

# VEHÍCULO DE COMPETICIÓN FORMULA SAE: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS

---

**MEMORIA PRESENTADA POR:**

***Arantxa Pons Estruch***

GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Convocatoria de defensa: septiembre de 2016**

*“Si una persona no tiene sueños, no tiene razón de vivir. Soñar es necesario aun cuando el sueño va más allá de la realidad. Para mí, soñar es uno de los principios de la vida.”*

**Ayrton Senna**

## RESUMEN

---

El objetivo de este proyecto es realizar el diseño y el análisis de un chasis tubular para un vehículo prototipo de competición bajo los parámetros de las normas Formula SAE Competition. Mediante software informático, se realizará la modelización en 3D del chasis y el cálculo mediante elementos finitos, analizando diversas hipótesis de carga según la normativa aplicable, que simularán las diferentes pruebas a las que puede ser sometido el vehículo. Se estudiarán diversas alternativas a partir de las cuales se obtendrá la solución más eficiente.

**Palabras clave:** Formula Student, prototipo, chasis, CAD, CAE

## RESUM

---

L'objectiu d'aquest projecte es realitzar un disseny i anàlisi d'un xassís tubular per a un vehicle prototip de competició complint els paràmetres de la normativa Formula SAE Competition. Mitjançant un software informàtic, es realitzarà la modelització en 3D del xassís i el càlcul mitjançant elements finits, analitzant diverses hipòtesis de carrega segons la normativa aplicable, que simularan les diferents proves a les que pot ser sotmès el vehicle. S'estudiaran diverses alternatives per a seleccionar la solució més eficient.

**Paraules clau:** Formula Student, prototip, xassís, CAD, CAE

## ABSTRACT

---

The main objective of this project is to carry out the design and analysis of a tubular chassis for a prototype vehicle used in competitions under the parameters of the rules Formula SAE Competition. Using the computer software, the chassis modelling in 3D as well as the calculation will be carried out through finite elements. Therefore, diverse load assumptions will be analyzed according to the applicable regulations, which will simulate different tests in which the vehicle can be subjected. Furthermore, different options will be studied in order to get the most efficient solution.

**Keywords:** Formula Student, prototype, chassis, CAD, CAE

## ÍNDICE

---

1	Objetivo.....	10
2	El chasis .....	11
2.1	Historia del chasis .....	11
2.2	Chasis en la Formula Student.....	13
3	Introducción a la Formula Student.....	14
3.1	Pruebas .....	14
3.1.1	Pruebas estáticas.....	14
3.1.2	Pruebas dinámicas.....	15
3.2	Normativa sae referente al chasis.....	16
3.2.1	Especificaciones.....	16
3.2.2	Requerimientos del material.....	17
3.2.3	Redondos del arco principal y frontal .....	18
3.2.4	Estructura frontal de impacto .....	20
3.2.5	Requisitos estructurales.....	21
4	Cargas en el chasis .....	23
4.1	Ergonomía.....	23
4.2	Suspensiones .....	24
4.3	Motor.....	25
4.4	Depósito de combustible .....	26
4.5	Batería .....	26
4.6	Otros.....	26
5	Consideraciones estructurales .....	26
5.1	Criterios de rigidez.....	26
5.1.1	Rigidez torsional .....	27
5.1.2	Rigidez a flexión .....	27
5.2	Selección de materiales .....	28
6	Análisis y estudio del modelo .....	29
6.1	Obtención de un modelo base .....	29
6.2	Análisis torsional.....	31
6.3	Ensayo a flexión.....	32
6.4	Remolque .....	34
6.5	Aceleración .....	36
6.6	Frenada.....	38
6.7	Curva.....	39

6.8	Normativa.....	41
7	Resultados .....	46
7.1	Ensayo torsional.....	46
7.2	Ensayo a flexión.....	48
7.3	Ensayo de remolque .....	49
7.4	Ensayo de aceleración.....	51
7.5	Ensayo de frenada .....	52
7.6	Ensayo de curva a izquierdas .....	54
7.7	Ensayo de curva a derechas.....	55
7.8	Conclusión .....	57
7.9	Normativa.....	57
7.9.1	Arco frontal .....	57
7.9.2	Arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo ..	59
7.9.3	Impacto lateral.....	59
7.9.4	Superficie frontal y soportes de la superficie frontal .....	61
7.9.5	Anclaje del cinturón de seguridad de los hombros.....	62
7.9.6	Anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino .....	63
7.9.7	Superficie frontal y soportes de la superficie frontal fuera del eje.....	65
8	Proceso de fabricación .....	66
8.1	Marcado de tubos .....	66
8.2	Corte y separado de los tubos.....	66
8.3	Doblado de tubos .....	67
8.4	Soldadura .....	67
9	Presupuesto .....	68
10	Conclusiones .....	74
11	Planos .....	75
12	Bibliografía .....	79

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Chasis Mercedes 300SL [1] .....	12
Imagen 2: Chasis monocasco del Lotus 25 [2] .....	12
Imagen 3: Chasis tubular [3] .....	13
Imagen 4: Inspección de seguridad [4] .....	15
Imagen 5: Modelo de piloto posicionado .....	17
Imagen 6: Disposición de los arcos de seguridad .....	19
Imagen 7: Estructura de impacto lateral.....	21
Imagen 8: Eje y centros de balanceo de un vehículo [5].....	23
Imagen 9: Posición del piloto.....	23
Imagen 10: Geometría de la suspensión [6].....	24
Imagen 11: Motor Honda CBR 600RR [7] .....	25
Imagen 12: Masas que afectan a la flexión en el chasis.....	27
Imagen 13: Estructura del chasis 1.....	29
Imagen 14: Estructura del chasis 2.....	30
Imagen 15: Fuerzas y puntos de fijación en torsión en el chasis 1 .....	32
Imagen 16: Fuerzas en flexión en el chasis 1.....	33
Imagen 17: Puntos de fijación de la suspensión delantera en flexión en el chasis 1.....	34
Imagen 18: Puntos de fijación de la suspensión trasera en flexión en el chasis 1.....	34
Imagen 19: Fuerzas en remolque en el chasis 1 .....	35
Imagen 20: Puntos de fijación en remolque en el chasis 1.....	36
Imagen 21: Fuerzas en aceleración en el chasis 1 .....	37
Imagen 22: Puntos de fijación en aceleración en el chasis 1 .....	37
Imagen 23: Puntos de fijación en frenada en el chasis 1.....	38
Imagen 24: Fuerzas en frenada en el chasis 1 .....	39
Imagen 25: Fuerzas en curva a izquierda en el chasis 1.....	40
Imagen 26: Puntos de fijación en curva en el chasis 1 .....	41
Imagen 27: Fuerzas y puntos de fijación para el ensayo del arco frontal en el Chasis 2-242	
Imagen 28: Fuerzas y puntos de fijación del ensayo de arco principal en el chasis 2-2 ...	42
Imagen 29: Fuerzas para el ensayo de impacto lateral derecho en el chasis 2-2 .....	43
Imagen 30: Puntos de fijación del ensayo de impacto lateral derecho en el chasis 2-2....	43
Imagen 31: Fuerzas y puntos de fijación del ensayo de superficie frontal del chasis 2-2.44	
Imagen 32: Fuerzas y puntos de fijación para el ensayo de anclaje del cinturón pélvico y anti-submarino en el chasis 2-2.....	44
Imagen 33: Fuerzas y puntos de fijación para el ensayo de anclaje del cinturón de hombros en el chasis 1-2 .....	45
Imagen 34: Fuerzas y puntos de fijación del ensayo de superficie frontal del chasis 2-2.45	
Imagen 35: Deformación en la dirección Y en torsión del chasis 1-6 .....	46
Imagen 36: Tensiones de Von Mises en torsión del chasis 1-6 .....	47
Imagen 37: Rigidez torsional – Peso.....	48
Imagen 38: Deformación total en flexión en el chasis 2-1 .....	49
Imagen 39: Deformación total en remolque en el chasis 2-1 .....	50
Imagen 40: Máxima tensión combinada en remolque en el chasis 2-1 .....	50
Imagen 41: Deformación total en aceleración del chasis 1-5.....	51
Imagen 42: Máxima tensión combinada en aceleración del chasis 1-5 .....	52
Imagen 43: Deformación total en frenada del chasis 2-1 .....	53
Imagen 44: Máxima tensión combinada en frenada del chasis 2-1 .....	53

Imagen 45: Deformación total en curva a izquierda del chasis 2-1 .....	54
Imagen 46: Tensión máxima combinada en curva a izquierda del chasis 2-1 .....	55
Imagen 47: Deformación total en curva a derecha del chasis 2-1 .....	56
Imagen 48: Tensión máxima combinada en curva a izquierda del chasis 2-1 .....	56
Imagen 49: Deformación total en ensayo de arco frontal del chasis 2-2 .....	57
Imagen 50: Tensión máxima en ensayo de arco frontal del chasis 2-2 .....	58
Imagen 51: Deformación total en ensayo de arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo del chasis 2-2 .....	59
Imagen 52: Deformación total en ensayo de impacto lateral a izquierdas del chasis 2-2 .....	60
Imagen 53: Tensión máxima en ensayo de impacto lateral a izquierdas del chasis 2-2 ...	60
Imagen 54: Deformación total en ensayo de superficie frontal y soportes de la superficie frontal del chasis 2-2 .....	61
Imagen 55: Deformación total en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad de los hombros del chasis 2-2 .....	62
Imagen 56: Deformación total en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino del chasis 2-2 .....	63
Imagen 57: Deformación total en ensayo de superficie frontal y soportes de la superficie frontal fuera del eje del chasis 2-2 .....	65
Imagen 58: Corte tipo boca pescado [10] .....	66
Imagen 59: Curvado por presión .....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Puntuación de las pruebas .....	14
Tabla 2: Dimensiones mínimos requeridos .....	17
Tabla 3: Espesores alternativos mínimos requeridos .....	18
Tabla 4: Longitudes del cuerpo .....	24
Tabla 5: Ángulos de las articulaciones .....	24
Tabla 6: Características técnicas del motor Honda CBR 600RR [8] .....	25
Tabla 7: Componentes del vehículo .....	26
Tabla 8: Composición química de los aceros S355 y S275 .....	28
Tabla 9: Propiedades mecánicas de los aceros S355 y S275 .....	28
Tabla 10: Dimensiones del perfil de las barras y peso total del chasis .....	31
Tabla 11: Cálculo de fuerzas a aplicar en cada nodo .....	31
Tabla 12: Fuerzas en el ensayo de flexión .....	32
Tabla 13: Fuerzas en el ensayo de remolque .....	35
Tabla 14: Fuerzas en el ensayo de aceleración .....	36
Tabla 15: Fuerzas en el ensayo de frenada .....	39
Tabla 16: Fuerzas para el ensayo de curva .....	40
Tabla 17: Resultados del ensayo torsional .....	47
Tabla 18: Resultados del ensayo de flexión .....	49
Tabla 19: Resultados del ensayo de remolque .....	51
Tabla 20: Resultados del ensayo de aceleración .....	52
Tabla 21: Resultados del ensayo de frenada .....	53
Tabla 22: Resultados del ensayo de curva a izquierdas .....	55
Tabla 23: Resultados del ensayo de curva a derechas .....	56
Tabla 24: Resultados del ensayo de arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo .....	58
Tabla 25: Resultados del ensayo de arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo .....	59
Tabla 26: Resultados de ensayo de impacto lateral a izquierdas .....	60
Tabla 27: Resultados de ensayo de superficie frontal y soportes de la superficie frontal .....	61
Tabla 28: Tensión máxima en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad de los hombros del chasis 2-2 .....	62
Tabla 29: Resultados de anclaje del cinturón de seguridad de los hombros .....	62
Tabla 30: Tensión mínima en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino del chasis 2-2 .....	64
Tabla 31: Resultados de anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino .....	64
Tabla 32: Resultados de superficie frontal y soportes fuera del eje .....	65
Tabla 33: Longitudes de tubos 26,8 x 3,2 mm .....	68
Tabla 34: Longitudes de tubos 27 x 4 mm .....	69
Tabla 35: Longitudes de tubos 26,5 x 2,7 mm .....	69
Tabla 36: Precio de la estructura .....	70
Tabla 37: Valores del coeficiente C [11] .....	70
Tabla 38: Pesos de cada soldadura por metro lineal .....	71
Tabla 39: Diámetro, tensiones e intensidades de los electrodos [11] .....	71
Tabla 40: Pesos del cordón de soldadura .....	72
Tabla 41: Eficiencia de aportación .....	72
Tabla 42: Longitudes de soldadura .....	72





Tabla 43: Costo del electrodo ..... 72

# 1 OBJETIVO

---

El proyecto fin de carrera que se presenta a continuación tiene como objetivo final obtener el diseño de un chasis válido para competir en la fórmula SAE, así como el estudio del mismo ante distintas cargas y/o pruebas a las que será sometido por la organización.

El chasis tiene que cumplir con la normativa impuesta por la SAE (Society of Automotive Engineers), las cuales plantean una geometría específica para las barras y unos criterios que garantizan la seguridad del piloto en todo momento.

Posteriormente se ensayará mediante el software de elementos finitos Ansys las condiciones que debe soportar favorablemente para que se considere válido el chasis. Se ha establecido como rigidez torsional que debe soportar como  $3000 \text{ N}\cdot\text{m}^\circ$ , según datos de equipos varios.

Una vez alcanzado el diseño base, se introducirán ciertas mejoras como disminuir la sección de los tubos o cambiar alguna distribución de la geometría para hacerlo más competitivo reduciendo su peso.

## 2 EL CHASIS

---

El chasis es la estructura que tiene como misión principal conformar una estructura rígida que conecta los componentes principales del vehículo, salvaguardar al piloto y proporcionar los puntos de anclaje para las suspensiones delanteras y traseras, los arcos de seguridad y los anclajes del motor.

Existen tres parámetros fundamentales a la hora de diseñar un chasis:

- La rigidez es el parámetro más importante y más influyente en el comportamiento del vehículo en pista. Es fundamental conseguir una estructura resistente a posibles impactos para la protección del piloto.
- La ligereza del chasis mejorará la potencia y el rendimiento del motor, disminuyendo notablemente el consumo de combustible.
- La fabricación del chasis tiene que ser viable, por lo que los chasis de elevado coste se utilizarán únicamente en vehículos de gama alta.

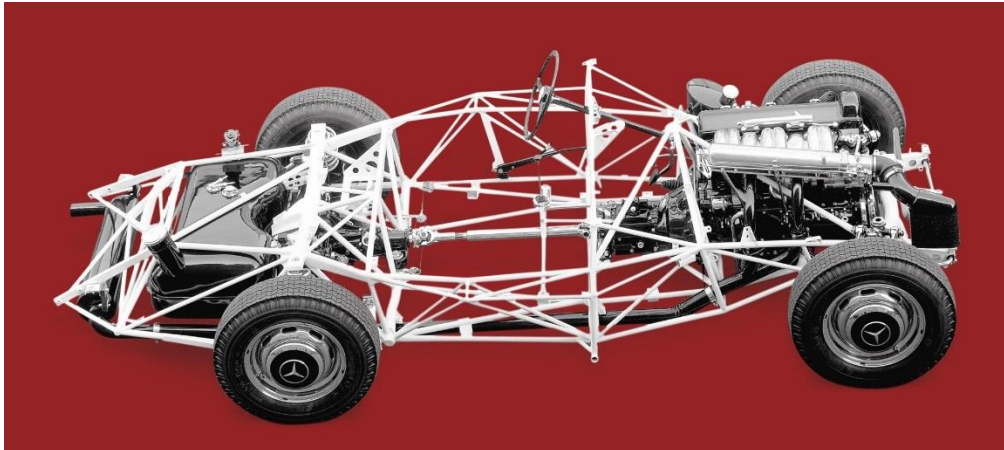
Cuando se diseña un vehículo, el chasis será el último elemento en ser diseñado, ya que primero se deben ubicar los elementos de una forma óptima en el vehículo. Para comenzar el diseño del chasis se tomarán inicialmente los valores de cota del motor y de la arquitectura de suspensiones.

### 2.1 HISTORIA DEL CHASIS

Los primeros chasis se basaban en estructuras de madera, muy similares a los coches de caballos y su diseño se consideraba un factor secundario debido a las bajas potencias. No fue hasta 1910 cuando se empezó a implantar el acero y aluminio en la estructura de los coches. A partir de esta década, el estudio del chasis empieza a tener mayor importancia, buscando una mayor rigidez torsional en este.

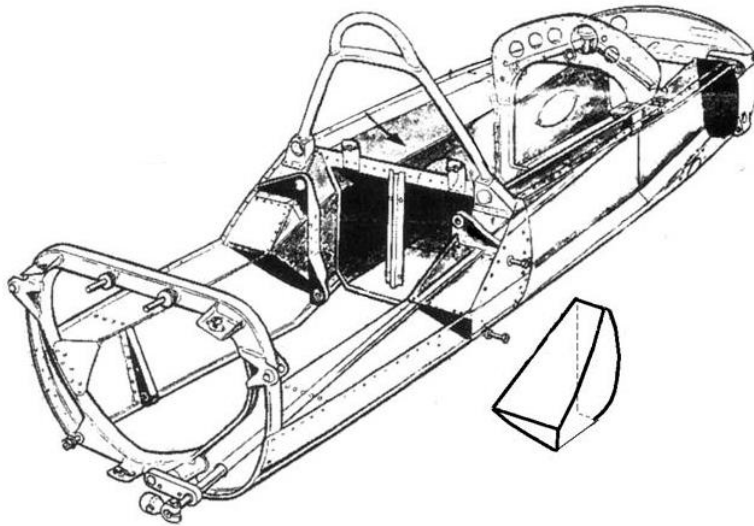
En 1934, Autounion construyó el primer chasis tipo escalera para su vehículo de competición, que consistía en dos tubos paralelos de sección redonda. El mismo año, Mercedes diseñó un chasis con la misma configuración, pero con tubos de sección cuadrada. Estos dos diseños fueron la referencia hasta los años 50.

En 1952, Mercedes presentó su primer coche con chasis tubular, el Mercedes 300SL. Colin Chapman también diseñó el mismo año el primer coche con chasis tubular para el Lotus MK6.



*Imagen 1: Chasis Mercedes 300SL [1]*

En 1962, Lotus lanzó para la Formula 1 el revolucionario Lotus 25 con chasis monocasco de aluminio de construcción aeronáutica.



*Imagen 2: Chasis monocasco del Lotus 25 [2]*

Con la crisis energética de finales de los 60, los fabricantes de automóviles dirigieron sus esfuerzos a mejorar el chasis y conseguir así una reducción de pesos.

## 2.2 CHASIS EN LA FORMULA STUDENT

La elecci3n del tipo de chasis que cada equipo depende sobretodo del presupuesto del que disponen. Las universidades que tienen suficiente apoyo econ3mico y cuentan con experiencia en la competici3n optan por el monocasco de fibra de carbono.

Este tipo de chasis tiene la ventaja de tener un excelente comportamiento en pista y una estructura muy resistente, ya que este tipo de estructuras ofrecen gran resistencia a torsi3n y alta capacidad de absorci3n de impactos debida a la estructura homogénea del coche. La estructura es una sola pieza que define la forma general del coche.

Por otro lado, las estructuras tubulares de acero son los m3s comunes en la Formula Student. Este tipo de chasis ofrece una buena respuesta a los esfuerzos, aunque su principal inconveniente es el aumento de peso respecto al chasis monocasco y su reducida capacidad de deformaci3n por flexi3n y torsi3n.

La mayoría de las estructuras de acero tubulares son soldadas, aunque tambi3n se puede optar por uniones atornilladas. Se pueden incluir tubos de aluminio junto con los de acero para favorecer la reducci3n de peso, pero el coste de esta opci3n ser3 m3s elevado.

Tambi3n hay algunos equipos que han innovado en sus diseños, usando tubos de secciones cuadradas, circulares e incluso chapas enfrentadas rellenas de ciertos materiales, como combinaciones de acero, aluminio, fibra de carbono y una resina entre placas, para conseguir siempre mayor rigidez a torsi3n con el menor peso y coste posible.



*Imagen 3: Chasis tubular [3]*

### 3 INTRODUCCIÓN A LA FORMULA STUDENT

La Formula Student o SAE es una competición universitaria donde diseñan, construyen y pilotan un monoplaza igual que en un equipo de automoción, como la Formula 1 o la IndyCar Series. El evento está organizado por la *Institution of Mechanical Engineers (IMechE)* y es una de las plataformas más importantes para el salto de nuevos ingenieros a la competición, ya que reúne a los responsables de las principales empresas automovilísticas para descubrir jóvenes promesas, como Ross Brawn, que fue el máximo responsable del equipo Mercedes AMG F1.

En el año 1981, la *SAE (Society of Automotive Engineering)* inició el primer programa de Formula SAE en los Estados Unidos. No fue hasta 1998 cuando la IMechE organizó la primera competición europea en el Reino Unido. En la actualidad hay competiciones en Alemania, Brasil, Japón y también en España, la cual está organizada por la *Sociedad de Técnicos de Automoción (STA)*.

El objetivo de esta competición es que los estudiantes desarrollen el diseño y proceso de fabricación del monoplaza, unido al trabajo de marketing, gestión de costes y logística. Todo ello debe realizarse siguiendo unos criterios establecidos.

#### 3.1 PRUEBAS

Durante el evento, los equipos son juzgados por especialistas del sector, debiendo superar diversas pruebas estáticas y dinámicas que demuestren el correcto funcionamiento del vehículo diseñado.

La Tabla 1 muestra la puntuación máxima de cada una de las pruebas:

	PRUEBA	PUNTOS
<b>Estáticas</b>	Presentación	75
	Diseño	150
	Análisis de costes	100
<b>Dinámicas</b>	Aceleración	75
	Skid-Pad	50
	Autocross	150
	Eficiencia	100
	Resistencia	300
<b>TOTAL</b>		<b>1000</b>

Tabla 1: Puntuación de las pruebas

##### 3.1.1 Pruebas estáticas

Estas pruebas comienzan con una inspección técnica del vehículo no puntuable. Cada vehículo debe pasar todas las partes de inspección y ensayo técnicos, y pegar las pegatinas que dan los comisarios cada vez que se pasan los test necesarios, para poder participar en las pruebas dinámicas o salir a pista. La primera parte de esta inspección será comprobar que el vehículo cumple con la normativa. La segunda parte será un test donde se colocará el vehículo en una plataforma inclinada, inicialmente a 45° para asegurar que el vehículo no pierde combustible o líquidos; y después se incrementará a 60°, donde el vehículo no deberá rodar. En la última parte de la inspección, el vehículo pasará el test de freno, ruido



y de interruptor principal. Si el vehículo no supera alguna de las pruebas, se podrá corregir el problema y volver a realizar la inspección.



Imagen 4: Inspección de seguridad [4]

#### 3.1.1.1 Presentación

En esta prueba se evaluará la capacidad del equipo para desarrollar un análisis de viabilidad detallado del proyecto, con la finalidad de convencer a los jueces, que serán tratados como si fueran ejecutivos de una corporación, que su propuesta es la mejor y puede ser fabricada y comercializada rentablemente.

#### 3.1.1.2 Diseño

Las diferentes secciones del equipo justifican las decisiones tomadas en el diseño del monoplaza, así como los componentes escogidos. Un equipo de jueces valora el diseño del monoplaza y como satisface las necesidades del mercado.

#### 3.1.1.3 Análisis de costes

Se evalúa un informe presentado con anterioridad, en el que se explica y justifica detalladamente los costes de fabricación todas las piezas del vehículo.

### 3.1.2 Pruebas dinámicas

En estas pruebas se valora el comportamiento del monoplaza. Participan directamente los miembros del equipo encargados de asistir mecánicamente al monoplaza y los pilotos.

#### 3.1.2.1 Aceleración

En esta prueba se mide el tiempo que tarda el vehículo en recorrer una recta de 75 metros con el vehículo inicialmente parado.

### 3.1.2.2 *Skid-pad*

El objetivo de esta prueba es evaluar la adherencia lateral que proporciona el vehículo. Se realiza en una pista con forma de ocho, formada por dos círculos de diámetro interior 9,25 m y un diámetro exterior de 15,25 m y cuyos centros están separados 18,25 m. La prueba consiste en dar dos vueltas a uno de los círculos girando a izquierdas y otras dos vueltas al otro círculo girando a derechas. Será válido el tiempo de la segunda vuelta a cada círculo.

### 3.1.2.3 *Autocross*

En esta prueba se evalúa el comportamiento dinámico del vehículo. Para ello se recorren dos circuitos diferentes, con un piloto diferente para cada uno de los circuitos. Cada piloto dispone de dos vueltas cronometradas para realizar el mejor tiempo.

### 3.1.2.4 *Resistencia*

Esta prueba consiste en recorrer aproximadamente 22 kilómetros en un circuito en el menor tiempo posible. A mitad de la prueba se realiza un cambio de piloto durante el cual se para el tiempo durante tres minutos y realizar los ajustes necesarios para el posicionamiento del segundo piloto dentro del vehículo.

### 3.1.2.5 *Eficiencia*

El objetivo de esta prueba es consumir el mínimo combustible posible en la prueba de resistencia y se miden los litros de combustible usados.

## 3.2 **NORMATIVA SAE REFERENTE AL CHASIS**

En la Formula Student existe un reglamento de obligado cumplimiento para todas las pruebas. La reglamentación será aplicada en todo lo referente al diseño del monoplaça y sus componentes para obtener una homologación.

### 3.2.1 **Especificaciones**

La distancia mínima entre ejes será de 1525 mm desde el centro de contacto con el suelo de los neumáticos delanteros y traseros con las ruedas derechas.

La distancia entre ruedas del eje más pequeño del vehículo no será inferior al 75% de la distancia entre ruedas más grande.

El vehículo estará diseñado para el piloto más alto del equipo y para un hombre de dimensiones que representan al 95% de la población. Un círculo de diámetro 200 mm representará las caderas y las nalgas, otro círculo de las mismas dimensiones representará al hombro/región cervical y estos dos círculos estarán unidos por una línea recta de 490 mm. Un círculo de diámetro 300 mm representará la cabeza con el casco y estará unido al círculo que representa al hombro por una línea recta de 280 mm. En la parte inferior del asiento se coloca el círculo inferior 200 mm, de tal manera que la distancia entre el centro del círculo y la cara más alejada de los pedales sea como mínimo 915 mm. El círculo que representa a los hombros, se apoyará en el asiento trasero y el círculo de 300 mm se posicionará no más de 25,4 mm de distancia de la cabecera.



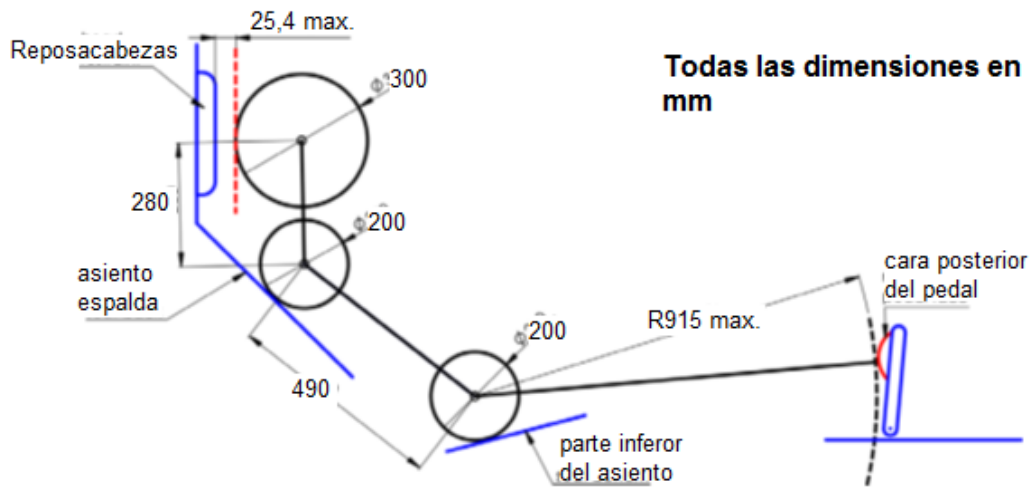


Imagen 5: Modelo de piloto posicionado

La distancia al suelo debe ser suficiente para evitar que cualquier parte del coche toque el suelo, excepto los neumáticos, durante las pruebas de pista.

En la parte trasera se colocará un punto de enganche que soporte el peso del vehículo. Estará pintado en naranja y será visible. Orientado horizontal y perpendicularmente a la línea central del coche. Debe tener forma tubular de entre 25 a 29 mm de diámetro exterior, fabricado de aluminio o acero y ser como mínimo de 300mm de longitud. Debe haber como mínimo 75mm desde la parte inferior del tubo hasta el suelo. Por otro lado, los 180° del tubo inferiores deben estar descubiertos a lo largo de una longitud mínima de 280mm para la posible sujeción y remolque del vehículo en caso de ser necesario.

### 3.2.2 Requerimientos del material

La estructura principal del coche ha de estar construida de tubos de acero, templado o aleado (mínimo 0,1% de carbono), en tubos con las siguientes dimensiones:

PIEZA O APLICACIÓN	DIÁMETRO EXTERIOR POR ESPESOR DE PARED
<b>Arco principal y frontal</b>	Redondo de 25,4 x 2,4 mm
<b>Barra donde se monta el arnés de los hombros</b>	Redondo de 25,0 x 2,5 mm
<b>Estructura de impacto lateral, mampara delantera, refuerzos de los arcos antivuelco, puntos de sujeción del arnés del conductor (excepto la de los hombros),</b>	Redondo de 25,4 x 1,65 mm Redondo de 25,0 x 1,75 mm Redondo de 25,4 x 1,6 mm
<b>EV: estructura protectora de acumulación</b>	Cuadrado de 25,4 x 25,4 x 1,2 mm Cuadrado de 25,0 x 25,0 x 1,25 mm
<b>Soportes de la mampara delantera, soportes de los refuerzos del arco principal,</b>	Redondo de 25,4 x 1,2 mm Redondo de 25,0 x 1,5 mm
<b>EV: componentes del sistema de tracción</b>	Redondo de 26,0 x 1,2 mm

Tabla 2: Dimensiones mínimos requeridos

La normativa también exige como características mínimas del material que el módulo de Young (E) sea 200 GPa, el límite elástico sea 305 MPa y la tensión de rotura (Su) sea 365 MPa. Para los puntos de unión soldada del monocasco, los valores mínimos serán distintos: el límite elástico será 180 MPa y la tensión de rotura (Su) será 300 MPa.

También se podrán utilizar otros materiales y, por tanto, otros espesores mínimos, siempre que cumpla las siguientes condiciones:

- La disposición de materiales alternativos debe tener un E·I mayor o igual sobre el eje más débil.
- Los tubos de aluminio deben estar tratados térmicamente y endurecidos tras la soldadura. El equipo deberá presentar un informe del proceso.
- Los materiales composite no están permitidos para el arco principal y frontal. El equipo deberá presentar un informe del tipo de material.

<b>MATERIAL Y APLICACIÓN</b>	<b>ESPESOR MÍNIMO DE LA PARED</b>
<b>Tubo de acero para arco principal y frontal, barra donde se monta el arnés de los hombros</b>	2,00 mm
<b>Tubo de acero para estructura de impacto lateral, mampara delantera, refuerzos de los arcos antivuelco, puntos de sujeción del arnés del conductor (excepto la de los hombros), soportes de la mampara delantera, soportes de los refuerzos del arco principal, protecciones HV de acumulación y del sistema de tracción</b>	1,20 mm
<b>Tubo de aluminio</b>	3,00 mm

*Tabla 3: Espesores alternativos mínimos requeridos*

### 3.2.3 Redondos del arco principal y frontal

La estructura de la protección del piloto está formada principalmente por dos arcos de seguridad, uno frontal colocado delante del volante de dirección y otro colocado detrás de la cabeza y la espalda del piloto. La cabeza y las manos del piloto debe estar protegida del suelo en caso de vuelco. Para conseguir esto, teniendo en cuenta al piloto más alto, y al modelo de piloto visto anteriormente, hay que cumplir con las siguientes distancias mínimas:

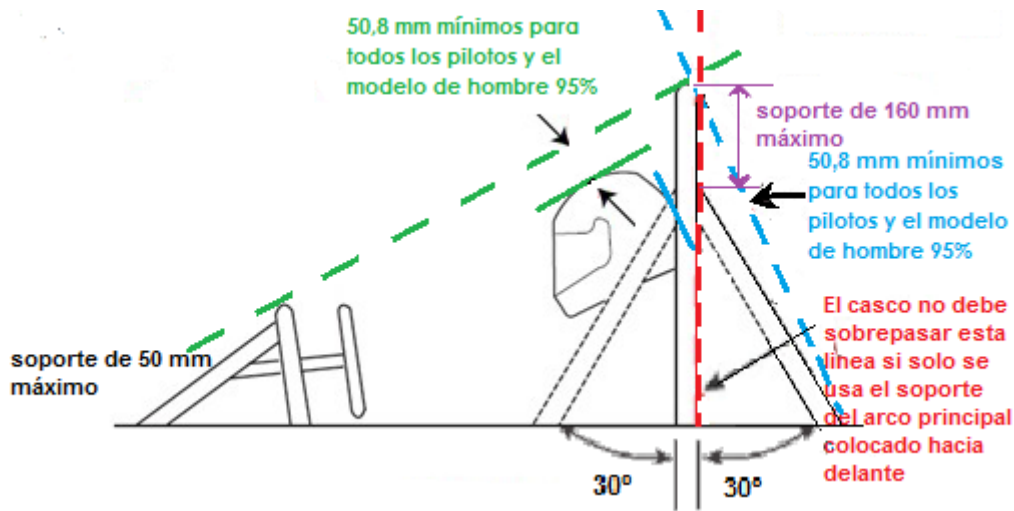


Imagen 6: Disposición de los arcos de seguridad

### 3.2.3.1 Arco principal

El arco principal debe estar construido de una sola pieza de tubos de acero de características especificadas anteriormente.

Ha de estar comprendido entre la parte más baja de un lado del chasis hasta la parte más baja del otro lado.

En una vista lateral, la inclinación no ha de superar los 10° respecto a la vertical.

En una vista frontal, los elementos verticales del arco principal deben de estar separados al menos 380 mm de donde este se une al resto del chasis.

### 3.2.3.2 Arco frontal

El arco frontal ha de ser de sección cerrada, sin la necesidad de que sea de una sola pieza y, ha de estar soportado como mínimo por dos brazos en dirección de avance para proteger las extremidades inferiores del piloto.

La superficie superior no podrá estar separada de éste una distancia superior a 250mm en dirección paralela al suelo, ni tener una altura inferior al volante.

En una vista lateral, la inclinación no ha de superar los 20° respecto a la vertical.

### 3.2.3.3 Brazos de soporte del arco principal

Los brazos de soporte han de ser de construidos de una sola pieza de tubos de acero de características especificadas anteriormente y serán rectos.

Debe de haber dos brazos de soporte para el arco principal, pero desde una vista lateral, estos no podrán estar en el mismo lado al que se inclina el arco principal con respecto a la vertical.

Los brazos de soporte deben estar unido lo más cerca posible de la parte superior del arco principal, la distancia máxima permitida será de 160 mm desde la parte superior del arco.

#### *3.2.3.4 Brazos de soporte del arco frontal*

Los brazos de soporte han de proteger las piernas del piloto, por lo que llegará hasta la estructura de protección de los pies del piloto.

Deben estar unido lo más cerca posible de la parte superior del arco frontal, pero no más de 50,8 mm por debajo de la superficie superior del arco frontal.

### **3.2.4 Estructura frontal de impacto**

Para la seguridad el piloto, los pies y las piernas no pueden sobresalir en ningún momento de la estructura principal.

A continuación de la superficie frontal debe haber un absorbedor de energía, para proteger al piloto en caso de colisión.

#### *3.2.4.1 Superficie frontal*

Ha de estar formada de tubos de acero de una sola pieza de características especificadas anteriormente y colocada por delante de cualquier elemento rígido.

Debe estar situado de tal forma que los pies del piloto (sin estar presionando los pedales) queden protegidos. Los pedales ajustables deben estar en la posición más adelantada.

El soporte de la superficie frontal debe estar integrada en la estructura.

La superficie frontal debe estar soportada por un mínimo de tres barras por cada lado para; una en la parte inferior, una en la parte superior (a una distancia inferior a 50,8mm de la parte superior del arco frontal) y una diagonal para triangular la estructura.

#### *3.2.4.2 Absorbedor de energía*

Se instala por delante de la superficie frontal, con una longitud mínima de 200 mm, 100 mm de alto y 200 mm de ancho, con una distancia mínima de 200 mm con la superficie frontal.

Para evitar penetrar en la estructura, el absorbedor debe ir colocado sobre una plancha de 1,5 mm de grosor de acero o de 4 mm si es de aluminio.

El diseño ha de ser capaz de disipar la energía en caso de colisión a 7 m/s, para un vehículo de 300 kg y con una desaceleración media del vehículo de 20 g, con un pico de desaceleración menor o igual a 40 g. La energía total absorbida ser como mínimo 7.350 J.

#### *3.2.4.3 Estructura de impacto lateral*

La protección lateral está formada como mínimo por tres piezas tubulares de igual sección a la de los arcos de seguridad. La barra superior conectará el arco frontal con el principal, a una altura del suelo entre 300 mm y 350 mm, con un piloto de 77 kg sentado en la posición normal de conducción. La barra inferior conectará los dos arcos por su parte inferior. Finalmente, la barra diagonal conectará las dos barras anteriores entre sí.

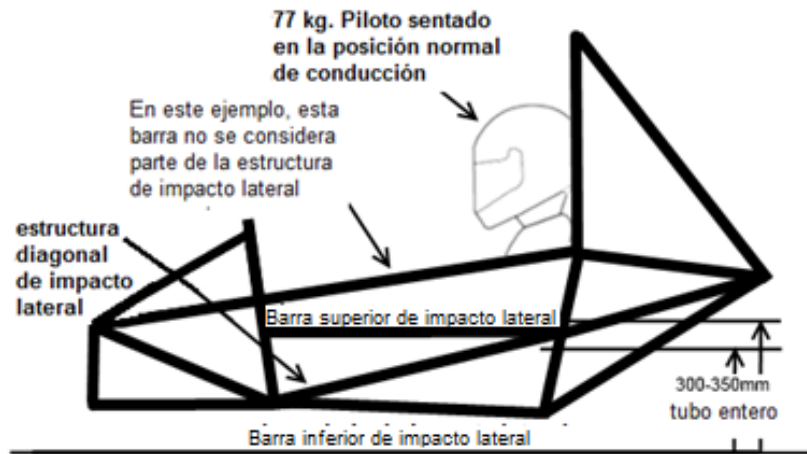


Imagen 7: Estructura de impacto lateral

### 3.2.5 Requisitos estructurales

La normativa contiene unos requisitos estructurales de no obligado cumplimiento si se cumple la normativa de materiales y dimensiones de las barras. Aun así, se ha considerado conveniente incluirlas para asegurar el comportamiento correcto del chasis en caso de accidente.

#### 3.2.5.1 Arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo

- Carga aplicada:  $F_x = 6,0 \text{ kN}$ ,  $F_y = 5,0 \text{ kN}$ ,  $F_z = -9,0 \text{ kN}$
- Punto de aplicación: Parte superior del arco principal.
- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

#### 3.2.5.2 Arco frontal

- Carga aplicada:  $F_x = 6,0 \text{ kN}$ ,  $F_y = 5,0 \text{ kN}$ ,  $F_z = -9,0 \text{ kN}$
- Punto de aplicación: Parte superior del arco frontal
- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

#### 3.2.5.3 Impacto lateral

- Carga aplicada:  $F_x = 0 \text{ kN}$ ,  $F_y = 7,0 \text{ kN}$ ,  $F_z = 0 \text{ kN}$ . La fuerza se aplica en dirección al piloto.
- Punto de aplicación: Todos los miembros estructurales que estén entre el arco frontal y el principal en la zona de impacto lateral.
- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

#### 3.2.5.4 Superficie frontal y soportes de la superficie frontal

- Carga aplicada:  $F_x = 120 \text{ kN}$ ,  $F_y = 0 \text{ kN}$ ,  $F_z = 0 \text{ kN}$ .
- Punto de aplicación: En los puntos de unión entre el atenuador de impactos y la superficie frontal.
  - Condiciones de contorno: desplazamiento fijo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal, y los puntos de anclaje del cinturón de seguridad.
  - Deformación máxima admisible: 25 mm
  - El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

#### 3.2.5.5 Anclaje del cinturón de seguridad de los hombros

- Carga aplicada: 7 kN en cada punto de anclaje.
- Punto de aplicación: En los dos puntos de anclaje de forma simultánea.
- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
  - Deformación máxima admisible: 25 mm
  - El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

#### 3.2.5.6 Anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino

- Carga aplicada: Se aplica 13 kN en cada punto de anclaje del cinturón de seguridad pélvico; 6,5 kN en cada punto de anclaje del cinturón sub-marino. Si el cinturón pélvico y el de sub-marino comparten los mismos puntos de anclaje, una carga de 19,5 kN se aplica en cada punto de anclaje.
  - Punto de aplicación: En todos los puntos de anclaje de forma simultánea.
  - Condiciones de contorno: desplazamiento fijo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
  - Deformación máxima admisible: 25 mm
  - El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

#### 3.2.5.7 Superficie frontal y soportes de la superficie frontal fuera del eje

- Carga aplicada:  $F_x = 120 \text{ kN}$ ,  $F_y = 10,5 \text{ kN}$ ,  $F_z = 0 \text{ kN}$ .
- Punto de aplicación: Crear nodo en el centro de la superficie frontal, conectado de forma rígida a los puntos de unión con la protección de impacto y la superficie frontal.
  - Condiciones de contorno: desplazamiento fijo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados del arco principal y los dos anclajes del cinturón de seguridad de los hombros.
  - Deformación máxima admisible: 25 mm
  - El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

## 4 CARGAS EN EL CHASIS

El chasis tiene que soportar los esfuerzos que ejercen todos los componentes del vehículo ya que es la estructura principal de este. Por tanto, a la hora de diseñar el chasis, hay que tener en cuenta estas cargas y su punto de aplicación.

Las condiciones que imponen las fuerzas laterales cuando el vehículo toma una curva, hacen que este bascule sobre los muelles de suspensión alrededor de unos puntos situados en cada uno de los extremos delantero y trasero. Estos puntos son los centros de balanceo y están unidos por una línea que configura el eje de balanceo. La inclinación de este eje juega un papel fundamental en las características de maniobrabilidad del vehículo.

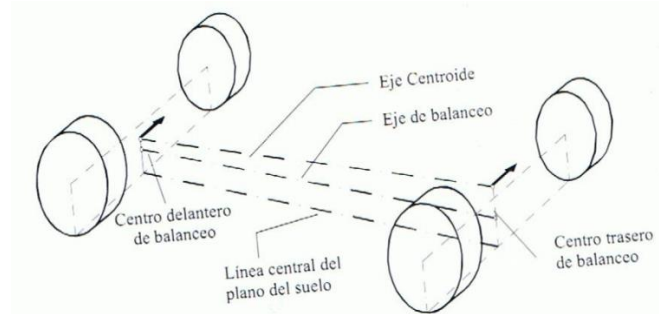


Imagen 8: Eje y centros de balanceo de un vehículo [5]

Por tanto, al realizar el diseño se tendrá en cuenta:

- Bajar todo lo posible el centro de gravedad del vehículo ya que la fuerza que se produce al tomar la curva será menor.
- Reducir el peso del chasis, para aprovechar la potencia del motor.

### 4.1 ERGONOMÍA

La posición del piloto debe ser tal que esta no suponga problemas a la hora de conducir o de evacuar el vehículo, para ello se utilizan plantillas normalizadas de posicionamiento que marcan los ángulos habituales de colocación de extremidades, espalda y cuello.

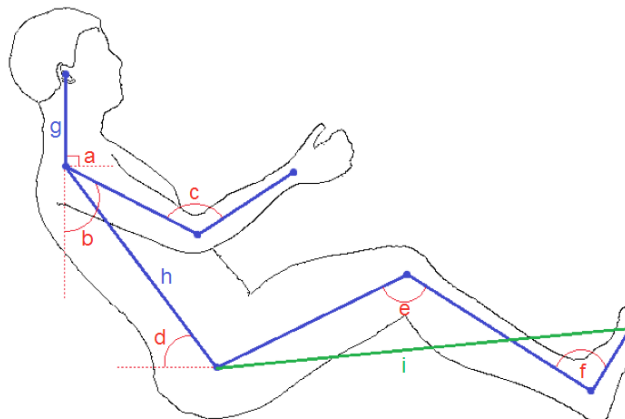


Imagen 9: Posición del piloto



LÍNEA	VARIABLE	LONGITUD (mm)
Del hombro al centro de la cabeza	g	280
Del hombro a la cadera	h	490
De la cadera los dedos del pie	i	915

Tabla 4: Longitudes del cuerpo

ARTICULACIÓN	VARIABLE	ÁNGULO (°)
Cuello	a	90
Hombro	b	55
Codo	c	116
Cadera	d	50
Rodilla	e	120-125
Tobillo	f	85

Tabla 5: Ángulos de las articulaciones

El peso será de 75 kg e irá repartido sobre los 6 puntos de anclaje del asiento al chasis.

## 4.2 SUSPENSIONES

El chasis tiene que soportar las cargas que transmiten las ruedas mediante las suspensiones, que ejercen un par torsor en el chasis, y condicionan el comportamiento del vehículo en pista.

La geometría de la suspensión se suele diseñar como la que se muestra en la Imagen 10, así como las posiciones del piloto y el motor. Las fuerzas de las barras de suspensión simplemente empujan y tiran debido al sistema multibrazo.

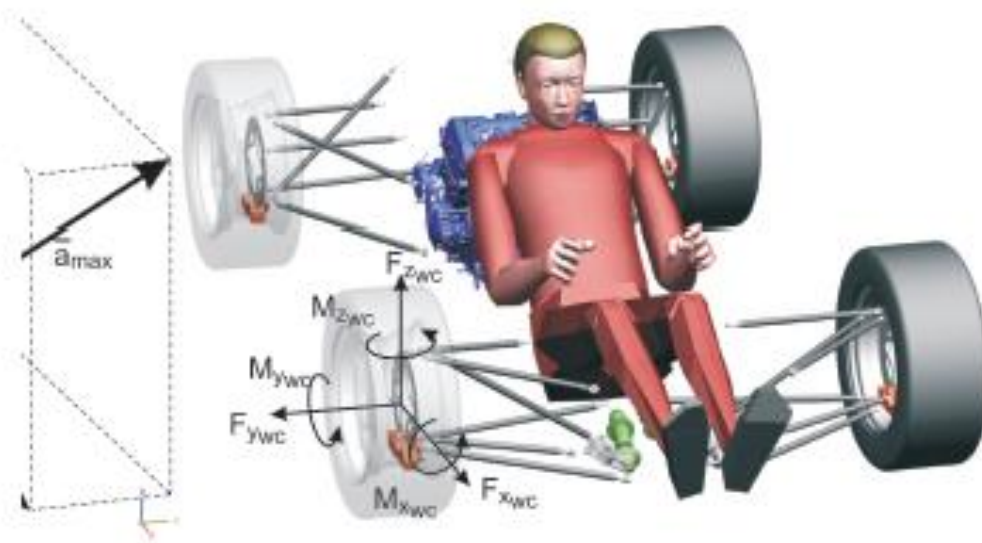


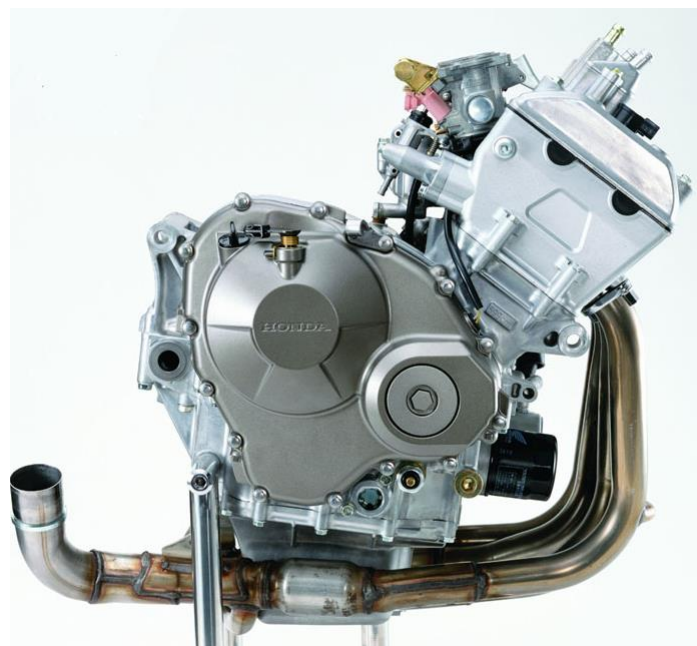
Imagen 10: Geometría de la suspensión [6]



Las ruedas, los sistemas de suspensión, transmisión y dirección constituyen un peso cercano a los 70 kg, aunque no se considerará este peso en los ensayos del chasis ya que no son masas suspendidas.

### 4.3 MOTOR

El motor se colocará en la parte trasera del monoplaza, justo detrás del arco principal. Por tanto, el monoplaza será de tracción trasera y motor central. Este motor será un Honda CBR 600RR ya que tiene buenas prestaciones, alta fiabilidad y buena relación potencia/par motor.



*Imagen 11: Motor Honda CBR 600RR [7]*

Las características técnicas del motor son:

<b>Cilindrada</b>	599cc
<b>Tipo de combustible</b>	Gasolina
<b>Tipo de motor</b>	4 tiempos. 4 cilindros en línea, DOHC, 16 válvulas, refrigeración líquida.
<b>Diámetro x Carrera</b>	67 x 42,5 mm
<b>Relación de compresión</b>	12,2:1
<b>Suministro de combustible</b>	Digital transistorizado con control computerizado y avance electrónico
<b>Tren de válvulas</b>	DOHC, 2 de admisión, 2 de escape por cilindro
<b>Potencia máxima</b>	88 kW (120 CV) / 13500 rpm (95/1/EC)
<b>Diámetro mariposa</b>	40 mm (x4)
<b>Peso</b>	58kg

*Tabla 6: Características técnicas del motor Honda CBR 600RR [8]*

#### 4.4 DEPÓSITO DE COMBUSTIBLE

Se considerará un depósito de combustible de 20 litros de capacidad, que serán suficientes para poder completar la prueba más larga de la competición. Este irá colocado justo detrás del asiento, para aprovechar al máximo el espacio disponible. Se supone un peso de 18 kg, considerando que el depósito está lleno, ya que la gasolina tendría una masa de 13,6 kg y 4,4 kg del tanque de combustible, la bomba y el regulador de presión.

#### 4.5 BATERÍA

Su peso estará en torno a los 10 kg y su ubicación estará cercana al eje delantero, por delante de los pedales, para compensar el mayor peso del eje trasero y evitar el subviraje.

#### 4.6 OTROS

En el vehículo hay otros elementos como el diferencial, los ejes, el sistema eléctrico, los pedales, el volante, el asiento y los frenos, los cuales no se estudiarán por separado ya que su peso es menor que el de los mencionados anteriormente. Éstos pesos se posicionarán repartidos por toda la estructura, excepto la parte superior del arco principal ya que en este punto no va anclado ningún componente de peso significativo. Se estima un peso total de 52,5 kg.

COMPONENTE	PESO (kg)
Diferencial	3
Ejes	19
Sistema eléctrico	3
Volante	1,5
Frenos	18
Asiento	5
Pedales	3

Tabla 7: Componentes del vehículo

## 5 CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES

El diseño de la estructura tubular ha de cumplir con la normativa expuesta anteriormente. Esto implica considerar ciertos aspectos importantes en el diseño de cara a conseguir el objetivo.

### 5.1 CRITERIOS DE RIGIDEZ

La rigidez es la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos generalizados. Se puede definir según la expresión:

$$K = \frac{P}{\Delta}$$

donde K es el parámetro de rigidez, P la fuerza ejercida en MPa y  $\Delta$  el desplazamiento en mm.

### 5.1.1 Rigidez torsional

Se refiere a cuanto se deforma un chasis debido a un esfuerzo de torsión. Esta es la más común en el mundo del automóvil, y tiene como fórmula:

$$K = \frac{M}{\theta}$$

donde K es la rigidez torsional en N·m/°, M el par aplicado en N·m y  $\theta$  el ángulo que gira la estructura en °.

Otra forma de calcular la rigidez torsional es:

$$K = \frac{F \cdot L}{\tan^{-1} \left[ \Delta z_1 + \frac{\Delta z_2}{2L} \right]}$$

donde  $\Delta z_1$  y  $\Delta z_2$  son las deformaciones verticales medidas en los puntos de máxima y mínima deformación respectivamente, F es la fuerza aplicada y L es la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el punto medio entre las dos fuerzas aplicadas.

En el caso de la Formula Student, los resultados de los equipos que llevan más tiempo en la competición se sitúan alrededor de los 3500 N·m/° [9]. Este valor se toma al ejercer un par torsor en uno de los ejes mientras que se fijan los desplazamientos en la parte posterior.

La estructura del vehículo recibe altas cargas dinámicas que se concentran en el chasis, en su mayoría en los puntos de anclaje de la suspensión, por lo que necesitan un apoyo adecuado para evitar su deformación o incluso su rotura.

### 5.1.2 Rigidez a flexión

El chasis, debido a todos los pesos del vehículo que soporta, tiende a deformarse cuando se apoya en las suspensiones. Para ello se simulan las masas principales del vehículo, las estructura, el piloto, el motor, las ruedas y el diferencial, aplicándolas en su centro de gravedad y uniendo estos a la estructura mediante elementos rígidos.

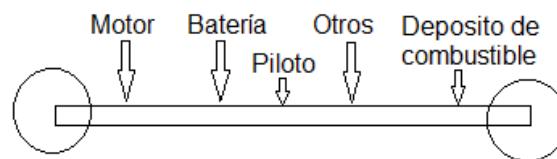


Imagen 12: Masas que afectan a la flexión en el chasis

## 5.2 SELECCIÓN DE MATERIALES

El deporte de motor es una disputa entre equipos muy reñida, por lo que se busca encontrar cualquier ventaja en todas las partes del vehículo para aumentar su rendimiento. Un material del chasis diferente puede reducir el peso del vehículo, aumentando la potencia de este. El del material correcto también puede proporcionar ventajas disminuyendo la flexión del tubo y aumentando la resistencia de la estructura.

En las normas de la Formula SAE no se permite el uso de aleaciones de titanio para la construcción del chasis, pero permite todos los demás materiales viables, tales como:

- Aceros al carbono
- Aceros aleados
- Aluminio
- Materiales composite

Para la fabricación del chasis se optará por usar acero porque tiene un peso relativamente bajo y una elevada resistencia. Si se compara con el aluminio que sería otro material de los más usados en fabricación de chasis, este es más ligero ofreciendo valores de resistencia similares, pero la diferencia la marca el precio. También cabe destacar la facilidad de fabricación y reparación que tiene el acero, lo que hace el proceso de manufactura más rápido. Se elegirá uno de los dos tipos de acero estudiados en la Tabla 8 y Tabla 9.

Las composiciones químicas de los aceros son las que se muestran en la Tabla 8

ACERO	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
<b>S355</b>	0,18-0,23	0,55 máx.	0,7-1	0-0,04	0-0,05
<b>S275</b>	0,17-0,23	0,45 máx.	0,3-0,6	0-0,04	0-0,05

Tabla 8: Composición química de los aceros S355 y S275

Y las propiedades mecánicas de dichos aceros, conformados en frío y sin tratamientos térmicos, son:

ACERO	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Precio (€/kg)
<b>S355</b>	205-215	470-630	320-395	470	0,393-0,434
<b>S275</b>	205-215	395-490	310-350	410	0,391-0,431

Tabla 9: Propiedades mecánicas de los aceros S355 y S275

Los dos aceros son óptimos para la construcción de la estructura tubular y tienen unas características muy similares. Se ha elegido para la construcción de la estructura tubular el Acero S355 ya que tiene mayor resistencia a la tracción, el límite elástico es ligeramente superior al igual que la tensión de rotura.

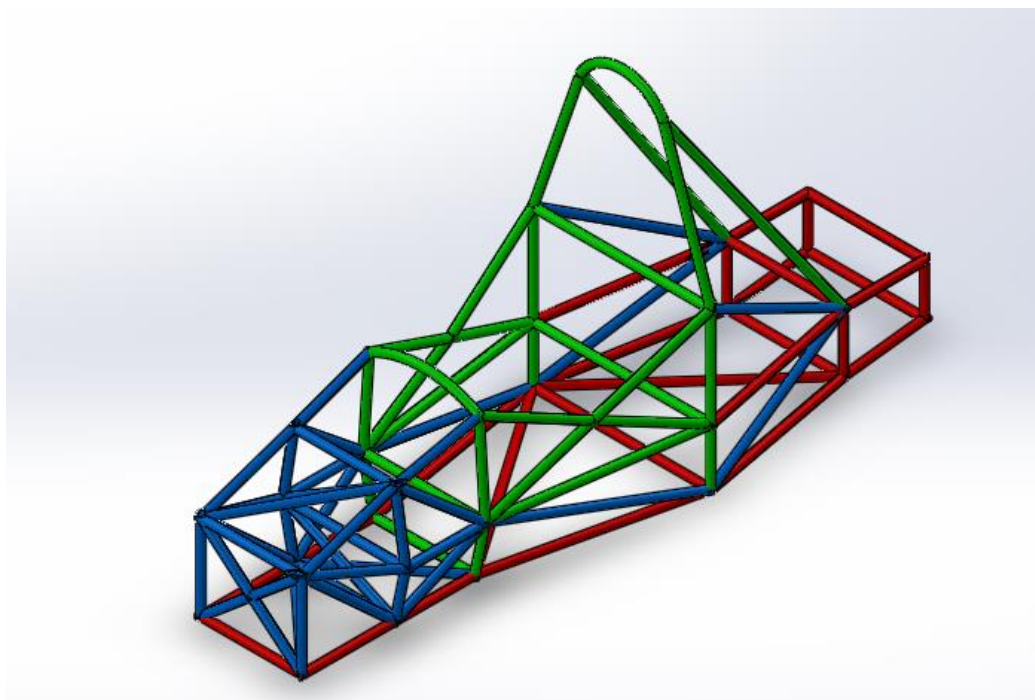
## 6 ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL MODELO

Para conseguir un chasis óptimo, primero se debe diseñar y simular su comportamiento de un chasis prototipo que cumpla con la normativa expuesta anteriormente. Los puntos débiles serán reforzados posteriormente hasta obtener el modelo más competitivo.

### 6.1 OBTENCIÓN DE UN MODELO BASE

A partir de la normativa impuesta por la organización, se han realizado dos diseños iniciales en los que consten básicamente los componentes especificados en la misma y que servirán de base. Los dos diseños creados tienen el mismo número de barras y nodos, la diferencia reside en que el chasis 2 tiene la parte frontal más baja que los chasis 1, y este tiene los arcos frontal y principal paralelos.

Se realizan diferentes pruebas variando el tamaño de los tubos que forman la estructura para detectar aquella que ofrece la relación rigidez/peso óptima.



*Imagen 13: Estructura del chasis 1.*

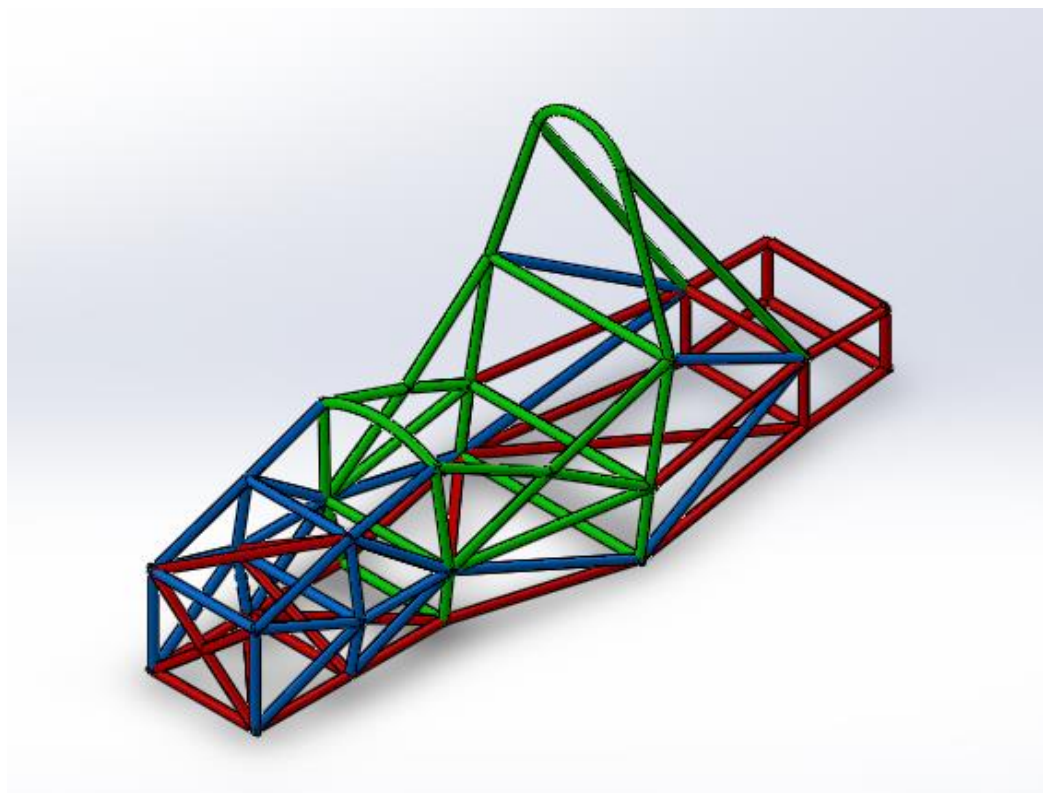


Imagen 14: Estructura del chasis 2.

Las barras de los dos modelos tienen un perfil redondo con un espesor determinado. Se han

	<b>VERDE (Diámetro exterior x espesor en mm)</b>	<b>AZUL (Diámetro exterior x espesor en mm)</b>	<b>ROJO (Diámetro exterior x espesor en mm)</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>Chasis 1-1</b>	25x2,5	25x1,75	25x1,5	23,594
<b>Chasis 1-2</b>	25,5x2,6	25,5x1,9	25,5x1,5	25,181
<b>Chasis 1-3</b>	25,7x3	25,7x2	26x1,6	27,835
<b>Chasis 1-4</b>	26x3,5	25,4x2	25,8x1,9	30,790
<b>Chasis 1-5</b>	26,5x4	26,8x3,2	26,5x2,7	42,191
<b>Chasis 1-6</b>	27x4	26,8x3,2	26,5x2,8	42,638
<b>Chasis 2-1</b>	27x4	26,8x3,2	26,5x2,8	42,142
<b>Chasis 2-2</b>	27x4	26,8x3,2	26,5x2,7	41,695

usado tres diámetros y espesores diferentes para las diversas partes del chasis (Tabla 10), y así poder cumplir con la normativa. Para la construcción de los demás diseños de chasis, se variarán los diámetros exteriores de las barras y su espesor.

Al variar el diámetro y espesor de los tubos, cambiará el peso total del chasis. Como ya se ha expuesto anteriormente, la reducción de pesos es uno de los factores a tener en cuenta a la hora de diseñar el chasis.



	<b>VERDE (Diámetro exterior x espesor en mm)</b>	<b>AZUL (Diámetro exterior x espesor en mm)</b>	<b>ROJO (Diámetro exterior x espesor en mm)</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>Chasis 1-1</b>	25x2,5	25x1,75	25x1,5	23,594
<b>Chasis 1-2</b>	25,5x2,6	25,5x1,9	25,5x1,5	25,181
<b>Chasis 1-3</b>	25,7x3	25,7x2	26x1,6	27,835
<b>Chasis 1-4</b>	26x3,5	25,4x2	25,8x1,9	30,790
<b>Chasis 1-5</b>	26,5x4	26,8x3,2	26,5x2,7	42,191
<b>Chasis 1-6</b>	27x4	26,8x3,2	26,5x2,8	42,638
<b>Chasis 2-1</b>	27x4	26,8x3,2	26,5x2,8	42,142
<b>Chasis 2-2</b>	27x4	26,8x3,2	26,5x2,7	41,695

Tabla 10: Dimensiones del perfil de las barras y peso total del chasis

## 6.2 ANÁLISIS TORSIONAL

Como ya se ha comentado, esta es la prueba clave, define en gran parte el comportamiento de un coche y por ello, aumentar la rigidez supone estar mejorando el chasis. Para realizar este ensayo, se fija la parte trasera del vehículo y se aplican unas fuerzas que en los puntos donde se anclan los brazos de la suspensión delantera.

Las fuerzas aplicadas son las que al aplicarlas producen un par torsor de 1000 N·m, 125 N·m en cada uno de los ocho nodos donde irán ancladas los brazos de la suspensión delantera. Se ha calculado mediante la fórmula:

$$T = F \cdot L$$

donde T es el par torsor resultante, F es la fuerza que se aplica y L es la longitud desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el plano de simetría de la estructura.

	<b>Longitud (m)</b>	<b>Fuerza (N)</b>
<b>Nodo 1</b>	0,19	-657,89
<b>Nodo 2</b>	0,23	-543,48
<b>Nodo 3</b>	0,23	-543,48
<b>Nodo 4</b>	0,19	-657,89
<b>Nodo 5</b>	0,19	657,89
<b>Nodo 6</b>	0,23	543,48
<b>Nodo 7</b>	0,23	543,48
<b>Nodo 8</b>	0,19	657,89

Tabla 11: Cálculo de fuerzas a aplicar en cada nodo.

Se establecen los puntos de fijación en los cuatro vértices inferiores de la parte trasera para poder obtener una medida válida.

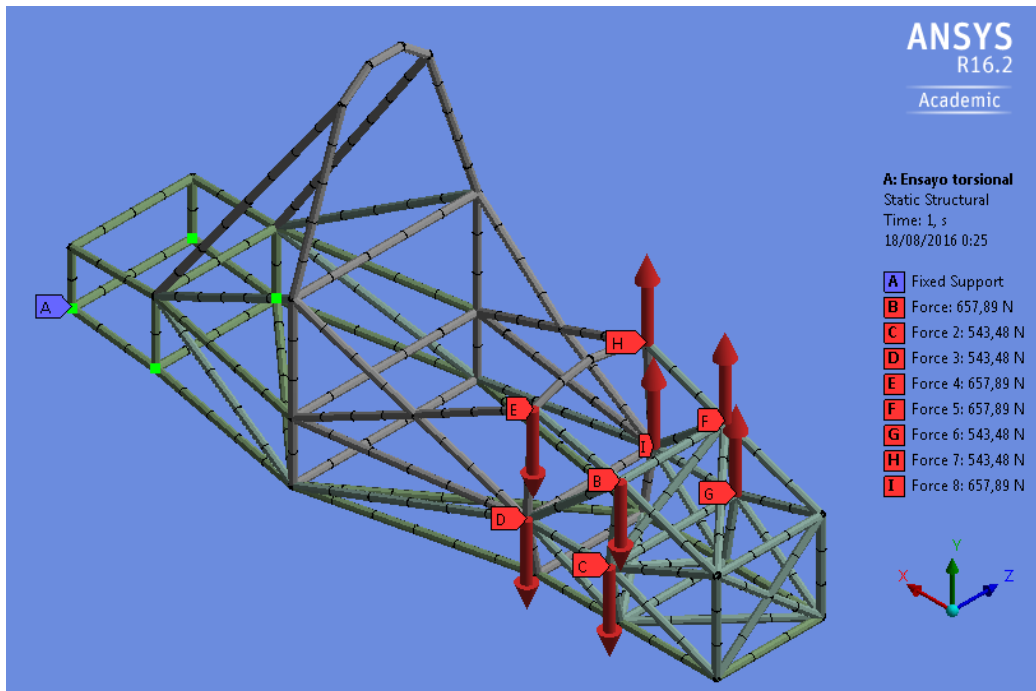


Imagen 15: Fuerzas y puntos de fijación en torsión en el chasis 1

### 6.3 ENSAYO A FLEXIÓN

Un estudio necesario consiste en comprobar el buen comportamiento a flexión de la estructura en condiciones estáticas. Para ello se simulan las masas de los principales componentes del vehículo (los más pesados) aplicadas en su centro de gravedad y el resto de masas repartidas entre los nodos de la estructura.

El reparto de pesos entre los nodos de la estructura se realizará mediante la siguiente fórmula:

$$F_{\text{punto de anclaje}} = \sum \left( \frac{P_i}{N} \right) \cdot a \cdot g$$

donde  $P_i$  es el peso de cada componente del vehículo,  $N$  el número de nodos que soporta la pieza,  $a$  es la aceleración que sufre el chasis medido en fuerzas  $g$  y que se considerará un valor igual a la unidad y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Las fuerzas que produce cada elemento del vehículo en los nodos:

	Puntos de anclaje	Peso (kg)	Fuerza total (N)	Fuerza en cada punto de anclaje (N)
<b>Motor</b>	8	58	568,98	71,12
<b>Piloto</b>	6	75	735,75	122,63
<b>Batería</b>	4	10	98,07	24,52
<b>Depósito de combustible</b>	4	18	176,58	44,15
<b>Otros</b>	32	52,5	515,03	16,09

Tabla 12: Fuerzas en el ensayo de flexión



Para realizar la simulación se impide el deslizamiento vertical de la estructura en los cuatro puntos de anclaje de las suspensiones delanteras y los de las suspensiones traseras.

Se estudiarán las tensiones máximas que alcanza la estructura y en qué puntos se dan y la deformación máxima que sufre la estructura. Será necesario comparar los resultados con las tensiones máximas que puede soportar el material y comprobar que no corre peligro. Como tensión de análisis se va a utilizar la de Von Mises:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

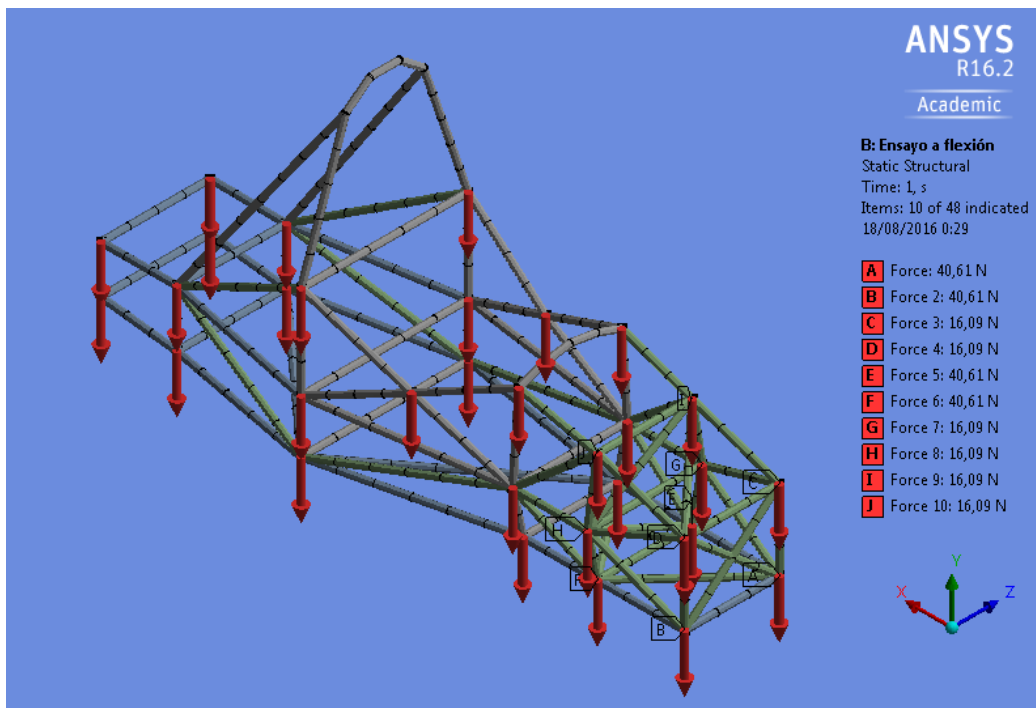
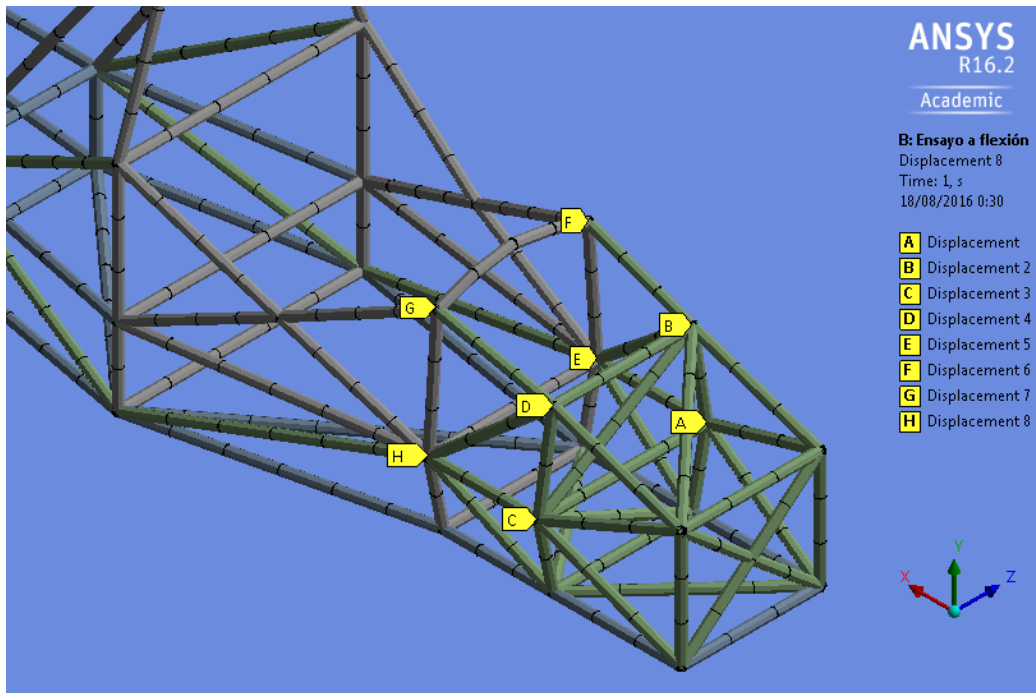
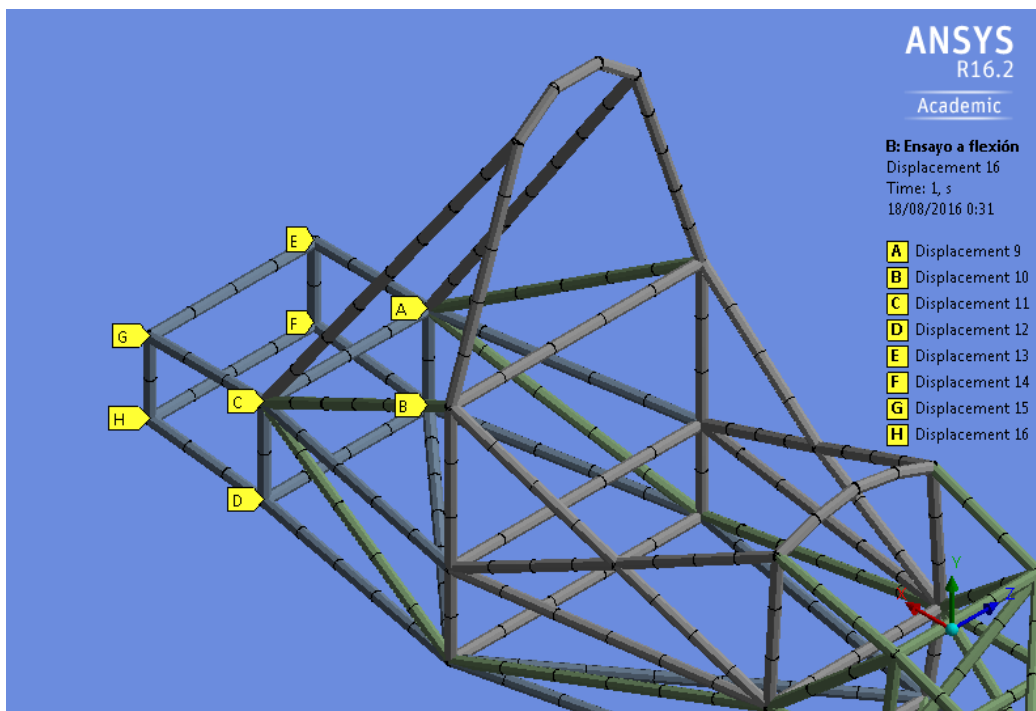


Imagen 16: Fuerzas en flexión en el chasis 1



*Imagen 17: Puntos de fijación de la suspensión delantera en flexión en el chasis 1*



*Imagen 18: Puntos de fijación de la suspensión trasera en flexión en el chasis 1*

## 6.4 REMOLQUE

Una de las especificaciones de las normas es que el chasis ha de tener un tubo auxiliar situado en la parte trasera de la estructura, cuya finalidad es la de servir como punto de

enganche. Esto sería necesario si tras cualquier fallo, ya sea mecánico o una salida de pista, el coche tuviese que ser remolcado por una grúa.

Para determinar la fuerza que actúa en el punto de remolque, se tendrá en cuenta la masa total del vehículo sin contar al piloto, ya que, en caso de accidente, el piloto abandona el vehículo antes de ser remolcado. Por tanto, el reparto de masas en el vehículo será igual que para el análisis de flexión, pero sin contar al piloto.

	Puntos de anclaje	Peso (kg)	Fuerza total (N)	Fuerza en cada punto de anclaje (N)
<b>Motor</b>	8	58	568,98	71,12
<b>Batería</b>	4	10	98,07	24,52
<b>Depósito de combustible</b>	4	18	176,58	44,15
<b>Otros</b>	32	52,5	515,03	16,09

Tabla 13: Fuerzas en el ensayo de remolque

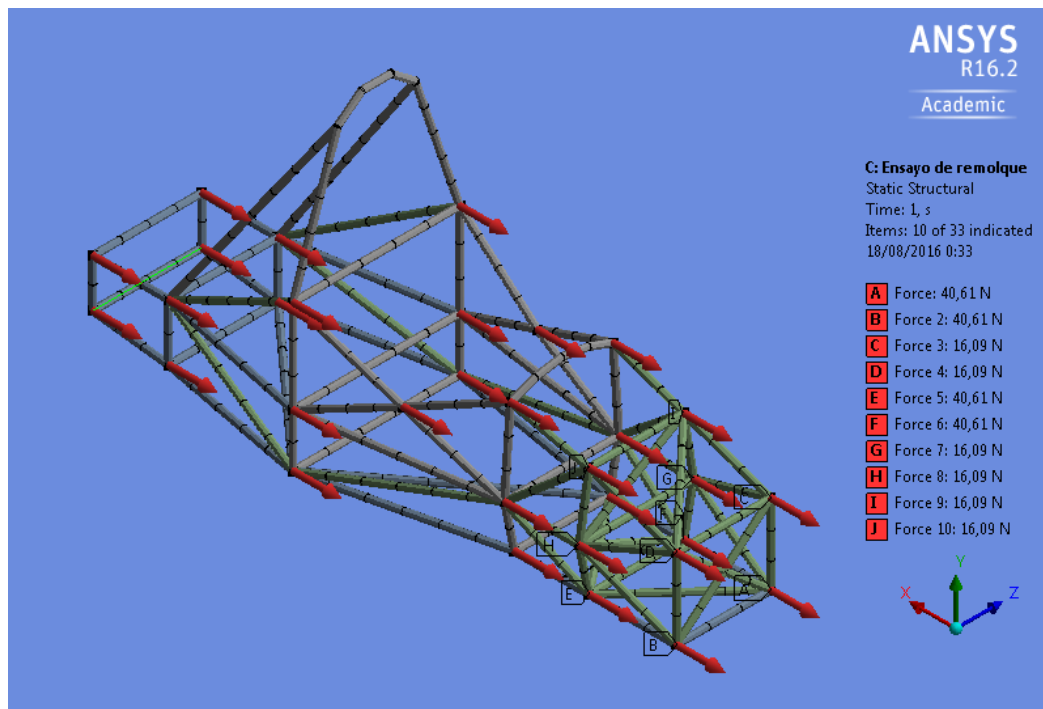


Imagen 19: Fuerzas en remolque en el chasis 1

Se establece la barra trasera inferior como elemento fijo y se deja colgar la estructura.

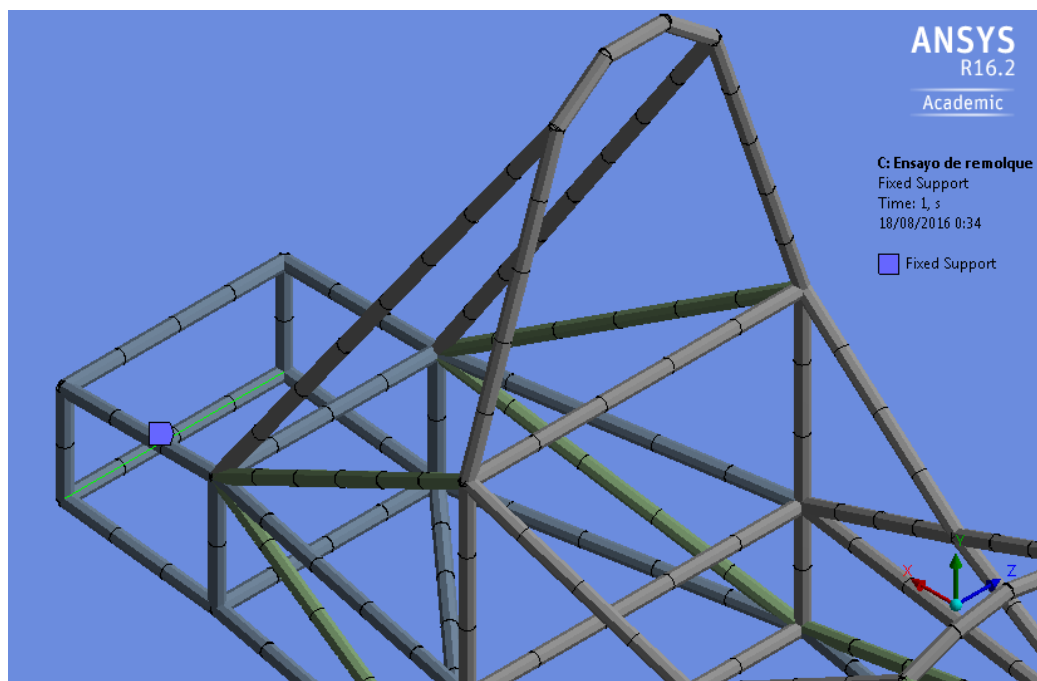


Imagen 20: Puntos de fijación en remolque en el chasis 1

## 6.5 ACELERACIÓN

Cuando un vehículo inicia la marcha, produce fuerzas de inercia se provocan una transferencia de pesos desde el eje delantero al trasero y con lo que se crean reacciones de diferente magnitud en los neumáticos. Las fuerzas que se producen en este ensayo se calculan igual que las del ensayo de flexión. En este caso, la aceleración la proporciona el fabricante del motor, que será  $6,94 \text{ m/s}^2$ , lo que equivale a  $0,68 \text{ g}$ .

	Puntos de anclaje	Peso (kg)	Fuerza total (N)	Fuerza en cada punto de anclaje (N)
<b>Motor</b>	8	58	386,88	48,36
<b>Piloto</b>	6	75	500,31	83,39
<b>Batería</b>	4	10	66,68	16,67
<b>Depósito de combustible</b>	4	18	120,07	30,02
<b>Otros</b>	32	52,5	350,22	10,94

Tabla 14: Fuerzas en el ensayo de aceleración

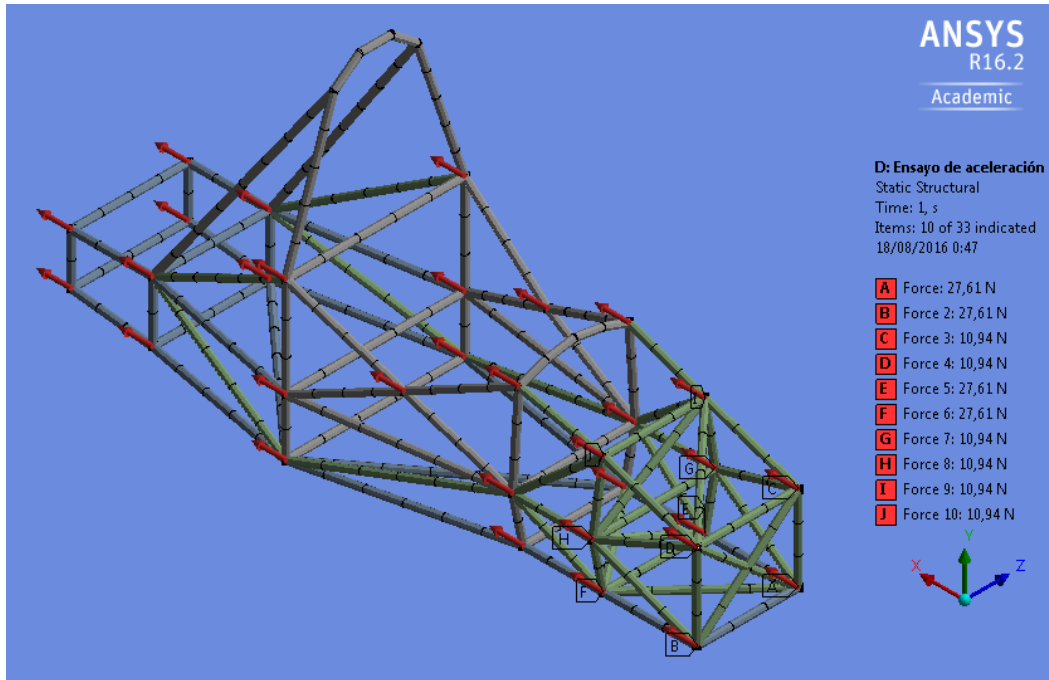


Imagen 21: Fuerzas en aceleración en el chasis 1

El eje trasero es el que transmite la fuerza de aceleración por lo que, al realizar la simulación, este estará fijado al igual que los movimientos verticales y laterales del eje delantero. Así que se fijarán los nodos donde irán ancladas las barras de suspensión trasera y se restringirán el eje Y y Z de los nodos de la suspensión delantera.

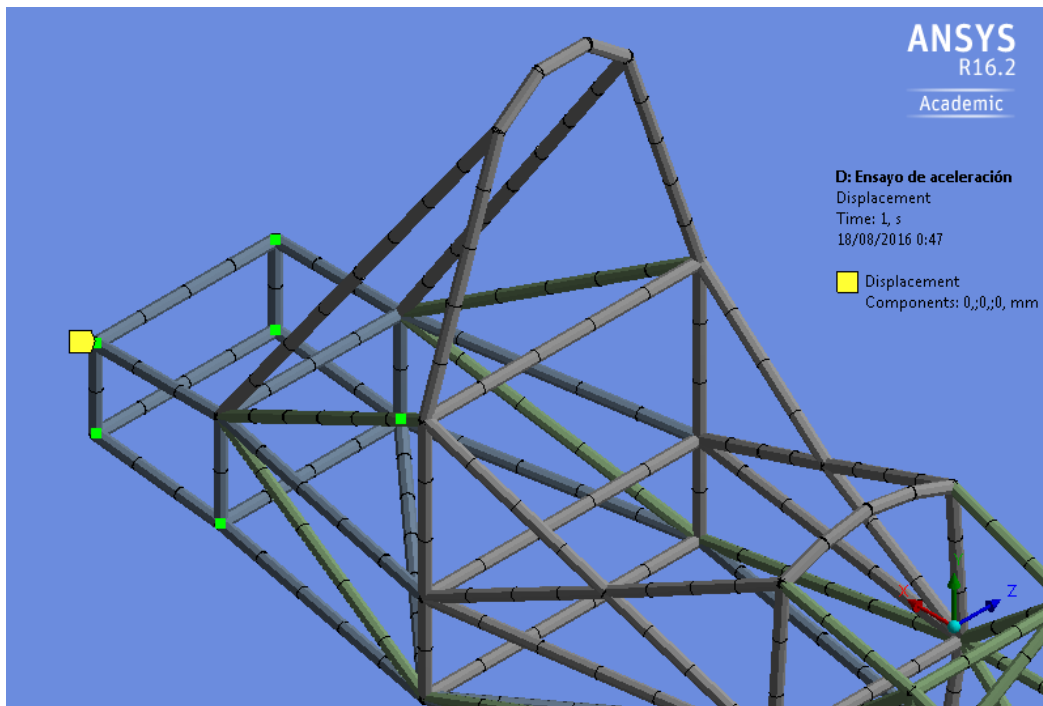


Imagen 22: Puntos de fijación en aceleración en el chasis 1

Al igual que en la prueba anterior, se estudiarán la tensión máxima de Von Mises y la deformación máxima que sufre la estructura.

## 6.6 FRENADA

Al frenar, las ruedas dejan de girar y tiran de la estructura mediante las barras de la suspensión, pero el giro sigue siendo libre ya que las articulaciones que unen la suspensión con el chasis así lo permiten. Así que se fijarán los nodos donde irán ancladas las barras de suspensión trasera y delantera.

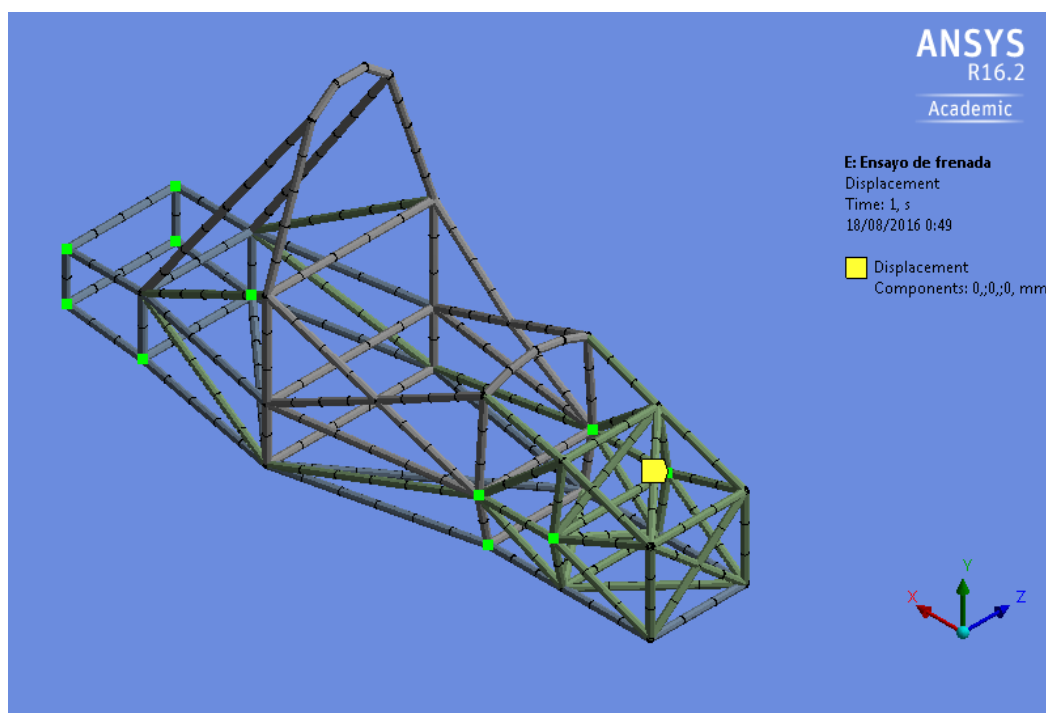


Imagen 23: Puntos de fijación en frenada en el chasis 1

Para realizar ese ensayo, se consideran las fuerzas que se producen en una frenada de 100 a 0 km/h en un tramo de 25 m. Estas aceleraciones se calculan mediante la fórmula:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot (x_1 - x_2)}$$

donde  $v_2$  es la velocidad final en m/s,  $v_1$  es la velocidad inicial en m/s,  $x_1$  es la posición inicial en m y  $x_2$  es la posición final en m.

La aceleración para la prueba de frenada será de 15,43 m/s<sup>2</sup>, lo que equivale a 1,57 g.

	Puntos de anclaje	Peso (kg)	Fuerza total (N)	Fuerza en cada punto de anclaje (N)
<b>Motor</b>	8	58	893,30	111,66
<b>Piloto</b>	6	75	1155,13	192,52
<b>Batería</b>	4	10	153,97	38,49
<b>Depósito de combustible</b>	4	18	277,23	69,31

Otros	32	52,5	808,60	25,27
-------	----	------	--------	-------

Tabla 15: Fuerzas en el ensayo de frenada

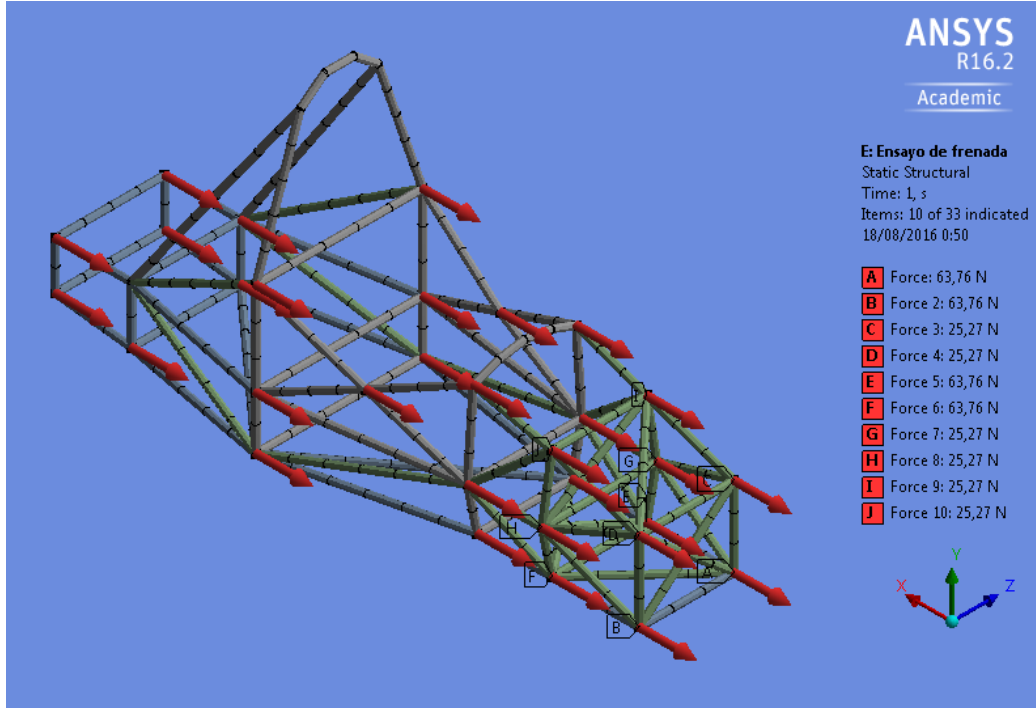


Imagen 24: Fuerzas en frenada en el chasis 1

## 6.7 CURVA

Durante la trayectoria del vehículo en una curva, la aceleración se divide en dos componentes, tangencial y normal. Esta última se conoce como aceleración centrífuga que provoca la transferencia de pesos desde la rueda interior a la exterior, generando cargas laterales en la estructura. La fuerza ejercida sobre el chasis durante el giro será:

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Donde  $F_c$  es la fuerza centrífuga que afecta al vehículo en el paso por curva,  $m$  es la masa del vehículo,  $v$  es la velocidad de paso por curva y  $r$  es el radio de la curva.

Para calcular las aceleraciones producidas en la competición se supone una curva con radio de 9 metros, ya que es el radio mínimo que se indica en la normativa, tomada a una velocidad de 50 km/h con una masa del vehículo estimada en 348,5 kg. Por tanto, la fuerza centrífuga será 7469,56 N, lo que equivale a una fuerza de 2,18 g.

	Puntos de anclaje	Peso (kg)	Fuerza total (N)	Fuerza en cada punto de anclaje (N)
<b>Motor</b>	8	58	1240,38	155,05
<b>Piloto</b>	6	75	1603,94	267,32
<b>Batería</b>	4	10	213,86	53,46
<b>Depósito de combustible</b>	4	18	384,94	96,24



Otros	32	52,5	1112,06	34,75
-------	----	------	---------	-------

Tabla 16: Fuerzas para el ensayo de curva

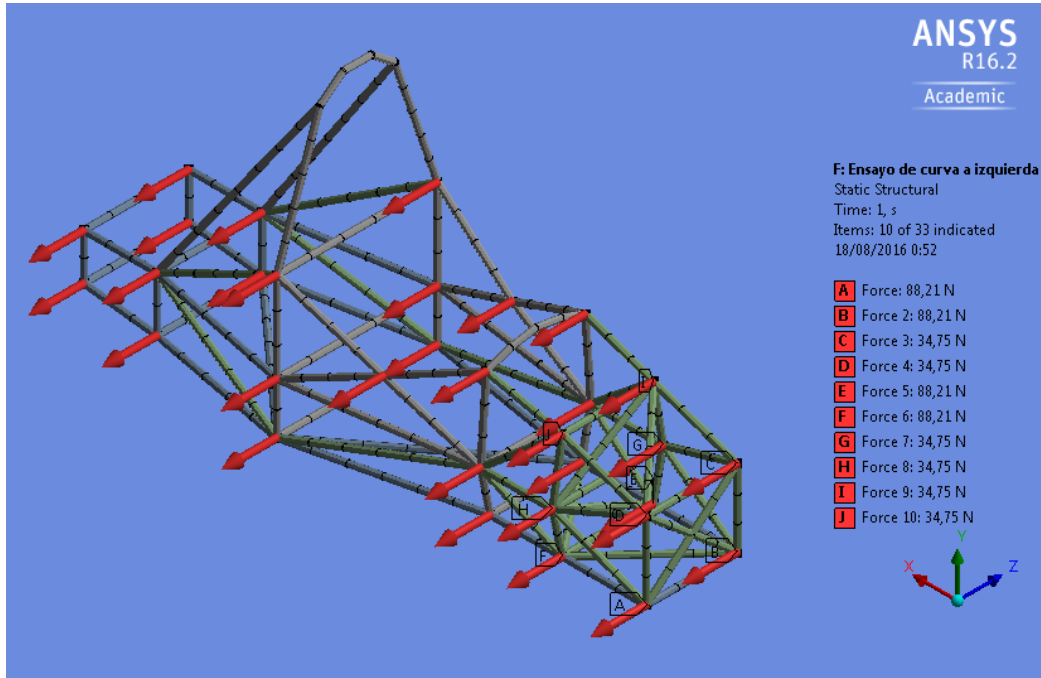


Imagen 25: Fuerzas en curva a izquierda en el chasis 1

Las fuerzas se aplicarán en la dirección del eje Z, en sentido positivo si la curva es a derechas y en sentido negativo si la curva es a izquierdas, y se restringe el movimiento en los puntos de anclaje inferiores de la suspensión, ya que en los superiores actuarán las fuerzas de fricción en dirección a la fuerza centrífuga.



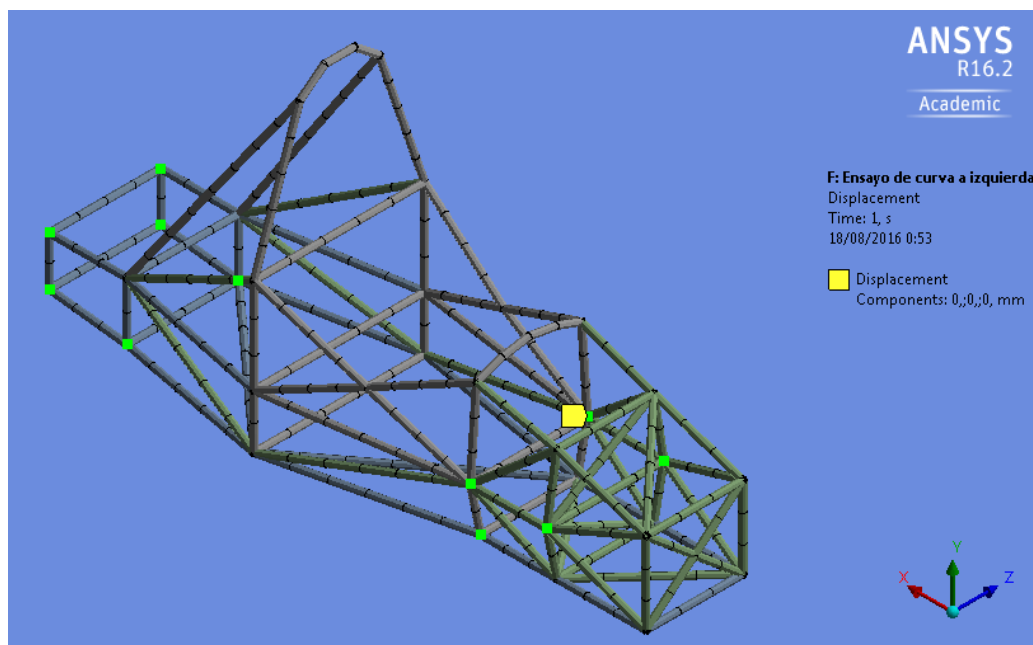


Imagen 26: Puntos de fijación en curva en el chasis 1

## 6.8 NORMATIVA

Para asegurar el correcto funcionamiento de las diferentes partes del chasis, se realizarán ensayos según los requisitos estructurales de no obligado cumplimiento expuestos anteriormente.

En estas pruebas se aplicarán fuerzas en cada componente de la estructura por separado, en el punto de aplicación y con las condiciones de contorno expresadas en la normativa.

Estas simulaciones se realizan ya que al no tener ningún antecedente y este chasis se ha diseñado desde cero, es conveniente representar las condiciones más desfavorables que podría sufrir por ejemplo en un accidente.

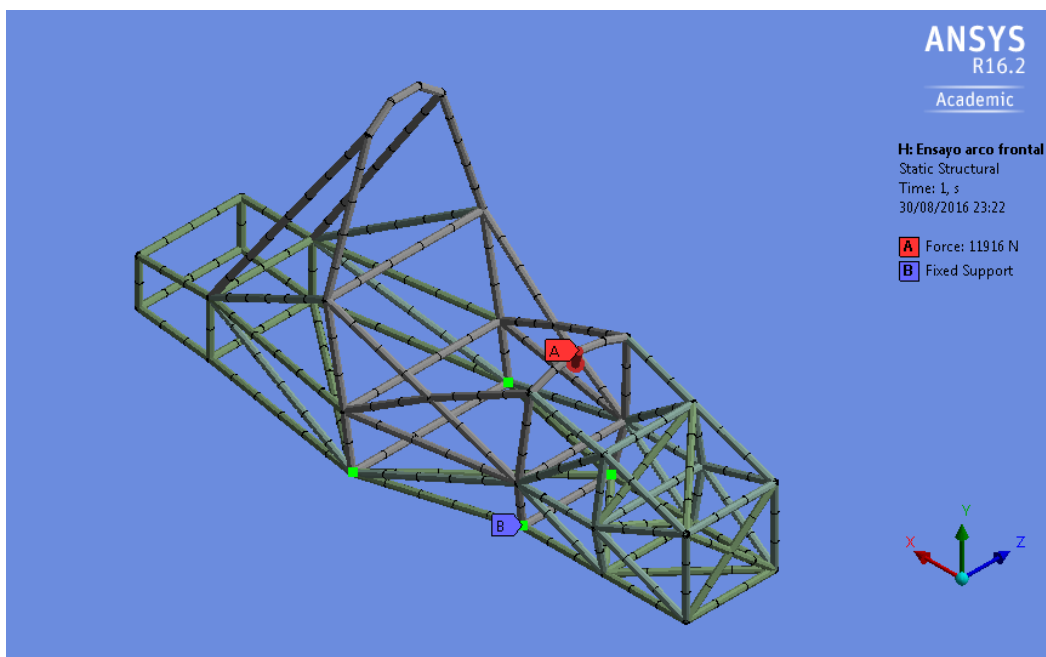


Imagen 27: Fuerzas y puntos de fijación para el ensayo del arco frontal en el Chasis 2-2

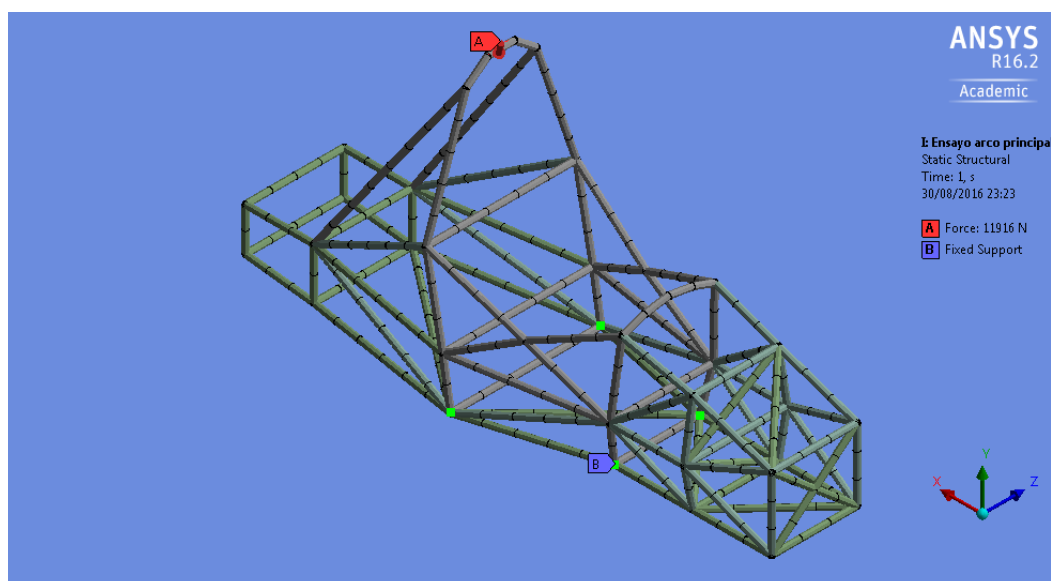


Imagen 28: Fuerzas y puntos de fijación del ensayo de arco principal en el chasis 2-2

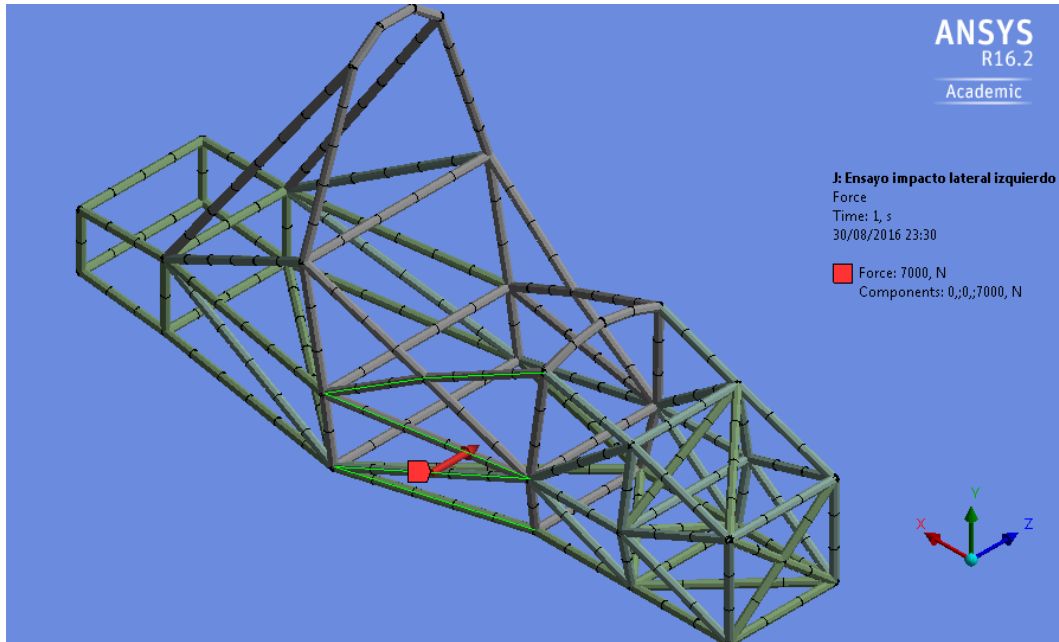


Imagen 29: Fuerzas para el ensayo de impacto lateral derecho en el chasis 2-2

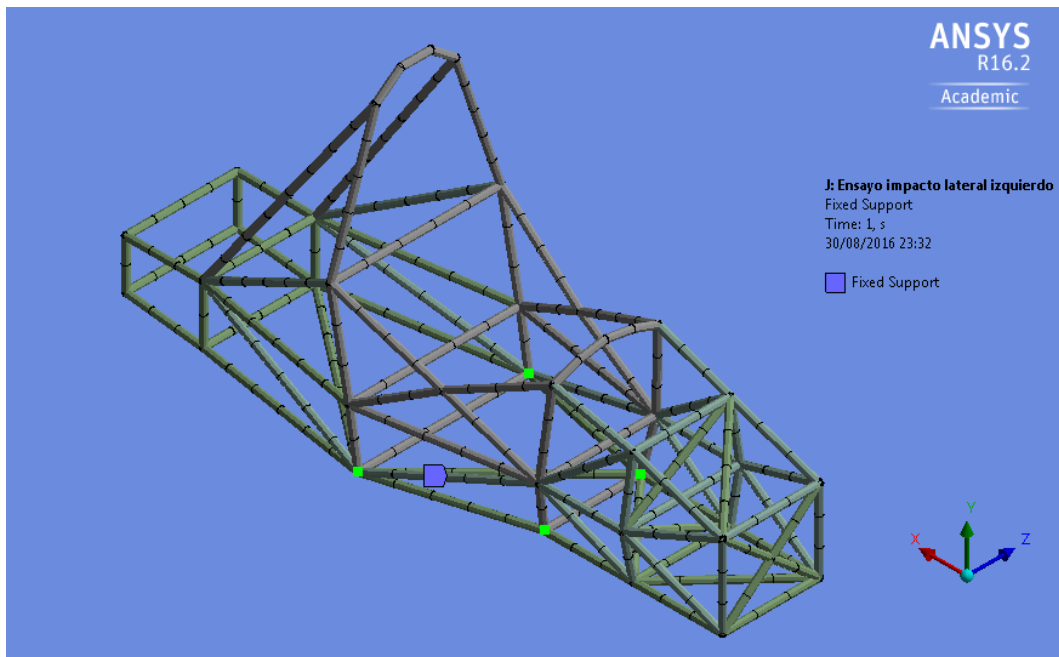


Imagen 30: Puntos de fijación del ensayo de impacto lateral derecho en el chasis 2-2

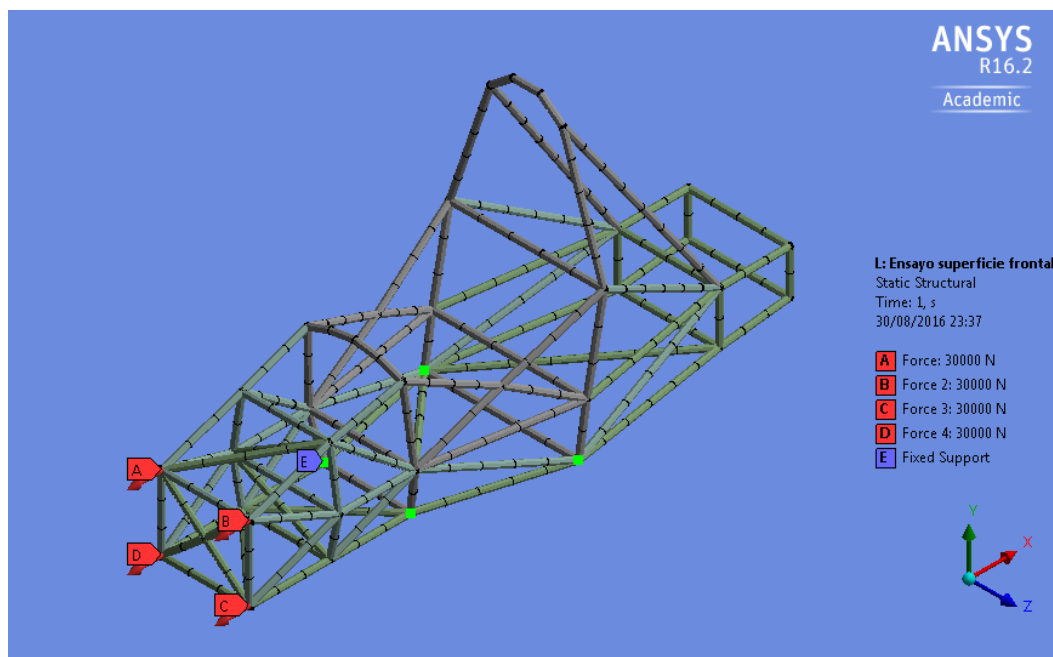


Imagen 31: Fuerzas y puntos de fijación del ensayo de superficie frontal del chasis 2-2

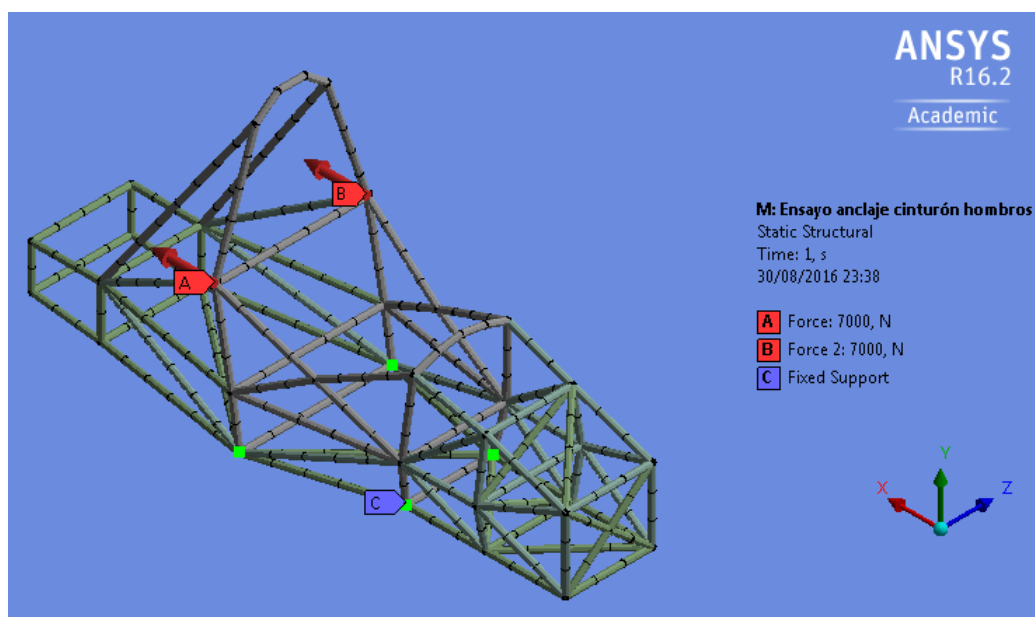


Imagen 32: Fuerzas y puntos de fijación para el ensayo de anclaje del cinturón pélvico y anti-submarino en el chasis 2-2

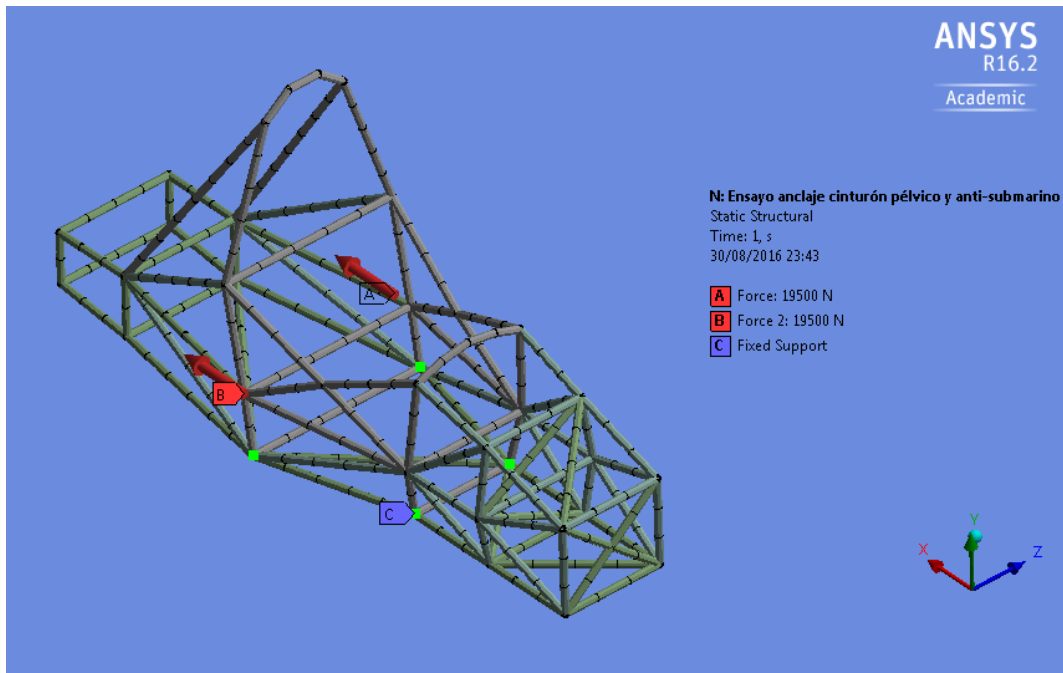


Imagen 33: Fuerzas y puntos de fijación para el ensayo de anclaje del cinturón de hombros en el chasis 1-2

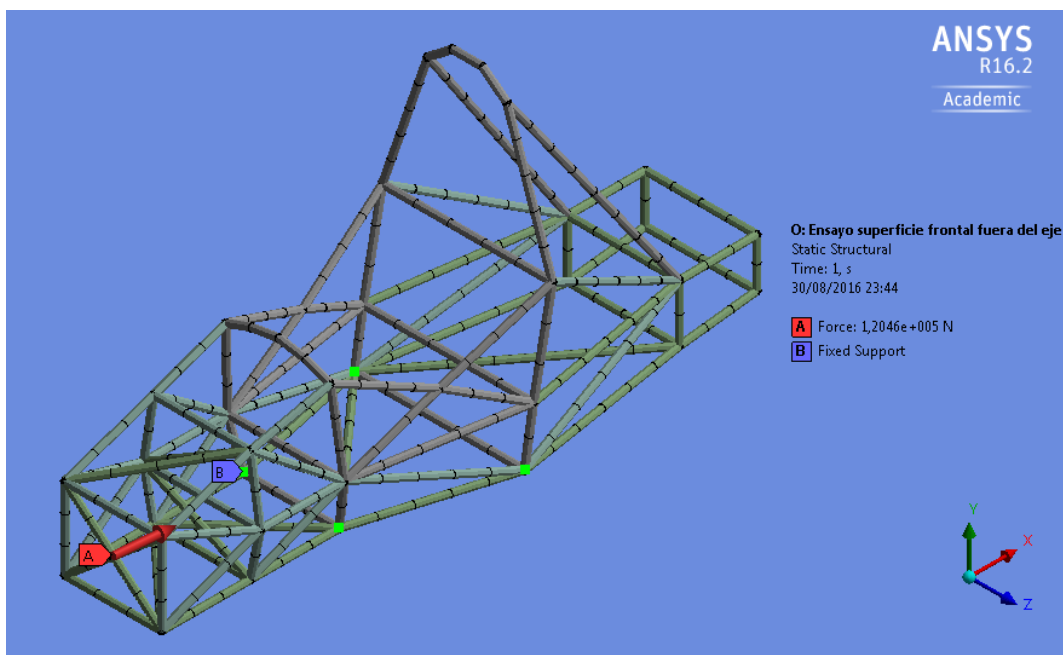


Imagen 34: Fuerzas y puntos de fijación del ensayo de superficie frontal del chasis 2-2

## 7 RESULTADOS

### 7.1 ENSAYO TORSIONAL

Una vez realizada la simulación explicada anteriormente, se han obtenido los resultados que aparecen en las siguientes imágenes.

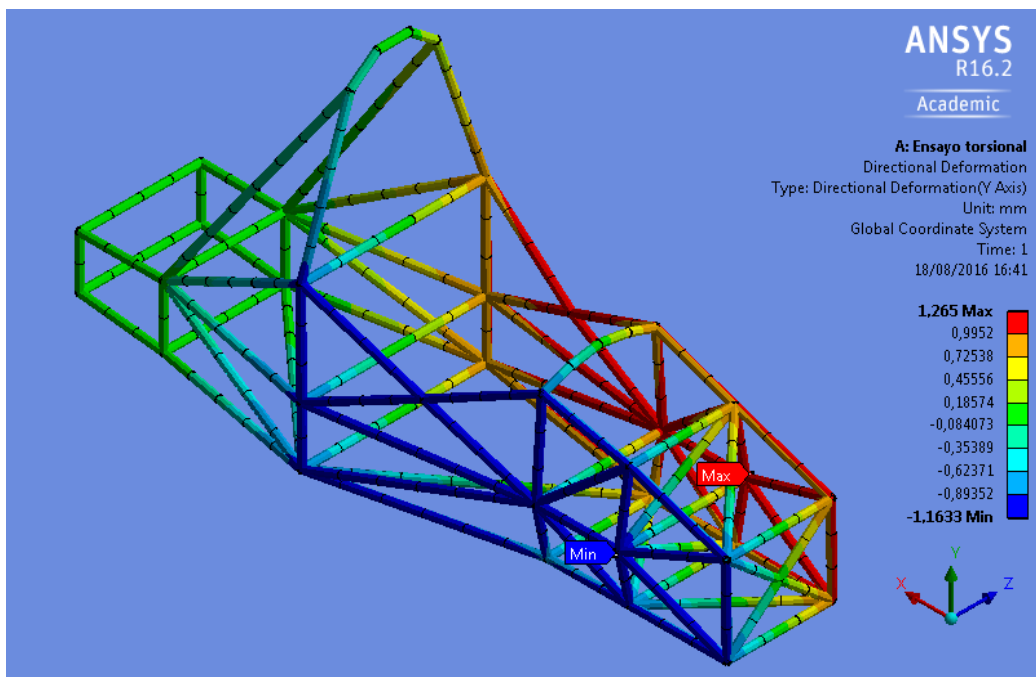


Imagen 35: Deformación en la dirección Y en torsión del chasis 1-6

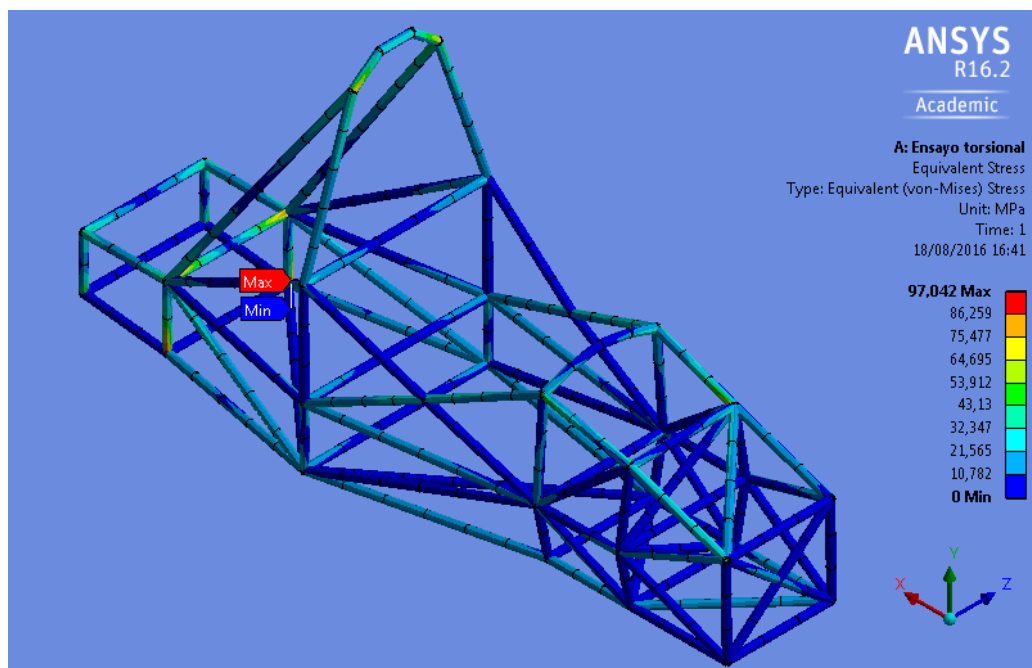


Imagen 36: Tensiones de Von Mises en torsión del chasis 1-6

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de la simulación de los diferentes modelos de chasis.

	Deformación direccional Y (mm)	Ángulo (°)	Tensión Von Mises (MPa)	Rigidez torsional (N·m/°)	Peso (kg)
<b>Chasis 1-1</b>	2,3901	0,5953	183,61	1679,5957	23,594
<b>Chasis 1-2</b>	2,2163	0,5520	175,20	1811,2988	25,181
<b>Chasis 1-3</b>	1,9933	0,4965	158,10	2013,9255	27,835
<b>Chasis 1-4</b>	1,8003	0,4484	218,53	2229,8168	30,790
<b>Chasis 1-5</b>	1,3012	0,3241	100,65	3085,0754	42,191
<b>Chasis 1-6</b>	1,2650	0,3151	97,042	3173,3579	42,866
<b>Chasis 2-1</b>	1,3095	0,3262	133,76	3065,5216	42,142
<b>Chasis 2-2</b>	1,3255	0,3301	101,89	3028,5188	41,695

Tabla 17: Resultados del ensayo torsional

Para seleccionar la mejor opción para el chasis, se busca la mejor relación rigidez torsional/peso. Por comparación con el resto de equipos de la competición, es interesante obtener un valor de rigidez superior a 3000Nm/°. Para ello se comparan mediante una gráfica las diferentes pruebas realizadas:



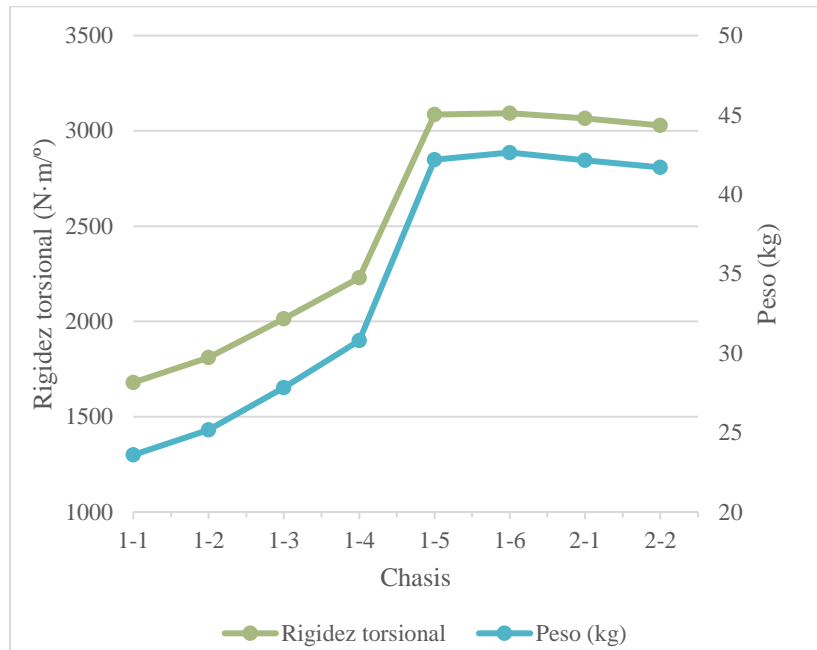


Imagen 37: Rigidez torsional – Peso

En base a los resultados que muestra la gráfica anterior, se observa que los modelos 1-1, 1-2, 1-3 y 1-4 tienen una rigidez torsional inferior a  $3000\text{N}\cdot\text{m}/^\circ$ , por tanto, quedan descartados.

El modelo que tiene la mejor relación rigidez/peso es el chasis 2-2, ya que proporciona un valor de rigidez próximo al deseado y es el que tiene el menor peso. Cabe destacar que las otras pruebas también ofrecen buenos resultados en cuanto a rigidez, pero con un peso ligeramente más elevado.

Aunque en la prueba a torsión el chasis 2-2 ha sido el que mejores resultados ha obtenido, a la hora de realizar los siguientes ensayos, se compararan todos los otros modelos por si se produjese algún fallo en el chasis y no fuese válido.

## 7.2 ENSAYO A FLEXIÓN

Para el ensayo de flexión y para todos los siguientes, se ha optado por comparar las deformaciones totales y las tensiones combinadas máximas y mínimas o tensiones de Von Mises, las cuales se usan en las teorías de fallo como indicador de la calidad del diseño.

En la siguiente imagen, se puede observar cómo varía la deformación en los diferentes puntos de la estructura.

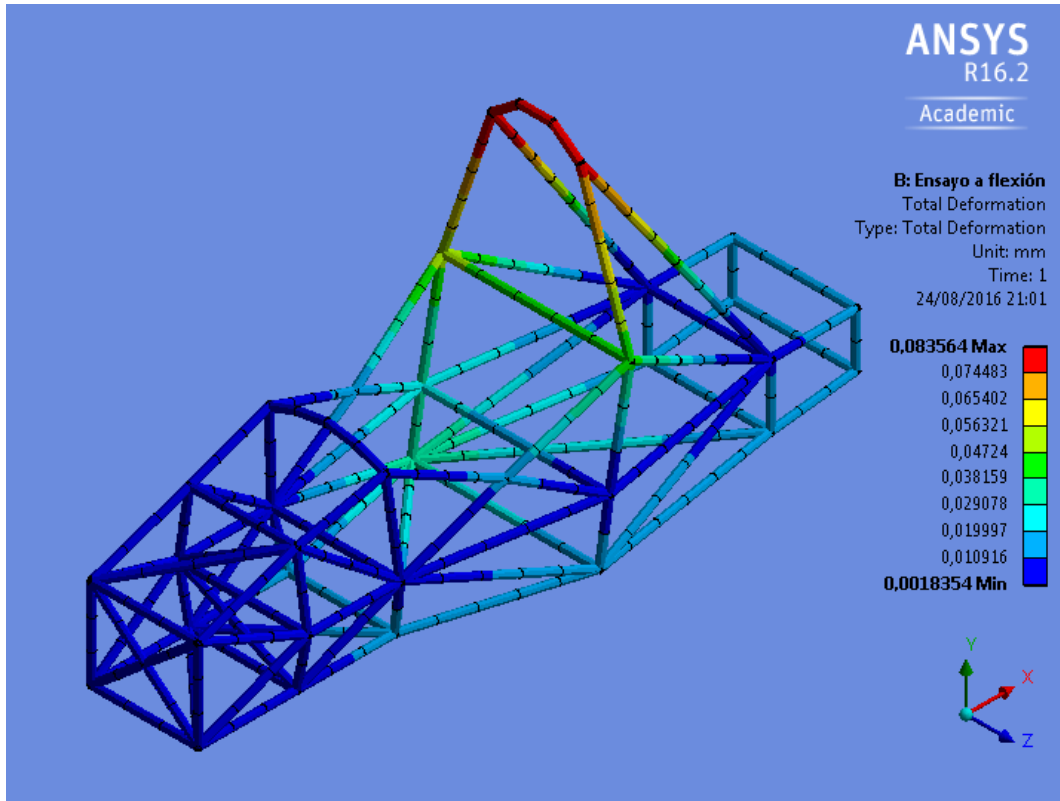


Imagen 38: Deformación total en flexión en el chasis 2-1

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 1-5</b>	0,0395	2,3851	-3,041
<b>Chasis 1-6</b>	0,0859	5,0078	-7,100
<b>Chasis 2-1</b>	0,0835	3,0174	-2,986
<b>Chasis 2-2</b>	0,0837	3,0181	-2,983

Tabla 18: Resultados del ensayo de flexión

Como se puede observar en la tabla anterior, las deformaciones por flexión son muy bajas en todos los ensayos, lo cual no representa ningún problema para la estructura.

En cuanto a las tensiones que tienen que soportar las estructuras a flexión son muy bajas, teniendo en cuenta que el material elegido para la fabricación del chasis tiene un límite elástico de 355 MPa, y los valores de entre 2 y 5 MPa son suficientemente bajos como para asegurar la integridad de las estructuras.

### 7.3 ENSAYO DE REMOLQUE

Las deformaciones que se han obtenido en esta simulación son las que se observan en la siguiente imagen:

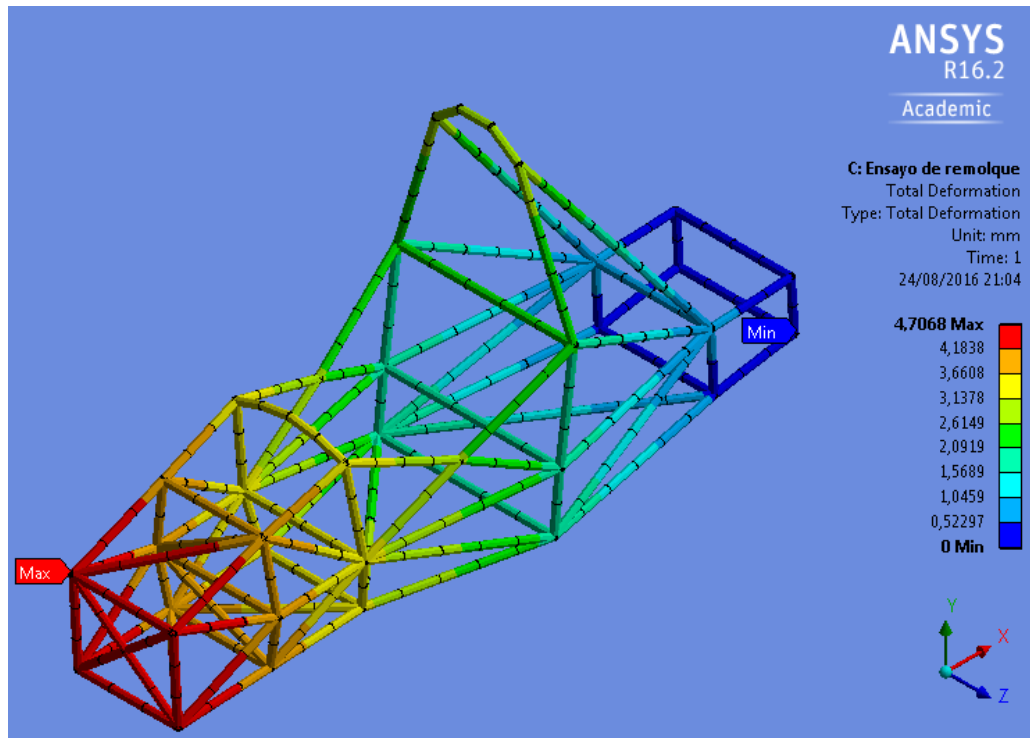


Imagen 39: Deformación total en remolque en el chasis 2-1

Las tensiones combinadas resultantes se pueden observar en la siguiente imagen:

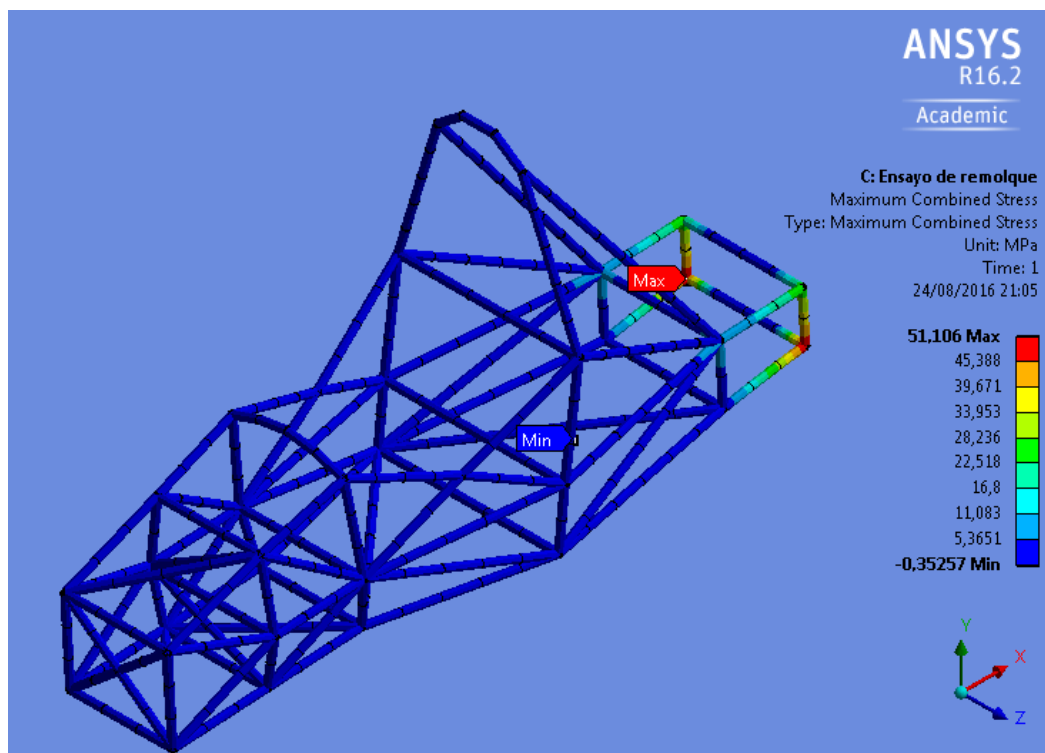


Imagen 40: Máxima tensión combinada en remolque en el chasis 2-1

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 1-5</b>	4,8478	52,70	-50,716
<b>Chasis 1-6</b>	10,816	112,14	-107,92
<b>Chasis 2-1</b>	4,7068	51,10	-49,193
<b>Chasis 2-2</b>	4,8522	52,70	-50,719

Tabla 19: Resultados del ensayo de remolque

La deformación oscila entre los 4 y 5 mm, a excepción del chasis 1-6 que tiene una deformación más elevada. Para los cuatro casis, la estructura es válida, ya que es un esfuerzo aplicado solamente si el vehículo tuviera que ser remolcado en la grúa en el caso de accidente o avería.

Las tensiones que tendrá que soportar en los cuatro modelos son inferiores al límite elástico del material, que es de 355 MPa.

## 7.4 ENSAYO DE ACELERACIÓN

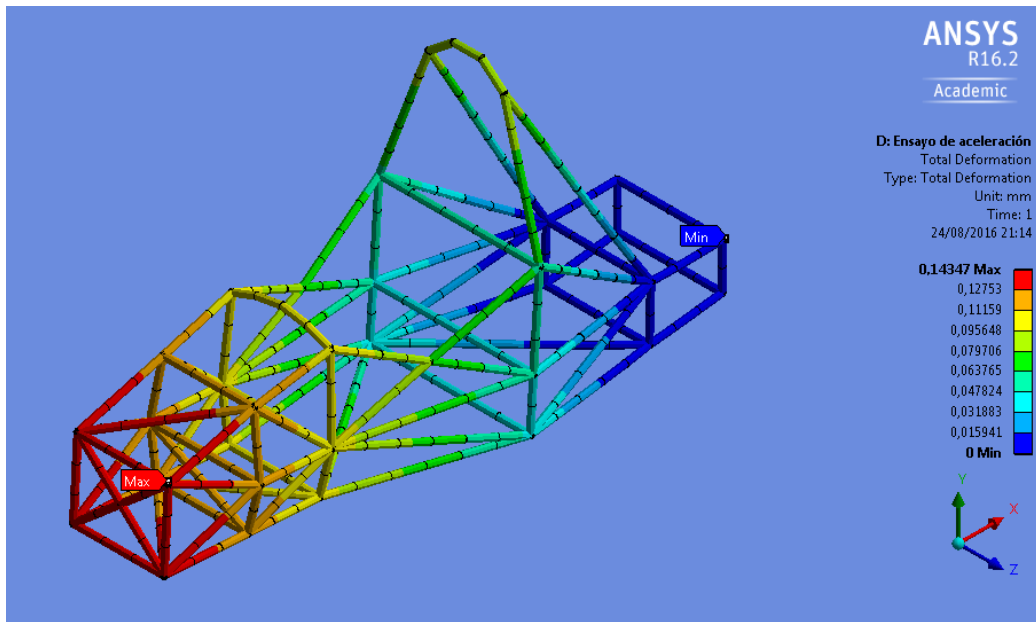


Imagen 41: Deformación total en aceleración del chasis 1-5

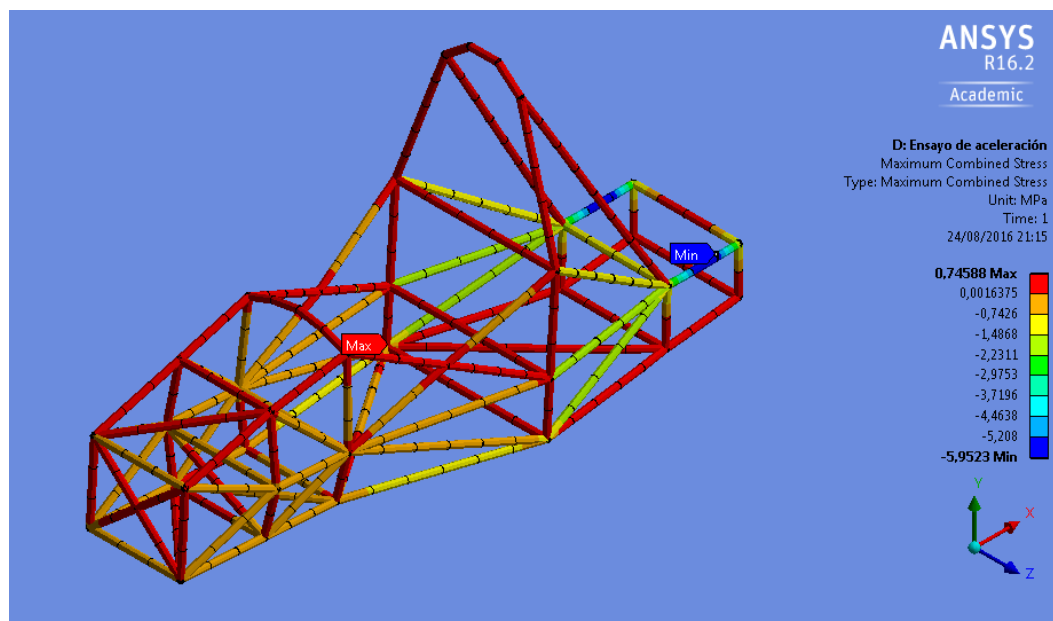


Imagen 42: Máxima tensi3n combinada en aceleraci3n del chasis 1-5

En la Imagen 41 se muestran las deformaciones que sufre la estructura y en la Imagen 42 se observa la distribuci3n de las tensiones combinadas.

	Deformaci3n total (mm)	Tensi3n combinada máxima (MPa)	Tensi3n combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 1-5</b>	0,1434	0,7458	-6,9783
<b>Chasis 1-6</b>	0,3038	1,7205	-14,7630
<b>Chasis 2-1</b>	0,1477	0,7398	-6,7791
<b>Chasis 2-2</b>	0,1511	0,7371	-7,0141

Tabla 20: Resultados del ensayo de aceleraci3n

Como se ha indicado anteriormente, la aceleraci3n proporcionada por el fabricante del motor es de  $6,94 \text{ m/s}^2$ . Para esta aceleraci3n, la estructura del vehículo sufre unas deformaciones totales menores al milímetro, produciéndose la máxima deformaci3n en la parte delantera del chasis. La tensi3n que sufre el chasis tiene unos valores muy pequeños, por lo que no se producirán deformaciones permanentes.

## 7.5 ENSAYO DE FRENADA

En las posteriores imágenes se observa la deformaci3n total de la estructura tubular para la simulaci3n en frenada y la máxima tensi3n combinada.

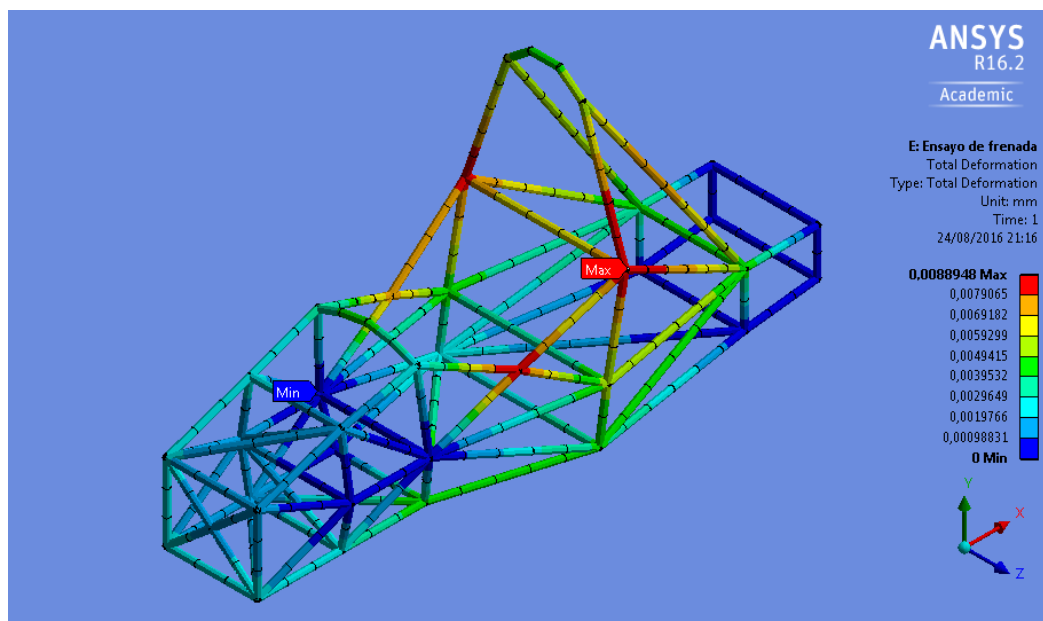


Imagen 43: Deformación total en frenada del chasis 2-1

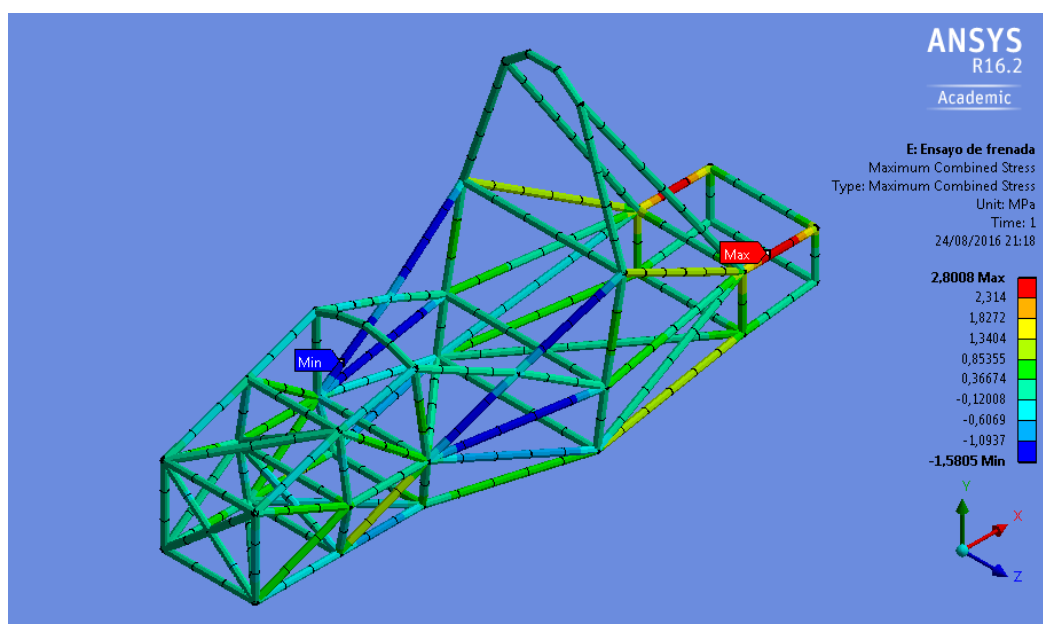


Imagen 44: Máxima tensión combinada en frenada del chasis 2-1

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 1-5</b>	0,0113	2,9968	-2,142
<b>Chasis 1-6</b>	0,0295	6,3160	-5,076
<b>Chasis 2-1</b>	0,0088	2,8008	-2,041
<b>Chasis 2-2</b>	0,0089	2,8621	-2,052

Tabla 21: Resultados del ensayo de frenada

En este ensayo, las deformaciones producidas son prácticamente inapreciables en comparación con la longitud total del chasis. Las tensiones que se producen tampoco suponen ningún riesgo para la integridad de la estructura ya que en ningún caso superan los 7 MPa.

## 7.6 ENSAYO DE CURVA A IZQUIERDAS

En la siguiente imagen se pueden observar las deformaciones totales que se producen en la simulación de curva a izquierdas.

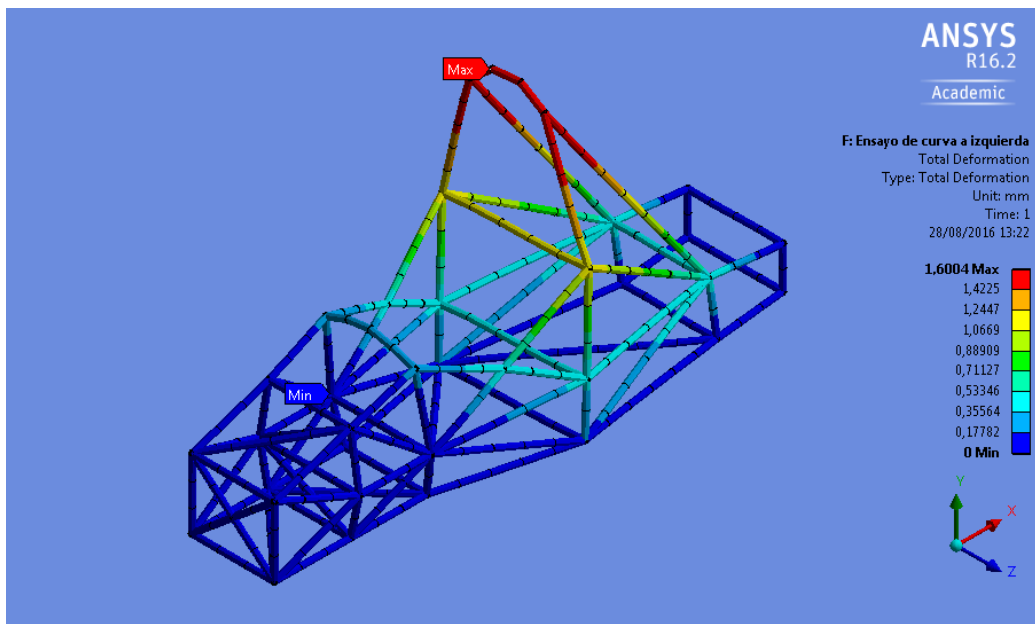


Imagen 45: Deformación total en curva a izquierda del chasis 2-1

A continuación, se muestran las tensiones combinadas máximas de la estructura:



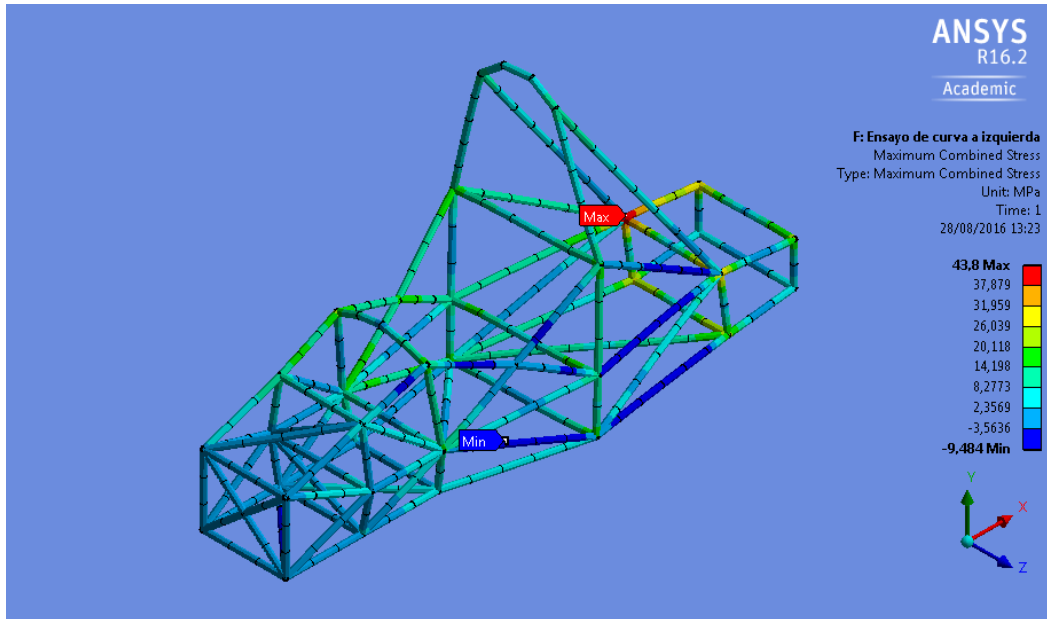


Imagen 46: Tensión máxima combinada en curva a izquierda del chasis 2-1

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 1-5</b>	1,8371	47,31	-48,223
<b>Chasis 1-6</b>	4,1568	102,02	-103,960
<b>Chasis 2-1</b>	1,6004	43,80	-44,889
<b>Chasis 2-2</b>	1,6183	44,79	-45,912

Tabla 22: Resultados del ensayo de curva a izquierdas

Para el ensayo en curva a izquierda se puede observar que las deformaciones producidas son más elevadas que para los ensayos anteriores, concentrándose mayormente en la zona del arco principal. Cabe destacar la deformación en el chasis 1-6 de 4,1568 mm, lo que supone un 15,3956 % del diámetro exterior del tubo del arco principal. Al ser un valor elevado, este chasis se considerará como no favorable.

Hay que realizar especial hincapié en las tensiones que se producen al tomar las curvas ya que las condiciones que se representan son de altas velocidades junto con fuerzas centrífugas que afectan al chasis. El acero S355 puede soportar perfectamente las tensiones producidas en estas condiciones ya que no se superan los 50 MPa a excepción del chasis 1-6 como se ha comentado anteriormente.

## 7.7 ENSAYO DE CURVA A DERECHAS

Ya que el chasis no es simétrico, es necesario realizar los ensayos de curva a ambas direcciones. Las deformaciones totales y tensiones combinadas máximas son las siguientes respectivamente:

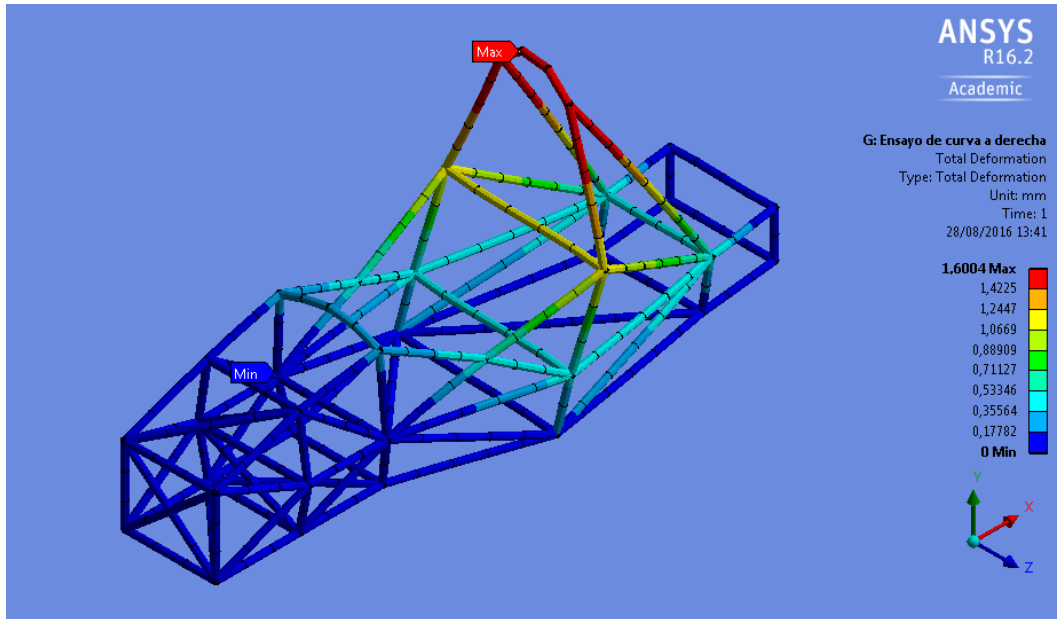


Imagen 47: Deformación total en curva a derecha del chasis 2-1

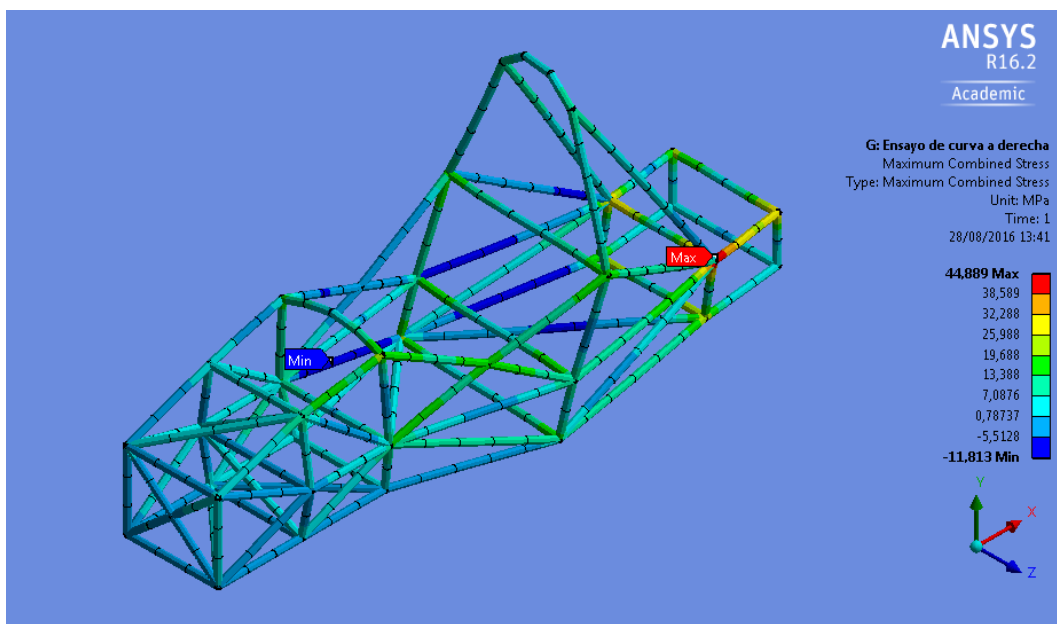


Imagen 48: Tensión máxima combinada en curva a izquierda del chasis 2-1

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 1-5</b>	1,8371	48,223	-47,31
<b>Chasis 1-6</b>	4,1568	103,960	-102,02
<b>Chasis 2-1</b>	1,6004	44,889	-43,80
<b>Chasis 2-2</b>	1,6183	45,912	-44,79

Tabla 23: Resultados del ensayo de curva a derechas

Aunque el chasis no sea simétrico, se puede ver que las deformaciones tanto en curva a izquierda como a derecha son las mismas y las tensiones máximas y mínimas están intercambiadas.

## 7.8 CONCLUSIÓN

El chasis 2-2 es la estructura que mejor resultados proporciona ya que es el chasis que tiene el peso más bajo con 41,695 kg y en el ensayo torsional obtiene una rigidez torsional de 3028,5188 N·m/°. En los otros ensayos, normalmente los chasis 1-5 y 2-1 obtienen deformaciones ligeramente más bajas como por ejemplo en el ensayo de remolque donde el modelo 1-5 se obtiene una deformación total de 4,8478 mm, en el 2-1 una deformación de 4,7068 mm y en el 2-2 una deformación 4,8522 mm. El chasis seleccionado sufre un poco más que los otros, debido también a su menor peso, pero no es relevante esta diferencia.

## 7.9 NORMATIVA

### 7.9.1 Arco frontal

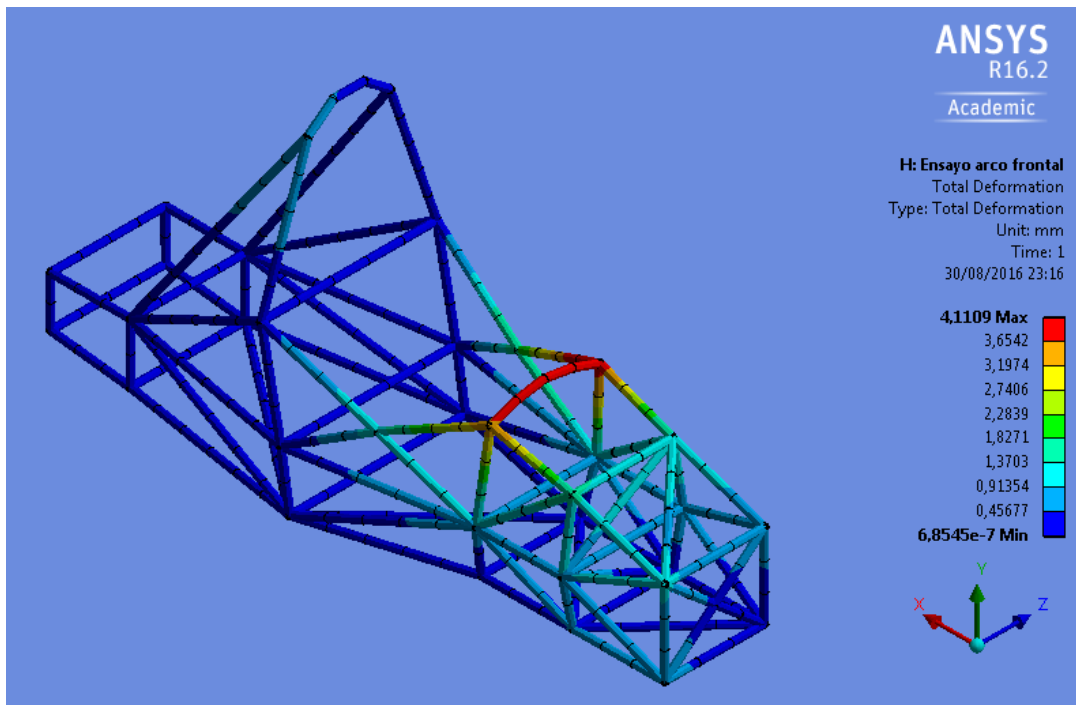


Imagen 49: Deformación total en ensayo de arco frontal del chasis 2-2

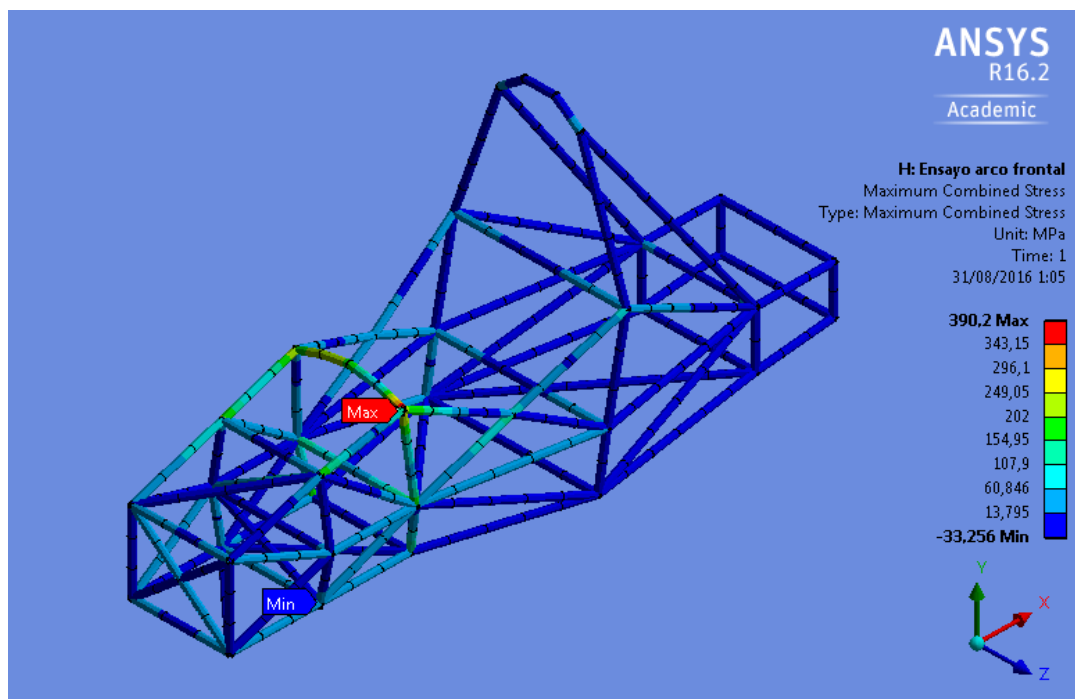


Imagen 50: Tensión máxima en ensayo de arco frontal del chasis 2-2

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 2-2</b>	4,1189	390,20	-132,01

Tabla 24: Resultados del ensayo de arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo

La deformación resultante cumple con la normativa ya que esta establece una deformación máxima de 25 mm.

El material que se va a utilizar tiene una resistencia a la rotura de 510 MPa. Como la reglamentación exige que no haya ningún fallo a la hora de realizar el ensayo, se debe comprobar que las tensiones máximas y mínimas estén por debajo de este valor. En esta simulación se cumple también con la segunda restricción impuesta.

### 7.9.2 Arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo

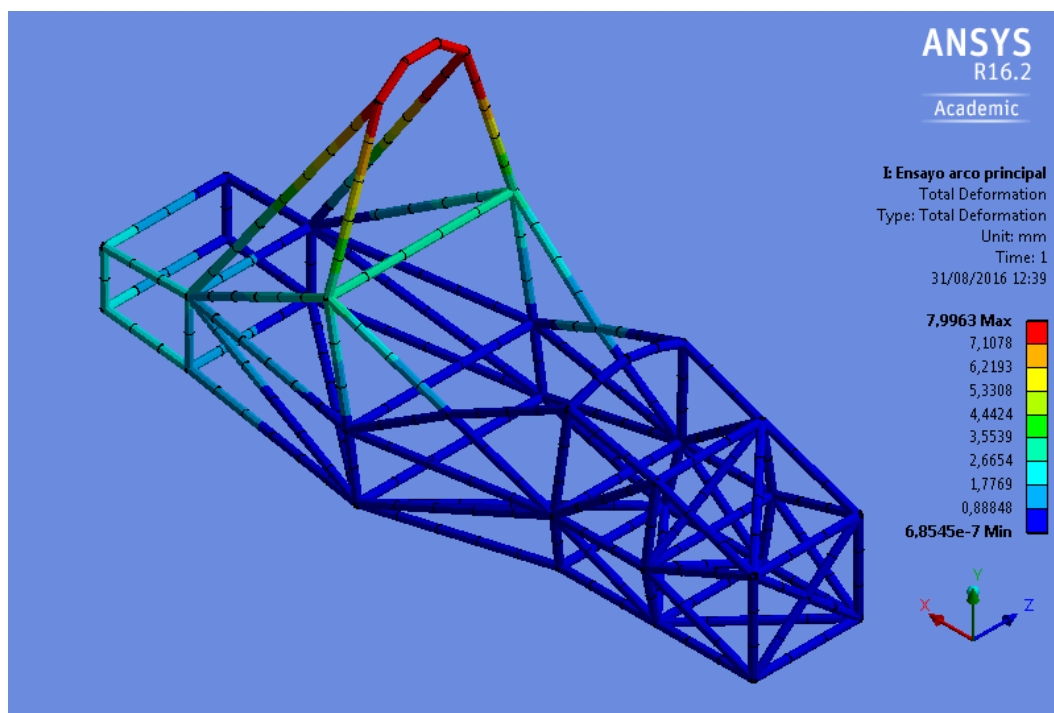


Imagen 51: Deformación total en ensayo de arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo del chasis 2-2

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 2-2</b>	7,9963	380,60	-424,86

Tabla 25: Resultados del ensayo de arco principal, brazos de refuerzo y soportes de los brazos de refuerzo

La deformación que sufre es inferior a 25 mm, por lo que cumple con la normativa.

El arco principal sufre, para este ensayo, una tensión mínima de -424,86 MPa, la cual es muy alta ya que a los 470 MPa se produce el fallo para este material. La normativa no establece ningún factor de seguridad ya que contempla el peor caso posible.

### 7.9.3 Impacto lateral

El ensayo de impacto lateral se ha realizado a ambos lados y se han obtenido los mismos resultados. Por ello, se representan solamente las imágenes del ensayo a izquierdas.

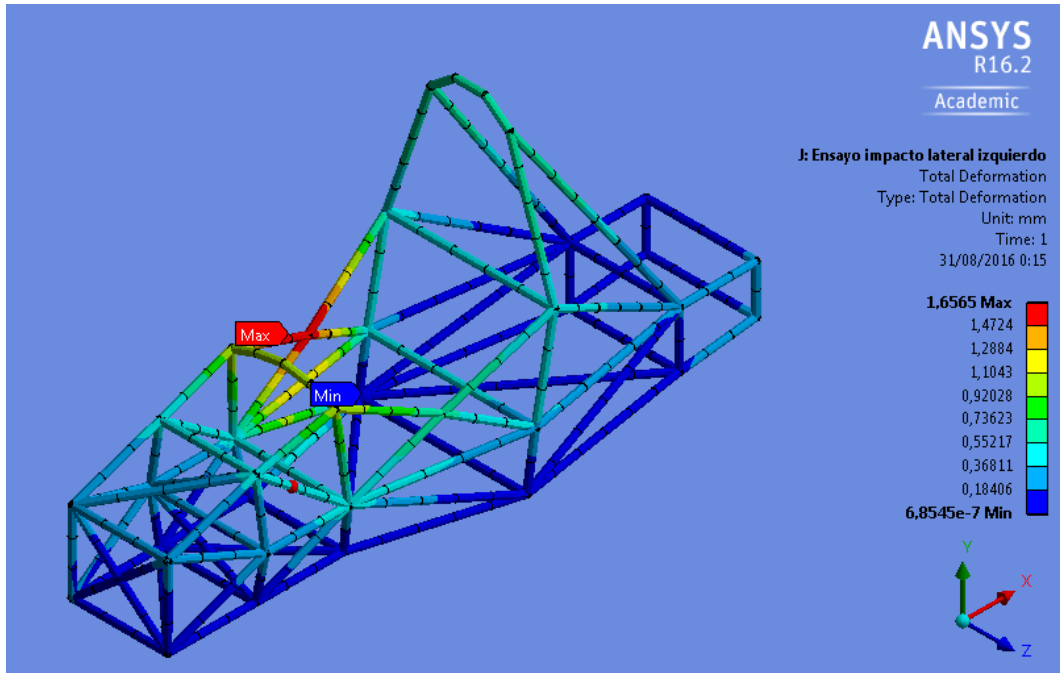


Imagen 52: Deformación total en ensayo de impacto lateral a izquierdas del chasis 2-2

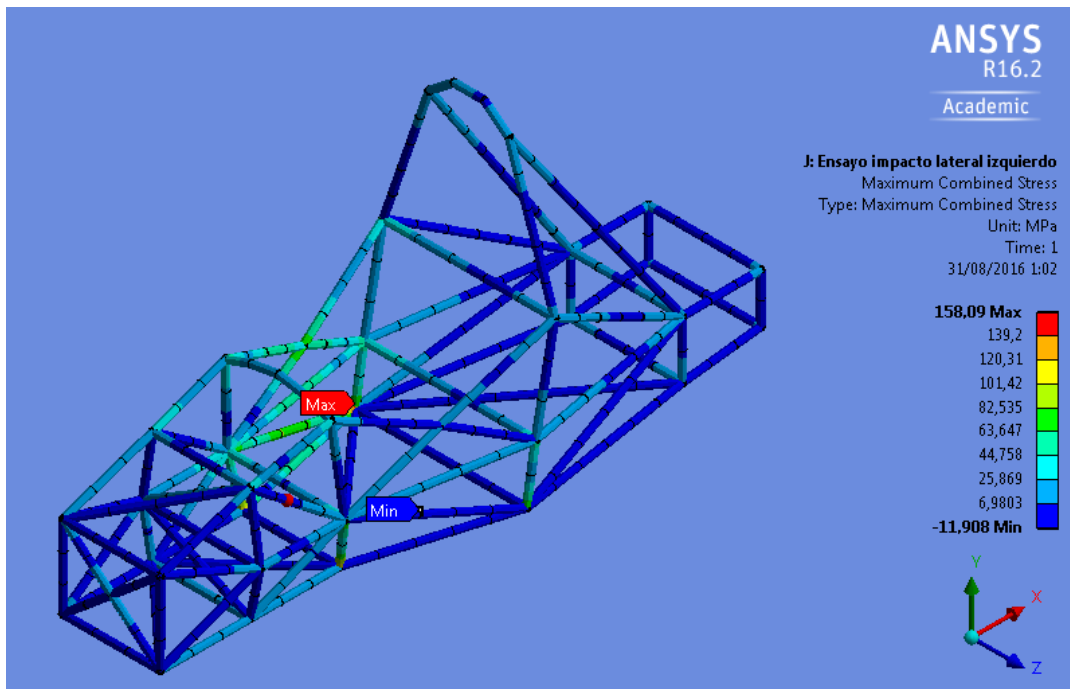


Imagen 53: Tensión máxima en ensayo de impacto lateral a izquierdas del chasis 2-2

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 2-2</b>	13,235	158,09	-132,01

Tabla 26: Resultados de ensayo de impacto lateral a izquierdas

En esta simulación, la deformación que se produce es elevada, pero cumple perfectamente con la normativa. Las tensiones resultantes también entran dentro de los límites establecidos por la normativa.

#### 7.9.4 Superficie frontal y soportes de la superficie frontal

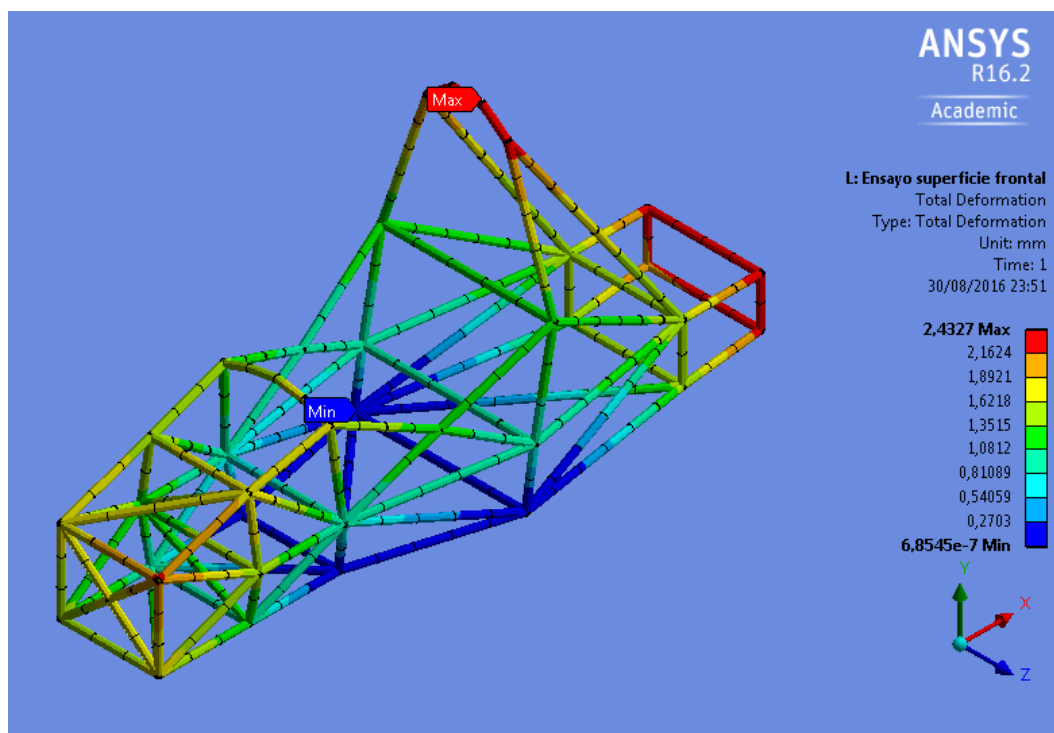


Imagen 54: Deformación total en ensayo de superficie frontal y soportes de la superficie frontal del chasis 2-2

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 2-2</b>	2,4327	390,20	-132,01

Tabla 27: Resultados de ensayo de superficie frontal y soportes de la superficie frontal

Al aplicar fuerzas en la superficie frontal, la deformación máxima se produce en el arco principal, tal y como se observa en la Imagen 54. Este valor es perfectamente válido para la normativa.

Las tensiones producidas tienen un valor pico de 390,2 MPa, el cual no sufre ningún riesgo de rotura con el acero S355.



### 7.9.5 Anclaje del cinturón de seguridad de los hombros

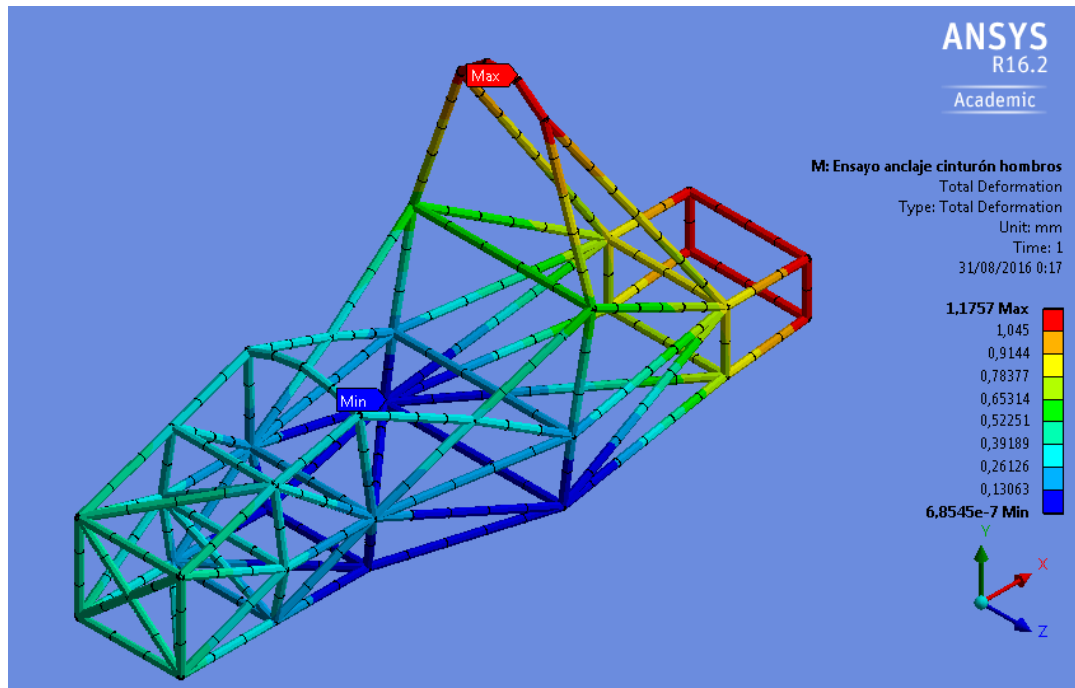


Imagen 55: Deformación total en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad de los hombros del chasis 2-2

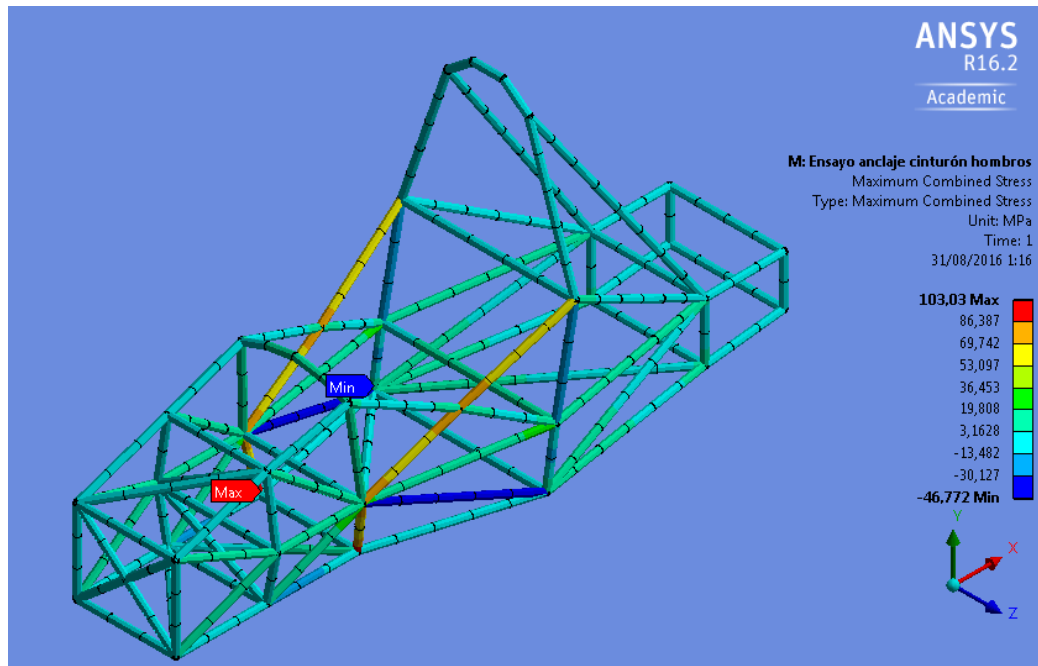


Tabla 28: Tensión máxima en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad de los hombros del chasis 2-2

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 2-2</b>	1,1757	103,03	-78,243

Tabla 29: Resultados de anclaje del cinturón de seguridad de los hombros

Para el ensayo de anclaje del cinturón de seguridad para los hombros, la deformación que se produce es muy pequeña, teniendo en cuenta que estos ensayos son para condiciones extremas. La tensión que se produce tampoco preocupa a la integridad de la estructura ya que esta rompe a los 470 MPa.

### 7.9.6 Anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino

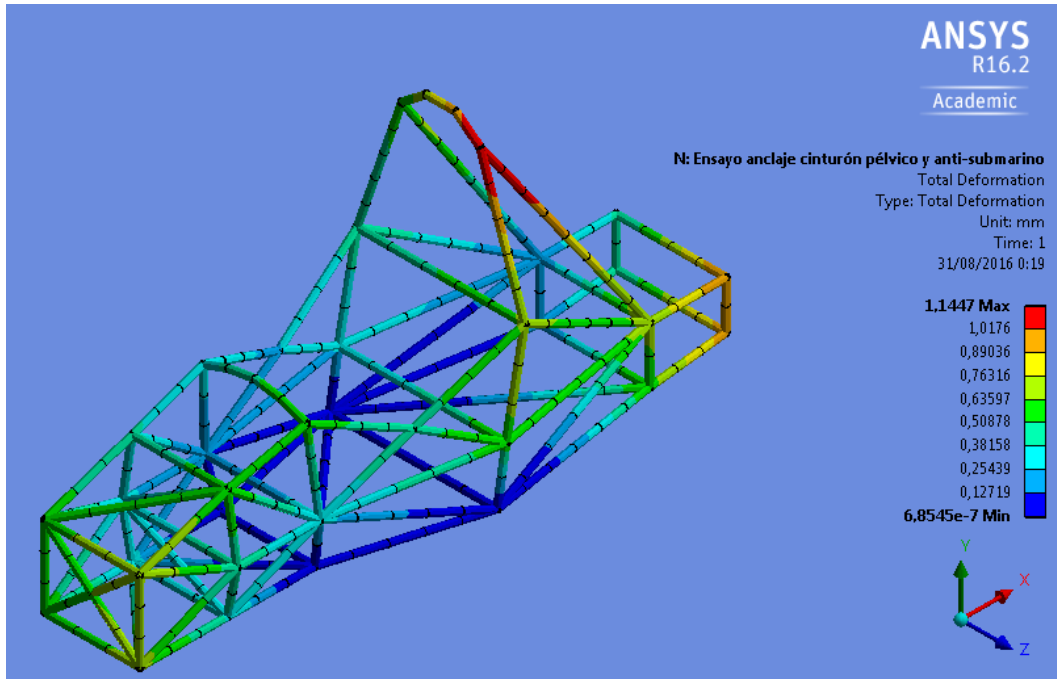


Imagen 56: Deformación total en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino del chasis 2-2

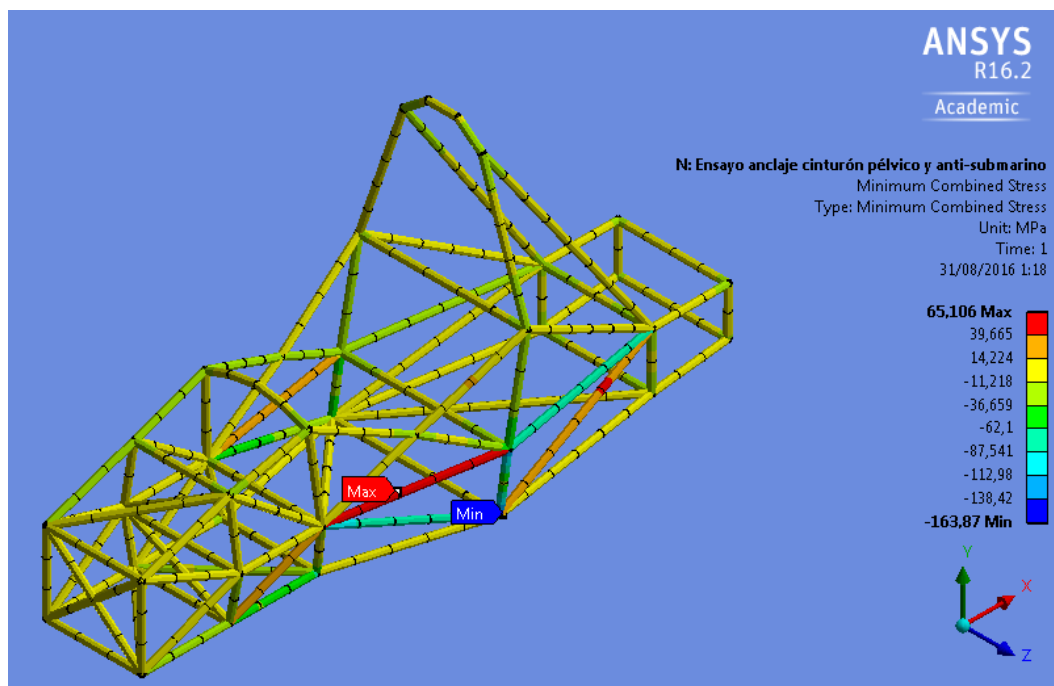


Tabla 30: Tensión mínima en ensayo de anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino del chasis 2-2

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 2-2</b>	1,1447	137,26	-163,87

Tabla 31: Resultados de anclaje del cinturón de seguridad pélvico y anti-submarino

La deformación que se produce para este ensayo, es muy similar a la producida en el ensayo de anclaje del cinturón de seguridad de los hombros, por tanto, al igual que el anterior, este ensayo también es válido. Las tensiones que sufre la estructura son un poco más elevadas que en el ensayo anteriormente nombrado, pero igualmente cumple con la normativa.

### 7.9.7 Superficie frontal y soportes de la superficie frontal fuera del eje

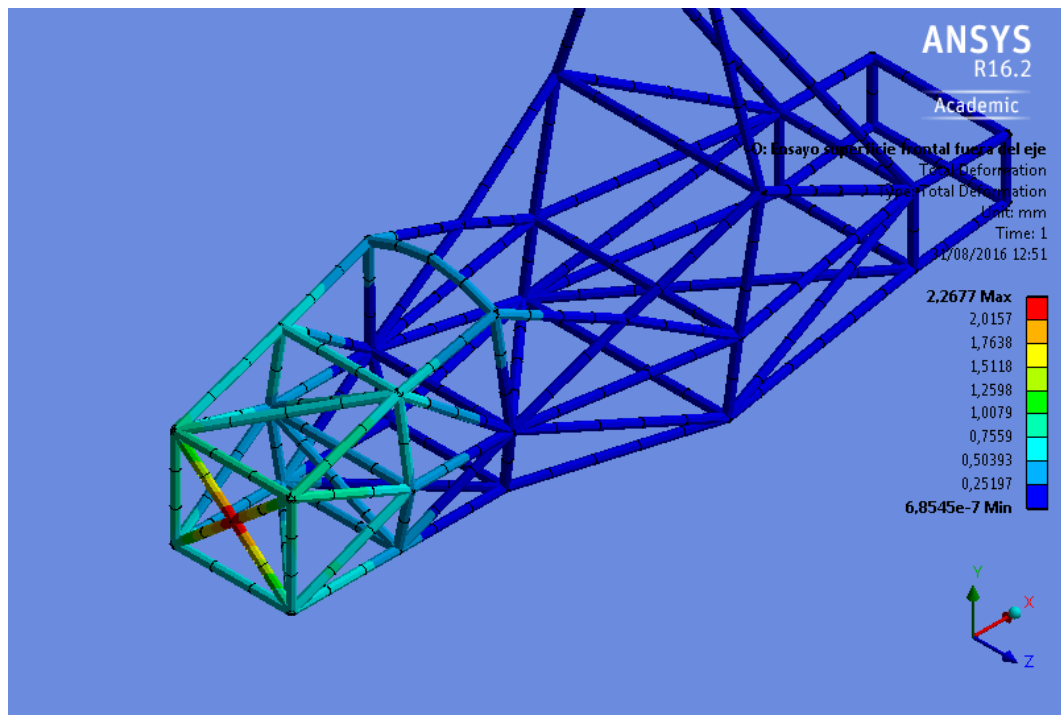


Imagen 57: Deformación total en ensayo de superficie frontal y soportes de la superficie frontal fuera del eje del chasis 2-2

	Deformación total (mm)	Tensión combinada máxima (MPa)	Tensión combinada mínima (MPa)
<b>Chasis 2-2</b>	2,2677	457,14	-458,81

Tabla 32: Resultados de superficie frontal y soportes fuera del eje

Este ensayo proporciona unos resultados críticos de tensiones. El límite de rotura se sitúa en 470 MPa, y la mínima tensión producida se sitúa en los -458,81 MPa. Esto significa que el factor de seguridad que posee es tan solo de 1,028, pero como ya se ha comentado anteriormente, esta simulación de normativa representa el peor caso posible para la estructura, por lo que el factor de seguridad no importa.

## 8 PROCESO DE FABRICACIÓN

---

El proceso se podría dividir en tres grandes bloques que más adelante se irán desarrollando. Primeramente, se ha de realizar el cortado de tubos, luego se realizaría el curvado de los tubos y por último su unión mediante soldadura.

Todos los costes y gastos dedicados para el proceso de fabricación van a formar una partida muy importante de dinero en el coste final del vehículo, debido a ello habrá que estudiarlos y planificarlos exhaustivamente para tratar de reducir al mínimo estos.

Todo proceso de fabricación debe de estar planificado de tal forma que el material que entre en el taller se encuentre predestinado en la fabricación mediante un avance y desarrollo de forma unidireccional.

### 8.1 MARCADO DE TUBOS

Es muy importante seguir exhaustivamente las medidas establecidas en los planos. También hay que tener en cuenta el grosor de la sierra que se utilizará para el serrado, para que una vez se haya realizado el corte del tubo, éste tenga las mismas dimensiones de los planos.

### 8.2 CORTE Y SEPARADO DE LOS TUBOS

El aserrado es una operación de desbaste que se realiza con la hoja de sierra por arranque de viruta y cuyo objetivo es cortar el material, parcial o totalmente. Esta operación, llevada racionalmente, resulta productiva, ya que el trabajo se efectúa con notable rapidez, evitando a veces el trabajo laborioso de otras herramientas y además con poca pérdida de material.

En la práctica industrial se emplean sierras alternativas, circulares, y de cinta para el corte de barras y piezas en desbaste, pero como no se hará una fabricación a masiva del chasis, se empleará el aserrado a mano por razones económicas.

Las uniones del chasis se realizan con el acople de los tubos unos con otros. El más utilizado es el de boca de pescado (Imagen 58) ya que evita el aporte innecesario de material en el proceso de soldadura, además de aportar un cordón más homogéneo con un acople más uniforme.



Imagen 58: Corte tipo boca pescado [10]

### 8.3 DOBLADO DE TUBOS

En este proceso pueden aparecer pliegues en la parte interna del material y reducirse el espesor de la parte externa. Hay diferentes formas de realizar esta operación como el curvado por rodillos giratorios o por cortes a inglete, pero para doblar el arco principal y frontal se usará el curvado en frío por presión ya que solo son dos tubos y es más rápido que los otros dos.

Este proceso consiste en colocar el tubo entre dos rodillos fijos (en los extremos), mientras que se ejerce presión con un rodillo central curvando el tubo. Es importante tener en cuenta el diámetro del rodillo que ejerce la presión en función del radio de curva que se desea, así como la separación de los rodillos.



*Imagen 59: Curvado por presión*

### 8.4 SOLDADURA

De entre todos los tipos de soldadura existentes, se ha optado por el método TIG. Este utiliza un arco de tungsteno no consumible protegido por un gas de argón. Se genera calor al establecerse el arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno y la pieza a soldar. De esta manera es necesario añadir material de aporte, el cual viene en forma de varilla o alambre a la zona de soldadura. Este proceso tiene una buena penetración y no necesita limpieza posterior ya que no hay salpicadura como ocurre en otros métodos.

## 9 PRESUPUESTO

A continuación, se detallan los costes asociados con la realización del proyecto. Para llevarlo a cabo, se divide el presupuesto en diversos apartados referentes al coste del material, trabajo de taller previo a la construcción de la estructura tubular y el coste personal que supone el trabajo tanto de ingenieros como de mecánicos.

El precio del trabajo de los ingenieros se ha establecido en 35 €/h. ya que se consideran como 34 horas trabajadas, lo que suma 1190 €.

Para calcular el coste del material, primero se ha de realizar un desglose de las medidas de las barras que conforman la estructura.

Para los tubos de diámetro 26,8 mm y 3,2 mm de espesor:

Cantidad	Longitud (mm)
2	370
2	312,66
2	380
2	320
2	400,73
2	375,15
2	252,19
2	195,14
1	460
2	415,33
2	330
2	383,38
2	649,70
2	768,51
2	721,40
<b>TOTAL</b>	<b>12208,4248</b>

Tabla 33: Longitudes de tubos 26,8 x 3,2 mm



En cuanto a los tubos de diámetro 27 mm y 4 mm de sección, las longitudes son:

<b>Cantidad</b>	<b>Longitud (mm)</b>
2	1074,65
2	552,87
2	381,44
2	215,16
3	670
2	436,87
2	407,02
2	377,26
2	353,87
2	648,55
2	337,65
2	196,16
1	380
1	460
1	425,54
1	177,78
<b>TOTAL</b>	<b>13416,43</b>

Tabla 34: Longitudes de tubos 27 x 4 mm

Y, por último, las barras de 2,7 mm de sección y 26,5 mm de diámetro:

<b>Cantidad</b>	<b>Longitud (mm)</b>
2	370
2	312,66
2	380
2	320
2	400,73
2	375,15
2	252,19
2	195,14
1	460
2	415,33
2	330
2	383,38
2	649,70
2	768,51
2	721,40
<b>TOTAL</b>	<b>15539,76</b>

Tabla 35: Longitudes de tubos 26,5 x 2,7 mm

El precio desglosado de la estructura tubular es el siguiente:

Dimensiones (mm)	Longitud total (m)	Precio unitario (€/m)	Precio (€)
26,5 x 2,7	15,5398	3,72	57,81 €
27 x 4	13,4164	4,36	58,50 €
26,8 x 3,2	12,2084	4,98	60,80 €
<b>TOTAL</b>			<b>177,10 €</b>

Tabla 36: Precio de la estructura

Como se ha comentado anteriormente, se ha elegido la soldadura de tipo electrodo. Para esta, primero se ha de calcular el peso del cordón de soldadura del metal de aportación por metro según la expresión:

$$M = C \cdot e^2$$

donde e es el espesor de las piezas que se quieren soldar y C es el coeficiente que depende del tipo de cordón.

Ya que no existe un solo espeso de barra en el chasis, se deberá calcular la cantidad de material depositado para cada espesor.





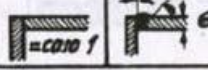
Preparación	$\alpha =$ ángulo de achaflanado					Cordón		
	50°	60°	70°	80°	90°	Cóncavo	Plano	Convexo
1 							10	
2 	4,3	5,4	6,6	7,8	9,4			
3 	2	2,6	3,2	3,8	4,5			
4 						2,5	4	5
5 	2,9	2,9	3,5	4,2	5			

Tabla 37: Valores del coeficiente C [11]

Se elegirá la preparación numero 5 ya que todas las barras están diseñadas para que estén soldados entre sí a tope, y un ángulo de achaflanado de 60°. Lo mejor sería conseguir un ángulo de achaflanado de 50° para hacer más económico el proceso y reducir así la cantidad de material que se traduce en una reducción de peso, pero se elige el ángulo de 60° porque no en todos los casos de las soldaduras se puede realizar de la forma más favorable. Por tanto, se toma como valor del coeficiente C 2,9.

Por tanto, se obtienen los siguientes pesos:

Espesor (mm)	Masa (g)
4	46,40
3,2	29,69
2,7	21,14

Tabla 38: Pesos de cada soldadura por metro lineal

Ahora, se ha de obtener el peso del metal aportado por metro de cordón de soldadura, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$m = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot 1000} \cdot l \cdot d \cdot \rho$$

donde D es el diámetro de la varilla en cm, d es la densidad del electrodo en g/cm<sup>3</sup>, l es la longitud de la varilla en cm y ρ es el rendimiento gravimétrico.

El espesor de la barra que se ha de soldar es vital para elegir correctamente el espesor de los electrodos a utilizar, así como las tensiones e intensidades de soldadura, tal como se indica en la siguiente tabla.

Espesor (mm)	Diámetro de electrodos (mm)	Tensión de soldadura (V)	Intensidad de soldadura (A)
0,75	1	13 a 15	18 a 22
1	1	13 a 16	24 a 30
1,5	1,5	16 a 18	33 a 40
1,5	2	16 a 18	36 a 45
2	2	16 a 18	50 a 60
3	3	16 a 18	80 a 120
4 a 5	4	17 a 19	120 a 180
6 a 7	4 a 5	17 a 19	150 a 200
8 a 10	5	18 a 20	160 a 200
11 a 15	5	18 a 20	180 a 220
16 a 20	5	19 a 22	200 a 230
Más de 20	5 a 6	20 a 25	200 a 260

Tabla 39: Diámetro, tensiones e intensidades de los electrodos [11]

Siempre se ha de usar un electrodo de igual o mayor diámetro que el espesor de la tubería, así que para los tubos de 4 mm y los de 3,2 mm de espesor se usará un electrodo de 4 mm, con una tensión de soldadura de 17 a 19 V y una intensidad de soldadura de 120 a 180 A; y para los de 2,7 mm se usará un electrodo de 3 mm con una tensión de soldadura de 16 a 18 V y una intensidad de soldadura entre 80 y 120 A. Además, se supondrá una longitud de electrodo de 300 mm ya que es el más común, un rendimiento gravimétrico de 0,8 y sabiendo que la densidad del acero es de 7,8g/cm<sup>3</sup>.

Diámetro del electrodo (mm)	Peso del cordón (g)
3	1,32
4	2,35

Tabla 40: Pesos del cordón de soldadura

El coste total del material de aporte usado durante todo el proceso se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Costo electrodo} = \frac{P_{md} \cdot \text{Valor electrodo} \cdot L}{E}$$

donde  $P_{md}$  es el peso del material depositado en kg, L es la longitud en m del cordón de soldadura y E es la eficiencia de deposición.

La eficiencia de aportación es la relación entre el metal efectivamente depositado y la cantidad en peso de electrodo de aporte requerido para efectuar la soldadura. Este valor se obtiene a partir de la siguiente tabla.

Proceso	Eficiencia deposición (%)
Electrodo manual	60-70
MIG sólido	90
MIG tubular c/protección	83
MIG tubular s/protección	79
TIG	95
Arco sumergido	98

Tabla 41: Eficiencia de aportación

La longitud se calculará usando el perímetro del diámetro exterior de cada barra y el número de barras, teniendo en cuenta que cada barra tiene dos extremos.

Diámetro exterior x espesor (mm)	Número de barras	Perímetro (mm)	Longitud de soldadura (m)
27 x 4	26	84,82	4,41
26,8 x 3,2	29	84,19	4,88
26,5 x 2,7	29	83,25	4,82

Tabla 42: Longitudes de soldadura

Se considera el valor del electrodo de 3 mm de espesor de 0,16 € y para el de 4 mm 0,18 €. [12] Por tanto, el coste del electrodo es el siguiente.

Espesor del electrodo (mm)	Longitud de soldadura (m)	Peso del cordón (g)	Costo del electrodo (€)
3	4,41	1,32	0,98
4	9,71	2,35	4,12
<b>TOTAL</b>			<b>5,10</b>

Tabla 43: Costo del electrodo

En cuanto a la mano de obra, se estipula para un oficial de 1ª soldador de 22,74 €/h y la maquinaria usada tiene un precio de 28,14 €, lo que supone un total de 50,88 €/h. Se ha considerado un tiempo de dos horas para realizar todo el proceso de soldadura.

El coste total del proyecto, tal y como se muestra detallado anteriormente, es de 1245,98 €.

## 10 CONCLUSIONES

---

Un proyecto de estas características permite el estudio de la estructura desde el primer esbozo hasta la realización material. Se muestran todas las etapas a través de las cuales ha ido evolucionando haciéndose necesaria la realización de cálculos y simulaciones de cara a validar y poder optimizar la primera solución válida obtenida.

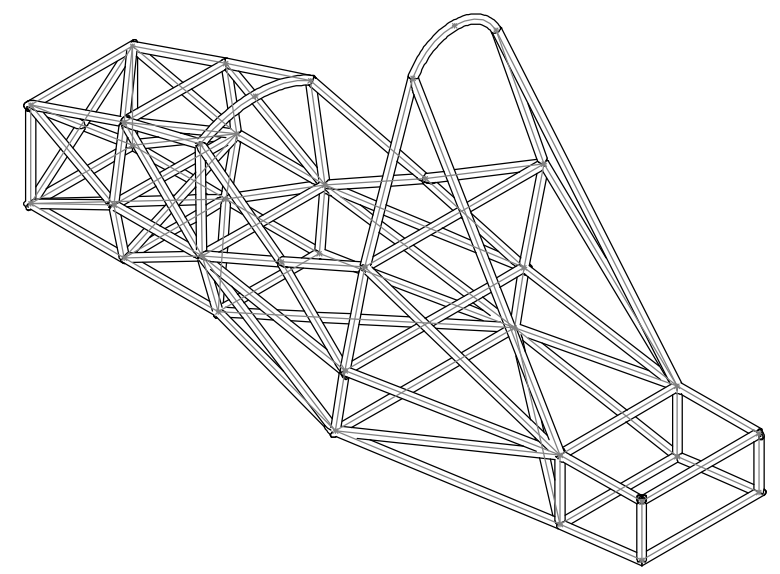
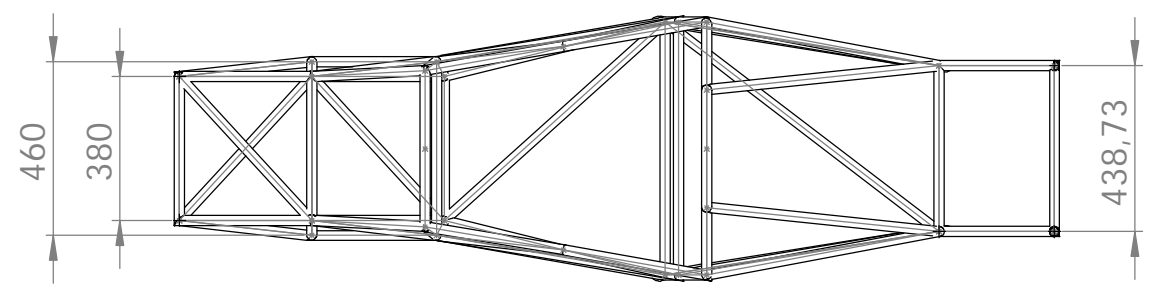
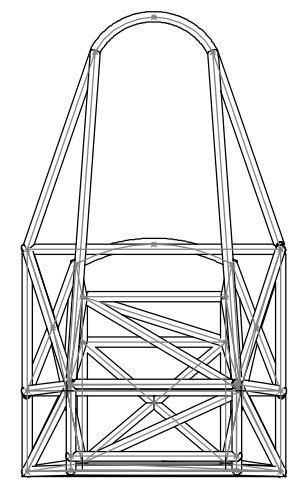
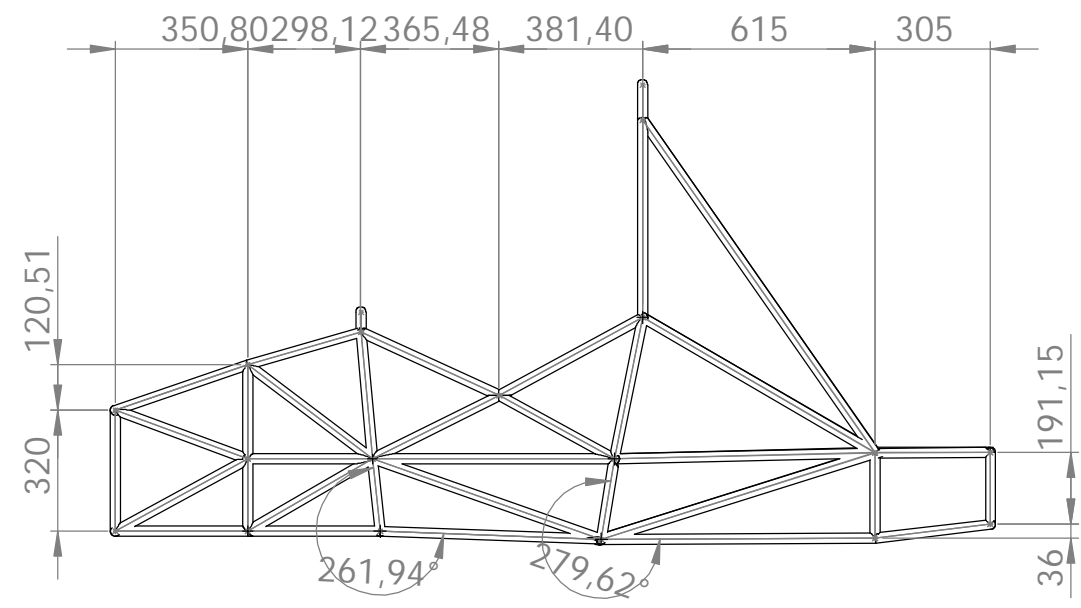
El trabajo contiene diversas temáticas, y sus conocimientos se han adquirido durante el transcurso de los años en la carrera.

Para líneas de trabajo futuras, se podría reducir aún más el peso del monoplaça empleando otro tipo de materiales como la fibra de carbono, aluminio o incluso cambiando la disposición de las barras en la estructura o el diámetro y sección de las mismas.

## 11 PLANOS

---





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: N10 TOLERANCIAS: LINEAL: ±0,1 ANGULAR: ±1°		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	ARANTXA PONS	05/09/2016		TITULO: <b>Chasis 2-2</b>	
VERIF.				N.º DE DIBUJO 1	A3
APROB.			MATERIAL: Tubo de acero S355	ESCALA:1:20	HOJA 1 DE 1
FABR.			PESO:		
CALID.					



4 3 2 1

F

F

E

E

D

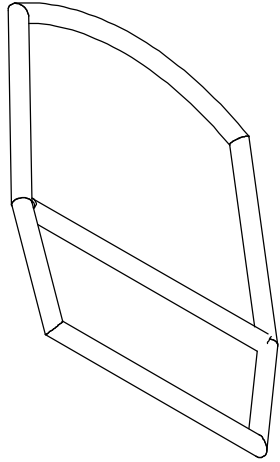
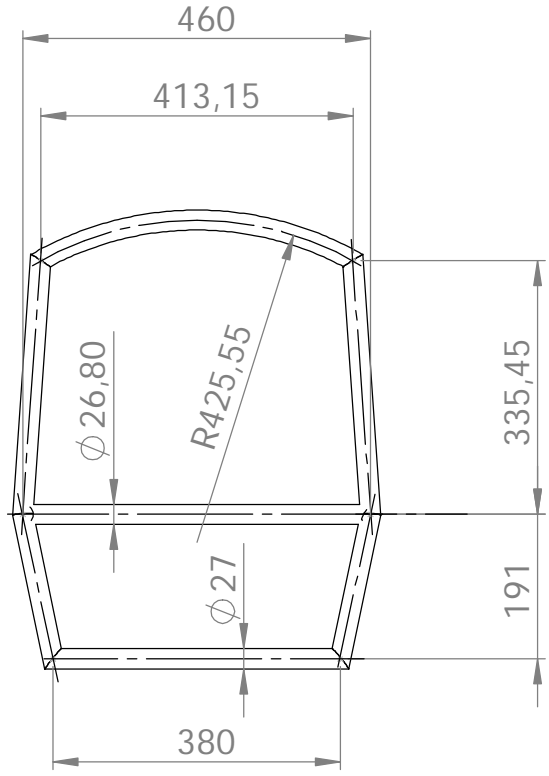
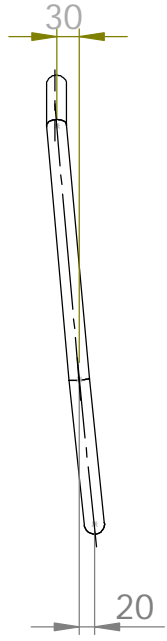
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
ACABADO SUPERFICIAL: N10  
TOLERANCIAS:  
LINEAL:  $\pm 0,1$   
ANGULAR:  $\pm 1^\circ$

ACABADO:  
  
REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

TÍTULO:

ARANTXA PONS		05/09/2016
DIBUJ.		
VERIF.		
APROB.		
FABR.		
CALID.		
MATERIAL:		
Tubo de acero S355		
PESO:		

TÍTULO:		
<b>Arco frontal</b>		
N.º DE DIBUJO	<b>3</b>	A4
ESCALA: 1:10	HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

A

A

## 12 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Heacock Classic. [En línea]. <<https://www.heacockclassic.com/articles/mercedes-benz-300-sport-light-the-gullwing-coupe/>>. [Acceso: 24 Mayo 2016].
- [2] S. Rinland. *Historia de la Técnica en la F1, sus Reglamentos y la Seguridad*.
- [3] Formula Student Portsmouth. [En línea]. <<http://fsportsmouth.wix.com/pfs12/2011-design-focus>>. [Acceso: 2016 Mayo 25].
- [4] E. F. S. U. S. Bolivar. *Formula SAE USB*.
- [5] J. Font Mezquita y J. F. Dols Ruiz. *Tratado sobre automóviles. Tomo II*. Universitat Politècnica de València, 1997.
- [6] J. D. v. Kerkhoven. *Design of a Formula Student race car chassis*. Eindhoven, 2008.
- [7] Mc News. [En línea]. <<http://www.mcnews.com.au/honda-cbr600rr/>>. [Acceso: 04 Junio 2016].
- [8] HONDA. [En línea]. <<http://www.honda.es/motorcycles/range/super-sport/cbr600rr-2013/specifications.html>>. [Acceso: 02 Junio 2016].
- [9] D. Baker, M. Grusenmeyer, S. Marcks, A. Baldan y E. Jenkins, «FSAE chassis: phase IV report,» Delaware, 2010.
- [10] <<http://www.patagonia4x4.com.ar/phpbb3/viewtopic.php?t=36196&p=376798>> [En línea]. [Acceso: 05 Agosto 2016].
- [11] Leroy merlin. [En línea]. <[http://www.leroymerlin.es/productos/herramientas/maquinaria\\_de\\_taller/equipos\\_de\\_soldadura.html](http://www.leroymerlin.es/productos/herramientas/maquinaria_de_taller/equipos_de_soldadura.html)>. [Acceso: 29 Julio 2016].
- [12] Iberdrola. [En línea]. <<http://www.blmgroupp.com/es/productos/corte-laser.aspx>>. [Acceso: 23 Julio 2016].
- [13] D. R. Askeland, P. P. Fulay y W. J. Wright. *The Science and engineering of materials*. Cengage Learning, 2016.