



# Universidad Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO.

Título del trabajo:

Diseño de una estructura de seguridad  
para turismo de competición.

Title and subtitle (if required):

Design of a competition car's safety cage.

Autor/es

Javier Torres López

Director

Dr. Hugo Malón Litago

Codirector

Dr. David Valladares Hernando

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2018/2019

# Diseño de una estructura de seguridad para turismo de competición.

## RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado “*Diseño de una jaula de seguridad para un vehículo turismo*”, se ha realizado con fin de diseñar una estructura de seguridad para un vehículo Volkswagen Polo III Classic de 1996. Pudiendo ser esta estructura homologada ante la F.I.A. (Federación Internacional del Automóvil) a partir de las especificaciones de diseño y llevando a cabo la simulación de ensayos que se imponen en dicha normativa. Esta simulación de ensayos se ha realizado mediante el software de diseño SolidWorks.

Para el desarrollo del proyecto, inicialmente se ha tenido que realizar un estudio de las normativas aplicables. Tras el estudio de las especificaciones de las tres normativas vigentes se ha decidido realizar el diseño a partir de la normativa expuesta por la F.I.A.

Una vez elegida la normativa a aplicar, se ha realizado el diseño inicial de la jaula en base a la normativa. Este diseño se ha llevado a cabo a partir del software de diseño SolidWorks. Además se ha realizado un estudio del material a aplicar y se ha realizado una comprobación de sus propiedades en dicho programa.

Al finalizar el diseño inicial con su respectiva aplicación del material, se ha procedido al estudio de mallado del material. Este estudio se ha llevado a cabo a partir de la simulación del ensayo del arco principal aplicando las condiciones de contorno y casos de carga correspondientes, con el fin de obtener un número de elementos óptimo en cuanto a calidad reduciendo al máximo el tiempo de trabajo.

En el desarrollo de estas simulaciones de ensayos se ha realizado una simulación de ensayos de elementos tipo Shell debido a la geometría de la jaula. Al observar la deformación plástica del material se ha procedido a realizar las simulaciones no lineales de los ensayos impuestos por la normativa.

Una vez realizadas las simulaciones se han obtenido resultados de tensión, desplazamiento y coeficientes de seguridad, los cuales han sido determinantes para la evaluación de la aptitud del prototipo inicial y la evaluación del posible rediseño de dicho prototipo.



## ÍNDICE

1	Introducción.....	5
1.1	Definición y justificación del proyecto.....	5
2	Objetivo del proyecto.....	5
3	Alcance del proyecto.....	5
4	Normativas existentes.....	6
5	Partes de la estructura.....	7
6	Toma de medidas.....	8
7	Modelado de la estructura.....	9
7.1	Estructura base.....	10
7.1.1	Arco principal.....	11
7.1.2	Semiarcos laterales.....	11
7.1.3	Miembro del techo transversal.....	12
7.1.4	Tirantes longitudinales traseros.....	12
7.1.5	Anclajes al chasis/carrocería.....	13
7.1.6	Resultado final estructura base.....	14
7.2	Refuerzos obligatorios.....	14
7.2.1	Miembros diagonales del arco principal.....	14
7.2.2	Refuerzos diagonales traseros.....	15
7.2.3	Refuerzos del techo.....	15
7.2.4	Barras de las puertas.....	16
7.2.5	Refuerzo del parabrisas.....	17
7.2.6	Cartelas.....	18
7.2.7	Barra de anclaje de arneses.....	18
7.3	Resultado final.....	19
8	Elección del material.....	20
9	Análisis numéricos.....	21
9.1	Casos de carga.....	21
9.2	Condiciones de contorno.....	23
9.3	Modelo numérico.....	24
9.4	Estudio de sensibilidad de malla.....	25
9.5	Material.....	27



9.6	Resultados.....	28
9.6.1	Simulación del ensayo prueba arco principal. ....	28
9.6.2	Simulación del ensayo prueba arco frontal. ....	29
10	Conclusiones.....	31
11	Referencias y Bibliografía. ....	33

**Anexo A: Normativas existentes.**

**Anexo B: Definiciones según anexo J.**

**Anexo C: Diseño de componentes.**

**Anexo D: Test de cargas estáticas.**

**Anexo E: Administrados de vaciados.**



## 1 Introducción.

### 1.1 Definición y justificación del proyecto.

Una estructura de seguridad o jaula antivuelco es una estructura multitubular que irá alojada en el interior del vehículo y estará fijada al chasis o carrocería mediante tornillería o soldadura.

La principal función de la jaula antivuelco es la de evitar la deformación de la carrocería del vehículo, protegiendo así al piloto y copiloto en caso de accidente, especialmente en caso de vuelco.

Según la F.I.A. (Federación Internacional del Automóvil) [1] el uso de la jaula antivuelco en competición es obligatorio, salvo que se indique otra cosa en la reglamentación técnica aplicable.

En este caso se va a diseñar una estructura de seguridad para un Volkswagen Polo III Classic de 1996 basada en las normativas vigentes.

## 2 Objetivo del proyecto.

El objetivo principal del proyecto será el diseño de una estructura de seguridad que pueda ser homologada según la normativa vigente de F.I.A. (Federación Internacional del Automóvil) y de la R.F.E. de A. (Real Federación Española de Automovilismo) para vehículos de competición.

Se va a desarrollar un modelo inicial a partir de los diámetros de los tubos impuestos por el artículo 253 del anexo J al C.D.I. (Código Deportivo Internacional) y posteriormente, se va a analizar la estructura inicialmente diseñada según los estudios estáticos que la F.I.A. requiere para la homologación de jaulas antivuelco. Este análisis se va a llevar a cabo mediante un estudio numérico basado en el Método de Elementos Finitos.

## 3 Alcance del proyecto.

A partir del estudio de las diferentes normativas de homologación proporcionadas por la F.I.A. y por la R.F.E. de A., y las medidas tomadas desde

el interior del vehículo se va a realizar un diseño inicial de la estructura de seguridad mediante el software de diseño SolidWorks.

Posteriormente se le va a aplicar un acero aleado 25CrMo4 realizando previamente un estudio de las características principales del material.

Una vez definido el material y el diseño inicial se realizarán los estudios estáticos que son requeridos por la F.I.A. para la homologación de estructuras de seguridad. Para ello será necesario la aplicación de cargas proporcionales a la masa del vehículo más un peso adicional de 150kg.

Para esta simulación se realizará un estudio numérico basado en el Método de Elementos Finitos a partir del software SolidWorks.

#### **4 Normativas existentes.**

La homologación de una estructura de seguridad puede ser llevada a cabo mediante tres reglamentos o instituciones:

- Fabricada según los requerimientos del Anexo J (comúnmente conocidas como artesanales).
- Homologada o certificada por una A.D.N. (Autoridad Deportiva Nacional).
- Homologada por la F.I.A. (Federación Internacional del Automóvil).

Las jaulas antivuelco diseñadas mediante el anexo J deben seguir en su totalidad la normativa especificada en dicho anexo. Sin embargo, en las homologadas mediante una A.D.N. o la F.I.A., ambas siguen las especificaciones impuestas por la F.I.A. y se diferencian entre sí en su proceso de documentación obligatoria. Para más información sobre los tipos de normativa existente se expone en el *Anexo A, Normativas Existentes*.

En este caso, se ha elegido aplicar la normativa impuesta por la F.I.A. o por A.D.N., ya que el anexo J, impone tanto limitaciones en cuanto a aplicación de material como limitaciones en cuanto a diámetros de los tubos, limitaciones que no están impuestas en la normativa de la F.I.A. siempre y cuando resulten favorables los ensayos explicados posteriormente.

TIPO DE ESTRUCTURA	HOMOLOGACIÓN	RGTO. APLICABLE	DOCUMENTACIÓN OBLIGATORIA	PLACA IDENTIFICATIVA
SEGÚN ANEXO J Art. 253.8	NO OBLIGATORIA	ANEXO J AL CDI	NINGUNA	NO NECESARIAMENTE
HOMOLOGADA ADN	OBLIGATORIA	RGTO. HOMOLOGACIÓN FIA	CERTIFICADO ADN	SI, OBLIGATORIA
HOMOLOGADA FIA	OBLIGATORIA	RGTO. HOMOLOGACIÓN FIA	FICHA HOMOLOGACIÓN FIA (VARIANTE OPCIÓN)	SI, OBLIGATORIA

Tabla 1: Cuadro resumen [2]

## 5 Partes de la estructura.

En este apartado de la memoria, para facilitar las explicaciones posteriores, se indicarán los nombres de los componentes con los que cuenta la estructura de seguridad diseñada. Para más información sobre las distintas partes y definiciones de los diferentes componentes con los que puede contar una jaula antivuelco acudiremos al *Anexo B, definiciones según el anexo J.*

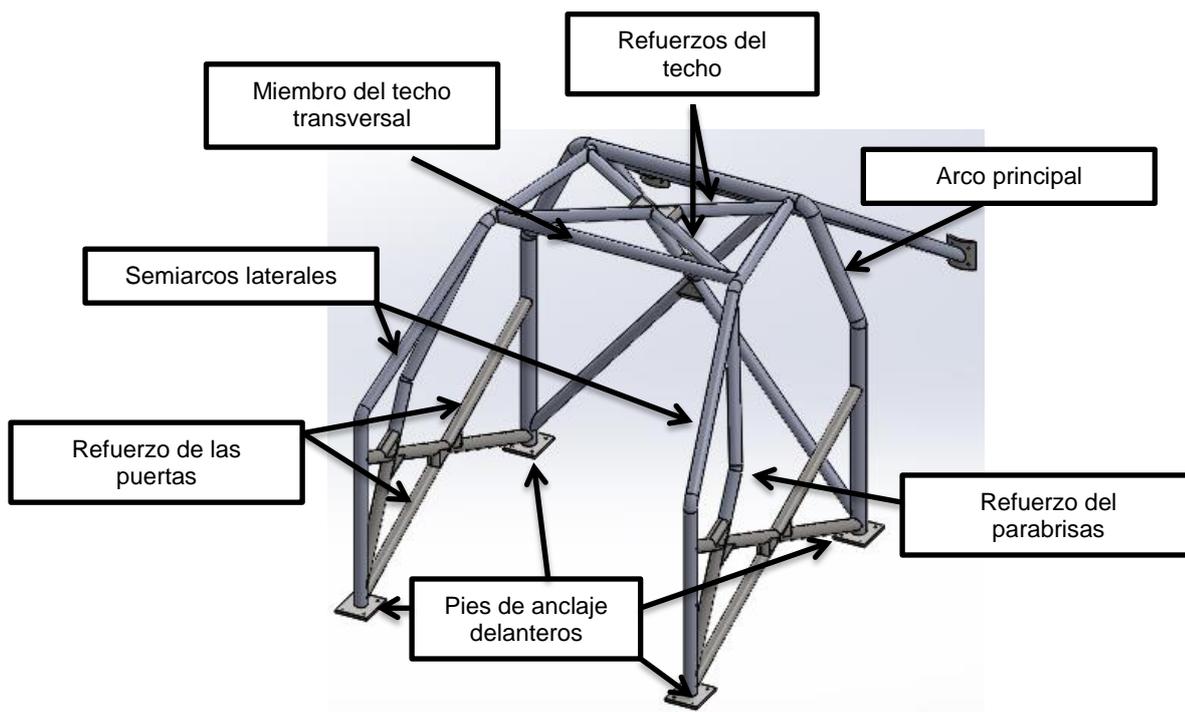


Figura 1: Partes de la jaula 1

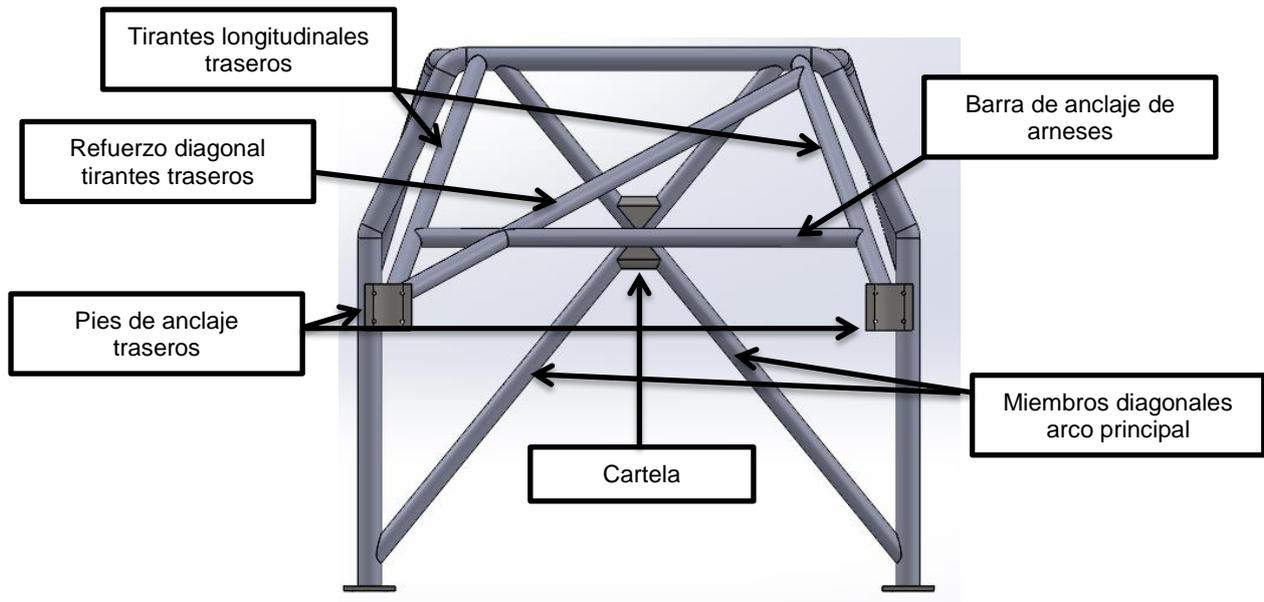


Figura 2: Partes de la jaula 2

## 6 Toma de medidas.

Debido a la dificultad para encontrar los planos del vehículo, en este caso un Volkswagen Polo III Classic de 1996, se ha tenido que llevar a cabo una toma de medidas manual extrayendo los asientos traseros facilitando así la medición.

Inicialmente, se ha elegido donde irán situados los puntos de anclaje. Lo ideal sería anclar la jaula al chasis del vehículo, pero debido a la dificultad para la toma de estas medidas, se ha tenido que aproximar la medición intentándola realizar lo más exacta posible.

Se contará con 6 puntos de anclaje:

- 2 del arco principal
- 1 por cada semiarco lateral
- 1 por cada tirante longitudinal trasero

Los puntos de anclaje del arco principal irán situados detrás de los asientos delanteros, a nivel del suelo del vehículo y lo más cerca posible de la carrocería, estando así situados lo más cerca posible de lo que sería un anclaje al chasis del vehículo.

Los semiarcos laterales estarán igualmente anclados a nivel del suelo, lo más cerca posible de la carrocería y detrás de la carrocería de la rueda delantera sin estar visible lateralmente por la puerta, es decir, debajo del salpicadero.

Por último los anclajes de los tirantes longitudinales traseros se ha decidido colocarlos en las torretas de suspensión traseras, ya que estas son partes muy resistentes del vehículo.

Una vez sabiendo donde irán situados los diferentes anclajes de la estructura básica de la jaula antivuelco se procederá a tomar las medidas de anchura, altura, y distancia longitudinal (tanto a nivel de suelo como de techo), necesarias para el desarrollo del modelo inicial. Además se ha dejado 1cm de margen entre el techo del vehículo y el de la jaula antivuelco.

Se adjunta a continuación un croquis con las medidas de importancia necesarias para el diseño de la jaula junto con otras que se han tomado que no se han podido representar en el croquis:

- Altura de las torretas: 660 mm
- Altura del techo: 1180 mm
- Anchura del techo (arco principal): 800 mm
- Anchura del techo (tirante transversal): 900 mm
- Altura de inicio montante del parabrisas: 730 mm
- Distancia tirante transversal – asientos traseros: 625 mm

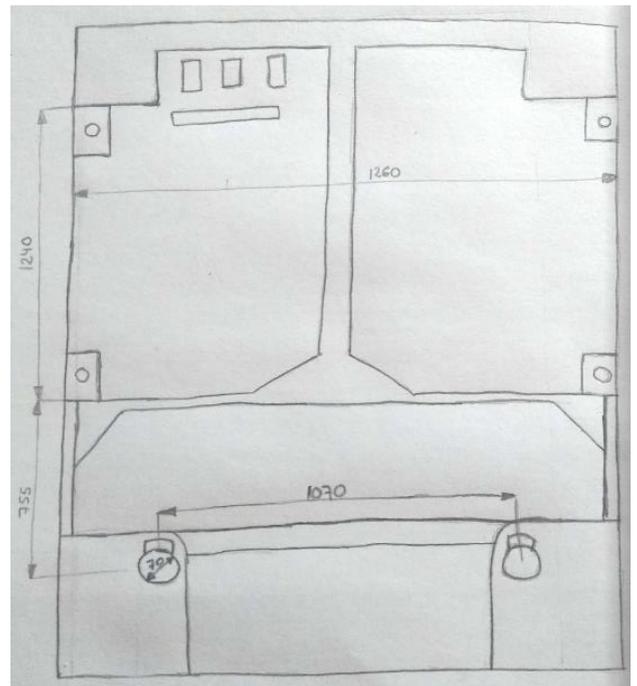


Figura 3: Croquis de medidas

## 7 Modelado de la estructura.

Para el modelado de la estructura de seguridad se seguirá la normativa marcada por la F.I.A. y se seguirán sus especificaciones impuestas [1], ya que estas permiten mayor libertad en cuanto a la elección de material y diseño.

En cuanto al software de diseño empleado, se ha utilizado el programa de diseño y de cálculo SolidWorks, diseñando cada tubo como piezas independientes y haciendo un ensamblaje de todas ellas mediante relaciones de posición.

El anexo J indica en su apartado 253-8.3.3 que diámetro de tubo, material y resistencia a la tracción mínima se debe aplicar según el tubo al que nos refiramos. Para este diseño inicial se seguirán los diámetros que marca el anexo J y sus espesores correspondientes.

Material <i>Material</i>	Resistencia mín. a la tracción <i>Min. tensile strength</i>	Dimensiones mínimas (mm) <i>Minimum dimensions (mm)</i>	Aplicación <i>Use</i>
Acero al carbono no aleado estirado en frío sin soldadura (ver a continuación) conteniendo un máximo de 0,3% de carbono  <i>Cold drawn seamless unalloyed carbon steel (see below) containing a maximum of 0.3 % of carbon</i>	350 N/mm <sup>2</sup>	45 x 2.5 (1.75"x0.095") o / or 50 x 2.0 (2.0"x0.083")	Arco principal (Dibujos 253-1 y 253-3) o Arcos laterales + Miembros transversales traseros (Dibujo 253-2)  <i>Main rollbar (Drawings 253-1 and 253-3) or Lateral rollbars +Rear transverse member (Drawing 253-2)</i>
		38 x 2.5 (1.5"x0.095") o / or 40 x 2.0 (1.6"x0.083")	Semiarcos laterales y otras partes de la estructura de seguridad (a menos que se indique lo contrario en los artículos anteriores)  <i>Lateral half-rollbars and other parts of the safety cage (unless otherwise indicated in the articles above)</i>

Tabla 2: Cuadro proporcionado por el anexo J art. 253-8.3.3 [3]

## 7.1 Estructura base.

La normativa de la F.I.A. dice que la estructura base de nuestra jaula antivuelco debe cumplir con el artículo 253-8.3.1 del anexo J [3].

Este artículo da a elegir entre 3 posibles diseños:

- Estructura 1 (figura 4): consta de 1 arco principal, 1 arco frontal, 2 miembros longitudinales, 2 tirantes longitudinales traseros, 6 puntos de anclaje.
- Estructura 2 (figura 5): consta de 2 arcos laterales, 2 miembros transversales, 2 tirantes longitudinales traseros, 6 puntos de anclaje.

- Estructura 3(figura 6): consta de 1 arco principal, 2 semiarcos laterales, 1 miembro transversal, 2 tirantes longitudinales traseros, 6 puntos de anclaje.

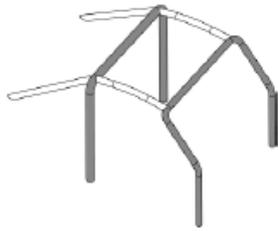


Figura 4: Estructura 1  
[3]



Figura 5: Estructura 2  
[3]

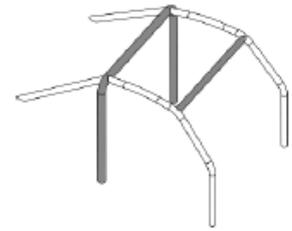


Figura 6: Estructura 3  
[3]

En este caso, se han elegido como estructura básica la estructura 3. A continuación se mostrarán los diseños de los componentes de la jaula. Para más información sobre el procedimiento de diseño en SolidWorks se acudirá al *Anexo C, Diseño de componentes*.

### 7.1.1 Arco principal.

Según el apartado anterior se ha elegido un tubo de diámetro 50 mm x 2 mm de espesor.

La normativa de la F.I.A. indica que este tubo debe ser transversal y casi vertical ( $\pm 10^\circ$  con respecto a la vertical) y estar contenido en un solo plano.

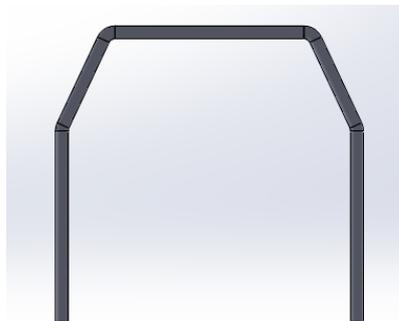


Figura 7: Arco principal  
en vista frontal

### 7.1.2 Semiarcos laterales.

La normativa de la F.I.A. indica que este diseño debe ser rectilíneo en vista lateral y además que la parte inferior del arco lateral no debe tener un ángulo superior a  $90^\circ$  con la horizontal. Este tubo será de 40 mm de diámetro y 2 mm de espesor según el apartado anterior.



Figura 8: Semiarco lateral

### 7.1.3 Miembro del techo transversal.

Este nuevo tubo volverá a ser de 40 mm de diámetro x 2 mm de espesor e irá situado transversalmente a nivel de techo.

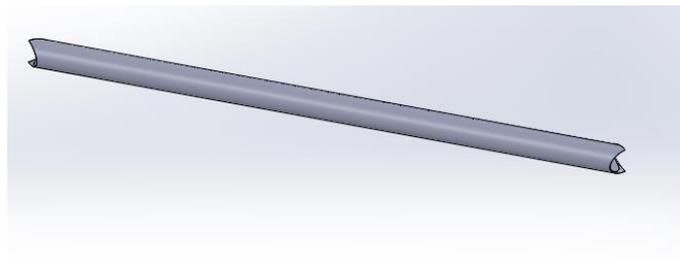


Figura 9: Miembro transversal

### 7.1.4 Tirantes longitudinales traseros.

Estos tirantes serán de 40 mm de diámetro x 2 mm de espesor e irán situados lo más cerca posible de las esquinas superiores del arco principal y en dirección casi longitudinal hacia atrás hasta las torretas traseras.

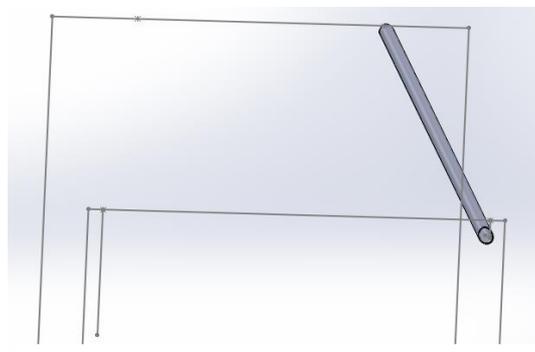


Figura 10: Tirante longitudinal trasero

### 7.1.5 Anclajes al chasis/carrocería.

La normativa para homologación mediante F.I.A. indica que los anclajes mínimos de la jaula de seguridad al chasis son:

- 1 por cada pilar del arco frontal
- 1 por cada pilar del arco lateral o semiarco lateral
- 1 por cada pilar del arco principal
- 1 por cada tirante trasero longitudinal

Y además indica que estos deben seguirse según el art 253-8.3.2.6 del anexo J [3], es decir, los del arco frontal, arco principal y arcos o semiarcos laterales, deben estar fijados por al menos 3 tornillos de métrica M8 de calidad ISO 8.8 sobre una placa de refuerzo de al menos 3 mm de espesor y 120 cm<sup>2</sup> de área.

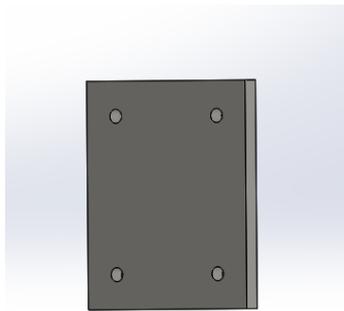


Figura 11: Anclaje delantero

Para los puntos de anclaje traseros la normativa indica que estos deben fijarse con un mínimo de 2 tornillos de métrica M8 con placas de refuerzo de al menos 60 cm<sup>2</sup>. Estos tienen un diseño curvado ya que se deben unir a la torreta de suspensión trasera la cual es cilíndrica.

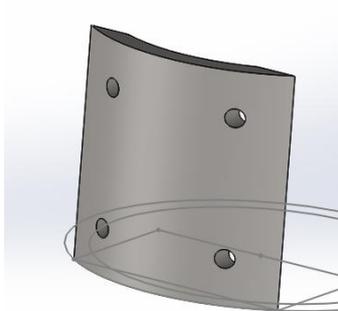


Figura 12: Anclaje trasero

### 7.1.6 Resultado final estructura base.

Este sería el resultado final de la estructura base:



Figura 13: Resultado final estructura base

## 7.2 Refuerzos obligatorios.

Además de la estructura base, la normativa obliga a implementar los siguientes refuerzos estructurales obligatorios los cuales serán todos de 40 mm de diámetro y 2 mm de espesor.

### 7.2.1 Miembros diagonales del arco principal.

Los miembros diagonales del arco principal según la normativa aplicable deben ser rectos y uno de ellos debe ser una única pieza. Además indica la restricción de que no debe haber más de 100 mm de distancia entre el extremo superior de las diagonales con el tirante longitudinal trasero y que no debe haber más de 100 mm de distancia entre el extremo inferior y el pie de anclaje. El resultado de la cruz ensamblada en la estructura sería el siguiente:

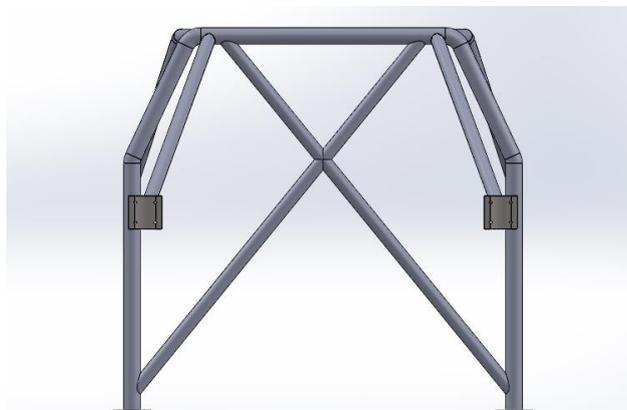


Figura 14: Ensamblaje cruz arco principal

### 7.2.2 Refuerzos diagonales traseros.

La normativa propone 3 tipos de refuerzos en los miembros longitudinales traseros, el refuerzo 253-4 será obligatorio, además si se requiere, se podrá implementar de manera opcional un segundo refuerzo diagonal, como es el caso del refuerzo 253-21, y si contamos un refuerzo en el techo en forma de V, será obligatorio implantar el refuerzo 253-22. En la figura 15 se describen de forma gráfica.

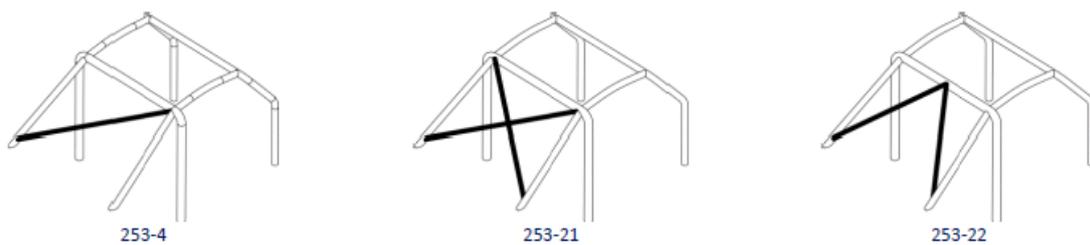


Figura 15: Tipos de refuerzos diagonales traseros [1]

En este caso únicamente se implantará un refuerzo diagonal similar al caso 253-4.

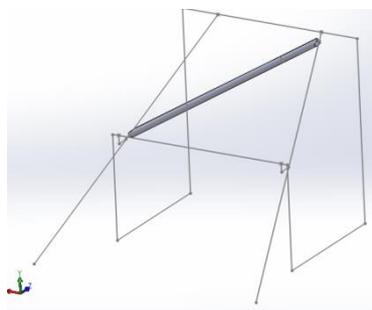


Figura 16: Miembro diagonal trasero

### 7.2.3 Refuerzos del techo.

Para los refuerzos del techo la normativa vuelve a presentar 3 opciones posibles para el diseño de los refuerzos. En la figura 17 se describen de forma gráfica.

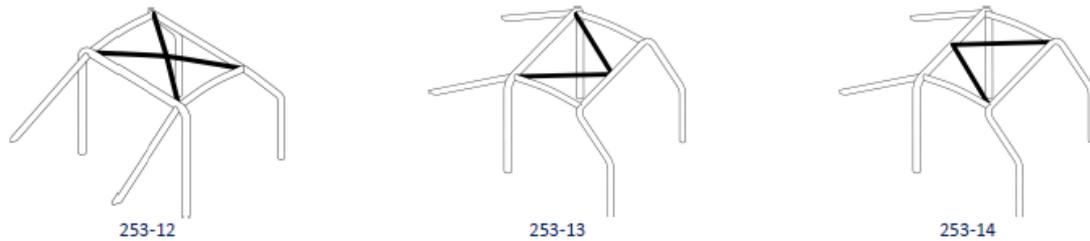


Figura 17: Tipos de refuerzo del techo [1]

En este caso he elegido el refuerzo 253-12, y la normativa impone para este caso que la distancia entre el miembro diagonal y la unión entre arcos no debe ser superior a 100 mm.

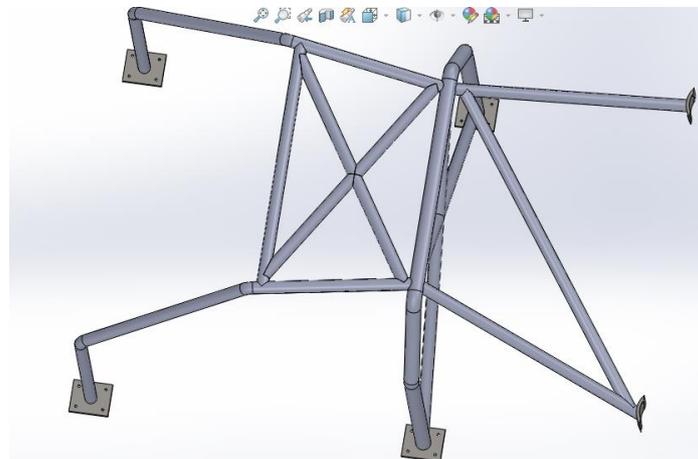


Figura 18: Ensamblaje refuerzos del techo

#### 7.2.4 Barras de las puertas.

Para las barras de las puertas, la normativa vuelve a presentar 4 opciones posibles. En la figura 19 se describen de forma gráfica:

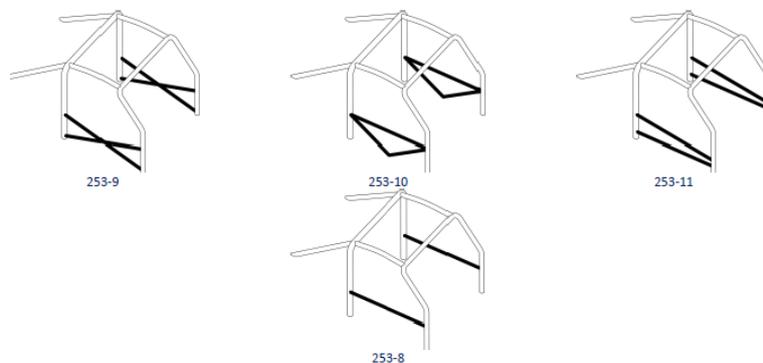


Figura 19: Tipos de refuerzo barra puertas [1]

En este caso se ha escogido el refuerzo 253-9, y por ello, uno de los tubos debe de estar dividido en dos y además, he tenido que redirigirme al artículo en el cual se nos expresa las dimensiones mínimas y máximas que deben tener estas barras:

- Dimensión de A debe ser mínimo de 300 mm
- Dimensión de B debe ser máximo de 250 mm
- Dimensión de C debe ser máximo de 300 mm
- Dimensión de E no debe ser mayor que la mitad de la altura de la puerta H (en este caso 1010 mm)

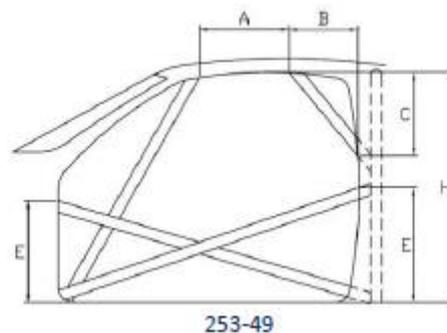


Figura 20: Dimensiones barra puertas [1]

### 7.2.5 Refuerzo del parabrisas.

El refuerzo del parabrisas debe incluirse si la dimensión A de la figura que se incluye a continuación es mayor que 200 mm según dice la normativa. En la estructura diseñada esta medida es de 560 mm, por lo que se deberá incluir en el diseño. Este refuerzo debe ser recto en vista lateral y su ángulo de curvatura no debe ser mayor de  $20^\circ$ , además su esquina superior no debe estar a una distancia superior de 100 mm con la unión entre el arco lateral y el miembro transversal, y su esquina inferior, a una distancia inferior a 100 mm con el pie de montaje. Si esta barra atraviesa los refuerzos de las puertas, esta debe dividirse en varias partes como sea necesario.

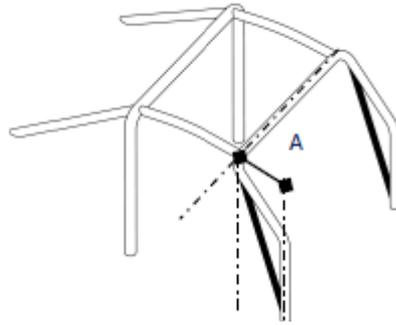


Figura 21: Tirante del parabrisas [1]

### 7.2.6 Cartelas.

La normativa indica también que se deben incluir refuerzos en forma de cartelas, estas cartelas son chapas dobladas en forma de U de espesor no inferior a 1mm, los extremos de la cartela (E) deben estar situados a una distancia del punto S de entre 3 y 4 veces el diámetro del tubo, y éstas deben situarse en:

- Miembros diagonales del arco principal
- Refuerzos del techo
- Barras de las puertas
- Barras de las puertas con el tirante del parabrisas.

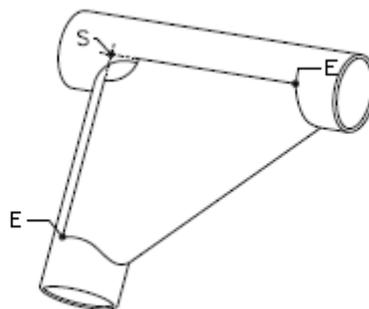


Figura 22: Cartela [1]

### 7.2.7 Barra de anclaje de arneses.

Según la normativa elegida, la barra de refuerzo para anclaje de los cinturones de seguridad debe seguir el artículo 253-6.2 del anexo J [3].

Según expresa esta normativa, las bandas de los hombros de los cinturones de seguridad deben estar hacia atrás y hacia abajo y deben instalarse de tal

forma que no formen un ángulo mayor de  $45^\circ$  con la horizontal, a partir del borde superior del respaldo, aunque se recomienda que este ángulo no supere los  $10^\circ$ .



Figura 23: Cinturones de seguridad [4]

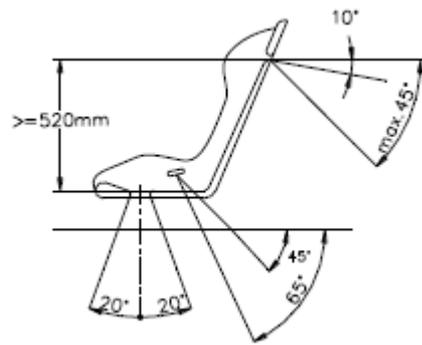


Figura 24: Datos barra arneses [3]

### 7.3 Resultado final.

Finalmente en este apartado de la memoria, se mostrarán imágenes del diseño inicial de la jaula antivuelco con todos los refuerzos ensamblados en la estructura base.

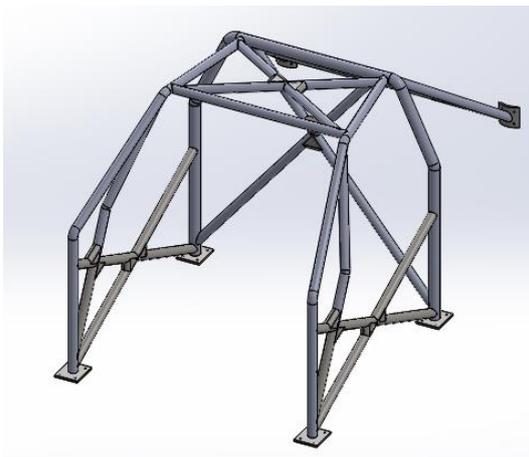


Figura 25: Jaula antivuelco



Figura 26: Alzado jaula antivuelco

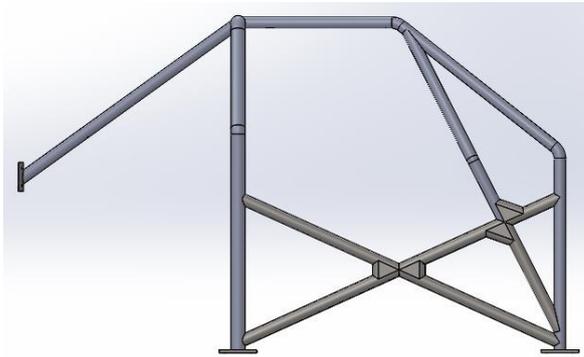


Figura 27: Vista lateral jaula antivuelco

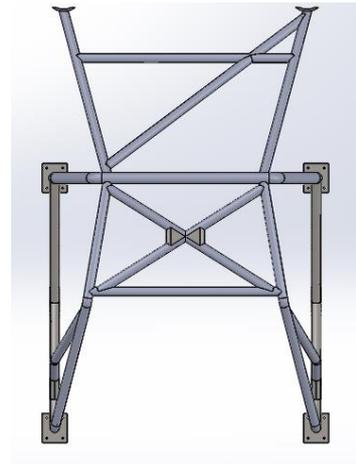


Figura 28: Planta jaula antivuelco

## 8 Elección del material.

Según la página [www.es.lksteelpipe.com](http://www.es.lksteelpipe.com) [5] y [www.marco-motorsport.com](http://www.marco-motorsport.com) [6] se ha observado que el material más utilizado para las jaulas antivuelco es el acero 25CrMo4. Este acero nos proporciona un alto límite elástico y un alto límite de rotura, además de ser fácilmente mecanizable por métodos convencionales y presentar una buena soldabilidad. Por lo tanto es el que se ha elegido para aplicar en nuestra jaula antivuelco.

Según la página Total Materia [7] este material consta con la siguiente composición química:

Composición química						
Composición química (%)						
Criterios	Min.	Max	Aprox	Comentario	Número CAS	
C	0.2200	0.2900	-	-	<a href="#">7440-44-0</a>	
Mn	0.6000	0.9000	-	-	<a href="#">7439-96-5</a>	
P	-	0.0350	-	-	<a href="#">7723-14-0</a>	
S	-	0.0350	-	Steels with improved machinability as a result of the addition of lead or higher sulphur contents up to around 0,100%, including calcium treatment, may be supplied on request.	<a href="#">7704-34-9</a>	
Si	-	0.4000	-	-	<a href="#">7440-21-3</a>	
Cr	0.9000	1,2000	-	-	<a href="#">7440-47-3</a>	
Mo	0.1500	0.3000	-	-	<a href="#">7439-98-7</a>	

Tabla 3: Composición química 25CrMo4 [7]

Según el anexo J [3], el acero elegido debe tener una resistencia a la tracción mínima de  $350 \text{ N/mm}^2$  el contenido máximo de carbono ha de ser 0,3% y tener

un contenido máximo de 1,7% para el manganeso y un 0,6% para otros elementos. En este caso obtenemos un contenido en cromo mínimo de 0,9% y un máximo del 1,2%, al superar el 0,6%, la normativa de homologación por F.I.A. obliga a realizar los test de carga estática que se nombraran posteriormente.

Las propiedades del material las cuales se han corroborado que se encuentren correctamente definidas en SolidWorks y que ha proporcionado la página web de Total Materia [7] son las siguientes:

- Modulo elástico: 210 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0.28
- Densidad de masa: 7800 Kg/m<sup>3</sup>
- Límite de tracción: 700 MPa
- Límite elástico:450 MPa
- Alargamiento a la rotura: 21,50%

Una vez diseñado el diseño inicial y aplicado el material, se observa mediante la herramienta de SolidWorks propiedades físicas que el volumen de la jaula antivuelco es de  $6,564 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , que al multiplicar por la densidad del material se obtiene un valor de 51,20 kg.

## 9 Análisis numéricos.

### 9.1 Casos de carga.

Para la homologación mediante la F.I.A. son necesarios los siguientes test, en los cuales se aplica la carga mediante sellos que se han tenido que modificar para poder realizar correctamente los ensayos. Para obtener más información sobre los test de carga estática acudiremos al *Anexo D, Test de cargas estáticas*.

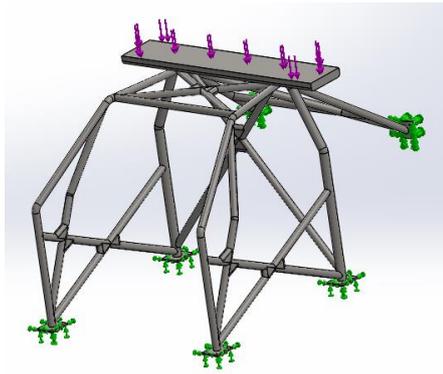


Figura 29: Ensayo arco principal

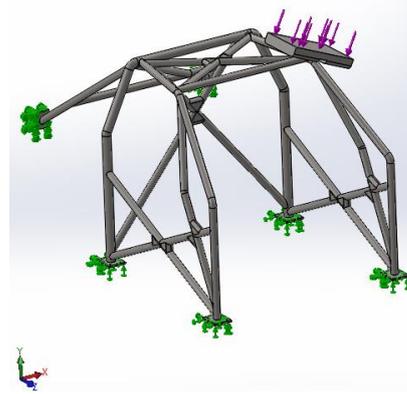


Figura 30: Ensayo arco frontal

Para la realización del test de carga estática en el arco principal, SolidWorks no permite simular la unión del sello con el arco principal mediante una relación de posición tangencial, por lo que se ha tenido que realizar una pequeña muesca en la parte inferior del sello y realizar una relación de posición concéntrica entre la muesca y el arco principal. Además, se ha aplicado una condición de unión rígida entre todos los componentes de la jaula incluido el sello con la jaula.

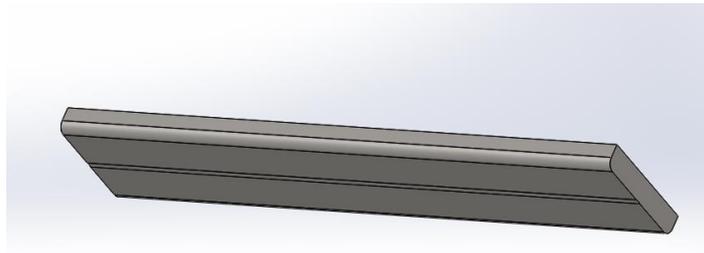


Figura 31: Sello arco principal

Para el test de carga estática en el arco frontal se ha hecho de nuevo una muesca que tendrá una inclinación de  $5^\circ$ , y una relación de posición entre la base de la jaula y la cara inferior del sello de  $20^\circ$  para cumplir con los ángulos que indica la normativa. Además, para que el sello no interfiriera con los miembros de la jaula, se han tenido que realizar unos cortes evitando su choque con el miembro transversal y el semiarco lateral.

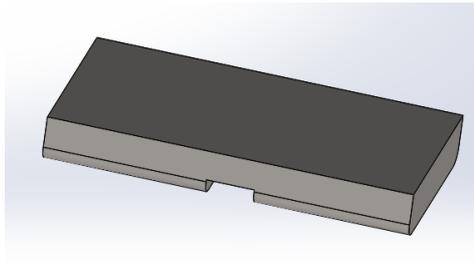


Figura 32: Sello arco frontal

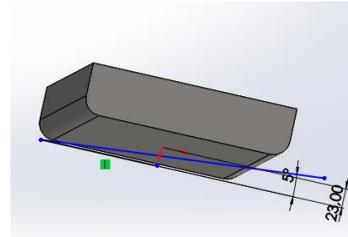


Figura 33: Sello arco frontal

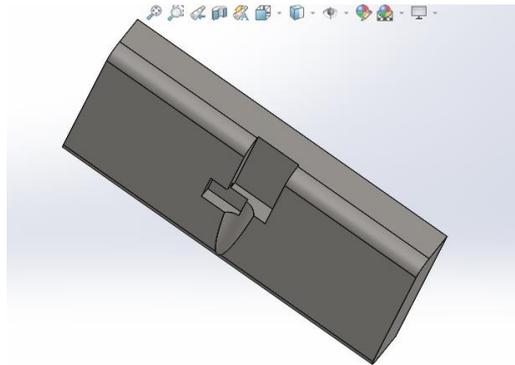


Figura 34: Sello arco frontal

Igual que en caso anterior, las uniones entre componentes serán todas de unión rígida, incluida la del sello con la jaula debido a los problemas de unión tangencial en la simulación.

## 9.2 Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno son similares para ambas simulaciones de ensayos:

- Las sujeciones serán sujeciones de geometría fija en las bases inferiores de cada uno de los anclajes, simulando así, una fijación soldada al chasis del vehículo.
- Las conexiones entre componentes serán en ambos casos de contacto global y unión rígida entre componentes, incluido las uniones entre el sello y la jaula, debido a lo explicado anteriormente de los problemas en la realización de simulaciones con relaciones de posición tangenciales.
- Por último, las cargas serán definidas según lo indicado en las normativas y que podemos observar en el *Anexo D, Test de cargas estáticas*, y estas

serán de 82125 N para la simulación del ensayo en el arco principal y de 38325 N para la simulación del ensayo en el arco frontal, ambas dos aplicadas en la cara superior del sello en sentido contrario a la normal de esta cara.

### 9.3 Modelo numérico.

Para estos análisis de test de carga estática y debido a la geometría de la jaula, nos encontramos ante tubos de una dimensión axial mucho mayor que la radial, y para facilitar el mallado y tener una mayor exactitud en los cálculos, se ha decidido realizar una simulación con elementos de tipo Shell. Esto quiere decir que se Solidworks mallará de forma automática a partir del modelo geométrico a lo largo de la superficie exterior de los tubos en dirección axial, y se definirá un espesor desde la superficie exterior hacia el interior del tubo. Además, SolidWorks aplicará condiciones de contacto rígido entre elementos de piezas diferentes en las zonas de unión soldada, tras haber definido correctamente las conexiones entre piezas. Para realizar esta función se ha empleado la herramienta de administrados de vaciados, la cual explico más en profundidad en el *Anexo E, Administrados de vaciados*.

Una vez realizado el estudio de sensibilidad de malla que se explica posteriormente se observan los siguientes parámetros:

Para el ensayo del arco principal:

- Número de elementos: 437.979
- Número de nodos: 318.190

Para el ensayo del arco frontal:

- Número de elementos: 192.561
- Número de nodos: 135.008

Esta diferencia entre valores es debida a que aunque la jaula sea la misma, el sello es de dimensiones diferentes en cada caso.



#### 9.4 Estudio de sensibilidad de malla.

Una vez realizado el ensamblaje de los ensayos y las cargas, sujeciones y uniones entre componentes será necesario mallar el ensamblaje.

Para encontrar un mallado óptimo se ha llevado a cabo un estudio de sensibilidad de malla. Teóricamente, conforme se aumenta el número de elementos en la malla, aumenta también la precisión del modelo obtenido y normalmente la tensión máxima obtenida. Hasta llegar a un número de elementos determinado, donde la tensión máxima obtenida se mantiene constante conforme seguimos aumentando el número de elementos. Posteriormente llegado a otro determinado valor, vuelve a aumentar de manera significativa las tensiones máximas.

El objetivo en el estudio de sensibilidad de malla será el de encontrar ese número mínimo de elementos de malla para el cual el valor tensional máximo permanece constante, obteniendo así una buena calidad de resultado para un número mínimo de elementos, ya que un número elevado de elementos puede ralentizar excesivamente los cálculos.

Consistirá en realizar un mallado basado en curvatura, fijar unos valores de 16 elementos por círculo y un cociente de tamaño de crecimiento de 1.5, y variar de forma progresiva el tamaño máximo y mínimo de elemento observando las tensiones máximas que aparecen en los resultados. Cuanto mayor sea el tamaño máximo de elemento, menos nº de elementos obtendremos, por lo que se deberá variar este valor hasta encontrar el punto óptimo de mallado reduciendo así los tiempos de cálculo para una misma calidad de resultado.

Este estudio se realizará con análisis lineales y definiendo el material como Isotrópico Elástico Lineal, ya que al tener que realizar varios análisis y únicamente tener en cuenta el valor tensional obtenido, nos interesa que el tiempo de cálculo de cada análisis sea el menor posible.

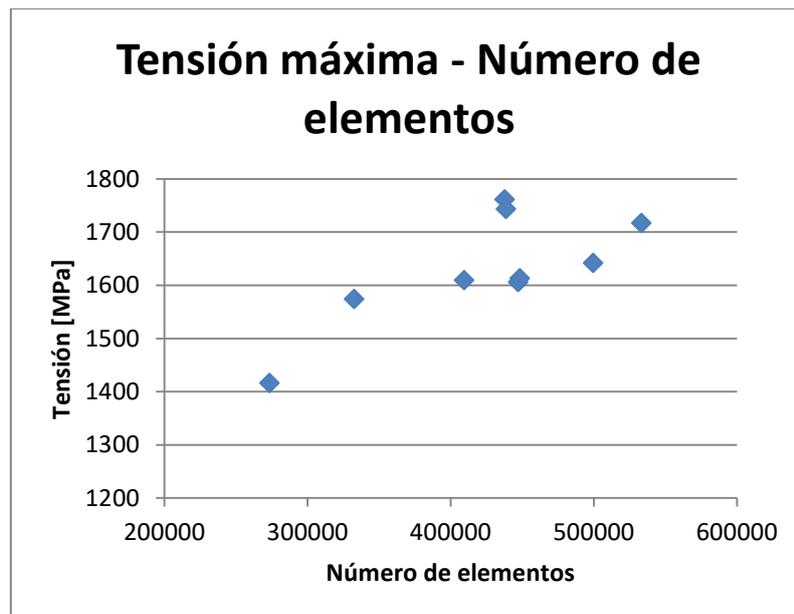
Se iniciará el primer análisis con 50 mm de tamaño máximo de elemento y se irá disminuyendo de 5 mm en 5 mm este valor hasta los 10 mm de tamaño máximo valorando los resultados obtenidos.



Tamaño máximo de malla	Número de elementos	Tensión máxima (MPa)
50 mm	273605	1415,99
45 mm	332784	1573,91
40 mm	409644	1609,31
35 mm	437979	1761,27
30 mm	438886	1743,18
25 mm	447451	1605,63
20 mm	448475	1612,77
15 mm	499665	1641,75
10 mm	533414	1716,74

Tabla 4: Relación número de elementos con tensión

Realizando una tabla tensión-número de nodos se observa lo siguiente:



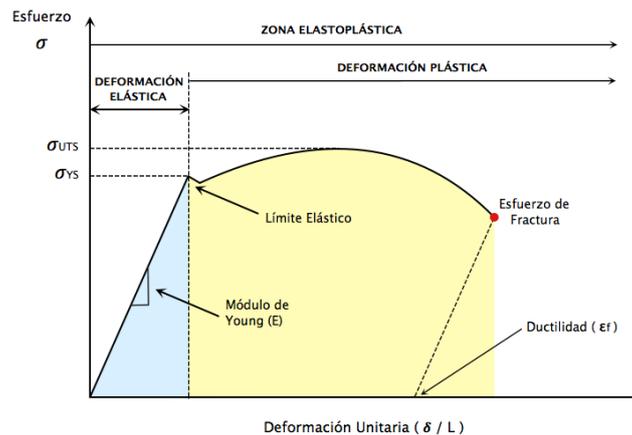
Gráfica 1: Tensión máxima - Número de elementos

Observamos que conforme se aumenta el número de nodos obtenido la tensión aumenta hasta llegar a un valle en torno a los 1600 MPa, además conforme se sigue aumentando el número de elementos se alcanzan tensiones superiores a los 1700 MPa. Finalmente y desde el punto de vista de la seguridad se ha decidido elegir el tamaño máximo de elemento de 35 mm, ya que esta se encontraría a la izquierda de lo que sería en valle teórico en cuanto a tensiones

por lo que el tiempo de cálculo sería óptimo. Este resultado de 35 mm se aplicará tanto en el test del arco principal como en el test del arco frontal.

## 9.5 Material.

Para los resultados obtenidos, se observa que las tensiones máximas producidas en la jaula en el estudio de mallado mediante simulaciones estático-lineales superan claramente el límite elástico del material.



Gráfica 2: Curva Tensión – Deformación [8]

Si observamos una gráfica curva de tensión-deformación de un material, observamos una proporcionalidad en cuanto a deformación y tensión hasta a aplicar una tensión de límite elástico, una vez superado este límite elástico, la deformación del material no es lineal con la tensión. SolidWorks en la opción de análisis lineal proporciona resultados de deformación proporcionales a los resultados obtenidos en base al Módulo de Young del material; este tipo de análisis es válido siempre y cuando nos mantengamos dentro de la zona tensional por debajo de límite elástico. En este caso, se supera claramente este límite, por lo tanto se tendrá que realizar análisis no lineales en SolidWorks para una validez de los resultados obtenidos.

Para la realización de este análisis no lineal será necesario aplicar nuevamente el material en SolidWorks, para ello he seleccionado de nuevo el 25CrMo4 con la diferencia de que ahora el tipo de modelo a la hora de definir el material será de Plasticidad – Von Mises en vez de Isotrópico Elástico Lineal que se definía anteriormente.

## 9.6 Resultados.

Tras definir el tipo de análisis requerido se procedió a realizar las simulaciones aplicando los parámetros de mallado obtenidos en el estudio de sensibilidad de malla.

### 9.6.1 Simulación del ensayo prueba arco principal.

- Tensiones: El resultado tensional maximo es de 463MPa, este resultado es ligeramente superior al límite elástico pero inferior al limite de rotura.

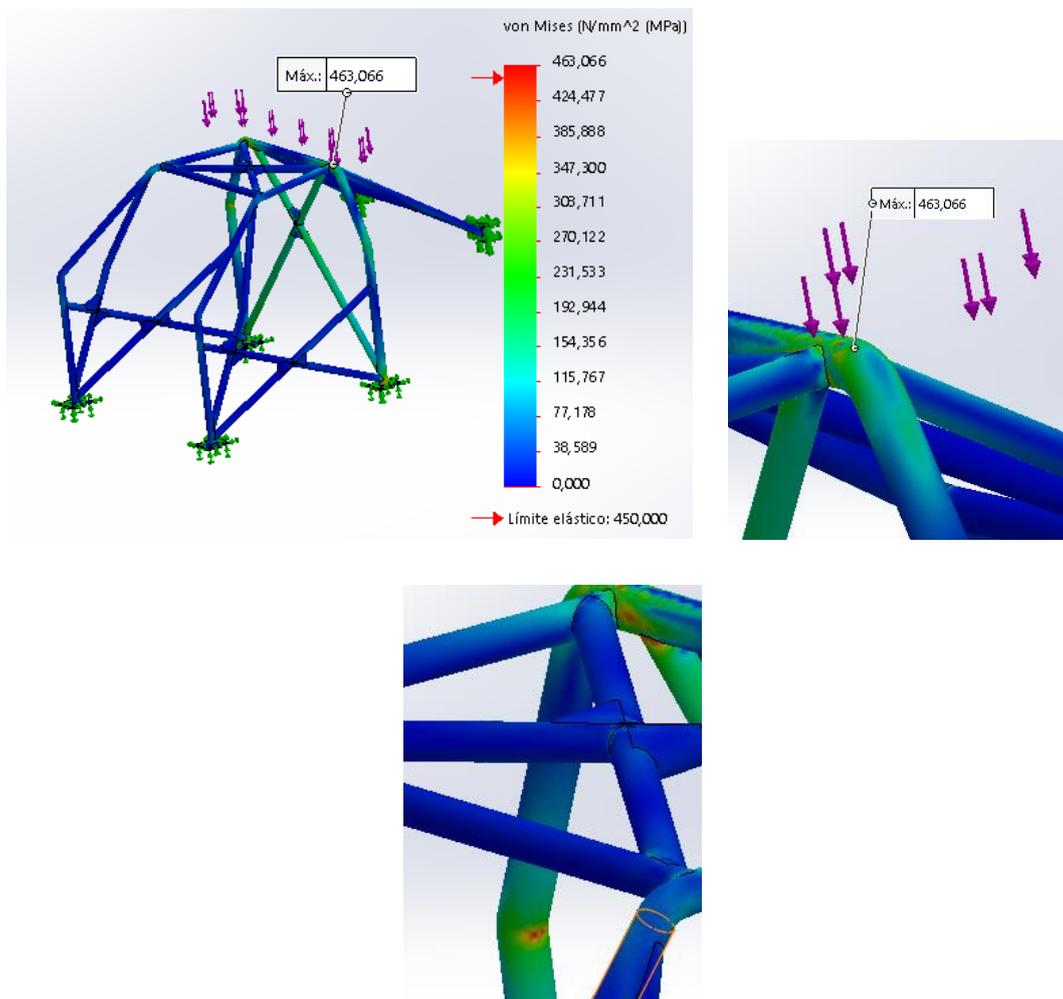


Figura 35: Tensión equivalente de Von Mises [MPa] en simulación del ensayo sobre el arco principal

- Desplazamientos: En cuanto a los desplazamientos, se observa que el mayor desplazamiento obtenido es en los pliegues del arco principal, este desplazamiento resultante máximo es de 3,019 mm. En la dirección de carga Y se observa que el desplazamiento máximo es de 0,477.

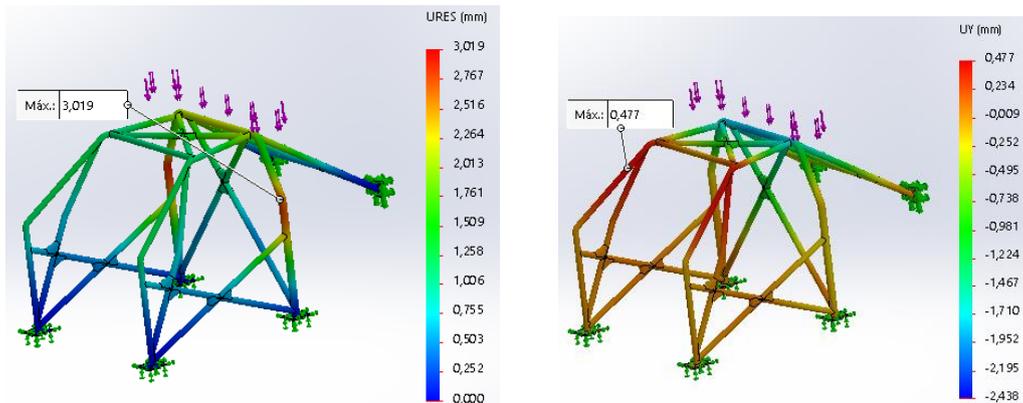


Figura 36: Desplazamiento resultante (izda.) y desplazamiento en dirección Y (drcha.) en simulación del ensayo sobre arco principal

- Factor de seguridad: Para calcular el factor de seguridad, SolidWorks da diferentes opciones de cálculo. En este caso se ha utilizado el criterio de Von Mises, en relación con el límite de rotura. Se ha escogido el límite de rotura ya que la normativa indica que no se debe producir la rotura del material. Observando los resultados vemos que el valor mínimo que coeficiente de seguridad es de 1,512.

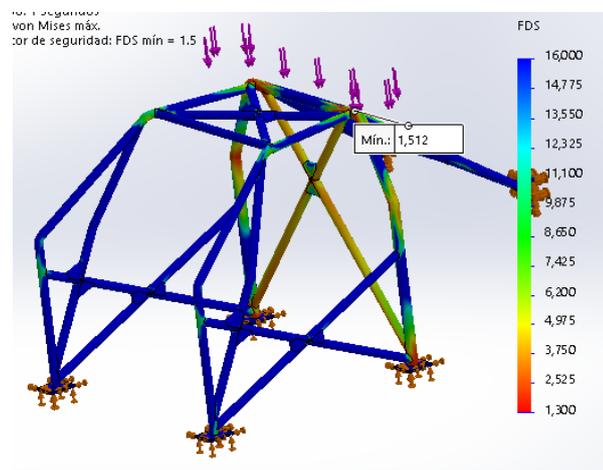


Figura 37: Factor de seguridad en simulación del ensayo sobre el arco principal

### 9.6.2 Simulación del ensayo prueba arco frontal.

- Tensiones: El resultado tensional maximo es de 456 MPa, este resultado es ligeramente superior al limite elastico pero inferior al limite de rotura y se observa que los puntos de tensión máxima son obtenidos en el pliegue del

refuerzo del parabrisas. Además se obtienen otros puntos de tensión alta en la zona de aplicación de la carga mediante el sello.

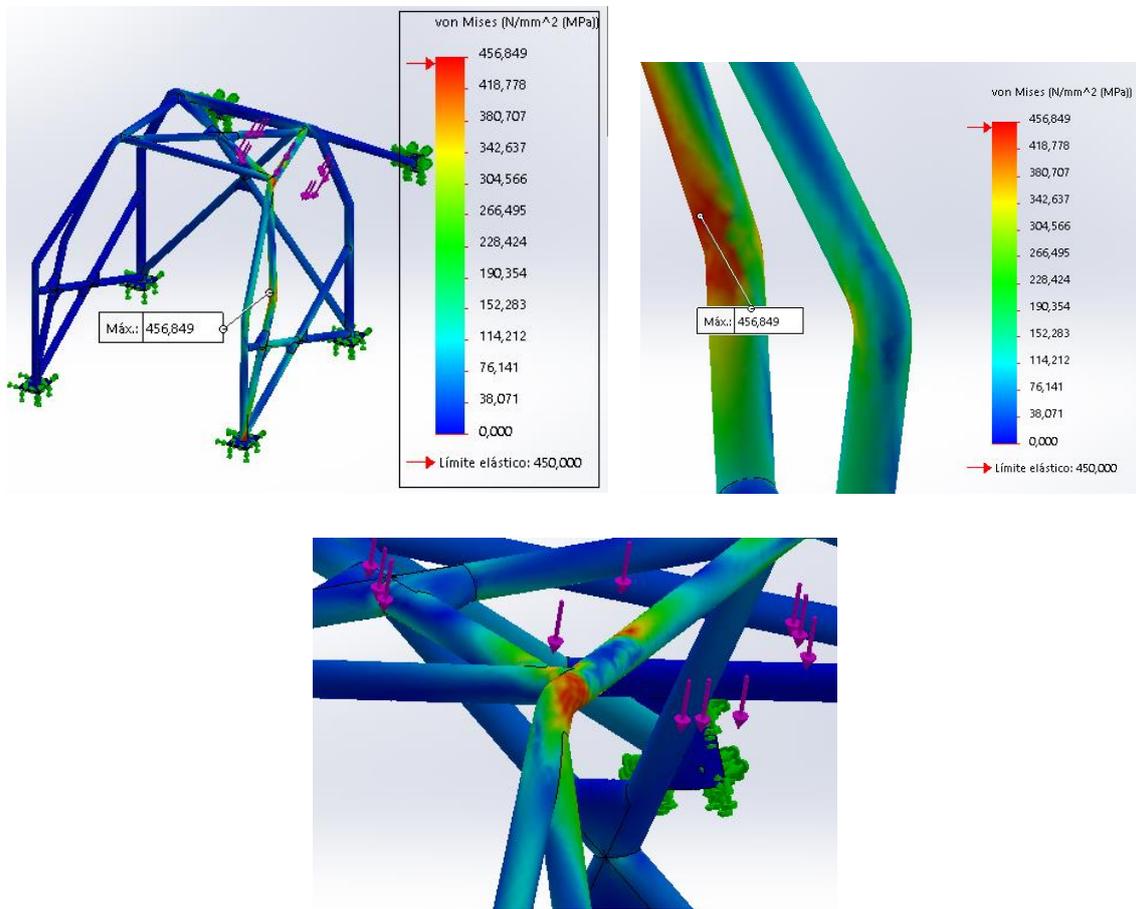
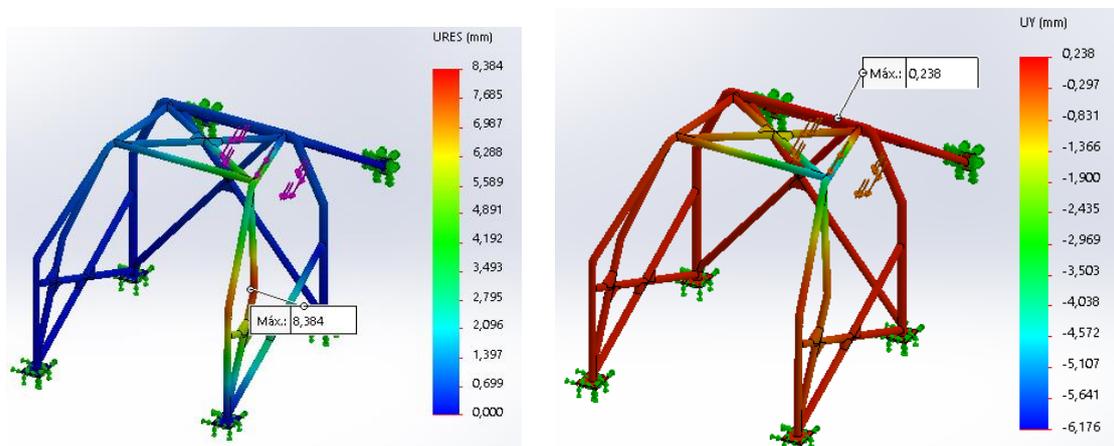


Figura 38: Tensiones equivalente de Von Mises [MPa] en simulación del ensayo sobre el arco frontal

- Desplazamientos: Los máximos desplazamientos resultantes son de 8,384 mm y son producidos en el pliegue del refuerzo del parabrisas, la misma zona donde se encuentran los máximos esfuerzos tensionales.



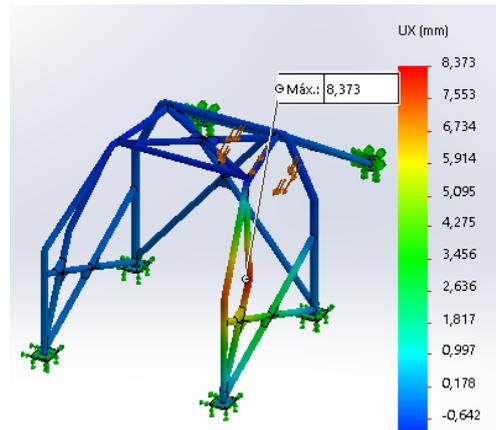


Figura 39: Desplazamientos en simulación del ensayo sobre el arco frontal

- Factor de seguridad: De igual manera que en el ensayo anterior se realizará el cálculo del factor de seguridad mediante Von Mises y con respecto al límite de rotura y observamos un factor de seguridad mínimo de 1,532.

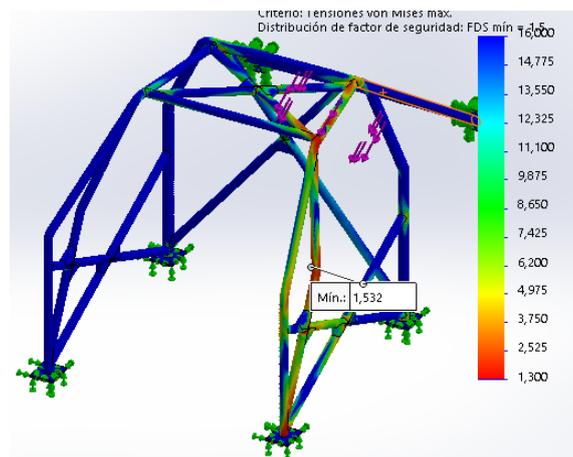


Figura 40: Factor de seguridad en simulación del ensayo sobre el arco frontal

## 10 Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis anteriores, los cuales han sido realizados mediante un estudio de sensibilidad de malla y mediante el ensayo de tipo Shell, se observa que la tensión máxima en el ensayo de carga estática sobre el arco principal es de 463 MPa, este resultado es superior al límite elástico pero inferior al límite de rotura de 700 MPa, por lo que se producirá una deformación plástica pero no una rotura del material.

Esta tensión máxima se produce en forma de concentración de tensión entre la unión del sello con jaula antivuelco, lo cual podría ser por la suposición de unión rígida entre el sello y la jaula a la hora de definir las conexiones entre componentes. Además, se observan otras zonas de alta tensión como pueden ser los pliegues del arco frontal, las uniones de este con sus refuerzos diagonales, o las uniones de este con los pies de anclaje.

Aun así estas tensiones se encuentran por debajo de la tensión máxima, por lo que no existe riesgo de rotura y se ha considerado este primer caso como favorable.

En cuanto a los resultados de desplazamientos, se observa que los desplazamientos resultantes son de 3,019 mm. Estos desplazamientos no son suficientes para determinar si es favorable o no, ya que la normativa expresa el valor máximo de desplazamiento a lo largo del eje de aplicación de la carga, por lo que he procedido a observar los desplazamientos a lo largo del eje Y, las cuales se han obtenido unos máximos de 0,477 mm. Igualmente muy inferiores a los máximos de 50 mm impuestas por la normativa, por lo que este resultado vuelve a ser favorable.

En el ensayo del arco frontal se puede observar que las tensiones máximas obtenidas son de 456,85 MPa en el pliegue del refuerzo del parabrisas, además podemos observar tensiones altas en zonas como la zona de aplicación del sello (la cual puede ser debida a la unión rígida entre componentes) o las uniones con los pies de anclaje, todas ellas inferiores de nuevo al límite de rotura. Por lo que este caso será favorable de nuevo.

En cuanto a los desplazamientos se obtienen unos resultados de desplazamientos resultantes de 8,384 mm. Debido a que SolidWorks no permite observar los desplazamientos en cualquier dirección, se ha procedido a observar los desplazamientos en dirección X e Y, observando desplazamientos de 8,373 y 0,238 mm simultáneamente. Estos resultados son muy inferiores a los expuestos por la normativa de 100 mm medidos bajo carga a lo largo del eje de aplicación de la carga, por lo que se puede definir este



último caso también como favorable, y por lo tanto el diseño inicial como óptimo para la homologación mediante la normativa de la F.I.A.

Además se descarta un proceso de optimización de material el cual podría ser interesante ya que la jaula estaría enfocada a la competición, ya que a pesar de que los desplazamientos se encuentran muy por debajo de los límites indicados por la normativa, el diseño cuenta con un factor de seguridad frente a rotura de 1,512 y de 1,532 los cuales considero mínimos desde el punto de vista de la seguridad.

## 11 Referencias y Bibliografía.

- [1]: F.I.A. SPORT, TECHNICAL DEPARTMENT (06/12/17). 2018 *homologation regulations for safety cages*.  
<http://www.rfeda.es/documents/20185/776060/RH+ES+FIA>
- [2]: R.F.E. de A., DEPARTAMENTO TÉCNICO (27/05/16). *Tipos de estructura de seguridad que se pueden dar en un turismo de competición*.  
<http://www.jtr-racing.com/v2/wp-content/themes/theme2076/images/reglamentos/homologaciones%20de%20estructuras.pdf>
- [3]: F.I.A. SPORT, TECHNICAL DEPARTMENT (07/03/19). *Appendix J – article 253*. <https://www.fia.com/regulation/category/123>
- [4]: GOOGLE IMÁGENES. *Cinturones de seguridad jaula antivuelco*.  
[https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV\\_enES751ES751&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sxsr=ACYBGNSXkNJ9kiSD9Hjouz\\_8qxnNIP-pAQ%3A1568915815533&sa=1&ei=Z8GDZXmRIJG0gQbO3paYAg&q=cinturones+de+seguridad+jaula+antivuelco&oq=cinturones+de+seguridad+jaula+antivuelco&gs\\_l=img.3...417445.428625..429311...3.0..0.502.2081.6j7j1j5-1.....0....1..gws-wiz-img.....35i39.Uo5MHwB5i8o&ved=0ahUKEwjZ4Pfuut3kAhURWsAKHU6vBSMQ4dUDCAc&uact=5](https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enES751ES751&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sxsr=ACYBGNSXkNJ9kiSD9Hjouz_8qxnNIP-pAQ%3A1568915815533&sa=1&ei=Z8GDZXmRIJG0gQbO3paYAg&q=cinturones+de+seguridad+jaula+antivuelco&oq=cinturones+de+seguridad+jaula+antivuelco&gs_l=img.3...417445.428625..429311...3.0..0.502.2081.6j7j1j5-1.....0....1..gws-wiz-img.....35i39.Uo5MHwB5i8o&ved=0ahUKEwjZ4Pfuut3kAhURWsAKHU6vBSMQ4dUDCAc&uact=5). [Consulta 18 de agosto de 2019].
- [5]: METAL SUPERMARKETS. *AISI 4130, 25CrMo4, 1.7218, 708A25, barra de acero de aleación SCM430*. <http://es.lksteelpipe.com/4130-alloy-steel-bar>. [Consulta 3 de mayo de 2019].



- [6]: MARCO. *Barras antivuelco sparco*. <http://marco-motorsport.com/166-barras-antivuelco-sparco>. [Consulta 3 de mayo de 2019].
- [7]: TOTAL MATERIA. *25CrMo4*. <https://www.totalmateria.com/subgroup.aspx?LN=ES&id1=320094&db=S> [Consulta 3 de mayo de 2019].
- [8]: GOOGLE IMÁGENES. *Curva tensión deformación*. [https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV\\_enES751ES751&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sxsr=ACYBGNS9HapTc\\_LPeyU55GFrY-fBx4EptQ%3A1568917045476&sa=1&ei=NcaDXeXbHPKKlwSq3afoDg&q=curva+tension+deformacion&oq=CURVA+TE+DEFORMACION&gs\\_l=img.1.0.0i7i30i6j0i8i7i30.87872.91255..93089...0.0..0.148.866.2j6.....0....1..gws-wiz-img.....35i39j0i10i24.3va6hvBPYH4](https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enES751ES751&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sxsr=ACYBGNS9HapTc_LPeyU55GFrY-fBx4EptQ%3A1568917045476&sa=1&ei=NcaDXeXbHPKKlwSq3afoDg&q=curva+tension+deformacion&oq=CURVA+TE+DEFORMACION&gs_l=img.1.0.0i7i30i6j0i8i7i30.87872.91255..93089...0.0..0.148.866.2j6.....0....1..gws-wiz-img.....35i39j0i10i24.3va6hvBPYH4) [Consulta 19 de agosto de 2019].

