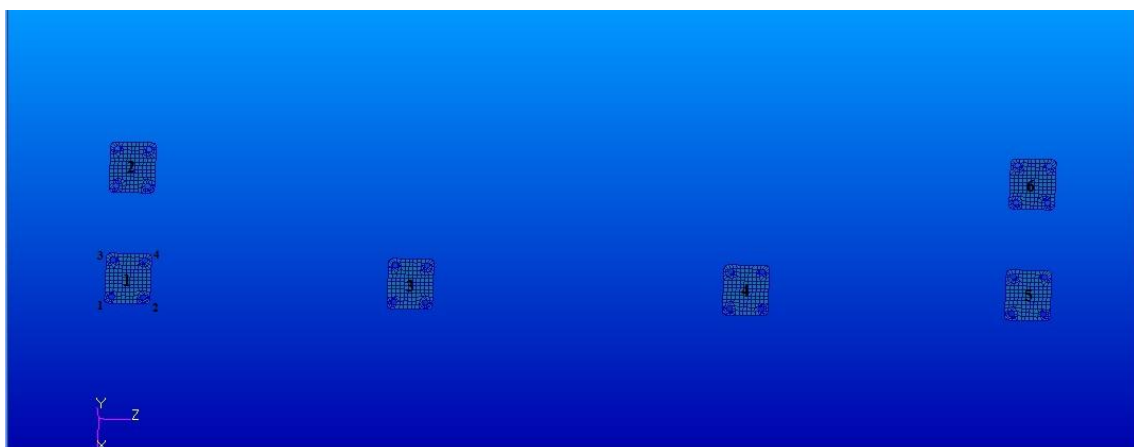


Figura 31 :Numeración de los tornillos en la parte delantera

Así mismo se calcularán con los pasos explicados anteriormente las reacciones en los tornillos:

DELANTE 2MM			
	x	y	z
A1.1	41	4,43E+03	37
A1.2	43	9001,79	-26
A1.3	-43,48	4,58E+03	18,275
A1.4	-33,54	9472,16	-25
	x	y	z
A2.1	47	8,47E+03	36
A2.2	135	13972,5	-54
A2.3	-38	1,46E+04	72
A2.4	-193	33017,1	-39
	x	y	z
A3.1	-154	0,00E+00	-121
A3.2	223	0	-192
A3.3	-38	8,33E+03	21
A3.4	-14	13522,2	-39

	x	y	z
A4.1	216	0,00E+00	188
A4.2	-156	0	121
A4.3	-14	1,35E+04	39
A4.4	-39	8325,83	-21
	x	y	z
A5.1	45	9,26E+03	27
A5.2	41	4478,29	-37
A5.3	-35	9,64E+03	26
A5.4	-43	4553,6	-18
	x	y	z
A6.1	143	1,43E+04	58
A6.2	49	8644,01	-37
A6.3	-207	3,40E+04	37
A6.4	-100	15041,3	-77

#### 4.7.2.-ENSAYO CON IMPACTO 2G DETRÁS

En este caso igualmente, se procederá a lanzar los archivos para su cálculo. Se obtendrán las siguientes graficas de la energía cinética:

Para 2mm: (se puede ver la secuencia en el Anexo I)

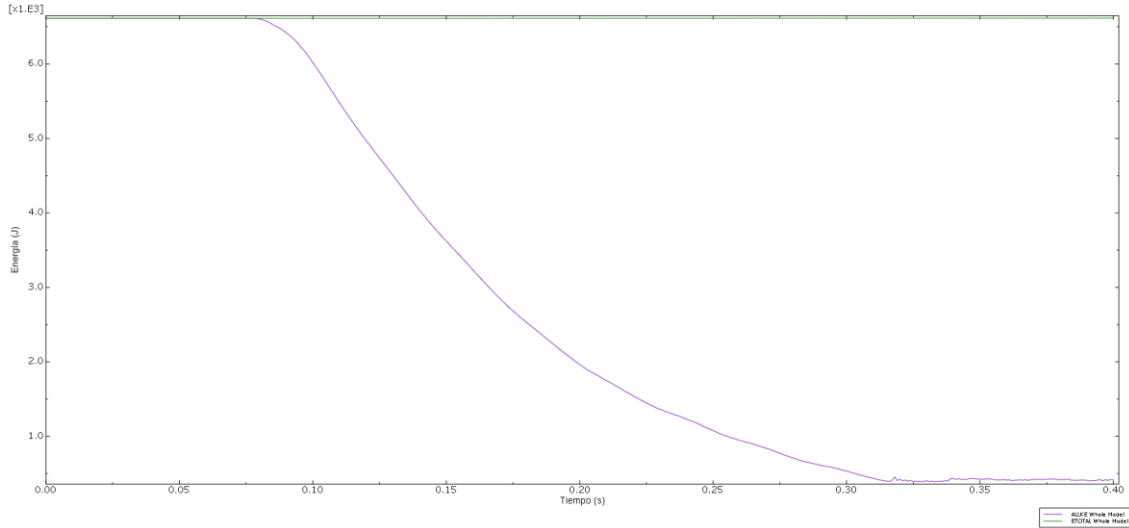


Figura 32 :Gráfica de la energía cinética de la botella en el ensayo de detrás para 2mm de espesor

Se observa que la energía cinética se aproxima a cero pero no llega por lo tanto la estructura no para la botella, se dimensionan de nuevo las barras de dos mm y se incrementa el espesor a tres mm, con el resultado siguiente:

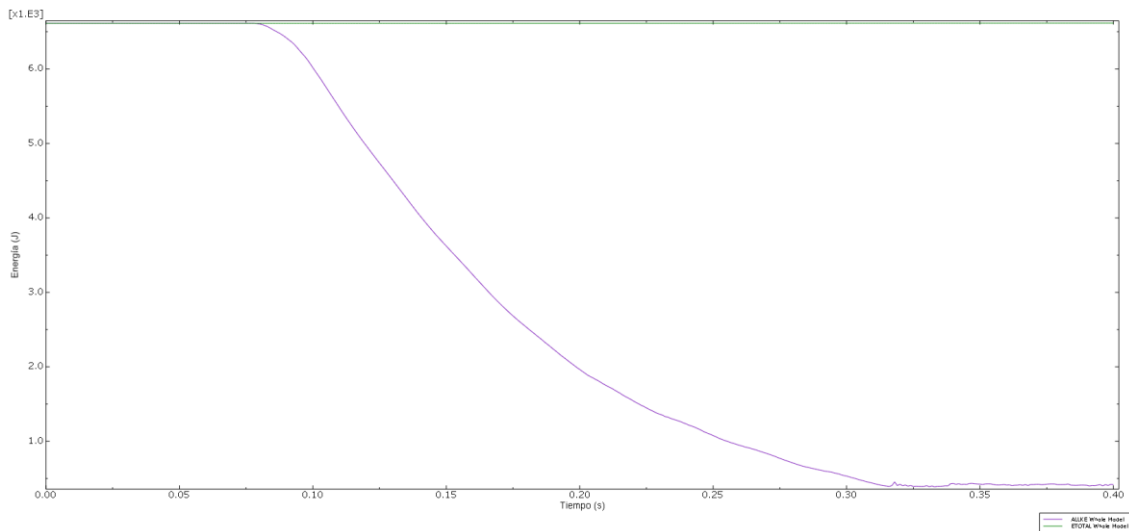


Figura 33 :Gráfica de la energía cinética de la botella en el ensayo de detrás para 3mm de espesor

Con espesor de tres mm. tampoco detiene la botella así que se dimensionará a cuatro mm.:

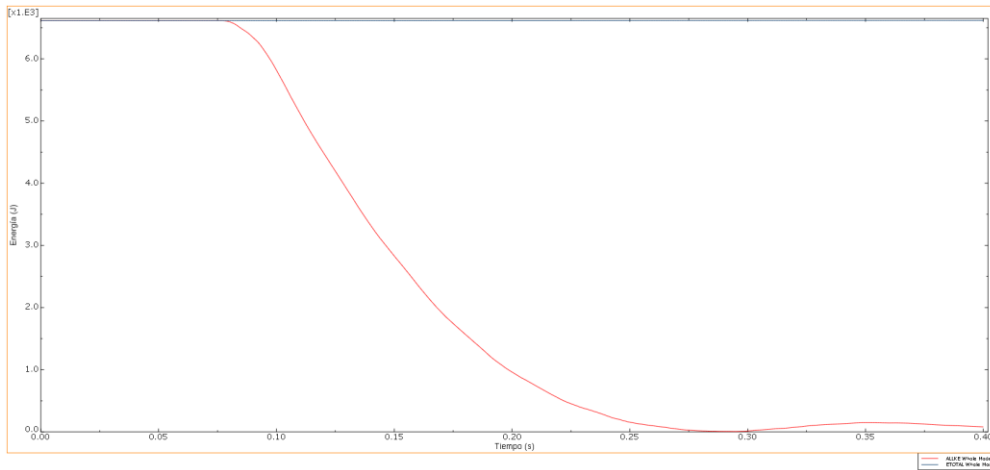


Figura 34 :Gráfica de la energía cinética de la botella en el ensayo de detrás para 4mm de espesor

Esta vez si se observa que hay rebote y la estructura es capaz de parar la bombona, se obtendrá la siguiente secuencia de imágenes que nos describen los esfuerzos producidos en el choque para 4mm:

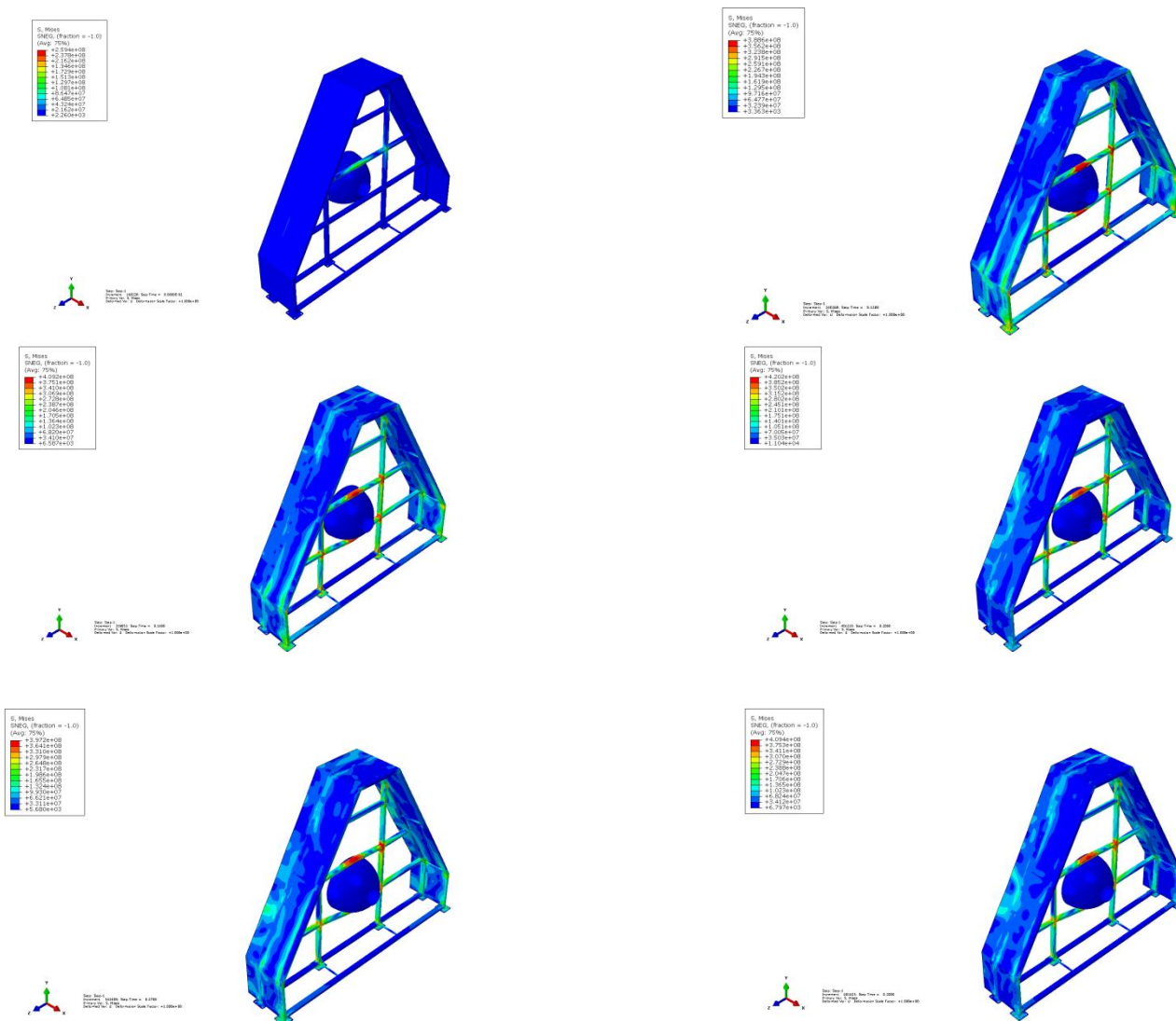


Figura 35: Secuencia de imágenes que describen el ensayo(cada 3 segundos)

Los resultados de las tensiones máximas obtenidas se indican en la siguiente tabla:

DETRÁS 4MM											
	Tensiones			Tensiones			Tensiones			Tensiones	
Barra 1	2,67E+08	Barra 11b	3,87E+08	Barra 21	3,37E+08	Barra 32	1,87E+08	Chapa 3	3,38E+08		
Barra 2	2,57E+08	Barra 12a	4,00E+08	Barra 22	3,39E+08	Barra 33	2,71E+08	Chapa 4	3,37E+08		
Barra 3	2,51E+08	Barra 12b	3,87E+08	Barra 23	3,60E+08	Barra 34	3,65E+08	Chapa 5	1,68E+08		
Barra 4	2,57E+08	Barra 13	3,60E+08	Barra 24	3,60E+08	Apoyo 1	3,65E+08				
Barra 5	2,41E+08	Barra 14	3,37E+08	Barra 25	3,64E+08	Apoyo 2	3,65E+08				
Barra 6	3,60E+08	Barra 15	3,62E+08	Barra 26	4,18E+08	Apoyo 3	3,59E+08				
Barra 7	3,59E+08	Barra 16	3,75E+08	Barra 27	3,65E+08	Apoyo 4	3,58E+08				
Barra 8	2,41E+08	Barra 17	4,22E+08	Barra 28	2,24E+08	Apoyo 5	3,70E+08				
Barra 9	3,65E+08	Barra 18	3,76E+08	Barra 29	3,34E+08	Apoyo 6	3,70E+08				
Barra 10	3,60E+08	Barra 19	3,68E+08	Barra 30	3,60E+08	Chapa 1	3,63E+08				
Barra 11	4,00E+08	Barra 20	3,69E+08	Barra 31	2,77E+08	Chapa 2	3,63E+08				

Tabla 5 :Tabla de tensiones máximas de los elementos que componen la estructura

Se muestra la numeración llevada a cabo para clasificar los tornillos:

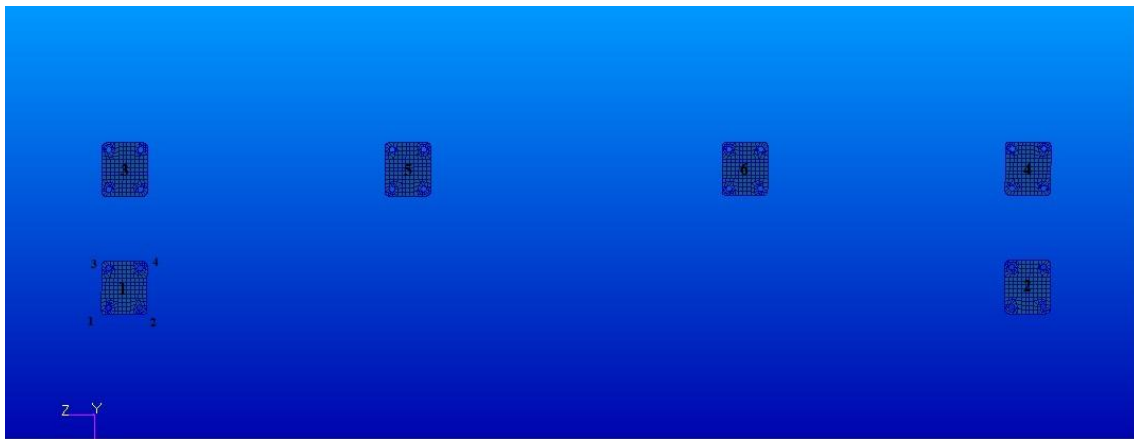


Figura 36 :Numeración de los tornillos en la parte trasera

Así mismo se calcularán con los pasos explicados anteriormente las reacciones en los tornillos:

DETRAS 4MM			
	x	y	z
A1.1	-357	3,11E+04	-188
A1.2	26	5119,17	-16
A1.3	-225	2,56E+04	-131
A1.4	-20	4086,87	-4
	x	y	z
A2.1	26	4,48E+03	16
A2.2	-355	31111,4	188
A2.3	-19	4,25E+03	4
A2.4	-226	25612	131
	x	y	z
A3.1	18	5,43E+03	15
A3.2	69	12896,8	-47
A3.3	-109,179	6,92E+03	93
A3.4	-40	13128,8	-50

	x	y	z
A4.1	67	1,28E+04	44
A4.2	19	5665,08	-17
A4.3	-40	1,34E+04	49
A4.4	-112	7654,1	-95
	x	y	z
A5.1	113	2,45E+04	159
A5.2	97	24499,6	-140
A5.3	270	4,16E+03	-426
A5.4	404	4777,87	443
	x	y	z
A6.1	97	2,45E+04	140
A6.2	111	24477,7	-159
A6.3	412	4,70E+03	-451
A6.4	269	3761,22	427

#### 4.8.-VERIFICACIÓN

Tras la realización de los ensayos se pasa a calcular los coeficientes de seguridad y verificar si los elementos serán capaces de soportar las tensiones máximas.

##### 4.8.1.- VERIFICACION ESPESORES DELANTE

Se procederá a calcular el coeficiente de seguridad tanto a fluencia como a rotura que viene dado por la formulas:

$$C_{sf} = \theta_f / \theta_{max.}$$

$$C_{sr} = \theta_r / \theta_{max.}$$

Coeficientes de seguridad Delante 2mm.														
	$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$
	360	520		360	520		360	520		360	520		360	520
	$C_{sf}$	$C_{sr}$		$C_{sf}$	$C_{sr}$		$C_{sf}$	$C_{sr}$		$C_{sf}$	$C_{sr}$		$C_{sf}$	$C_{sr}$
Barra 1	0,999167	1,443242	Barra 11a	0,904295	1,306204	Barra 21	0,903388	1,304893	Barra 32	1,70052	2,456306	Apoyo 4	0,987925	1,427003
Barra 2	1,229508	1,775956	Barra 11b	0,936037	1,352054	Barra 22	0,983338	1,420377	Barra 33	2,252816	3,254068	Apoyo 5	0,999167	1,443242
Barra 3	1,002227	1,447661	Barra 12	0,947618	1,368781	Barra 23	0,996402	1,439247	Barra 34	2,363756	3,414314	Apoyo 6	1	1,444444
Barra 4	1,030633	1,488692	Barra 13	0,998336	1,442041	Barra 24	0,965924	1,395224	Barra 35	0,999722	1,444043	Chapa 1	0,989283	1,428964
Barra 5	2,233251	3,225806	Barra 14	0,961538	1,388889	Barra 25	0,971136	1,402752	Barra 36	0,996954	1,440044	Chapa 2	0,999445	1,443642
Barra 6	2,199145	3,176542	Barra 15	2,279924	3,293224	Barra 26	0,970874	1,402373	Barra 37	2,896219	4,183427	Chapa 3	1,410658	2,037618
Barra 7	2,199145	3,176542	Barra 16	0,971136	1,402752	Barra 27	0,998336	1,442041	Barra 38	1,868189	2,698495	Chapa 4	0,999722	1,444043
Barra 8	0,962052	1,389631	Barra 17	0,969044	1,399731	Barra 28	0,96463	1,393355	Barra 39	2,995008	4,326123	Chapa 5	0,988739	1,428179
Barra 9a	0,904523	1,306533	Barra 18	2,264151	3,27044	Barra 29	0,995025	1,437258	Apoyo 1	0,999167	1,443242	Chapa 6	0,856124	1,236623
Barra 9b	0,935551	1,351351	Barra 19	0,983338	1,420377	Barra 30	0,74922	1,082206	Apoyo 2	0,998059	1,441641			
Barra 10	0,949367	1,371308	Barra 20	0,752666	1,087184	Barra 31	0,995851	1,438451	Apoyo 3	0,988197	1,427395			

Tabla 7:Tabla de coef.de seguridad de la estructura delantera para 2mm

Se observa que en la barra de delante que muchos de los coeficientes de fluencia están por debajo de la unidad, es decir pasaran a tener deformaciones permanentes, no obstante solo dos barras se acercan al coeficiente de seguridad por rotura las cuales se comentarán en el apartado posterior.

##### 4.8.2.- VERIFICACIÓN ESPESORES DETRÁS

Se verificará el último ensayo realizado, el de 4mm, dado que es el que soporta el choque. Se procede a calcular el coeficiente de seguridad tanto a fluencia como a rotura que viene dado por la formulas:

$$C_{sf} = \theta_f / \theta_{max.}$$

$$C_{sr} = \theta_r / \theta_{max.}$$

Coeficientes de seguridad Detrás 4mm.														
	$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$		$\theta_f$	$\theta_r$
	360	520		360	520		360	520		360	520		360	520
	Csf	Csr		Csf	Csr		Csf	Csr		Csf	Csr		Csf	Csr
Barra 1	1,348315	1,947566	Barra 11b	0,930233	1,343669	Barra 21	1,068566	1,543485	Barra 32	1,923077	2,777778	Chapa 3	1,06383	1,536643
Barra 2	1,399689	2,021773	Barra 12a	0,899775	1,299675	Barra 22	1,061321	1,533019	Barra 33	1,328413	1,918819	Chapa 4	1,066983	1,541197
Barra 3	1,434263	2,071713	Barra 12b	0,930473	1,344017	Barra 23	0,99889	1,442841	Barra 34	0,986301	1,424658	Chapa 5	2,140309	3,091558
Barra 4	1,400778	2,023346	Barra 13	0,999445	1,443642	Barra 24	0,99889	1,442841	Apoyo 1	0,985491	1,423488			
Barra 5	1,495017	2,159468	Barra 14	1,067299	1,541654	Barra 25	0,989283	1,428964	Apoyo 2	0,985222	1,423098			
Barra 6	0,999167	1,443242	Barra 15	0,995851	1,438451	Barra 26	0,862069	1,245211	Apoyo 3	1,001669	1,446856			
Barra 7	1,001669	1,446856	Barra 16	0,961025	1,388147	Barra 27	0,985491	1,423488	Apoyo 4	1,005587	1,452514			
Barra 8	1,493776	2,157676	Barra 17	0,853283	1,23252	Barra 28	1,604278	2,317291	Apoyo 5	0,97271	1,405026			
Barra 9	0,987654	1,426612	Barra 18	0,958466	1,384452	Barra 29	1,076877	1,555489	Apoyo 6	0,971922	1,403888			
Barra 10	0,999445	1,443642	Barra 19	0,978261	1,413043	Barra 30	0,999722	1,444043	Chapa 1	0,99283	1,434087			
Barra 11a	0,899101	1,298701	Barra 20	0,976404	1,410361	Barra 31	1,301518	1,879971	Chapa 2	0,993103	1,434483			

Tabla 8 : Tabla de coef.de seguridad de la estructura trasera para 4mm.

La estructura trasera, consta de menos barras esto hace que a pesar del aumento de espesor respecto a la estructura delantera se observe que algunos de los coeficientes de fluencia estén por debajo de la unidad, respecto a los coeficientes de rotura se observa una mejoría en las barras con mayores tensiones.

#### 4.9.- CÁLCULO TORNILLERÍA

Para realizar los cálculos se seguirán las instrucciones de anexo A. Hay que resaltar que para el cálculo solo se utilizarán las cargas a tracción dado que las de compresión son favorables. Las fuerzas están en Nw. Las medidas en mm, tensiones en MPa. Se realizará la secuencia:

Se Calculará el Área resistente con la ecuación:

$$A_r = \pi \left( \frac{d-0.983p}{2} \right)^2 \text{ siendo:}$$

*d*: Se refiere a la métrica del tornillo

*p*: Se refiere al paso.

Se parte de un tornillo hexagonal M12x60 mg 6.8 DIN 633, el cual tiene un diámetro de 12mm, el cual tiene un paso de 1,75 en la tabla (ver anexo B) y por tanto:

Ar	84,2692148
Diámetro	12
Paso	1,75

$$Fa = \frac{\sqrt{Fx^2 + Fz^2}}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{Fa}{Ar}$$

$$\theta_x = \frac{Fy}{Ar}$$

Para sacar la  $\tau_{m\acute{a}x}$ :

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{\theta x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Y por último los coeficientes, los cuales vienen definidos en el punto 3.8:

$$Cs = \frac{\theta f}{2 \times \tau_{m\acute{a}x}}$$

Con esto se calculará la siguiente tabla, se subdividirá en parte delantera y trasera, se sigue con la misma numeración de tornillos que en la figura 31 en el apartado 4.7.1.

DELANTE 2MM				
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A1.1	0,329537158	5,25E+01	26,2628975	9,13836715
A1.2	0,295097603	1,07E+02	53,4136671	4,49323203
A1.3	0,279843934	5,44E+01	27,2064174	8,82144812
A1.4	0,249900504	1,12E+02	56,2040047	4,27015835
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A2.1	0,352919501	1,00E+02	50,2341933	4,77762226
A2.2	0,86512733	1,66E+02	82,9091583	2,89473449
A2.3	0,484793953	1,73E+02	86,6637445	2,76932414
A2.4	1,168867733	3,92E+02	195,905485	1,22508055
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A3.1	1,16072021	0,00E+00	1,07736726	222,765262
A3.2	1,746816675	0,00E+00	1,32167192	181,588181
A3.3	0,258525011	9,89E+01	49,4527602	4,85311637
A3.4	0,244539617	1,60E+02	80,2336706	2,99126287
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A4.1	1,702660541	0,00E+00	1,30486035	183,927728
A4.2	1,169467249	0,00E+00	1,08141909	221,930612
A4.3	0,244184054	1,60E+02	79,919206	3,00303284
A4.4	0,262415324	9,88E+01	49,4028433	4,85801998
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A5.1	0,310442917	1,10E+02	54,9174239	4,37019771
A5.2	0,330094668	5,31E+01	26,5775394	9,03018133
A5.3	0,259077371	1,14E+02	57,2010888	4,19572433
A5.4	0,279506739	5,40E+01	27,0233424	8,88121078
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A6.1	0,917188043	1,70E+02	85,051871	2,82180741
A6.2	0,362544138	1,03E+02	51,2915997	4,67912878
A6.3	1,249305171	4,04E+02	201,787935	1,18936744
A6.4	0,749210872	1,78E+02	89,2497186	2,68908411

Tabla 9 : Tabla de calculo tornillería delante..

Se observa que los tornillos más críticos de la parte delantera serán el 2.4 con un coeficiente de 1,225 y el 6.3 con un coeficiente de 1,18.

Se pasa a realizar los cálculos para la parte trasera, se sigue el mismo proceso y obtendremos la tabla:

DETRÁS 4MM				
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A1.1	2,39143215	3,69E+02	184,5127683	1,300722992
A1.2	0,1816724	6,07E+01	30,37689397	7,900741933
A1.3	1,54425749	3,04E+02	152,100952	1,577899394
A1.4	0,12164797	4,85E+01	24,25139914	9,896336233
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A2.1	0,18039627	5,32E+01	26,57946907	9,029525736
A2.2	2,38430524	3,69E+02	184,6017464	1,300096043
A2.3	0,11855837	5,05E+01	25,24573043	9,506557975
A2.4	1,47136259	3,04E+02	151,9701825	1,579257168
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A3.1	0,14136915	6,44E+01	32,1937262	7,454868646
A3.2	0,49187971	1,53E+02	76,52463419	3,136244982
A3.3	647,79908	-2,00E+02	103,3305336	2,322643576
A3.4	0,38022034	-1,58E+02	78,96896736	3,039168524
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A4.1	0,47494391	1,52E+02	75,83034825	3,16495975
A4.2	0,15110423	6,72E+01	33,61523438	7,13962001
A4.3	0,37536502	1,59E+02	79,6785459	3,012103162
A4.4	0,87277049	9,08E+01	45,42417608	5,283530065
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A5.1	1,15888387	2,91E+02	145,2895475	1,651873821
A5.2	1,0102019	2,91E+02	145,368541	1,65097619
A5.3	2,99276797	4,93E+01	24,73387808	9,70329033
A5.4	3,55822169	5,67E+01	28,41153456	8,447273395
	Fa/Ar	Fy/Ar	Tau max.	Cs
A6.1	1,01108579	2,91E+02	145,567307	1,648721852
A6.2	1,15131319	2,90E+02	145,2390892	1,652447707
A6.3	3,62409377	5,58E+01	27,96041986	8,583562093
A6.4	2,99253614	4,46E+01	22,3836373	10,72211798

Tabla 10 : Tabla de calculo tornillería detrás..

Se observa que los tornillos más críticos de la parte trasera serán el 1.1 con un coeficiente de 1,3 y el 2.2 con un coeficiente de 1,3.

#### 4.10.- ANÁLISIS

En este apartado se analizará y observará los puntos más críticos de la estructura y en el siguiente se darán algunas posibles soluciones.

##### 4.10.1.- ANÁLISIS DE TENSIONES MÁS DESFAVORABLES EN LOS TORNILLOS

Los tornillos se basan en el criterio de rigidez que dice:

$$\sigma_{\text{tornillo}} \leq \sigma_e / 2$$

Se observa que los tornillos más críticos de la parte delantera serán el 2.4 con un coeficiente de 1,225 y el 6.3 con un coeficiente de 1,18.

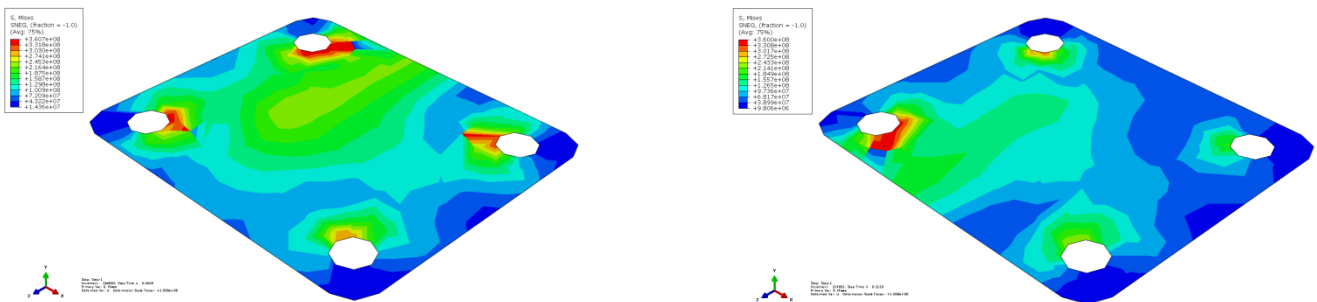


Figura 37 : Vista de las placas delanteras con los tornillos mas desfavorables.

Si se miran los esfuerzos se observará que estos soportan una gran carga a tracción y a eso se debe ser los puntos con tensiones máximas.

Se observa que los tornillos más críticos de la parte trasera serán el 1.1 con un coeficiente de 1,3 y el 2.2 con un coeficiente de 1,3.



Figura 38 : Vista de las placas traseras con los tornillos mas desfavorables.

Se ve que en este caso son los tornillos mas alejados pero la causa es la misma una gran carga de tracción.



Barra 30 Delante (2mm):

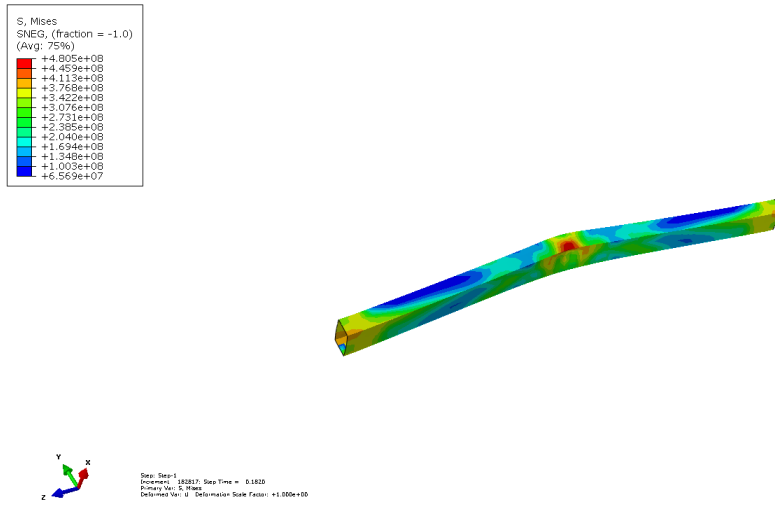


Figura 40 : Vista de las barras delanteras mas desfavorables.

Se observa un punto crítico que es donde golpea la bombona, es la barra superior llegando este cerca de valores del límite de rotura.

Barra 11 a Detrás (4mm):

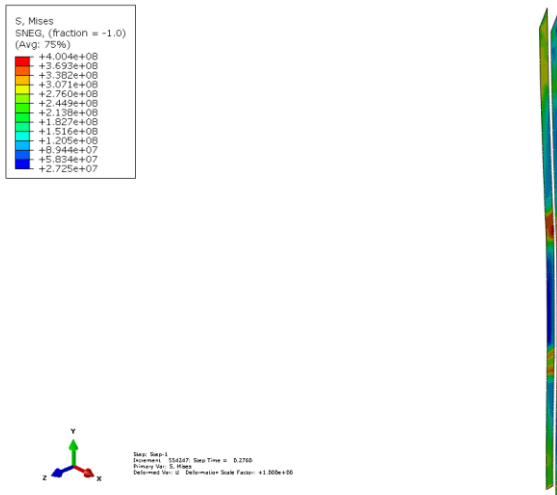


Figura 41 : Vista de las barras traseras mas desfavorables.

Se observa un punto crítico que es donde tiene que soportar la carga a flexión la barra, llegando a su tensión máxima.

Barra 12 a Detrás (4mm):

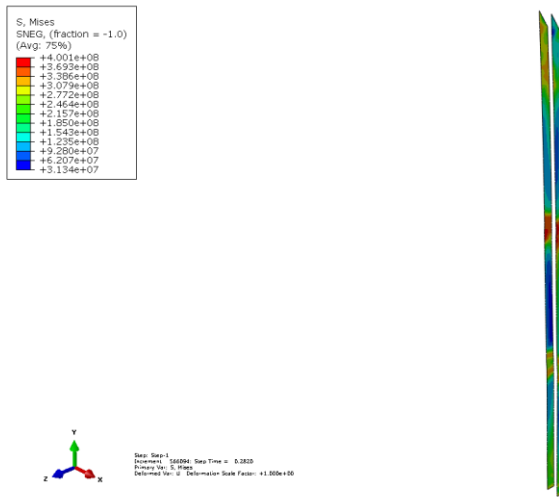


Figura 42 : Vista de las barras traseras mas desfavorables.

Se observa un punto crítico que es donde tiene que soportar la carga a flexión la barra, llegando a su tensión máxima.

Barra 17 Detrás (4mm):

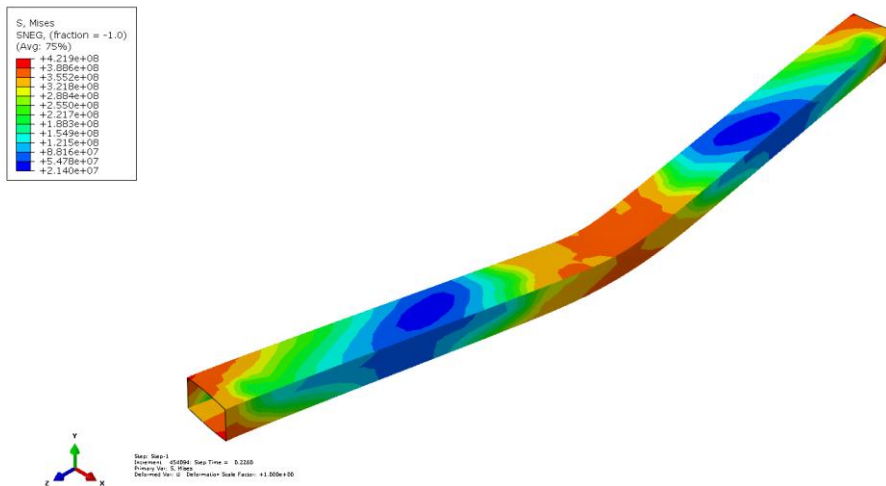


Figura 43 : Vista de las barras traseras mas desfavorables.

Se observa un punto crítico que es donde golpea la bombona, es la barra inferior llegando este a valores elevados, se ve la deformación producida.

Barra 26 Detrás(4mm):

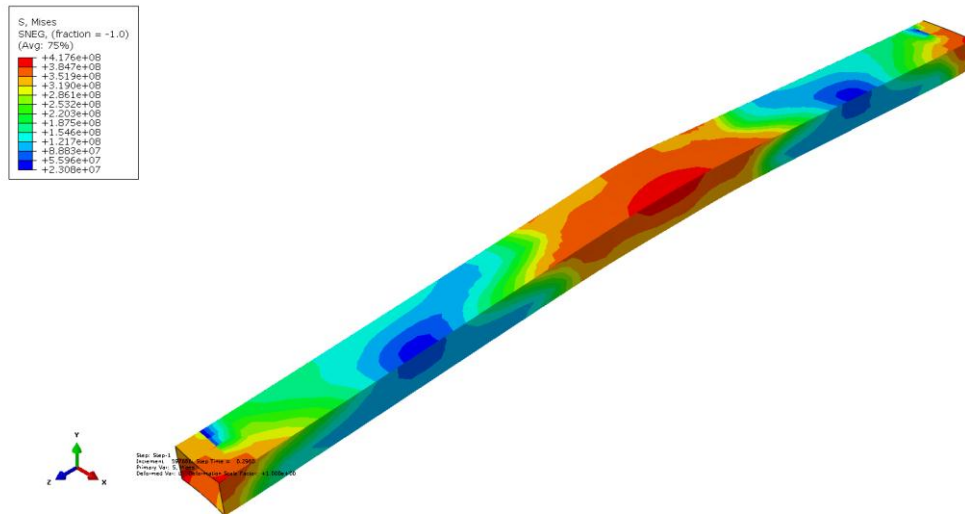


Figura 44 : Vista de las barras traseras mas desfavorables.

Se observa un punto crítico que es donde golpea la bombona, es la barra superior llegando este a valores elevados, se ve la deformación producida.

Chapa 6 (delante):

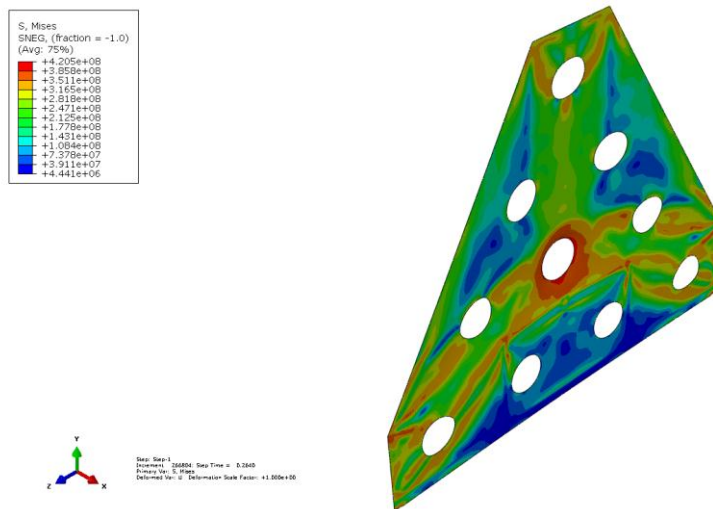


Figura 45 : Vista de las barras delanteras mas desfavorables.

Para finalizar la imagen mas impactante, se ve en la imagen de la chapa como ha golpeado la bombona y las deformaciones que ha producido así mismo se observa el cuadro de barras y como absorbe las tensiones, y en su parte inferior las tensiones son

mínimas, las mayores deformaciones se producen en la zona de impacto de la chapa, esta será la que frene la bombona.

#### 4.10.3.- REEDISEÑO ESTRUCTURAL

Se hará una breve descripción, de acciones llevadas a cabo y posibles mejoras en nuestro diseño.

Tanto la barra veinte como la treinta de la estructura delantera, soportan deformaciones altas y tensiones máximas también altas debido a que es donde impacta la bombona el mejor criterio sería establecer unas barras en su punto medio que ayuden a soportar el impacto de la carga, otra idea sería aumentar el espesor aunque no se hacen grandes avances y se tiene que considerar el aumento de peso.

Para continuar con la estructura de delante una vez solucionado el problema de las barras veinte y treinta, la botella no pasaría entre ellas así que la chapa seis no tendría que soportar el impacto de está.

Así mismo los tornillos 2.4 y 6.3, no soportarían la carga de flexión de la chapa seis y minimizarían sus tensiones.

En la parte trasera se han llevado a cabo varios ensayos los dos primeros con espesores de dos y tres milímetros respectivamente, se han despreciado por que aunque la estructura resista, no son capaces de hacer que la energía cinética de la bombona se haga cero, es decir que pare, en el tercero con un espesor de 4mm ya se consigue detener la bombona en el impacto.

Los puntos críticos de la estructura trasera se darán en las barras que rodean a la botella, observamos que la causa de no tener unos apoyos como las barras 25 y 26 y 16 y 17 de la parte delantera es que la carga a flexión será mayor en su punto central aparecerán tanto las mayores tensiones como las mayores deformaciones, la mejor solución estaría en establecer unas barras en la parte central que eviten la flexión.

En la parte trasera los tornillos más solicitados son los más alejados, su sollicitación es a tracción, deberemos estar seguros de que estén bien roscados y aguantes dichas tensiones.

## **5.- CONCLUSIONES**

- Se han dimensionado los testeros de los semirremolques de forma que sean capaces de soportar las cargas que puedan aparecer y transmitirlos eficazmente a la estructura básica del remolque.
- Se partió de unos diseños y hasta obtener los más adecuados se han realizado varios ensayos, la solución tomada ha sido aumentar el espesor de las barras aunque se observa que la estructura varía lo suficiente para cumplir con los criterios de rigidez.
- Una mejor solución sería colocar mas barras con menor espesor en las zonas adecuadas, esto es, el factor “diseño” marca la diferencia a la hora de conseguir unas buenas características de resistencia y ligereza.
- Cuanto mayor sea el espesor de las barras, mayor es la masa, con lo que habría un exceso de material que no es útil porque no está trabajando de forma óptima para las cargas aplicadas que influyen más en la estructura.
- Hay que tener muy en cuenta para optimizar una geometría, el tipo de esfuerzos y como afectan a la estructura las piezas que se piensen sustituir o añadir, y si el nuevo elemento que se introduzca mejorará realmente el comportamiento de la estructura, teniendo en cuenta la forma en que mejor trabaja.
- En este proyecto se han ido encontrando problemas en los ensayos de choque siendo necesario en algunos casos cambiar la estructura de nuevo. Es por ello que se gana experiencia a la hora de plantear y analizar bien la situación antes de realizar ningún cálculo.

### 5.1.- BIBLIOGRAFIA

1.- *ELASTICIDAD Y RESISTENCIA DE MATERIALES*, Apuntes de la asignatura 2º Curso de Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica.

2.- *TEORIA DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES*, Apuntes de la asignatura 3º Curso de Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica.

3.- *DISEÑO DE MÁQUINAS*, Apuntes de la asignatura 3º Curso de Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica.

4. - *MSC PATRAN Reference Manual*, F.E.M. Modeling Theory Manual, MSC Software, 2001.

### 5.2.- CONSULTAS WEB

<http://www.wikipedia.org>

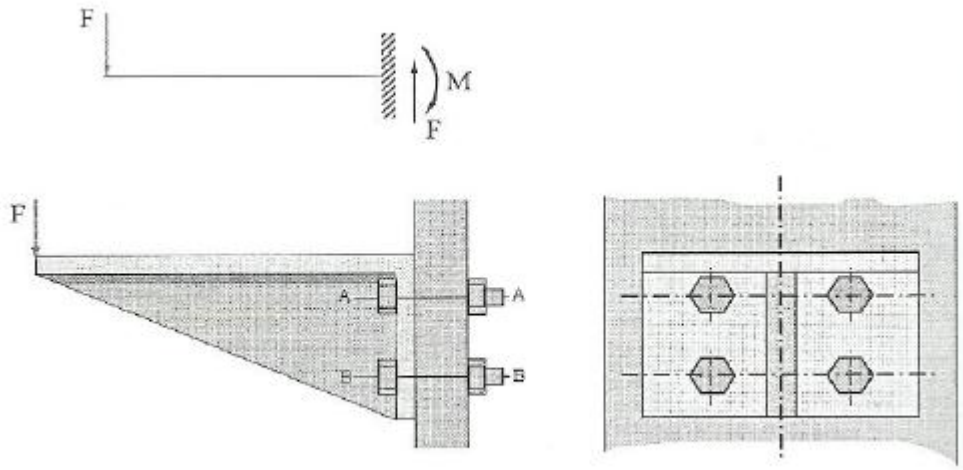
<http://www.energiasostenible.net>

# Anexos

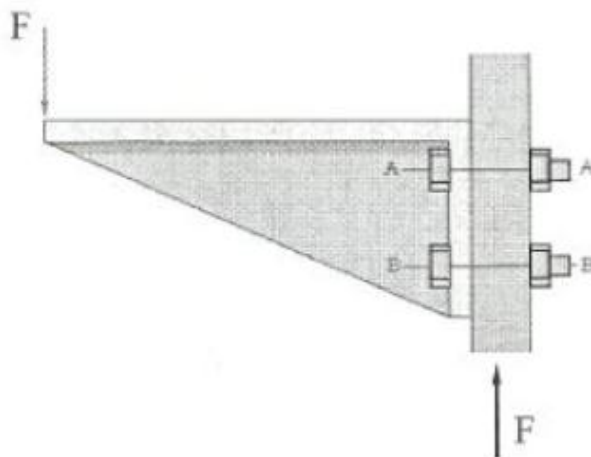
## ANEXO A

### CÁLCULO DE UNIONES ATORNILLADAS A FLEXIÓN

1.- Se analizan las reacciones:



2.- Se calculan las fuerzas a cortadura:



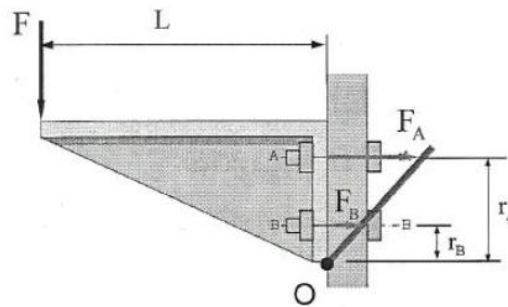
donde:

$$F'_A = F / n$$

$$F'_B = F / n$$

(n = nº de pernos)

3.- Se calculan las fuerzas de tracción:



$$(n_A \cdot F_A \cdot r_A) + (n_B \cdot F_B \cdot r_B) = F \cdot L$$

$$F_A / r_A = F_B / r_B$$

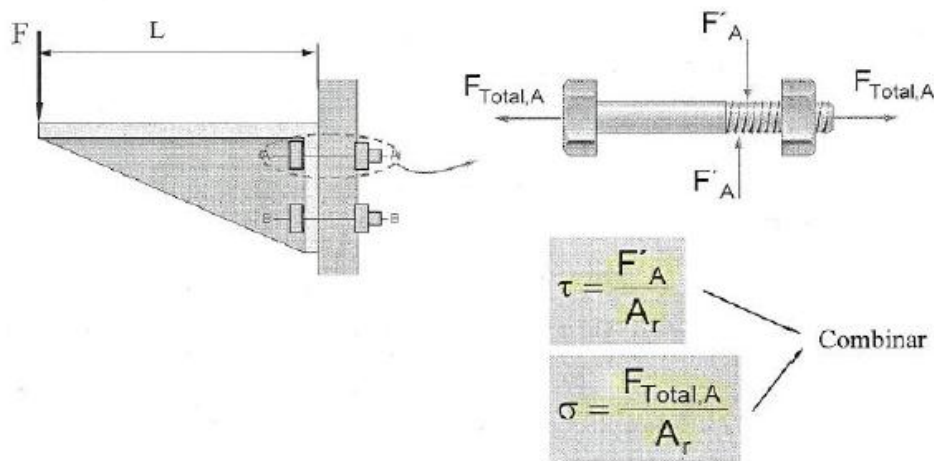
( $n_A$  = nº de pernos hilera A)

( $n_B$  = nº de pernos hilera B)

A partir de las dos ecuaciones se obtendrá la fuerza exterior por tornillo, siendo la fuerza total, en el tornillo más solicitado (en el ejemplo: la hilera A), la dada por la siguiente expresión:

$F_{total\ A} = F_i + C \cdot F_A$  siendo  $F_i$  la precarga inicial y  $C$  la constante de rigidez de la unión.

Una vez están calculadas las fuerzas, se calculan sus respectivas tensiones y se combinan según Von Mises:



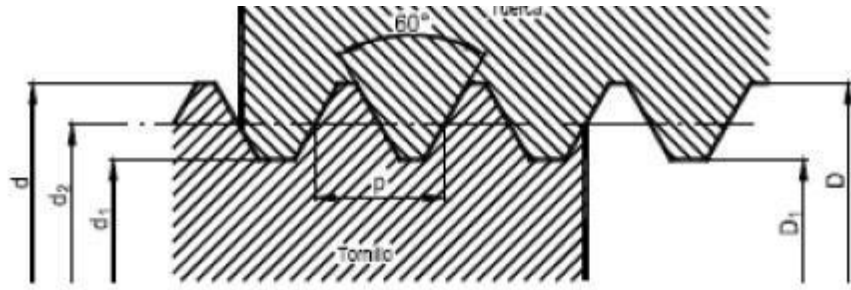
$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

Donde se podrá asegurar la unión mediante un coeficiente de seguridad:

$$C_s = \frac{\tau_f}{\tau_{\max}} = \frac{0.5 \sigma_f}{\tau_{\max}}$$

## ANEXO B

### PERFILES DE TORNILLOS



Díámetro nominal $D, d$	Peso $p$	Díámetro medio $D_2, d_2$	Díámetro inferior $D_1, d_1$	Díámetro nominal $D, d$	Peso $p$	Díámetro medio $D_2, d_2$	Díámetro inferior $D_1, d_1$
1	0,25	0,838	0,729	60	5,5	56,428	54,046
1,1	0,25	0,938	0,829	64	6	60,103	57,505
1,2	0,25	1,038	0,929	68	6	64,103	61,505
1,4	0,3	1,205	1,075	70	6	66,103	63,505
1,6	0,35	1,373	1,221	72	6	68,103	65,505
1,8	0,35	1,573	1,421	76	6	72,103	69,505
2	0,4	1,740	1,567	80	6	76,103	73,505
2,2	0,45	1,908	1,713	85	6	81,103	78,505
2,5	0,45	2,208	2,013	90	6	86,103	83,505
3	0,5	2,675	2,459	95	6	91,103	88,505
3,5	0,6	3,110	2,850	100	6	96,103	93,505
4	0,7	3,545	3,242	105	6	101,103	98,505
4,5	0,75	4,013	3,686	110	6	106,103	103,505
5	0,8	4,480	4,134	115	6	111,103	108,505
6	1	5,350	4,917	120	6	116,103	113,505
7	1	6,350	5,917	125	6	121,103	118,505
8	1,25	7,188	6,647	130	6	126,103	123,505
9	1,25	8,188	7,647	135	6	131,103	128,505
10	1,5	9,026	8,376	140	6	136,103	133,505
11	1,5	10,026	9,376	145	6	141,103	138,505
12	1,75	10,863	10,106	150	8	144,804	141,340
14	2	12,701	11,835	160	8	164,804	161,340
16	2	14,701	13,835	170	8	164,804	161,340
18	2,5	16,376	15,294	180	8	174,804	171,340
20	2,5	18,376	17,294	190	8	184,804	181,340
22	2,5	20,376	19,294	200	8	194,804	191,340
24	3	22,051	20,752	210	8	204,804	201,340
27	3	25,051	23,752	220	8	214,804	211,340
30	3,5	27,727	26,211	230	8	224,804	221,340
33	3,5	30,727	29,211	240	8	234,804	231,340
35	4	33,402	31,670	250	8	244,804	241,340
39	4	36,402	34,670	260	8	254,804	251,340
42	4,5	39,077	37,129	270	8	264,804	261,340
45	4,5	42,077	40,129	280	8	274,804	271,340
48	5	44,752	42,587	290	8	284,804	281,340
52	5	48,752	46,587	300	8	294,804	291,340
56	5,5	52,428	50,046				

## ANEXO C

### LA TEORÍA DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es un método numérico que se utiliza para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales. Su evolución y desarrollo desde mediados del siglo XX hasta nuestros días ha sido constante y en la actualidad puede considerarse como el método numérico más utilizado en la mayoría de los ámbitos de la ingeniería. Son muchas las facetas de la ingeniería en las que se precisa determinar la distribución de tensiones y deformaciones en un continuo elástico. Los casos particulares de dichos problemas pueden variar desde problemas bidimensionales de tensión o deformación plana, sólidos de revolución y flexión de placas y láminas, hasta el análisis más general de sólidos tridimensionales.

El MEF consiste en su formulación física en la división del dominio espacial, ya sea uni, bi o tridimensional en una serie de subdominios de geometría simple, a los cuales se les denomina elementos. Estos elementos se encuentran formados por una serie de puntos que definen su geometría y se denominan nodos. En el interior de cada elemento se interpola una función de desplazamientos que se formula en función de los valores de desplazamientos que existen en los nodos.

La forma de trabajo de estos elementos consiste en aplicar las ecuaciones de compatibilidad y comportamiento y obtener una relación entre la fuerza aplicada sobre los elementos y los desplazamientos de los nodos. Esta relación se expresa mediante la matriz elemental, la cual depende del número de nodos, situación de estos, material utilizado, geometría de elementos y tipo de problema.

Dependiendo del tipo de formulación del problema se determina si el problema es lineal (elasticidad lineal) o si no es lineal (grandes desplazamientos o deformaciones, comportamiento del material complejo).

A continuación se expresa el proceso de cálculo con el MEF:

1. Planteamiento de continuidad de desplazamientos y equilibrio de fuerza entre elementos.
2. Sistema de ecuaciones globales de la estructura.
3. Tipo de formulación inicial (lineal o no lineal).
4. Resolución.
5. Obtención de los desplazamientos nodales (incógnitas básicas).
6. Obtención de otras variables: deformaciones y tensiones.

La aproximación de los elementos finitos no requiere la selección del tipo de ecuación que será usada para modelar la estructura. Los códigos disponibles en el mercado han definido previamente los elementos para los cuales la matriz de rigidez individual del elemento ha sido resuelta.

De esta forma, el usuario necesita definir únicamente el tipo de elemento. Una vez que el elemento ha sido definido el procedimiento es el siguiente:

1. Decidir la geometría requerida para modelar correctamente el problema.
  - 1D (cables, vigas)
  - 2D (tensión o deformación plana)
  - 2D axisimétrica (láminas y sólidos de revolución)
  - 3D (láminas y sólidos)
  
2. Seleccionar el tipo de elemento y formular la matriz de rigidez del elemento si se requiere
  - Definir la matriz que relaciona las deformaciones del elemento con los desplazamientos nodales  $\{B\}$
  - Definir la matriz de la ley constitutiva  $\{D\}$
  - Aplicar una rutina numérica cuadrática para evaluar la rigidez del elemento sobre el volumen del elemento,

$$\int \{B\}^T \{D\} \{B\} dv$$

El MEF consiste en dividir un medio continuo en un número finito de partes cuyo comportamiento se especifica con un número finito de parámetros, pasando de un sistema con infinitos grados de libertad a otro con un número fijo, con propiedades físicas y geométricas muy parecidas, en el que las ecuaciones de equilibrio se pueden expresar mediante un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un determinado número de incógnitas, obteniéndose la solución del sistema completo mediante el ensamblaje de las soluciones para cada elemento finito.

3. Discretizar la geometría en una malla.
  - Definir las localizaciones de los nodos de los elementos.
  - Agudizar el mallado en zonas de concentración de tensiones
  
4. Definir las propiedades locales del elemento.
  - Anisótropo
  - Isótropo
  - Ortótropo
  
5. Siguiendo los pasos anteriores obtenemos la matriz de rigidez del elemento.
  
6. Transformar la matriz de rigidez local del elemento en coordenadas globales.
  
7. Obtener el ensamblaje de la matriz de rigidez suponiendo las matrices de rigidez globales de los elementos.
  
8. Definir las condiciones de contorno aplicadas al sistema y formular el vector de fuerzas nodales  $\{F\}$  así como definir desplazamientos, nodos fijos, contactos, cargas, temperatura, etc.
  
9. Resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas lineales resultante usando los métodos apropiados.
  
10. Resolver tensiones y deformaciones locales de elementos. Calcular tensiones y deformaciones en lámina y comparar con los criterios de rotura. Una vez que se han establecido las características de los nodos o los elementos, las ecuaciones individuales deben ensamblarse para formar un sistema global de ecuaciones que describa la respuesta general del sistema.

Este ensamblaje, el cual aparece en el punto 9, da lugar a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales cuya forma básica es la siguiente.

$$[K]\{u\} = \{f\}$$

En donde:

[K] es una matriz (n x n) de rigidez del sistema;

{u} es un vector columna (nx1) que normalmente representa los términos de desplazamiento del sistema que son desconocidos.

{f} es un vector columna (nx1) que normalmente son las cargas aplicadas que son conocidas.

## ANEXO D

### CARACTERISTICAS DEL HIDROGENO GASEOSO

La realización de instalaciones de hidrógeno fiables y seguras requiere del conocimiento de sus propiedades físicas y de su comportamiento frente a los riesgos intrínsecos que posee cualquier instalación de combustibles. Además de conocer los principios generales de seguridad y de como debe usarse el hidrógeno de forma segura es muy importante reconocer las propiedades del hidrógeno y los peligros asociados para diseñar instalaciones y proyectos seguros sobre todo en lo que se refiere con los nuevos usos del hidrógeno. Las propiedades del hidrógeno relacionadas con la seguridad y su contribución a los posibles peligros potenciales es el punto de partida de la seguridad en los diseños, la manipulación y el uso del hidrógeno en cualquier instalación.

Las propiedades físicas y químicas de los combustibles gaseosos como el metano, propano e hidrógeno son bastante diferentes de los combustibles líquidos más comúnmente usados como la gasolina. El hidrógeno no es ni más ni menos peligroso en sí que la gasolina, el propano o el metano. La contribución potencial de una propiedad en particular del hidrógeno a un peligro determinado depende fuertemente de las condiciones específicas bajo las cuales el hidrógeno es liberado y/o confinado.

Las propiedades más importantes del hidrógeno relativas a la seguridad se resumen en los siguientes puntos (para un listado más exhaustivo de las propiedades del hidrógeno, metano y gasolina ver Hord –1976–):

- **Densidad:** es el más ligero de los elementos.
- **Densidad respecto al aire:** el hidrógeno gaseoso a temperatura ambiente tiene mucha menos densidad que el aire.
- **Difusión:** aunque el transporte de gas por difusión es mucho menor que el debido a la diferencia de densidad con el aire, el hidrógeno se difunde en el aire mucho más deprisa que otros gases combustibles.
- **Color, olor, gusto y toxicidad:** el hidrógeno como el metano y propano es incoloro, inodoro e insípido y no tóxico.
- **Inflamabilidad** y características de la llama: el hidrógeno es inflamable en el aire en un amplio rango de concentraciones y arde, en ausencia de impurezas, con una llama casi invisible.
- **Energía de ignición:** el hidrógeno puede entrar en ignición con una cantidad de energía muy pequeña
- **Límites de detonación:** el hidrógeno puede detonar en un rango de concentración bastante amplio cuando esta confinado pero es muy difícil que detone en espacios abiertos.
- **Velocidad de la llama:** el hidrógeno, para concentraciones medias, tiene una velocidad de llama mayor que otros combustibles.
- **Temperatura de ignición:** el hidrógeno tiene mayor temperatura de ignición que los combustibles comunes.

Algunas de las propiedades anteriores son menos críticas que otras desde el punto de vista de la seguridad. Tan sólo un pequeño número de ellas se pueden considerar decisivas a la hora de evaluar los peligros potenciales y establecer sus factores de riesgo. Las condiciones normales de temperatura y presión (NTP) corresponden a propiedades a 0°C y 1 atmósfera.

Se debe realizar una distinción entre la velocidad de empuje y la velocidad de difusión. El empuje responde a la velocidad de una nube de gas que permanece cohesionada. La difusividad describe la velocidad a la cual las moléculas individuales penetran en el volumen de otro gas. Ambos parámetros son necesarios para explicar la velocidad con la que la nube de hidrogeno se dispersa en el aire.

- Velocidad de difusión en el aire a NTP: la velocidad a la cual un combustible gaseoso se difunde en el aire.
- Velocidad ascensional en el aire NTP: la velocidad a la cual el combustible gaseoso se eleva en el aire por las fuerzas de empuje.
- Energía térmica radiada: energía emitida por radiación desde la zona de combustión hacia sus proximidades.
- Quenching en el aire a NPT: la máxima distancia, entre dos superficies planas de acero, que evita la propagación de las llamas o chispas a través de dicha separación.
- Distancia de inducción a la detonación a NPT: la distancia necesaria para que una deflagración se convierta en una detonación en una mezcla aire/hidrógeno.
- Limitación de oxígeno: la concentración mínima de oxígeno que soportaría la propagación de la llama en una mezcla con concentraciones desconocidas de combustible, aire y nitrógeno. Si esta mezcla contiene menos de un 5% en volumen de oxígeno la llama no podrá propagarse.
- Máxima distancia experimental de seguridad (MESG) en el aire a NTP: la combustión del combustible depende en gran medida de si el proceso ocurre en una zona total o parcialmente confinada, o bien en espacios abiertos dado que la sobrepresión puede provocar una situación de accidente.

**Tabla de las propiedades del hidrógeno gaseoso**

Temperatura de autoignición	858 K
Mínima energía para la ignición	0.02 mJ
Límites de inflamabilidad en el aire	4.1 – 75 (vol. %)
Límites de detonabilidad en el aire	18.3 – 59 (vol. %)
Temperatura de la llama	2318 K
Velocidad de detonación	1.48 – 2.15 km/s
Sobrepresión de la detonación	1470 kPa
Calor de combustión inferior	120 kJ/g
Calor de combustión superior	142 kJ/g
Velocidad de combustión a NTP	265 – 325 cm/s
Porcentaje de energía térmica radiada	≈ 21 %
Flujo de calor emitido	$1.53 \times 10^{-2}$ kJ/cm <sup>2</sup> ·s
Energía de explosión	2 kg TNT/m <sup>3</sup>
Velocidad ascensional NTP	1.2 – 9 cm/s
Velocidad de difusión en el aire a NTP	≈ 2 cm/s
Coefficiente de difusión a NTP	0.61 cm <sup>2</sup> /s
Composición estequiométrica a NTP	29.53 vol. %
Limitación de oxígeno	5 vol.%
Viscosidad del gas a NTP	$8.9 \times 10^{-5}$ g/cm·s
Quenching gap a NTP	0.06 cm
Densidad del gas	0.0838 kg/m <sup>3</sup>
Peso Molecular	2.02 g/mol
Punto de ebullición	20.3 K
Toxicidad	No es tóxico

## ANEXO E

### CONFINAMIENTO DEL HIDROGENO

#### Materiales específicos de confinamiento

La extensión y modo de degradación por hidrógeno en cualquier sistema de confinamiento depende de múltiples factores relacionados con el material, el diseño y las condiciones de servicio. Existen distintas directrices que se pueden emplear para seleccionar los materiales a utilizar en los sistemas de hidrógeno. La mayoría de ellas recoge aspectos metalúrgicos como la composición, la microestructura, la resistencia, la soldabilidad y sus interacciones con la temperatura y presión del hidrógeno. De manera que la solubilidad y concentración del hidrógeno junto con su difusión marcan la fragilización por hidrógeno.

Algunos son: Aleaciones de hierro, Aceros martensíticos y ferríticos, Aceros de mediana y alta resistencia, Aceros austeníticos, Aleaciones de níquel, Aleaciones de titanio, Aleaciones de cobre, Aleaciones de aluminio, Aleaciones de zirconio.

#### Influencia de la temperatura

El éxito en el diseño de los sistemas de confinamiento depende del control de variables como la temperatura, la presión, las cargas cíclicas, las condiciones de exposición o la pureza del gas.

La tendencia al agrietamiento en los aceros desciende con el incremento de la temperatura. Sin embargo la reducción de área en los ensayos de tracción de los aceros en hidrógeno a 152 bares muestran un mínimo en la reducción de área en torno a los -40°C. Para temperaturas mayores de 160°C y para menores a -80°C la fragilización por hidrógeno desciende.

#### Influencia de la presión

La influencia de la presión del hidrógeno gaseoso en la solubilidad del hidrógeno en el hierro es proporcional a la raíz cuadrada de la presión parcial del hidrógeno en el ambiente (Ley de Sievert):

$$S = K \cdot p^{1/2}$$

Esta relación es válida excepto para altas presiones (>120 atm) y para altas temperaturas.

La presión también afecta a la permeabilidad del hidrógeno en el hierro y acero de manera que se obtiene una expresión análoga a la anterior:

$$P = K \cdot p^{1/2}$$

#### Materiales comúnmente aceptados

##### ***Materiales metálicos***

Los metales con estructura cúbica centrada en las caras como el acero inoxidable austenítico, las aleaciones de aluminio, el cobre y las aleaciones de cobre realizan un servicio satisfactorio con el hidrógeno.

El níquel que también tiene una estructura centrada en las caras es una excepción ya que es susceptible a sufrir un fuerte efecto de fragilización por hidrógeno por lo que no se emplea normalmente.

Los aceros austeníticos no estabilizados (algunos de las series 300) pueden convertirse en martensíticos cuando sufren un esfuerzo por encima del límite elástico a baja temperatura reduciéndose la ductilidad del acero.

Los aceros al carbono ordinarios se pueden emplear con hidrógeno gaseoso pero pierden ductilidad a las temperaturas de servicio del hidrógeno líquido por lo que no son aconsejables para este tipo de aplicación.

Hierro, aceros de baja aleación, cromo, molibdeno, niobio, cinc y la mayoría de los metales con estructura cúbica centrada en el cuerpo no son aceptables para un uso a temperaturas criogénicas.

### ***Materiales no metálicos***

El uso de elastómeros y plásticos debe limitarse a obturación y elementos de sellado.

### ***Materiales prohibidos***

La fundición gris, la fundición dúctil o el hierro fundido no deben emplearse en el servicio con hidrógeno (NFPA 50A 1994)

Los asbestos y asbestos impregnados con Teflón<sup>7</sup> no deben emplearse debido al peligro cancerígeno de los asbestos.

### ***Medidas preventivas y técnicas de minimización de riesgos***

#### Selección de materiales:

Dependencia del nivel de resistencia:

#### *Materiales a evitar:*

- Algunos aceros están sujetos a fragilización por hidrógeno y consecuentemente deben ser evitados para minimizar el riesgo de fallos.

Prevención de fragilización por hidrógeno

#### *Materiales resistentes:*

- Usar aquellos materiales que son muy resistentes al hidrógeno como el AISI 316 y 310 (acero inoxidable)

#### *Materiales susceptibles*

- Para aquellos materiales que sean susceptibles a la fragilización como los aceros de alta resistencia y las aleaciones ferríticas se recomienda atender ciertos criterios de diseño de seguridad.

### *Prevención de ataque por hidrógeno:*

- La combinación de altas temperaturas con altas presiones en un ambiente con hidrógeno impone especiales requerimientos para los materiales que se empleen. El ataque por hidrógeno tiene dos formas de actuación. La primera se denomina descarburación superficial y da lugar a una pérdida de resistencia y a un incremento de la ductilidad. La segunda forma es la descarburación interna que ataca desde el interior del acero provocando una pérdida de resistencia y ductilidad en la que las fisuras aparecen en el borde de grano.

### *Soldadura*

- Las soldaduras en general tienen una alta tendencia a verse afectadas por el hidrógeno de manera que la fragilización por hidrógeno puede aparecer mediante fisuras espontáneas tanto en el metal de aportación como en la zona afectada térmicamente. Por esa razón se han efectuado numerosos ensayos al respecto.

### *Inhibidores de la fragilización*

- La pureza del hidrógeno es importante. Ciertas impurezas pueden emplearse para retardar o evitar el fenómeno de agrietamiento debido al hidrógeno. Esto es debido a que la permeabilidad del hidrógeno en los metales puede reducirse por reacción de la superficie del metal con los inhibidores.

### Inspección y seguimiento

### Control de calidad

## ANEXO F

### PREVENCIÓN Y EXTINCIÓN DE INCENDIOS DE HIDRÓGENO

La respuesta frente a los incendios de hidrógeno requiere de un esfuerzo conjunto que englobe a los trabajadores de propia planta, la organización de seguridad, las fuerzas de seguridad, los parques bomberos y los servicios de asistencia médica. El análisis completo de los riesgos potenciales debe dar lugar a planes de respuesta antincendios exhaustivos.

- Normalmente los incendios de hidrógeno, no se intentan extinguir hasta que la alimentación de hidrógeno se ha cerrado ya que siempre existe el riesgo de re ignición o explosión. La re ignición puede ocurrir si la mezcla entra en contacto con una superficie metálica lo suficientemente caliente. Para evitar este riesgo es muy importante emplear agua u otros medios para su enfriamiento.
- Los equipos que contienen hidrógeno deben mantenerse fríos mediante agua en spray para disminuir la magnitud de la fuga de hidrógeno y evitar la transmisión térmica asociada a la misma.
- Se deben rociar grandes cantidades de agua sobre los equipos adyacentes para enfriar dichos equipos y evitar su posible influencia en cualquier fuego que pudiera aparecer.
- Cuando se emplea el agua como parte del sistema contraincendios en sistemas que emplean hidrógeno líquido (NFPA 50B 1994) el agua no debe penetrar, bajo ningún concepto, en las válvulas de seguridad y/o purga.
- Los pequeños fuegos de hidrógeno pueden combatirse mediante extintores de polvo químico seco o con dióxido de carbono, nitrógeno y vapor.
- Deberá instalarse un sistema de extinción de agua en spray en las zonas de almacenamiento de hidrógeno, cerca de grupos de tuberías y bombas y en general donde exista un riesgo potencial de incendio. Estos sistemas están preparados para proteger determinados equipos peligrosos y zonas y no están proyectados para la protección global de toda la instalación.
- El sistema de extinción debe ser capaz de realizar una difusión de agua uniforme sobre el 100 por cien de la superficie de la cisterna así como de las tuberías y conexiones adyacentes.
- El caudal mínimo a aplicar mediante spray es de  $8.14 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$  de superficie expuesta.
- El control manual de las estaciones debe estar situado fuera el área de peligro pero con visión directa de la instalación protegida. En cualquier caso el control remoto es fundamental.
- El diseño, la instalación, el mantenimiento y las pruebas de los sistemas de agua en spray deben cumplir con 29 CFR 1910.163 (1999) y NFPA 15 (1996)
- Utilización de sistemas de extinción por dióxido de carbono en fuegos provocados por hidrógeno:
- Aunque se puede producir monóxido de carbono tóxico su concentración es muy pequeña.
- Cualquiera que respire los gases de la llama caliente se verá afectado en cualquier caso sin tener en cuenta la presencia de monóxido de carbono.

- Los espacios cerrados deben ventilarse y verificarse como seguros antes de penetrar en ellos. Se emplean los dispositivos de protección adecuados en dichos espacios.
- El polvo químico seco es mejor que el dióxido de carbono porque son capaces de hacer visibles las llamas.
- El uso de equipos de agua en spray por control remoto es preferible a, las mangueras cuando se trata de enfriar los equipos y de reducir la propagación del fuego.
- Si es necesario emplear las mangueras el personal que las utilice debe estar ubicado detrás de estructuras que sirvan como protección.
- El equipo de extinción de incendios debe estar preparado listo para controlar fuegos incipientes.
- Se deben diseñar e instalar los sistemas fijos de extinción de incendios tal y como se describe en la sección de instalaciones de hidrógeno.
- No se debe permitir que el agua llegue al hidrógeno líquido a través de los sistemas de descarga.

En incendios por hidrógeno gaseoso:

- Se debe cortar el suministro de hidrógeno.
- Los sistemas de hidrógeno deben estar diseñados para interrumpir el flujo de gas en caso de emergencia.
- Para el control de incendios se pueden emplear las toberas de chorro en spray.
- Para controlar pequeños incendios se pueden emplear extintores químicos de polvo seco, dióxido de carbono, nitrógeno y vapor .
- En los casos en que sea necesario proteger equipos e instalaciones próximas se utilizarán sistemas de agua en spray

## ANEXO G

### TABLA DE ESPESORES BARRAS

Adjuntaremos las tablas de espesores de las barras:

DELANTE				
	1,5MM	2MM	4MM	10MM
Barra 1		X		
Barra 2		X		
Barra 3		X		
Barra 4		X		
Barra 5	X			
Barra 6	X			
Barra 7		X		
Barra 8		X		
Barra 9		X	X	
Barra 10		X		
Barra 11		X	X	
Barra 12		X		
Barra 13		X		
Barra 14		X		
Barra 15	X			
Barra 16		X		
Barra 17		X		
Barra 18	X			
Barra 19		X		
Barra 20		X		

DELANTE				
	1,5MM	2MM	4MM	10MM
Barra 21		X		
Barra 22		X		
Barra 23		X		
Barra 24		X		
Barra 25		X		
Barra 26		X		
Barra 27		X		
Barra 28		X		
Barra 29		X		
Barra 30		X		
Barra 31		X		
Barra 32		X		
Barra 33	X			
Barra 34	X			
Barra 35		X		
Barra 36		X		
Barra 37	X			
Barra 38	X			
Barra 39	X			

Como aclaración, las barras que tienen dos espesores el a es de 2mm y b de 4mm, a la hora de modificar solo se modificara el a.

Los apoyos tendrán 10 mm de espesor y chapas 2mm, no variarán.

Para la estructura trasera y para el primer caso sin modificar:

DETRÁS 2mm					DETRÁS 2mm				
	1,5MM	2MM	4MM	10MM		1,5MM	2MM	4MM	10MM
Barra 1		X			Barra 17				
Barra 2		X			Barra 18		X		
Barra 3		X			Barra 19		X		
Barra 4		X			Barra 20		X		
Barra 5	X				Barra 21	X			
Barra 6	X				Barra 22	X			
Barra 7	X				Barra 23		X		
Barra 8	X				Barra 24		X		
Barra 9		X			Barra 25		X		
Barra 10		X			Barra 26		X		
Barra 11		X	X		Barra 27		X		
Barra 12		X	X		Barra 28		X		
Barra 13		X			Barra 29		X		
Barra 14	X				Barra 30		X		
Barra 15	X				Barra 31	X			
Barra 16		X			Barra 32	X			
Barra 17		X			Barra 33	X			
					Barra 34		X		

En los sucesivos ensayos se modificarán solo las barras de dos mm pasando a tres mm y cuatro mm sucesivamente, así mismo los apoyos tienen diez mm de espesor y las chapas dos mm., a las chapas no se les modificara el espesor.

## ANEXO H

### ACUERDO INTERNACIONAL SOBRE EL TRANSPORTE DE MERCANCIAS PELIGROSAS POR CARRETERA (ADR)

El ADR o Acuerdo Europeo sobre el transporte internacional de cargas peligrosas por vía terrestre es un acuerdo europeo firmado por varios países en Ginebra el 30 de Septiembre de 1957 para regular el transporte de mercancías peligrosas por carretera.

El acuerdo regula el embalaje, transporte, documentación y demás aspectos del transporte por carretera de las mercancías peligrosas, incluyendo la carga, descarga y almacenaje de las mismas, sea que el transporte se realice entre varios países o dentro del territorio de uno solo. Un aspecto importante es la determinación de las obligaciones y responsabilidades de cada uno de los intervinientes en las operaciones en orden a procurar evitar daños a las personas y cosas así como proteger al medio ambiente.

En el punto 3.5.3 se describe el ensayo que deben soportar los bultos llenos al 95 por ciento o 98 si se trata de sólidos, el bulto debe soportar:

Una caída de 1,8 m sobre una superficie horizontal plana, rígida y no elástica, como la muestra se asemeja a forma de bidón, se dejara caer en las siguientes orientaciones:

- En diagonal sobre el reborde de la parte superior, con el centro de gravedad en la vertical del punto de impacto.
- Diagonalmente sobre el reborde de la base
- De plano sobre el costado

Nota: Cada una se ensayara en bultos diferentes pero idénticos.

Una fuerza aplicada sobre la superficie superior durante 24 horas y equivalente al peso total, de los bultos idénticos que podrían apilarse hasta una altura de 3 metros (incluida muestra).

En el punto 6.7.2 las disposiciones relativas a la construcción y ensayos a los que deben someterse las cisternas o estructuras dedicadas al transporte de materias por carretera.

6.7.2.7 indica que todas las cisternas portátiles deberán estar provistas de un equipo de descompresión, éstos estarán diseñados para cumplir con todas las especificaciones indicadas, el punto 6.7.2.12 nos indica el caudal de estos.

El apartado 6.7.18 nos indica el tipo de normativa que debe tener aprobado nuestro vehículo para circular.

El apartado 6.7.2.19 nos indica los controles y ensayos a pasar la periodicidad de estos (6.7.2.19.2),.

En el apartado 6.7.2.2 indica las disposiciones relativas al diseño y construcción lo mas relevante es el apartado 6.7.2.2.12 que indica que la cisterna y sus medios de fijación debe soportar con la carga máxima autorizada. Las fuerzas estáticas siguientes aplicadas por separado:

- En la dirección de transporte, dos veces el PBMA multiplicado por la aceleración de la gravedad (g)<sup>1</sup>;
- Horizontal, perpendicularmente a la dirección de transporte, el PBMA (en el caso en que la dirección de transporte no esté claramente determinada, las fuerzas deberán ser iguales a dos veces el PBMA multiplicada por la aceleración de la gravedad (g)<sup>1</sup>;

- Verticalmente de abajo a arriba, el PBMA multiplicado por la aceleración de la gravedad ( $g$ )<sup>1</sup>;
- Y verticalmente de arriba abajo, dos veces el PBMA (la carga total incluyendo el efecto de la gravedad) multiplicado por la aceleración de la gravedad ( $g$ )<sup>1</sup>.

## ANEXO I

### IMÁGENES ENSAYO ESTRUCTURA DETRÁS 2MM

Se obtendrá la siguiente secuencia de imágenes cada cuatro segundos omitiendo las imágenes antes del contacto que nos describen los esfuerzos producidos en el choque para 2mm:

