



# **MASTER EN AUTOMOCIÓN**

## **ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

### **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Diseño de la suspensión delantera de un vehículo de competición Formula  
SAE**

Autor: Jesús Orejuela de Cáceres

Tutor: D. Javier Romo García

Valladolid, Julio de 2016







## RESUMEN

Este trabajo Fin de Master tiene como objetivo el diseño de la suspensión delantera de un vehículo para la competición Formula Student 2016 que se realizará el próximo mes de agosto en Cataluña.

En este trabajo se recogen los conocimientos y habilidades de diseño, así como la normativa exigida por la organización para el desarrollo de un monoplace tipo Formula para una de las competiciones más importantes a nivel mundial entre universidades.

El proyecto se presenta como el primer diseño realizado en la Universidad de Valladolid para esta competición. Pretende servir de base para que los próximos integrantes del equipo de la universidad puedan tener una referencia o guía a la hora de realizar la suspensión delantera del vehículo para futuras competiciones.

En la primera parte de este documento se recogen las normas y requisitos exigidos por la organización de la Formula Student, que serán imprescindibles en todos los vehículos presentados y que serán evaluados exhaustivamente en la competición.

A continuación se describirá, paso a paso, el proceso de diseño de la suspensión, realizando un bucle de iteraciones entre los departamentos de cálculo y diseño hasta conseguir una estructura compacta, resistente y dinámicamente competitiva. Se detallará en profundidad el proceso de diseño en cada una de las iteraciones.

Por último se recogen las conclusiones tras la elaboración de este proyecto y se proporcionan algunas recomendaciones para los futuros diseñadores de suspensiones destinados a este tipo de competición.

## ABSTRACT

The goal of this Master Project is to design a front suspension for a race car which may be able to participate at the Formula Student 2016 competition, which will be held next August in Catalonia (Spain).

This project is the first race car design at Valladolid University. Its aim is to give background to future students of the university team and serve them as a guide to make a suspension for vehicles of future contests.

This document will capture the growing body of knowledge and best practices as well as the normative regulation for the developing of a race car to compete in one of the most prestigious competitions around the world for students.

The first part of this document contains the rules and requirements demanded by Formula Student organization, something essential in each car that want to participate and that will be evaluated during competition thoroughly.

Following the process of design of the suspension will be described step by step. Iterations between the departments of Maths and Design will be necessary. The process of design will be deeply detailed after every iteration.

Finally, we will get to some conclusions and give some recommendation for future designers of the suspension which want to participate in this type of competitions.

## INDICE

### Table of Contents

INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Enunciado y objetivos .....	2
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Justificación proyecto.....	2
2 Situación y estado del arte.....	3
2.1 Pisuerga Sport .....	3
2.2 Fórmula Student.....	5
3 Análisis de la normativa Formula Student .....	7
3.1 Dimensiones geométricas básicas.....	7
3.2 Espesor tubos.....	7
3.3 Espacio reservado para el piloto.....	8
4 Tipos de suspensión .....	10
4.1 Sistemas de suspensión de eje rígido.....	10
4.2 Sistema de suspensión de eje independiente.....	11
4.2.1 Suspensión de brazos tirados o arrastrados.....	11
4.2.2 McPherson.....	12
4.2.3 Suspensión de paralelogramo deformable.....	12
4.2.4 Suspensiones Multibrazo o Multilink .....	13
4.3 Push-bar y Pull-Bar .....	13
4.4 Cotas de la suspensión.....	15
5 Desarrollo del diseño.....	21
5.1 Definición de los sistemas del vehículo.....	21
5.2 Definición de la Suspensión.....	23
5.3 Definición esquemática en profundidad .....	43
5.4 Diseño en detalle: .....	51
5.4.1 Triangulo Superior e Inferior:.....	51
5.4.2 Empaquetamiento de rueda:.....	58
5.4.3 Bieleta: .....	63
5.4.4 Pushbar:.....	65
5.4.5 Antiroll: .....	67
Anclajes:.....	72
6 Conclusiones.....	75
6.1 Resumen de resultados .....	75

6.2	Aportaciones .....	77
6.3	Sugerencias para trabajos futuros .....	77
7	Bibliografía .....	78



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Escudo del Equipo Pisuerga Sport .....	3
Figura 2 Plantilla para reserva de espacio vertical.....	8
Figura 3 Plantilla para reserva de espacio longitudinal.....	9
Figura 4 Reservas de espacio para el piloto.....	9
Figura 5 Suspensión de eje rígido.....	10
Figura 6 Suspensión de brazos tirados o arrastrados.....	11
Figura 7 Suspensión McPherson .....	12
Figura 8 Suspensión de paralelo deformable.....	12
Figura 9 Suspensión multibrazo.....	13
Figura 10 Comparación entre Push Rod y Pull Rod.....	14
Figura 11 Ángulo de Avance.....	16
Figura 12 Ángulo de Salida.....	17
Figura 13 Ángulo de Caída .....	17
Figura 14 Ángulo comprendido .....	18
Figura 15 Ángulos de convergencia y divergencia.....	19
Figura 16 Efecto de la presión de inflado en los neumáticos .....	20
Figura 17 Reservas de espacio para cada sistema .....	22
Figura 18 Diseño esquemático de la suspensión delantera.....	24
Figura 19 Vista frontal, lateral y cenital. ....	24
Figura 20 Teoría para la definición frontal de la suspensión delantera (reposo).....	25
Figura 21 Teoría de la definición frontal de la suspensión (en curva).....	25
Figura 22 Comportamiento del camber de la rueda Michelin .....	26
Figura 23 Definición frontal definitiva de la suspensión .....	27
Figura 24 Reparto de fuerzas entre elementos elásticos y rígidos.....	27
Figura 25 Esquema para el cálculo del Anti-Dive y Anti-Lift.....	28
Figura 26 Creación del plano para triángulo superior .....	29
Figura 27 Creación del plano para triángulo inferior .....	29
Figura 28 Creación del esquema para el triángulo superior.....	30
Figura 29 Creación del esquema para triángulo inferior .....	31
Figura 30 Representación definitiva de los triángulos de la suspensión .....	31
Figura 31 Mangueta esquematizada.....	32
Figura 32 Creación del punto de anclaje inferior para la pushbar .....	33
Figura 33 Creación de un punto correspondiente al centro de la bieleta .....	34
Figura 34 Creación del punto de anclaje al chasis.....	35
Figura 35 Creación del plano de la bieleta.....	36

Figura 36 Representación esquemática de la bieleta .....	37
Figura 37 Representación de la pushbar .....	38
Figura 38 Representación del amortiguador .....	39
Figura 39 Longitud del amortiguador .....	40
Figura 40 Creación de un plano para el link del antiroll .....	41
Figura 41 Representación esquemática del link y el brazo del antiroll.....	42
Figura 42 Representación esquemática en profundidad de la suspensión .....	43
Figura 43 Representación de los anclajes de los triángulos de la suspensión.....	44
Figura 44 Representación del empaquetamiento de rueda .....	45
Figura 45 Representación de un dibujo esquemático en profundidad de la bieleta .....	46
Figura 46 Corte transversal del esquema de la bieleta .....	46
Figura 47 Vista en planta de la geometría de la bieleta .....	47
Figura 48 Representación de los anclajes de la pushbar.....	48
Figura 49 Representación esquemática del sistema antiroll .....	49
Figura 50 Representación del link de la barra de suspensión.....	50
Figura 51 Diseño del triángulo superior e inferior.....	51
Figura 52 Diseño final de un porta rótulas simple .....	52
Figura 53 Optimización topológica del porta rótulas simple .....	52
Figura 54 Alojamiento de la rótula y cierre por circlip.....	53
Figura 55 Método de unión de elementos rígidos mediante rótulas.....	53
Figura 56 Porta rótulas del triángulo superior .....	54
Figura 57 Porta rótulas del triángulo inferior .....	54
Figura 58 Diseño preliminar del porta rótulas inferior.....	54
Figura 59 Optimización topológica del porta rótulas inferior .....	55
Figura 60 Corte transversal del porta rótulas inferior .....	55
Figura 61 Cálculo de esfuerzos en el porta rótulas inferior .....	56
Figura 62 Cálculo de desplazamientos en el porta rótulas inferior .....	56
Figura 63 Diseño del empaquetamiento de rueda .....	58
Figura 64 Optimización topológica de la mangueta .....	58
Figura 65 Cálculo de esfuerzos para la mangueta.....	59
Figura 66 Cálculo de esfuerzos para la mangueta (detalle).....	60
Figura 67 Corte transversal del empaquetamiento de rueda .....	61
Figura 68 Descomposición del empaquetamiento de rueda .....	61
Figura 69 Cálculo de esfuerzos del buje .....	62
Figura 70 Cala de la mangueta para variar el ángulo de salida .....	62
Figura 71 Diseño final de la bieleta .....	63

Figura 72 Corte transversal de la bieleta .....	64
Figura 73 Representación de la pushbar .....	65
Figura 74 Anclaje inferior de la pushbar .....	65
Figura 75 Porta rótulas inferior de la pushbar .....	66
Figura 76 Vehículo de la Formula SAE con los sistemas de suspensión fuera del carenado .....	67
Figura 77 Localización inicial del antiroll .....	67
Figura 78 Cambio de localización de la pushbar hacia una zona más adelantada .....	68
Figura 79 Limitaciones de espacio para el antiroll .....	68
Figura 80 Diseño definitivo del sistema antiroll .....	69
Figura 81 Unión cuadrada de la barra antiroll con la orejeta .....	69
Figura 82 Unión de triángulo redondeado de la barra antiroll con la orejeta .....	69
Figura 83 Localización y anclaje del sistema antiroll .....	70
Figura 84 Antiroll con casquillo .....	70
Figura 85 Antiroll con rodamiento de agujas .....	70
Figura 86 Anclajes de los triángulos .....	72
Figura 87 Anclaje del conjunto muelle-amortiguador .....	72
Figura 88 Anclaje de la bieleta .....	73
Figura 89 Funcionamiento de la bieleta junto con su anclaje .....	73
Figura 90 Diseño completo de la suspensión delantera derecha .....	75

# INTRODUCCIÓN

## 1.1 *Enunciado y objetivos*

El objetivo de este trabajo que a continuación se describe consiste en realizar el diseño de la suspensión delantera de un vehículo de competición monoplace, cumpliendo con los siguientes objetivos:

- Cumplir con la normativa de la competición.
- Proporcionar la dinámica vehicular pretendida.
- Soportar todos los esfuerzos a los que se ve sometido el vehículo garantizando su integridad.
- Generar sensación de deportividad y de gusto estético.

La suspensión se anclará al chasis del vehículo y a su vez también será un punto de anclaje para sistemas como el de dirección y frenado.

El diseño de la suspensión marcará también, según su disposición, el espacio del habitáculo disponible para las piernas del piloto. El diseño debe permitir que el vehículo sea conducido por un piloto con una fisionomía notablemente variable, oscilando entre un 5 y un 95% percentil.

Con la correcta realización de este proyecto conseguiremos, como objetivo final, una suspensión delantera optimizada para nuestro Formula Student.

## 1.2 *Antecedentes*

La competición Formula Student, también conocida como Fórmula SAE, es una competición entre estudiantes de todo el mundo que promueve la excelencia en ingeniería a través de una competición donde los miembros de los equipos desarrollan de principio a fin un pequeño pero potente monoplace de competición.

Formula Student se creó con el objetivo de ser el campo de pruebas de las próximas generaciones de estudiantes con interés en el mundo del motor. El concurso persigue el principal objetivo de inspirar y desarrollar jóvenes estudiantes de ingeniería, emprendedores e innovadores que sean capaces de planificar, diseñar, construir y hacer competir un monoplace.

## 1.3 *Justificación proyecto*

Este proyecto responde al compromiso de la Universidad de Valladolid junto a la asociación Pisuegra Sport en participar por primera vez en la competición Formula Student en el circuito de Montmeló en Barcelona el próximo mes de Agosto.

La competición supone una gran oportunidad para demostrar y mejorar las capacidades adquiridas durante mi formación académica, pudiendo desarrollar un producto tangible en el exigente contexto de una competición automovilística.

## 2 Situación y estado del arte.

### 2.1 *Pisuerga Sport*

En el curso académico 2013/2014 un grupo de alumnos de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid se embarcaro en el proyecto de participar por primera vez en la competición de Formula Student.

Los beneficios que obtenemos los miembros del equipo son muchos, fundamentalmente, la experiencia y las competencias técnicas que vamos adquiriendo en el camino, y que van más allá de la formación recibida en las aulas.

Tenemos que enfrentarnos de primera mano a las exigencias que conlleva un proyecto de ingeniería tan complejo como es la fabricación de un monoplace partiendo desde cero como son: cumplimiento de plazos, asignación eficiente de recursos, trabajo en equipo...

Cabe destacar las competencias motivacionales de liderazgo, del trabajo en equipo y de cultura de colaboración, logrando obtener un enfoque de trabajar unidos, codo con codo, aunando esfuerzos y conocimientos con estudiantes de otras especialidades, todos con un único fin común.

En definitiva, participar en esta experiencia supone un impulso para sus participantes hacia el mundo laboral ya que se adquieren unos valores y cualidades que las empresas suelen buscar en sus futuros miembros.

Con el fin de facilitar el contacto con las empresas e instituciones se creó esta asociación sin ánimo de lucro, que es una de nuestras herramientas más importantes. A través de esta asociación nos es más fácil conseguir apoyo económico e institucional que tan necesario es para sacar este proyecto adelante. Esta es la razón por la que nace la asociación PISUERGA SPORT.



Figura 1 Escudo del Equipo Pisuerga Sport

Los miembros del equipo se reparten en diversas áreas, trabajando con distintas herramientas e intentando compartir conocimientos. De esta forma los miembros del equipo se dividen en los siguientes departamentos:

- **Administración y compras;** encargados en primer lugar de conseguir patrocinadores y colaboradores que permitan financiar este proyecto. En segundo lugar gestionan los fondos conseguidos y realizan las compras de todos los elementos necesarios para llevar a cabo nuestro vehículo.
- **Gestión y Calidad;** su trabajo consiste en verificar la calidad del trabajo realizado y gestionar los plazos y recursos.
- **Diseño Gráfico e Imagen;** su primera labor fue encontrar un nombre y crear una imagen corporativa que nos identificara y nos diera a conocer. A partir de ese momento comenzaron sus labores de promoción y difusión a través de las redes sociales y mediante la creación de una página web.
- **Diseño de superficies;** diseñan la carrocería o carenado del vehículo mediante el programa de diseño de superficies, Alias.
- **Cálculo Aerodinámico;** realiza el análisis fluido dinámico del carenado creado por los miembros de diseño de superficies a través del programa Fluent.
- **Diseño Mecánico;** crean la geometría de todas las piezas que compondrán el monoplace. Para ello emplean el programa de diseño 3D, Catia.
- **Cálculo Mecánico;** son los encargados de realizar el cálculo de todas las piezas realizadas por los miembros del equipo de diseño mecánico. Los cálculos son realizados mediante Hyperworks.
- **Diseño de Hardware y Software;** diseñan y realizan todos los elementos y componentes electrónicos que lleva el vehículo.
- **Modelado de Motor, Sistemas Mecánicos y Sistemas de Control;** realizan simulaciones y ensayos sobre el motor, los sistemas mecánicos y los sistemas de control para conseguir el correcto funcionamiento del vehículo, empleando Matlab.
- **Fabricación y Puesta a Punto;** se encargan de la realización de las piezas diseñadas y calculadas por el equipo, así como de la puesta a punto del vehículo antes y durante la competición.

## 2.2 Fórmula Student

La primera competición de Formula SAE se desarrolló en 1981 en la Universidad de Texas en Austin, donde participaron un total de 40 alumnos repartidos en 6 equipos.

Estas competiciones han ido creciendo y actualmente se celebran competiciones en numerosos países como Alemania, Japón, Brasil, Australia... todas se basan en la misma normativa original de la Formula SAE y llegan a albergar hasta 120 equipos y más de 2000 estudiantes de todo el mundo. Los resultados de las competiciones son recogidos y puntuados en el ranking mundial

El objetivo de la competición es simular una situación real en la cual una empresa de competición contrata a ingenieros para desarrollar un prototipo. Los compradores de dicho prototipo serían corredores amateur y por ello el vehículo debe satisfacer unas elevadas prestaciones en aceleración, frenada, y estabilidad. También se valora que el monoplace sea fiable y fácil de mantener, y que su coste no sea elevado. Otros factores que se tienen en cuenta a la hora de puntuar son la estética y el confort. El precio máximo al que puede ascender la elaboración del vehículo es de 21000 euros. Logrará la victoria el equipo que mejor satisfaga estos requisitos.

Las diferentes pruebas en las que participan los vehículos se dividen en dos bloques:

- Eventos estáticos: en los que se agrupan todas las fases de diseño del vehículo previas a la competición propiamente dicha. Consiste en la elaboración de una serie de documentos e informes en los que se plasman los factores importantes a tener en cuenta.

En la fase de planificación del proyecto se desarrolla la viabilidad de la fabricación, la rentabilidad, la seguridad, el volumen de trabajo...

Se presenta el análisis de costes del desarrollo del vehículo.

Y por último se evalúa la calidad del diseño, la seguridad del vehículo, la eficiencia energética e y las emisiones que produce, entre otros aspectos, antes de poner a prueba su comportamiento en el circuito de carreras.

- Eventos dinámicos: como cabe esperar en este bloque se agrupan las diferentes pruebas que evalúan el comportamiento de los monoplaces sobre la pista. Se miden aspectos como la aceleración, la resistencia, el consumo real de combustible, la fiabilidad... Y como no la habilidad de los pilotos que representan a todo el equipo dentro del fórmula.

Los aspectos se valoran según la siguiente tabla:

EVENTOS ESTÁTICOS	325
Diseño	150
Análisis de costes	100
Business Presentation	75

EVENTOS DINÁMICOS	675
Skidpad	75
Aceleración	75
Autocross	100
Endurance	325
Consumo	100
TOTAL	1000

Existen diferentes categorías o clases dentro de la competición:

- Clase 3: es la clase de inicio en la competición. Se presentan los equipos nuevos, participan únicamente vehículos en fase de diseño y validación del modelo. Como norma general y para fomentar el progreso, un equipo no se puede presentar dos años consecutivos en este nivel, sino que debe hacerlo en categorías o clases superiores. En este nivel solo se puntúan las pruebas pertenecientes al apartado de eventos estáticos.
- Clase 2: en esta categoría compiten los equipos que ya han pasado de los conceptos básicos del diseño inicial y han logrado fabricar un vehículo completo. Como requisito mínimo para participar en esta categoría es contar con un chasis completo. Al igual que en la clase anterior solo se puntúan las pruebas de diseño, presentación y costes.
- Clase 1: en este nivel compiten monoplazas totalmente acabados que son capaces de desplazarse. Es la categoría de mayor importancia. Un mismo coche solo puede participar durante 12 meses, obligando así a los equipos a progresar y fabricar cada vez nuevos y mejores vehículos. Se permite reaprovechar componentes de los monoplazas antiguos salvo el chasis. Los equipos puntúan en esta categoría en todas y cada una de las pruebas, tanto estáticas, diseño, presentación, costes, como dinámicas, aceleración, skidpad, autocross, endurance y consumo de combustible.

Nuestro objetivo es que el monoplaza esté preparado para afrontar todas y cada una de las pruebas de la competición.



### 3 Análisis de la normativa Formula Student

El primer paso para comenzar la realización la suspensión es estudiar a fondo las especificaciones redactadas en la normativa de la competición.

#### 3.1 Dimensiones geométricas básicas

La norma establece unas dimensiones mínimas que todo monoplace debe cumplir, así pues:

- La batalla o distancia entre eje delantero y trasero tendrá un valor mínimo de 1525mm.
- La vía menor o distancia menor entre ruedas de un mismo eje, no ha de ser en ningún caso inferior al 75% de la vía mayor.
- La distancia del bajo del vehículo al suelo no debe ser menor de 25,4mm para garantizar que los componentes mecánicos o la estructura del vehículo no entra en contacto con el asfalto en ningún momento.

#### 3.2 Espesor tubos

Los diferentes sistemas del vehículo podrán emplear tubos de acero aleado o bajo en carbono, según las especificaciones recogidas en la siguiente tabla:

Aplicación barra	Dimensión exterior x espesor (mm)
Arco principal Arco frontal Anclaje cinturones hombros	25 x 2.5
Impacto lateral Arco delantero Anclajes cinturones	25 x 1.75
Tirantes arco principal Tirantes arco frontal	25 x 1.5

Además se ha de tener en cuenta las siguientes exigencias:

- El uso de aleaciones no permite emplear tubos con una pared de espesor menor al especificado para los tubos de acero bajo en carbono.
- Los tubos nunca podrán tener un espesor menor al especificado en la tabla anterior; se podrán emplear tubos de mayor diámetro pero habrá que aumentar el espesor.
- El arco principal y sus refuerzos deben estar contruidos con elementos de acero.

### 3.3 Espacio reservado para el piloto

La organización establece unas plantillas para dimensionar el espacio reservado al piloto.

Estas plantillas son insertadas en el vehículo para garantizar que se ha respetado las dimensiones requeridas en la abertura del habitáculo para un correcto acceso a la cabina.

Existen dos plantillas diferentes:

- La primera plantilla se inserta en dirección vertical por la abertura del habitáculo, hasta pasar la barra superior de la estructura de protección de impacto lateral.

Durante esta comprobación pueden ser retirados el volante, el asiento, la columna de dirección y las protecciones.

Esta plantilla tiene la forma siguiente:

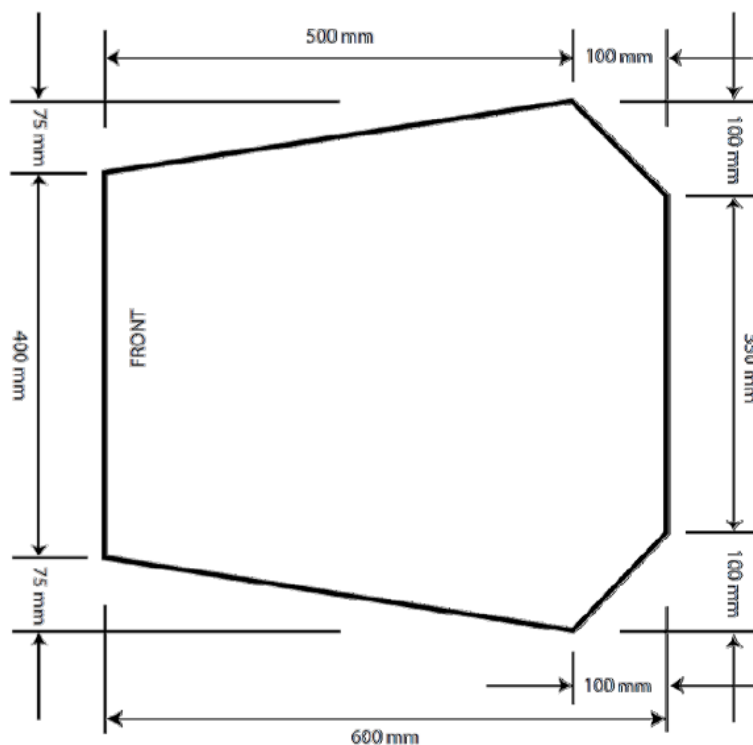
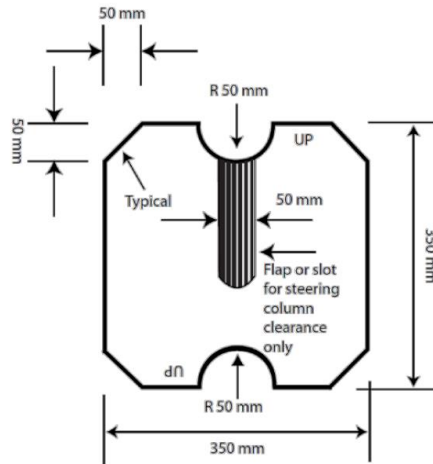


Figura 2 Plantilla para reserva de espacio vertical.

- La segunda plantilla se inserta en dirección horizontal para garantizar una sección transversal libre donde se colocan las piernas del piloto. Esta sección debe introducirse hasta una distancia de 100mm de la cara posterior de los pedales cuando estos se encuentran en posición no operativa. Si los pedales son ajustables se colocarán en la posición más cercana al piloto.

En esta prueba pueden retirarse solamente el volante y cualquier protección que pueda eliminarse sin el empleo de herramientas.

La sección de la plantilla es la mostrada a continuación:

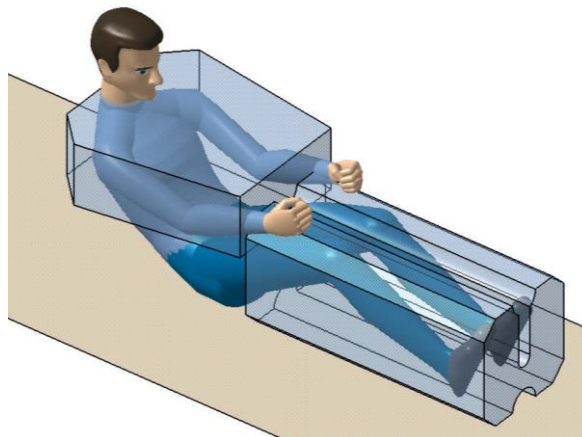


**Figura 3** Plantilla para reserva de espacio longitudinal

Además se ha de tener en cuenta que, según las normas de la competición, el piloto debe ser capaz de salir del vehículo en un tiempo inferior a 5 segundos, por lo que el espacio reservado al piloto deberá estar diseñado de manera que facilite la salida del mismo.

Debe tenerse en cuenta la posición de colocación de cada uno de los componentes, garantizando un fácil acceso a los mismos en el caso de que se produzca una avería, siendo necesaria la reparación del sistema, o simplemente para realizar el mantenimiento.

Definimos el paso de estas plantillas, siguiendo el patrón dado por la normativa, como espacio reservado donde no podrán colocarse ningún elemento ni sistema:



**Figura 4** Reservas de espacio para el piloto

## 4 Tipos de suspensión

Se denomina suspensión al conjunto de elementos cuya unión no es rígida que se interpone entre las masas suspendidas (Chasis, carrocería, motor, pasajeros, carga...etc.) y las no suspendidas (empaquetamiento de rueda). Es sencillo distinguir si un elemento es masa suspendida o no suspendida en función de si sirve de algún modo a filtrar las irregularidades del terreno.

El objetivo de una buena suspensión es asegurar una buena estabilidad en cualquier circunstancia y controlar la trayectoria. Esto se consigue a partir de un contacto óptimo entre rueda y suelo. También ha de garantizar el confort mínimo para que se pueda conducir el vehículo con una mínima ergonomía. Todas las funciones de la suspensión pueden resumirse en:

- Absorber esfuerzos y vibraciones generados por las irregularidades de la pista, y éstos no sean transmitidos al bastidor.
- Transmitir las fuerzas de aceleración y de frenada entre los ejes y el chasis.
- Resistir el par motor y de frenada.
- Resistir los efectos de las curvas.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido.
- Conservar el paralelismo entre los ejes y la perpendicular del chasis.
- Soportar la carga del vehículo.
- Resistir el balanceo de la carrocería.

Esta es la descripción y las funciones fundamentales de cualquier suspensión. Para el diseño de cualquier suspensión hay que llegar a una relación de compromiso entre confort y ergonomía frente a la mejora de tiempos y dinámica en el pilotaje. Los vehículos destinados al entretenimiento deportivo presentan una suspensión muy rígida con apenas recorrido. En cambio, los vehículos destinados al público en general disponen de suspensiones más blandas y con mayores recorridos.

### 4.1 Sistemas de suspensión de eje rígido

Existe un eje rígido que une ambas ruedas y como consecuencia de ello, el movimiento que afecta a una rueda se transmite hacia la otra. Además, el eje se fija directamente al chasis luego la inclinación y las vibraciones producidas se transmiten a todo el vehículo. Tienen la ventaja de ser muy resistentes, robustas, económicas y fáciles de fabricar e instalar. Por el contrario, ofrecen poco confort y seguridad en la conducción.



Figura 5 Suspensión de eje rígido

Este tipo de suspensión se emplea en vehículos con altas prestaciones off-road.

## 4.2 Sistema de suspensión de eje independiente.

Los sistemas de suspensión independiente están configurados de manera individual en cada rueda. De este modo el movimiento de una rueda no se transmite al otro extremo del eje. De esta forma la elevación o hundimiento de una rueda tiene una repercusión mucho menor en la inclinación del chasis y la carrocería. Por tanto, este sistema ofrece una serie de ventajas:

- Mejor control de los ángulos de rueda.
- Mejor confort.
- Mejor comportamiento en curva.
- Mejor control del balanceo.
- Mayor resistencia al balanceo.
- Masa no suspendida reducida.
- Más compacta.
- Permite carreras más amplias.

Existe una gran variedad de configuraciones independientes.

### 4.2.1 Suspensión de brazos tirados o arrastrados

Este tipo de suspensión independiente se caracteriza por tener los brazos en disposición longitudinal que van unidos por un extremo al bastidor y por el otro a la mangueta de la rueda. Si el eje es de tracción, el grupo diferencial va anclado al bastidor. En cualquier caso las ruedas son tiradas o arrastradas por los brazos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería. Este sistema de suspensión ha dado un gran número de variantes cuyas diferencias estriban fundamentalmente en cuál es el eje de giro del brazo tirado en el anclaje al bastidor.



Figura 6 Suspensión de brazos tirados o arrastrados

## 4.2.2 McPherson

Existen a su vez una gran cantidad de suspensiones McPherson pero todas tienen en común un amortiguador insertado concéntricamente con un muelle. La parte superior de este conjunto muelle-amortiguador se ancla al chasis por medio de fijaciones con cierto grado de libertad al giro. El extremo inferior del conjunto se ancla directamente a la mangueta o a los brazos de la suspensión.

Su utilización está muy extendida en todo tipo de vehículos porque son mecánicamente sencillas, fiables, baratas, compatibles con la transmisión y la dirección y superan obstáculos sin variar los ángulos de rueda.

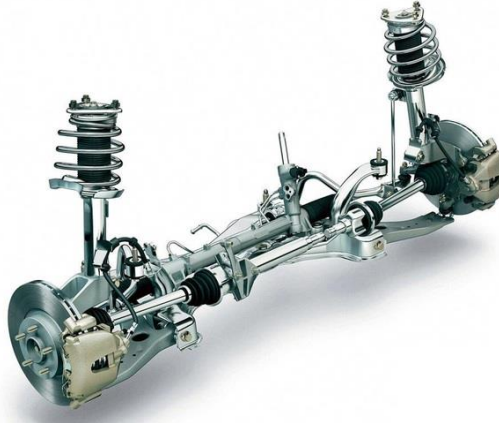


Figura 7 Suspensión McPherson

## 4.2.3 Suspensión de paralelogramo deformable

La suspensión de paralelogramo deformable junto con la McPherson es la más utilizada en un gran número de automóviles tanto para el tren delantero como para el trasero.

El paralelogramo está formado por un brazo superior y otro inferior que están unidos al chasis a través de unos pivotes. La mangueta está articulada con los brazos mediante rótulas esféricas que permiten la orientación de la rueda. El conjunto muelle-amortiguador está unido al brazo inferior y al bastidor. Completan el sistema unos topes que evitan que el brazo inferior suba lo suficiente como para sobrepasar el límite elástico del muelle y un estabilizador lateral que va anclado al brazo inferior.



Figura 8 Suspensión de paralelo deformable

#### 4.2.4 Suspensiones Multibrazo o Multilink

Las suspensiones multibrazo se basan en el mismo concepto básico que sus precursoras: las suspensiones de paralelogramo deformable. El paralelogramo está formado por dos brazos transversales, la mangueta de la rueda y el propio bastidor. La diferencia fundamental que aportan estas nuevas suspensiones es que los elementos guía de la suspensión multibrazo pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Gracias a esta variante las multibrazo permiten modificar tanto los parámetros fundamentales de la rueda, como la caída o la convergencia, de la forma más apropiada de cara a la estabilidad en las distintas situaciones de uso del automóvil. Esto significa que las dinámicas longitudinal y transversal pueden configurarse de forma precisa y prácticamente independiente entre sí, y que puede alcanzarse un grado máximo de estabilidad direccional y confort.



Figura 9 Suspensión multibrazo

#### 4.3 Push-bar y Pull-Bar

A pesar de ser sistemas de suspensión con carácter independiente, ambas requieren ser tratadas en un apartado único por entrañar grandes diferencias con el resto de suspensiones.

Existe una relación de compromiso entre el comportamiento dinámico y el confort. Este equilibrio en el caso de los vehículos comerciales se decanta del lado del confort mientras que en el caso de la competición se busca la mayor eficiencia posible. Las suspensiones pull-rod y push-rod están especialmente destinadas a la competición por el alto rendimiento y el aprovechamiento del espacio frente al confort.

Su diseño con una escasa cota vertical está pensado para no penalizar la aerodinámica del vehículo y bajar el centro de gravedad lo máximo posible.

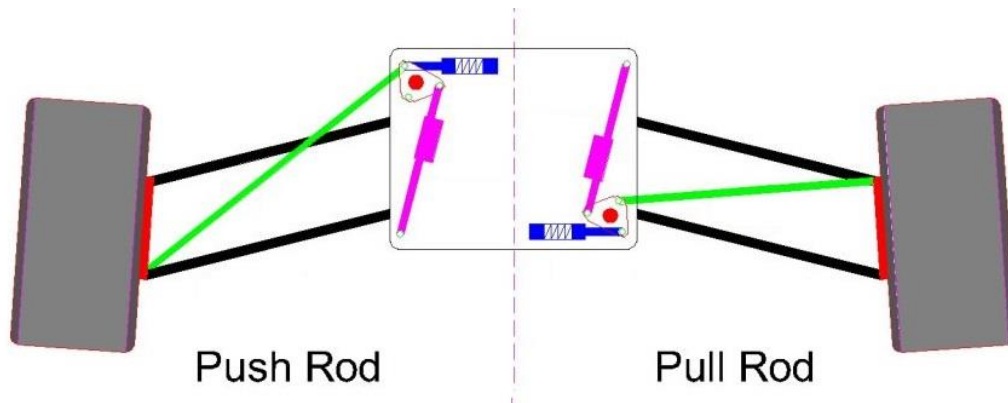


Figura 10 Comparación entre Push Rod y Pull Rod

En este caso los desplazamientos verticales de la rueda no son directamente absorbidos por un conjunto muelle amortiguador sino que este movimiento se transmite a través de una pushbar o pullbar hasta la bieleta. Esta bieleta se encarga de transformar el movimiento de la barra en un movimiento giratorio que le transmite tanto al amortiguador, como al muelle, como a la barra antiroll.

En el caso de la geometría con pushbar, si la rueda se eleva la barra trabaja a compresión y el punto de anclaje a la rueda siempre estará más bajo que el punto de anclaje a la bieleta.

En el caso de una disposición con pullbar la disposición de los elementos es contraria. La diagonal que dibuja tiene inclinación contraria y en caso de que la rueda se eleve, trabaja a tracción.

La evolución de las suspensiones en los vehículos de competición ha llevado finalmente a la implementación de estos dos tipos de geometrías dado que para ser competitivos hay que cumplir con tres requisitos básicos: aerodinamismo, robustez y ligereza.

En competiciones exigentes como la Formula 1, las ruedas siempre han estado al descubierto y consecuentemente, gran parte de los elementos de sujeción también lo han estado. A partir de la década de los 50 la concienciación sobre la aerodinámica comienza a tomar partido y se empiezan a diseñar suspensiones carenadas dentro del chasis. Hoy en día el amortiguador, el muelle y el antiroll están en el interior de la carrocería. Las barras no pueden obviamente carenarse pero se diseñan con perfiles aerodinámicos para generar la menor caída de presión posible a su paso por el aire.

Las prestaciones de los vehículos cada vez aumentaban más, y por tanto, la resistencia estructural de todos los elementos debería verse reforzada. Esto contradice el hecho de la mejora aerodinámica luego se buscaron formas de evitar los esfuerzos de flexión en las estructuras. Con la configuración de estas suspensiones se distribuyen todas las fuerzas entre los diferentes elementos siempre de forma axial.

Ambas tienen ventajas y desventajas. El sistema con Pullbar:

- Mantiene el centro de gravedad del vehículo en una posición más cercana al suelo con las evidentes ventajas en el comportamiento dinámico que esto representa.
- Dificulta mucho el acceso a los elementos para los diferentes ajustes y reglajes.
- Puede permitirse una barra de sección más delgada ya que las barras aguantan más los esfuerzos a tracción que a compresión. Esto es así porque para las barras a tracción se puede diseñar frente al límite de rotura, sin embargo para las barras con fuerzas de compresión hay que estudiarlas frente al riesgo a pandear, que ocurre antes que el límite de rotura. Esto tiene dos ventajas implícitas como son la reducción de peso y la mejora aerodinámica.



- Puede generar problemas aerodinámicos en función de la cantidad de flujo de aire que pase por la parte inferior del vehículo.
- La unión del triángulo superior con la mangueta, conocida como fulcro, es uno de los reglajes que puede manipularse en función de las características del circuito (curvas rápidas o lentas). La barra pullbar se ancla generalmente a este punto para este sistema no puede ser configurable.

A modo de resumen:

	PUSH	PULL
<b>Centro de gravedad</b>		
<b>Peso</b>		
<b>Acceso a elementos</b>		
<b>Fuerzas sobre la barra</b>		
<b>Modificación fulcro</b>		
<b>Aerodinámica</b>		
<b>Flujo aire inferior</b>		

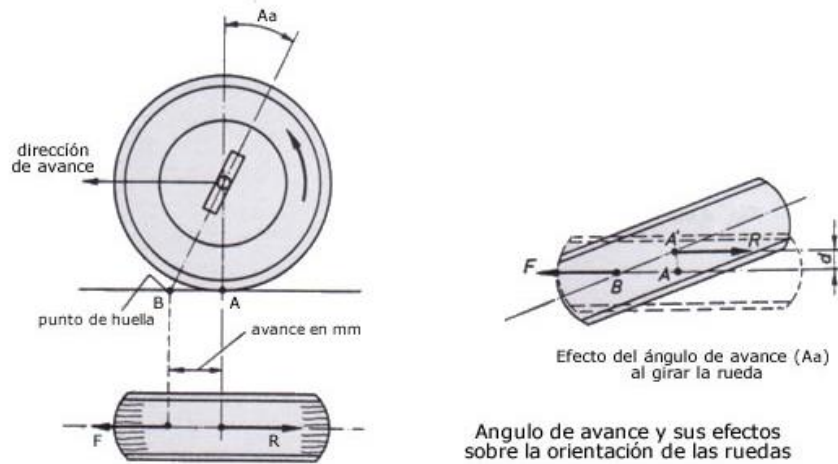
#### 4.4 Cotas de la suspensión

Para el correcto funcionamiento del sistema de suspensión es necesario que las ruedas cumplan con unas determinadas cotas en su posicionamiento. Mediante estas cotas se pretende dotar al sistema de las características más óptimas para su rendimiento.

Las principales cotas de una suspensión son:

##### Avance

Visto desde un plano lateral, es el ángulo formado por el eje que une los pivotes de la mangueta con el eje vertical que pasa por el centro de la rueda. Se dice que el ángulo de avance es positivo cuando la prolongación de este eje corta por delante de la rueda en el sentido de la marcha. El empuje del vehículo se produce en este punto, es decir, más adelantado que el punto que ofrece la resistencia al avance (punto de contacto con el asfalto). La rueda bajo estas circunstancias se mantendrá estable siguiendo la trayectoria de este punto adelantado gracias al par de fuerzas que se generan. Se denomina autocentrado.



**Figura 11 Ángulo de Avance**

Si el ángulo de avance es correcto, le proporcionará al sistema de dirección firmeza y suavidad al mismo tiempo. Si el ángulo de avance fuera muy elevado, la dirección sería muy dura. Si por el contrario es muy bajo, la dirección sería muy blanda y descontrolada, después de la curva el sistema no siente la necesidad de volver a su posición inicial.

La variación de este ángulo de una rueda a otra provoca el vehículo tienda hacia el lado de la rueda que menor ángulo de avance tenga.

Cuando los coches son tracción trasera las ruedas directrices son empujadas desde atrás, lo que provoca una inestabilidad en la dirección. A estos vehículos se les dota de un ángulo de avance entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ . Cuando el coche es tracción delantera esta inestabilidad es mucho menor y se les suele configurar ángulos de avance entre los  $0^\circ$  y  $3^\circ$ .

El gran inconveniente de esta cota se pone de manifiesto en la inestabilidad que genera en una curva a nivel de fuerzas laterales. La rueda no rota alrededor de la vertical al suelo, y tampoco lo hace desde el plano medio del neumático sino desde un plano posicionado más hacia el interior del coche. Esto provoca que el sistema de dirección de la rueda interior a la curva se eleve y el de la rueda exterior descienda. Se genera un balanceo en el coche que favorece el par de vuelco en la curva. Utilizando un avance negativo los efectos son los contrarios, aumenta la estabilidad en la curva provocando un balanceo beneficioso para su estabilidad.

Por lo tanto, el ángulo de avance dota al sistema de dirección de una firmeza en línea recta beneficiosa pero disminuye la estabilidad en curva.

### **Salida o inclinación del pivote principal**

Se conoce como el ángulo que hay entre el pivote de dirección y el eje Z en el plano YZ, es decir, el ángulo entre la vertical del suelo y el pivote de la dirección mirando el neumático frontalmente. Es positivo hacia el interior y negativo hacia el exterior.

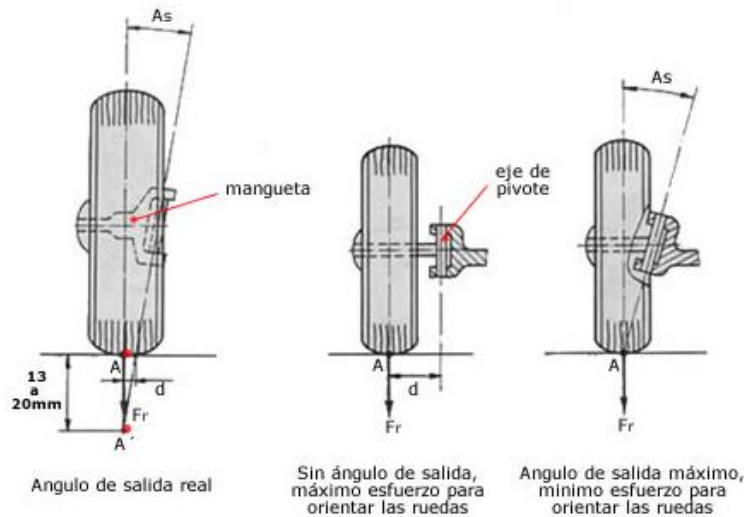


Figura 12 Ángulo de Salida

Ayuda a volver a emprender una trayectoria recta tras una curva y reduce el esfuerzo de giro en la dirección. Al orientar la curva, la rueda tiende a hundirse en el suelo y como no puede, el resultado es un levantamiento del coche oponiéndose a su propio peso. Esto provoca que cuando se suelte el volante el peso tienda a devolver las ruedas a su posición inicial.

El giro de la dirección en parado resulta mucho menos perjudicial para el desgaste del neumático. Provoca que no gire sobre sí mismo el punto de contacto con el suelo sino que rota con menos deslizamiento tanto la rueda interior como la exterior.

### Caída

Es la inclinación de la mangueta de la rueda, es decir, la inclinación del plano medio del neumático respecto a la vertical. Una caída positiva se considera cuando la parte superior de la rueda se inclina hacia fuera del vehículo.

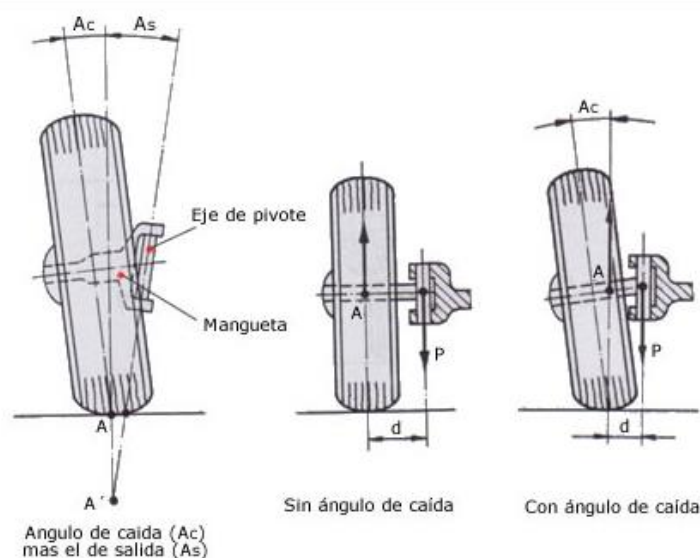


Figura 13 Ángulo de Caída

Suele darse una caída ligeramente positiva para que al cargar el coche se recupere la verticalidad de las ruedas.

La caída negativa también se suele emplear para mejorar la estabilidad en curva. Cuando se emprende un viraje, la rueda exterior carga más peso debido a las fuerzas de inercia. Estas fuerzas generan una caída positiva natural de las ruedas. Ambas caídas se compensarían y mejorarían la superficie de contacto con el pavimento.

Si la caída fuera distinta en una y otra rueda, las fuerzas no se verían compensadas y tendería a desviarse de la trayectoria.

### Angulo comprendido

Es la suma del ángulo de caída y el ángulo de salida. Se entiende este ángulo también como “cotas conjugadas”.

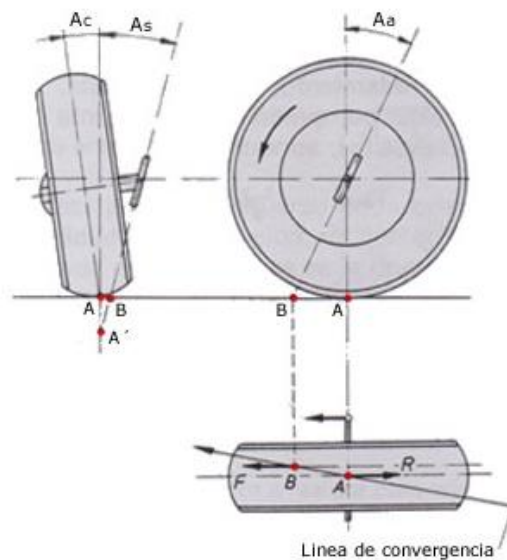


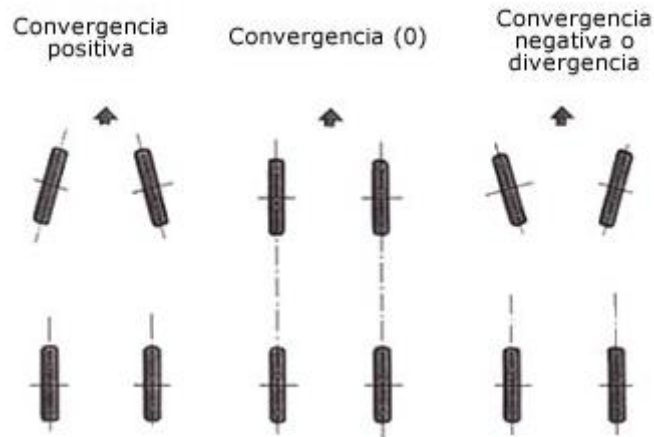
Figura 14 Ángulo comprendido

Gracias al avance, ya se explicó que el empuje se aplicaba en un punto adelantado de la trayectoria. Ahora, gracias a la influencia de la salida y la caída, este punto B se sitúa más cerca del interior del coche. Si el empuje se sitúa en el punto B y la resistencia a la rodadura en el punto A, entonces se genera un par de fuerzas que tienden adoptar a la rueda con unos grados de convergencia. Esta convergencia será mayor cuando más alejado este el punto B de la trayectoria natural de la rueda.

### Convergencia y divergencia

Determina el paralelismo que existe entre las dos ruedas directrices del vehículo vistas desde arriba y en el sentido natural de la marcha.

Cuando las prolongaciones de los planos medios tienden a encontrarse por delante del vehículo, entonces las ruedas son convergentes. Si las prolongaciones de estos planos se cortan por detrás del eje delantero, las ruedas son divergentes.



**Figura 15 Ángulos de convergencia y divergencia**

Al diseñar la dirección se pretende que cuando el vehículo se desplace en condiciones normales, esta convergencia o divergencia esté próxima a cero. La carga que se le instale al coche, el tipo de tracción o las resistencias al avance pueden modificar esta cota.

Si el vehículo es tracción trasera, las ruedas delanteras tienden a abrirse con el empuje. Por lo tanto, debe tener una convergencia inicial para compensarse sobre la marcha. Al contrario con la dirección delantera que tiende a cerrar las ruedas por su parte adelantada, la dirección deberá tener una divergencia inicial.

Influencia del desgaste de los neumáticos.

Todas estas cotas, excepto el avance, tienen ventajas y desventajas en relación al desgaste de los neumáticos:

- Una caída anormal tanto positiva como negativa, crea en el neumático diámetros variables lo que hace que el diámetro más pequeño frote contra el suelo desgastando con gran rapidez los bordes de la banda de rodadura (parte exterior con exceso de caída y parte interior con exagerada caída negativa).
- La salida suele ser fija en casi todos los vehículos modernos, e influye en la caída por lo tanto si la primera se deforma, los desgastes producidos por la salida son los mismos que los que se deben a la caída.
- La convergencia, por poco que varíe, influye mucho en el desgaste de las cubiertas, si ésta es pequeña desgasta la parte interior del neumático derecho y si es superior a la debida desgasta la parte exterior del neumático izquierdo, en vehículos con conducción por la izquierda y lo contrario, en aquellos que ruedan por la derecha. El desgaste debido a esta cota, produce un leve reborde que puede apreciarse, pasando la mano por la banda de rodadura de dentro hacia fuera, y el debido a una divergencia anormal se aprecia pasando la mano en sentido contrario.
- Aunque no sea una cota de la dirección, el inflado del neumático tiene una importancia capital para un buen comportamiento. Un desajuste de este inflado contribuye a un gasto del neumático irregular y un mayor consumo de gasolina

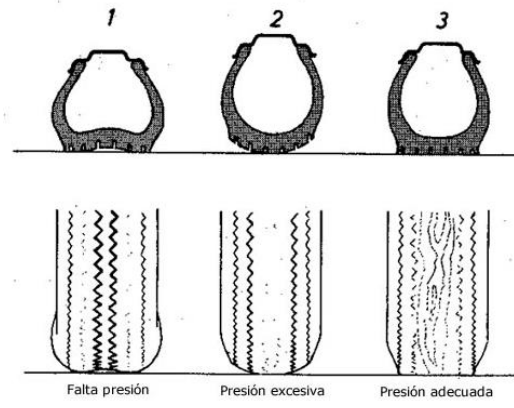


Figura 16 Efecto de la presión de inflado en los neumáticos

## 5 Desarrollo del diseño

Al comienzo de este proyecto todo el equipo se repartió en departamentos y sistemas, de modo que todos los sistemas contarán con miembros válidos para realizar el diseño y cálculos necesarios para desarrollar cada componente.

De tal modo que el equipo quedó dividido en los siguientes sistemas:

- Grupo Motor
- Transmisión
- Suspensión delantera
- Suspensión trasera
- Dirección
- Sistema de frenado
- Cockpit
- Chasis

Cada grupo se encarga de desarrollar el componente que se le ha asignado para crear un elemento funcional, fabricable y en concordancia con el resto de los elementos del vehículo.

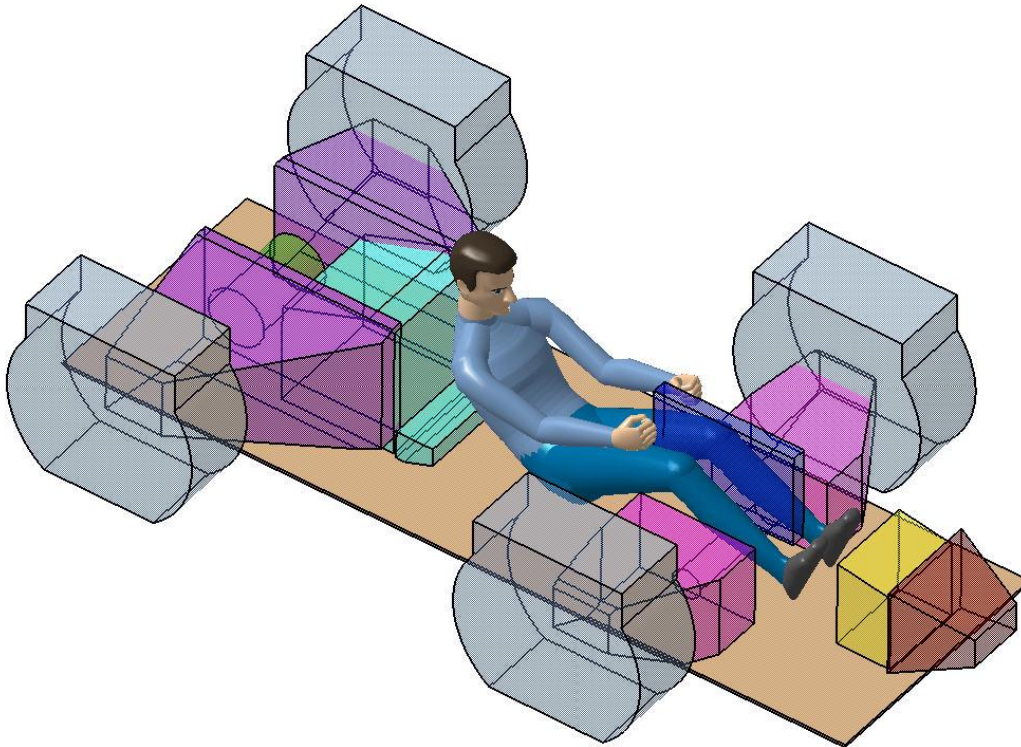
A partir de la asignación de personal a cada sistema, comenzó la toma de decisiones de cada sistema en particular y de todo el equipo en su conjunto. Cada grupo debe desarrollar y sacar adelante su sistema pero sin olvidarse que forma parte de un todo. Por ejemplo, de nada serviría diseñar el chasis más ligero y robusto del mundo, si en el no podemos fijar las suspensiones o si no deja espacio al motor. Todos los integrantes deben estar conectados y al corriente de cada modificación en los componentes del monoplaza para lograr una armonía entre todos los elementos.

### 5.1 Definición de los sistemas del vehículo

Para comenzar con el diseño definimos los parámetros esenciales de todo vehículo respetando las restricciones exigidas por la organización, así pues definimos:

- Batalla → 1600mm
- Vía delantera → 1300mm
- Vía trasera → 1300mm
- Altura ejes → 260mm

A continuación incluimos unos volúmenes toscos a modo de reserva de espacio para cada sistema:



**Figura 17 Reservas de espacio para cada sistema**

En la imagen anterior distinguimos espacio de reserva para cada sistema en función del color:

- Ruedas → Gris
- Grupo Motor y depósito → Cian
 

El depósito se coloca debajo del asiento del piloto, para que el peso del carburante contribuya a disminuir el centro de gravedad del conjunto.

Contamos con un motor cuatro tiempos, de cuatro cilindros, y con una cilindrada de 600cc. El motor estará anclado por 3 puntos al chasis.
- Transmisión → Verde
 

Este sistema logrará transmitir la potencia generada por el motor hasta las ruedas.
- Suspensión delantera → Rosa
 

La suspensión está compuesta por dobles triángulos, anclados al chasis.
- Suspensión trasera → Morado
 

Definida igual que la suspensión delantera, se compone de dobles triángulos, unidos al chasis es sus extremos.
- Dirección → Azul
 

La dirección se coloca entre las piernas del piloto.
- Sistema de frenado → Amarillo



Está compuesto por los pedales y las bombas de freno. Irá colocado en la parte delantera del vehículo a continuación de las piernas del conductor y serán regulables en posición para adaptarse a los distintos pilotos.

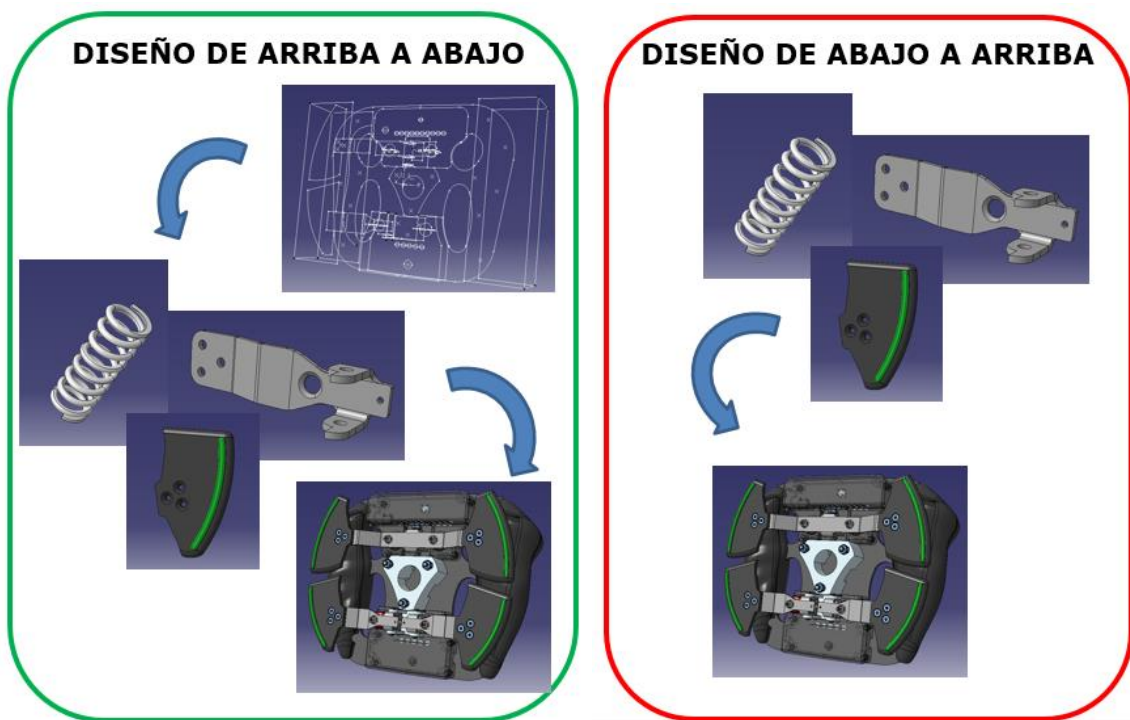
- Atenuador de impacto (perteneciente al equipo de chasis) → Granate

Se coloca en la parte frontal del vehículo, delante del chasis y anclado a él. Tiene la función de absorber la mayor cantidad de energía, en caso de colisión para que el chasis se deforme lo mínimo posible.

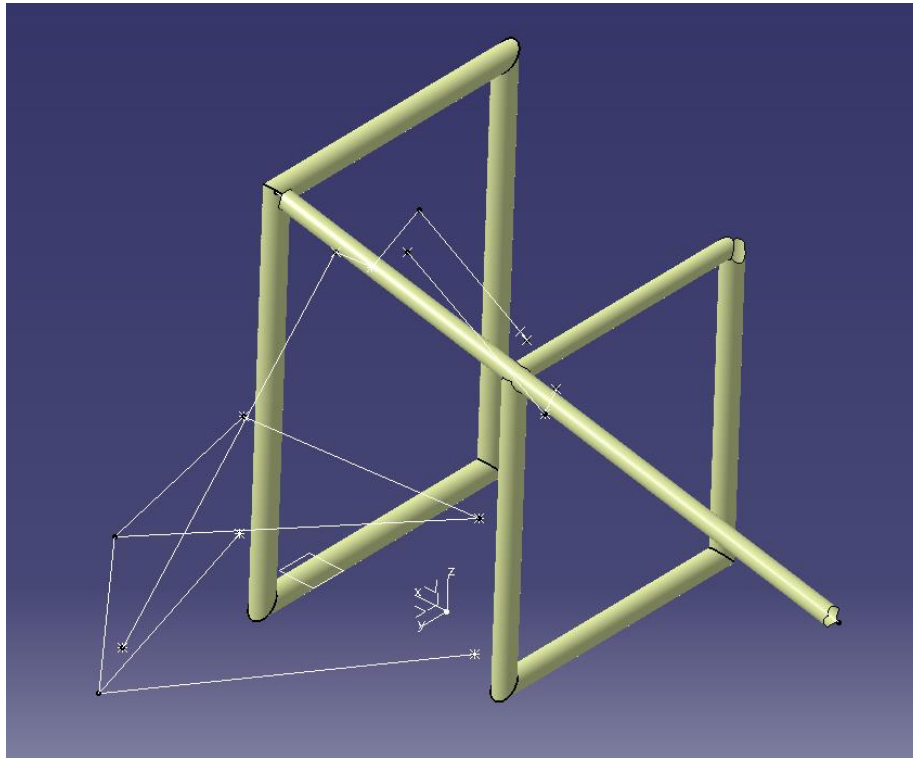
## 5.2 Definición de la Suspensión.

Para el diseño de la suspensión a través de Catia V5 se emplea un diseño “de arriba abajo”. Es decir, se genera un diseño preliminar y muy básico de lo que va a ser el conjunto completo, para luego coger esa información y crear las piezas una a una.

El diseño “de abajo a arriba” promueve el diseño pieza a pieza para luego juntarlas todas y crear el sistema conjunto.



El diseño preliminar de esta suspensión antes de entrar al diseño en detalle es el siguiente:



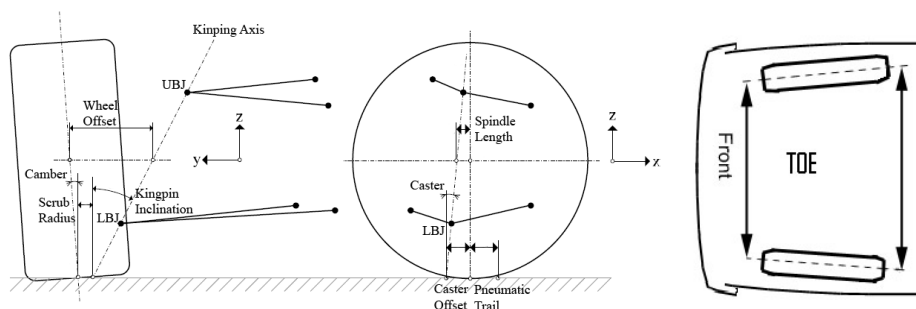
**Figura 18** Diseño esquemático de la suspensión delantera

Las razones por las que se usan estos esquemas son:

- Permiten ver reservas de espacio.
- Pueden trabajar varias personas sobre el conjunto.
- Representación exclusiva de partes funcionales.
- Actualización automática de todo el conjunto al cambiar una sola de las variables.

Se explica a continuación los pasos que se han seguido para llegar a este diseño esquemático.

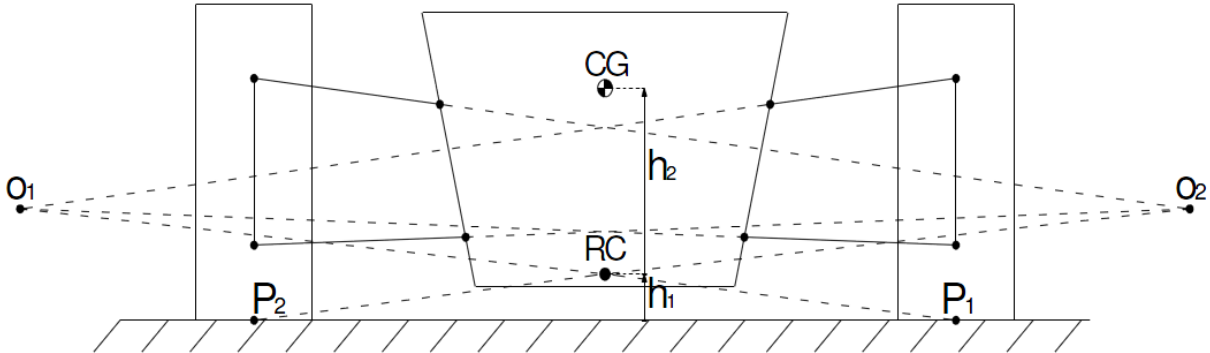
Para comenzar con el diseño de la suspensión, lo más importante es tener clara la geometría del propio sistema, es decir, establecer cuáles serán las cotas anteriormente explicadas. Como se ha visto, estos ángulos se toman viendo el vehículo desde una posición frontal, lateral y cenital.



**Figura 19** Vista frontal, lateral y cenital.

- **Definición frontal:**

Para dar una primera aproximación sobre lo rígida o blanda que tiene que ser la suspensión, entran en juego dos parámetros fundamentales como son los polos de rotación y el Roll-Center.



**Figura 20 Teoría para la definición frontal de la suspensión delantera (reposo)**

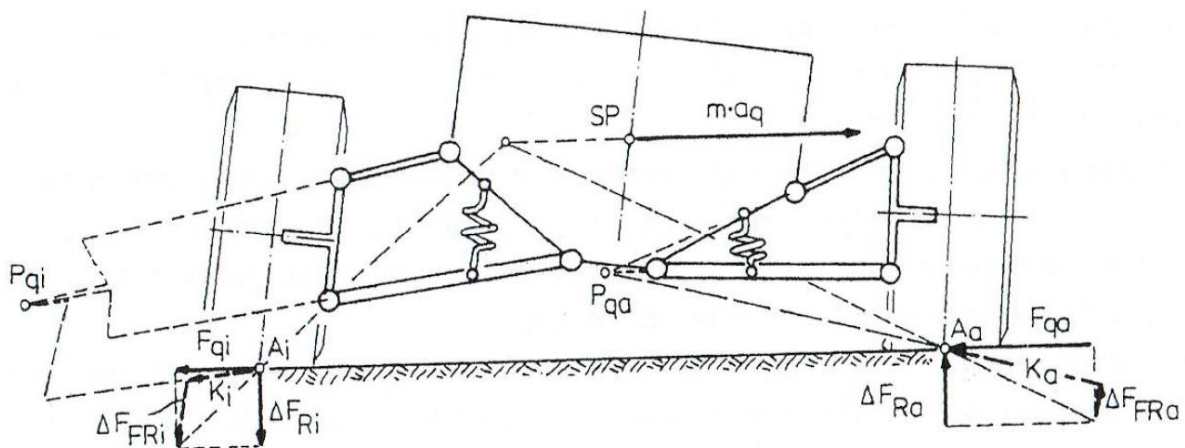
Los Polos de Rotación de cada brazo de suspensión ( $O_1$  y  $O_2$ ) son los puntos de intersección del eje instantáneo de rotación de cada brazo de suspensión con el plano frontal que pasa por el centro de las ruedas.

El Roll-Center (RC) es el punto intersección del eje de Rotación del Chasis con respecto a la Suspensión y el Plano que pasa por el Centro de las Ruedas.

El Roll-Center (RC) se obtiene con la intersección de las rectas que unen los puntos de Contacto ( $P_1$  y  $P_2$ ) y los Polos ( $O_1$  y  $O_2$ )

Cuanto mayor es la distancia ( $h_2$ ) entre el Centro de Gravedad (CG) y el Roll-Center (RC), mayor es el momento inducido a la suspensión en curva. Esto implica aumentar la rigidez del sistema antiroll, haciendo la suspensión menos independiente (lado izquierdo-lado derecho).

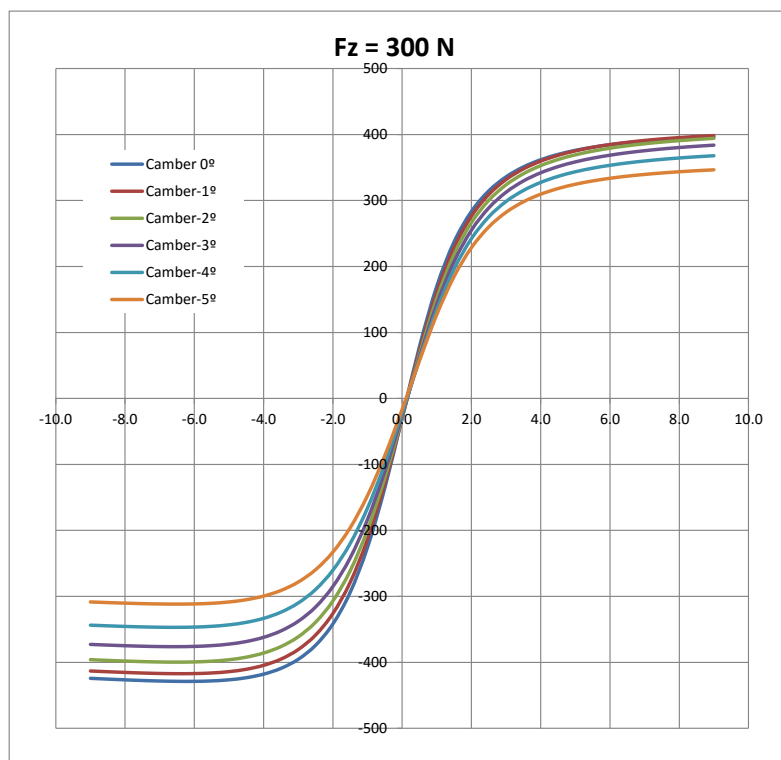
Para cuantificar mediante geometría las fuerzas que son soportadas por los elementos rígidos y las fuerzas soportadas por elementos elásticos (elementos de la suspensión) se hace el siguiente estudio basado en la imagen de un vehículo tomando una curva a izquierda y mirado desde atrás.



**Figura 21 Teoría de la definición frontal de la suspensión (en curva)**

- Con alta aceleración lateral la fuerza lateral interior ( $F_{qi}$ ) es más baja que la fuerza lateral exterior ( $F_{qa}$ ).
- La transferencia de carga interior ( $\Delta F_{Ri}$ ) y exterior son iguales ( $\Delta F_{Ra}$ ).
- La Fuerza Total sobre el neumático se puede descomponer en una componente ( $K_i$ ,  $K_a$ ) en dirección de los polos ( $P_{qi}$ ,  $P_{qa}$ ) y una componente en dirección al movimiento del punto de contacto ( $\Delta F_{FRi}$ ,  $\Delta F_{FRa}$ )
- Las fuerzas  $K_i$ ,  $K_a$  son soportadas por el chasis directamente y las fuerzas  $\Delta F_{FRi}$ ,  $\Delta F_{FRa}$  son soportadas por los elementos elásticos de la suspensión (muelles).
- En el ejemplo el incremento  $\Delta F_{FRa}$  es considerablemente menor que el decremento  $\Delta F_{FRi}$ , esto produce que el hundimiento de la suspensión exterior sea menor que la extensión de la interior. Esto produce una elevación indeseable del chasis llamada "Jacked Up".
- Para evitar el "Jacked Up" es necesario que  $\Delta F_{FRi}$ ,  $\Delta F_{FRa}$  sea la más similares posible.
- Esto se consigue reduciendo el Ángulo entre la dirección marcada por el Polo-Punto de Contacto y el Suelo.

Otra de las variables a tener en cuenta en el diseño de la vista frontal es el ángulo de caída o camber. Las fuerzas laterales de los neumáticos en curva dependen en gran medida de este ángulo. Es importante que al girar el chasis, la suspensión contrarreste el giro para mantener el camber deseado. La variación del camber tiene que ser monótona y progresiva.



**Figura 22 Comportamiento del camber de la rueda Michelin**

Vista la gráfica del neumático Michelin 16/53-13 S6B, nos marcamos como objetivo un camber entre  $-1^\circ$  y  $0^\circ$ .

Finalmente la suspensión delantera del monoplaza tiene una geometría frontal de la siguiente forma:

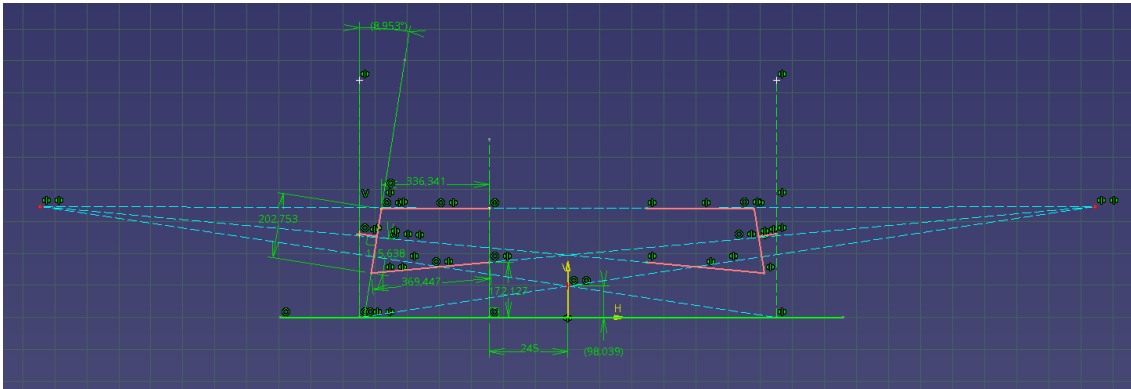


Figura 23 Definición frontal definitiva de la suspensión

- **Definición lateral:**

La definición lateral de la geometría se hace a través de un plano que pasa por el centro de rueda. Es importante entender tres parámetros fundamentales:

- Anti-Dive: Hundimiento de la suspensión delantera en frenada.
- Anti-lift: Elevación de la suspensión trasera en frenada.
- Anti-Squat: Hundimiento de la suspensión trasera en tracción.

El comportamiento Anti-Dive y Anti-Lift está definido no solo por la geometría de la suspensión, sino también por el reparto de frenada. La Fuerza Total sobre el neumático se puede descomponer en una componente ( $F_k$ ) en dirección de los polos y una componente en dirección vertical ( $\Delta F_{FA}$ ).  $F_k$  es soportada por la estructura de la suspensión y  $\Delta F_{FA}$  por los elementos elásticos de la suspensión.

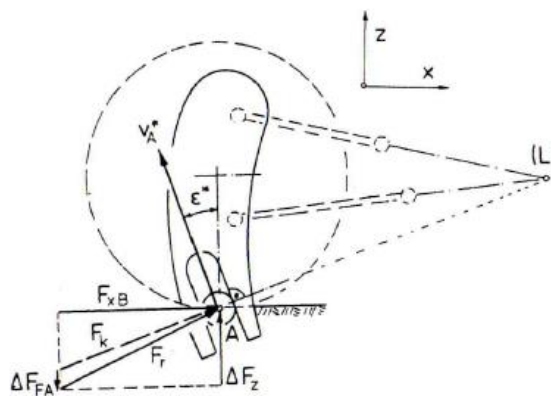


Figura 24 Reparto de fuerzas entre elementos elásticos y rígidos

Existe una geometría de suspensión que hace que  $\Delta F_{FA}$  sea cero. Esta es 100% “Anti” pero conlleva diferentes inconvenientes:

- Es subjetivamente extraño para el piloto.
- La geometría del sistema de dirección debería volverse muy complejo al generarse esfuerzos muy grandes que tienden a cambiar el ángulo de avance.
- En la suspensión trasera podrían darse problemas de sobreviraje al elevar tanto su punto de anclaje.

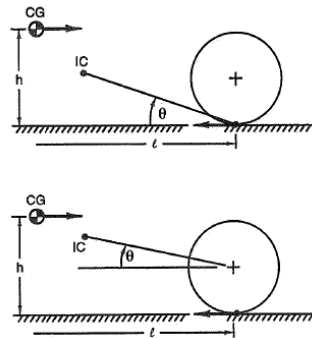


Figura 25 Esquema para el cálculo del Anti-Dive y Anti-Lift.

$$Anti - Dive = \frac{\tan(\theta_{ad})}{h/(l \cdot p)} \cdot 100\% \quad Anti - Lift = \frac{\tan(\theta_{al})}{h/(l \cdot (1 - p))} \cdot 100\%$$

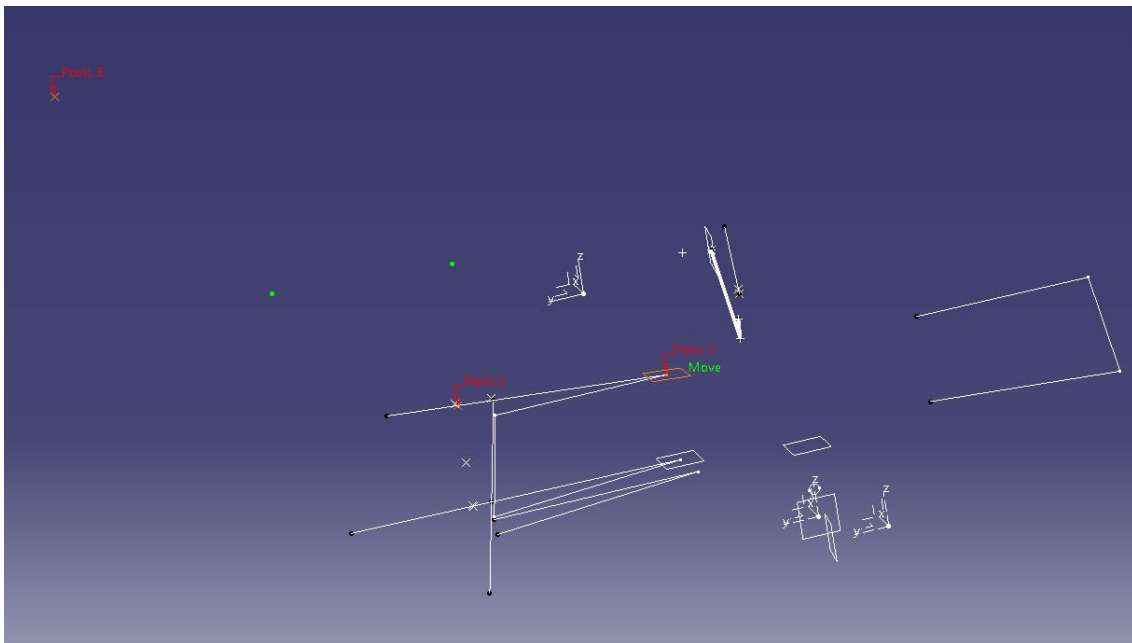
El objetivo del equipo a la hora de concebir la suspensión ha sido la de obtener un porcentaje de Anti-Dive y Anti-Lift del 30% en el supuesto caso de tener un reparto de frenada de 0,84, una altura del centro de gravedad de 275mm y un reparto de pesos en estático situado en el centro de la batalla.

En cuanto a la definición frontal y lateral de la suspensión cabe recalcar dos puntos fundamentales:

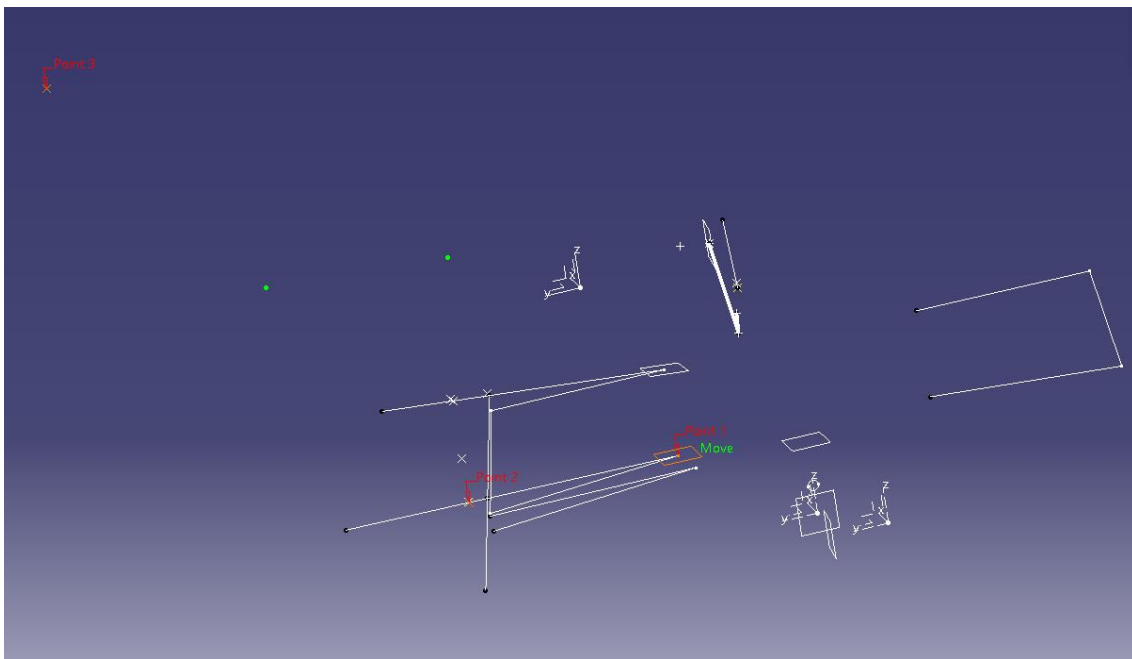
- La suspensión del monoplaza no es una suspensión plana sino espacial. Esto quiere decir que cada uno de los puntos geométricos de la suspensión están repartidos en el espacio tomando referencias orientativas sobre los planos frontales y laterales pero en la práctica no quiere decir que todos los valores se cumplan. En un plano frontal o lateral los angulos pueden ser unos dado que lo que se ve es la proyección de la geometría, y en la realidad pueden ser otros debido a que no es una suspensión plana y los puntos pueden salirse de estos planos teóricos.
- A pesar de la teoría, se le ha dado prioridad a los cálculos elaborados mediante modelado. La teoría facilita una primera aproximación a los valores que se desean para el vehículo pero luego todo es afinado en función de los modelos.

Estas dos razones explican la diferencia que existe entre la teoría expuesta y el 3D definitivo.

- **Creación de planos en los que situar los triángulos:**



**Figura 26 Creación del plano para triángulo superior**



**Figura 27 Creación del plano para triángulo inferior**

Una vez que se tiene la vista frontal y lateral, podemos apoyarnos en los puntos obtenidos para generar los planos en los que se van a construir los triángulos superiores e inferiores.

- Point 1: Punto a la altura del anclaje con el chasis.
- Point 2: Punto a la altura del anclaje con la mangueta.
- Point 3: Anti-Center proveniente de la vista lateral. Este punto va a dotar de la inclinación necesaria al plano de los triángulos.

- Creación del sketch del triángulo superior con los puntos de anclaje del chasis y el punto creado a 4º de avance

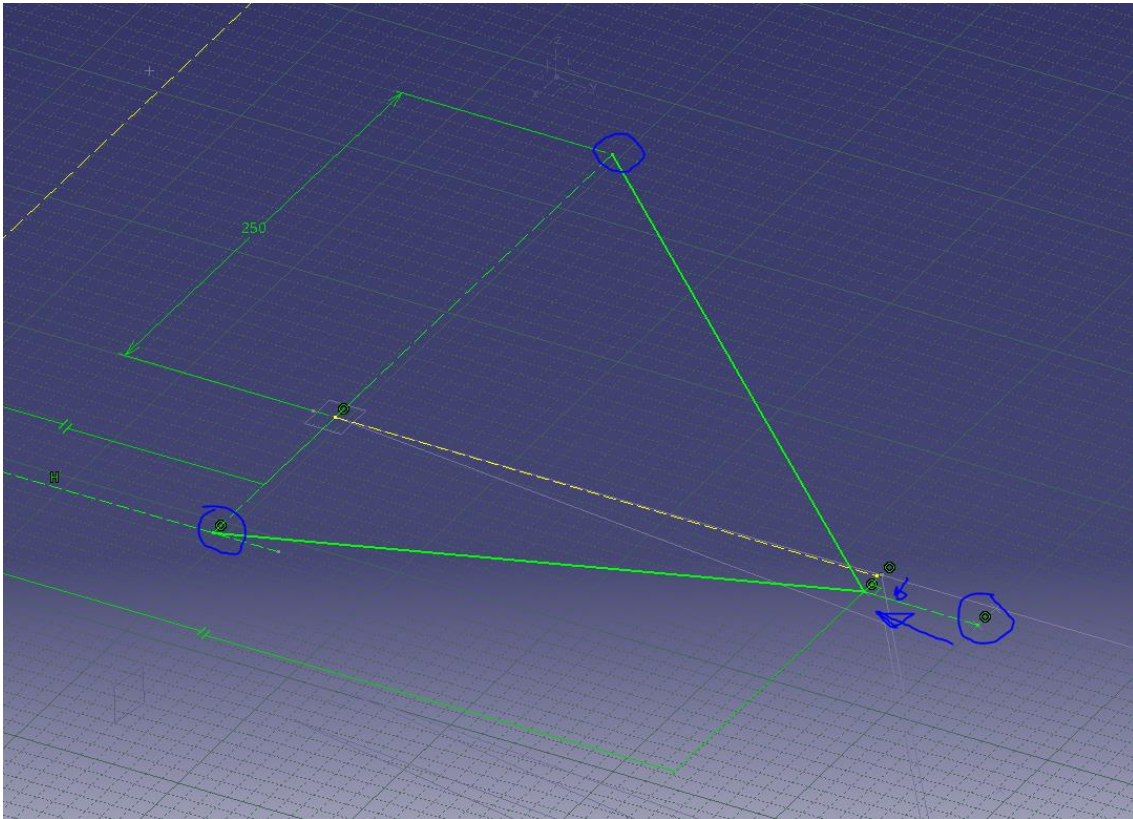


Figura 28 Creación del esquema para el triángulo superior

Una vez creado el plano, dibujamos sobre él las líneas que representan el triángulo superior.

Para ello se emplean los dos puntos de anclaje del chasis. Estos puntos del chasis son fijos ya que el chasis se soldó con anterioridad a la concepción de la suspensión.

El último punto es el obtenido en el sketch de la vista lateral. Es el punto que genera 4º de avance y 10mm de brazo de avance. Se toma este punto para el anclaje definitivo a la mangueta.



- Creación del sketch del triángulo inferior con los puntos de anclaje del chasis y el punto creado a 4º de avance

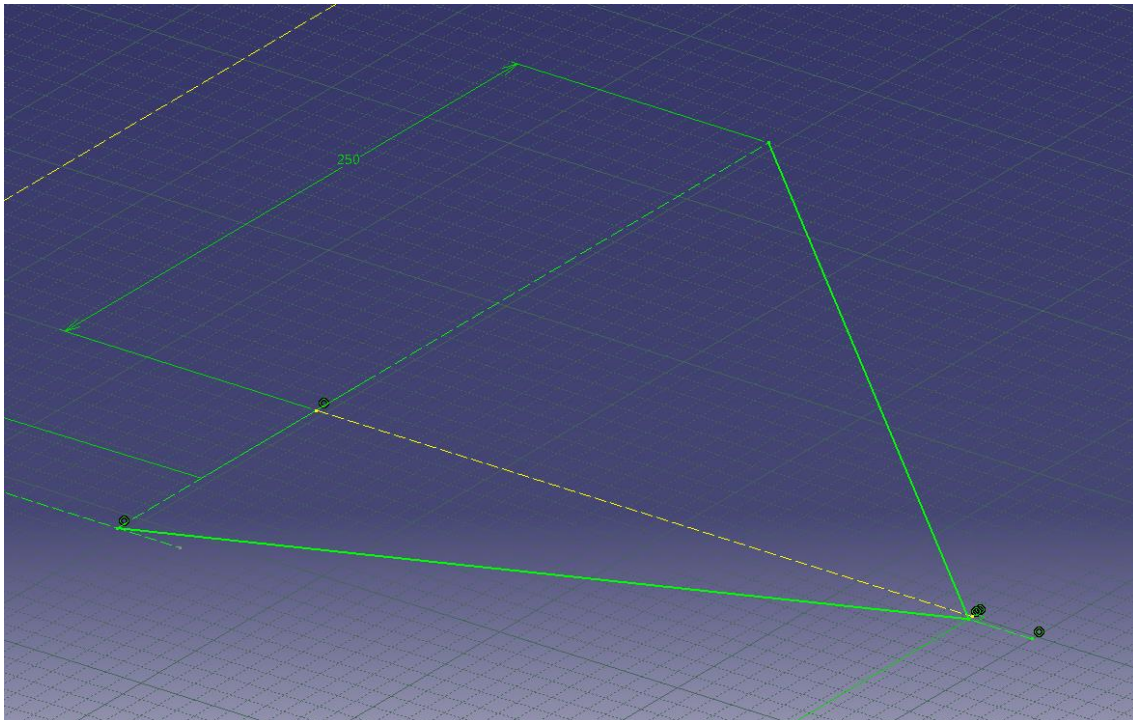


Figura 29 Creación del esquema para triángulo inferior

Se genera la misma situación que para el triángulo superior.

Se toman los puntos de anclaje correspondientes a las barras del chasis y el punto generado en el sketch lateral para cumplir con los 4º de avance y los 10mm de brazo de avance.

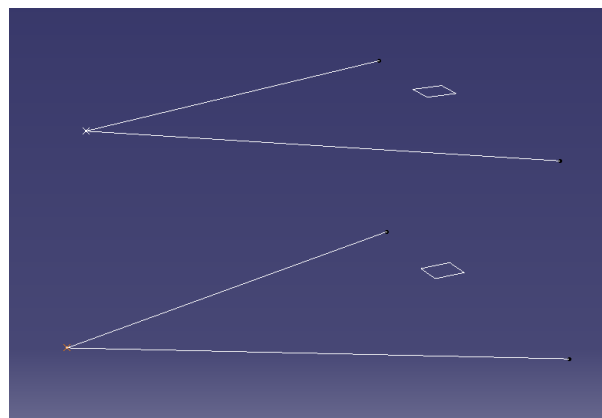


Figura 30 Representación definitiva de los triángulos de la suspensión

Ya se han generado por tanto los dos triángulos de la suspensión delantera. Gracias a dos vistas planas (frontal y lateral) y la combinación de los puntos de ambas vistas se ha podido generar una geometría en el espacio con las características deseadas.

- Creamos una referencia para la mangueta:

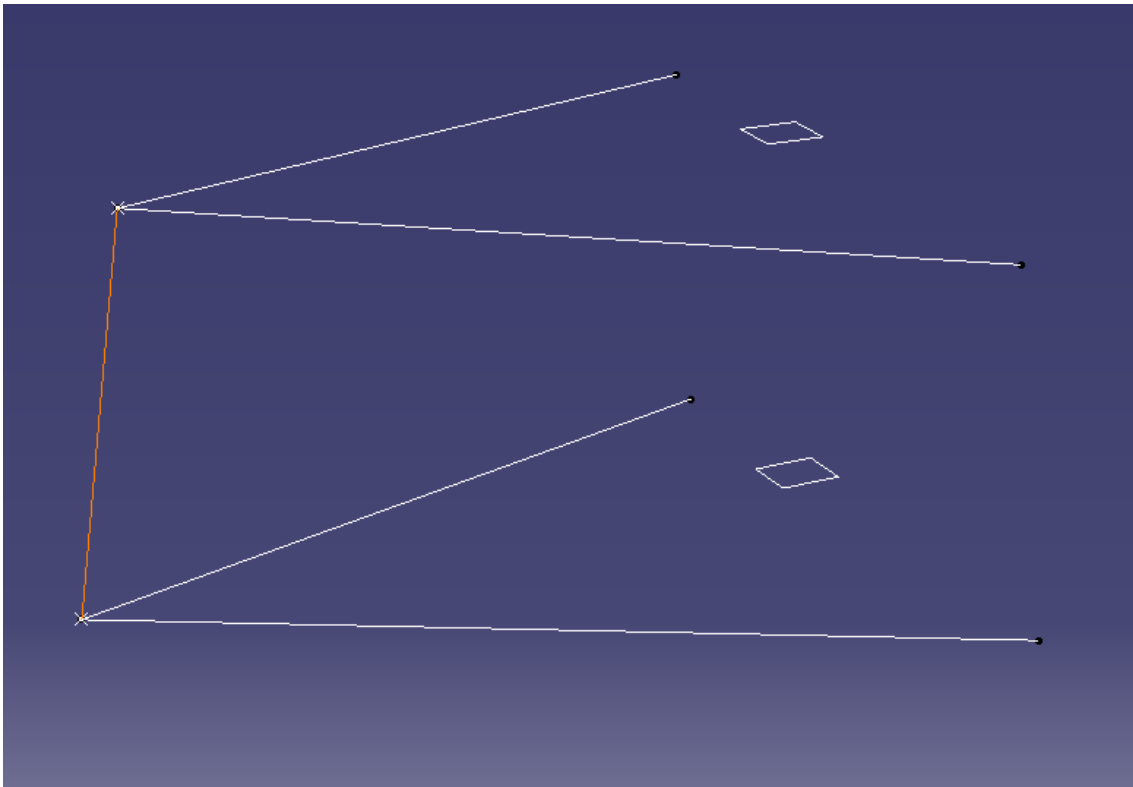


Figura 31 Mangueta esquematizada

Esta es la referencia que posteriormente utilizaremos como dato de entrada para dibujar en detalle la mangueta.

- Creación de un punto en el que anclar uno de los extremos de la pushbar.

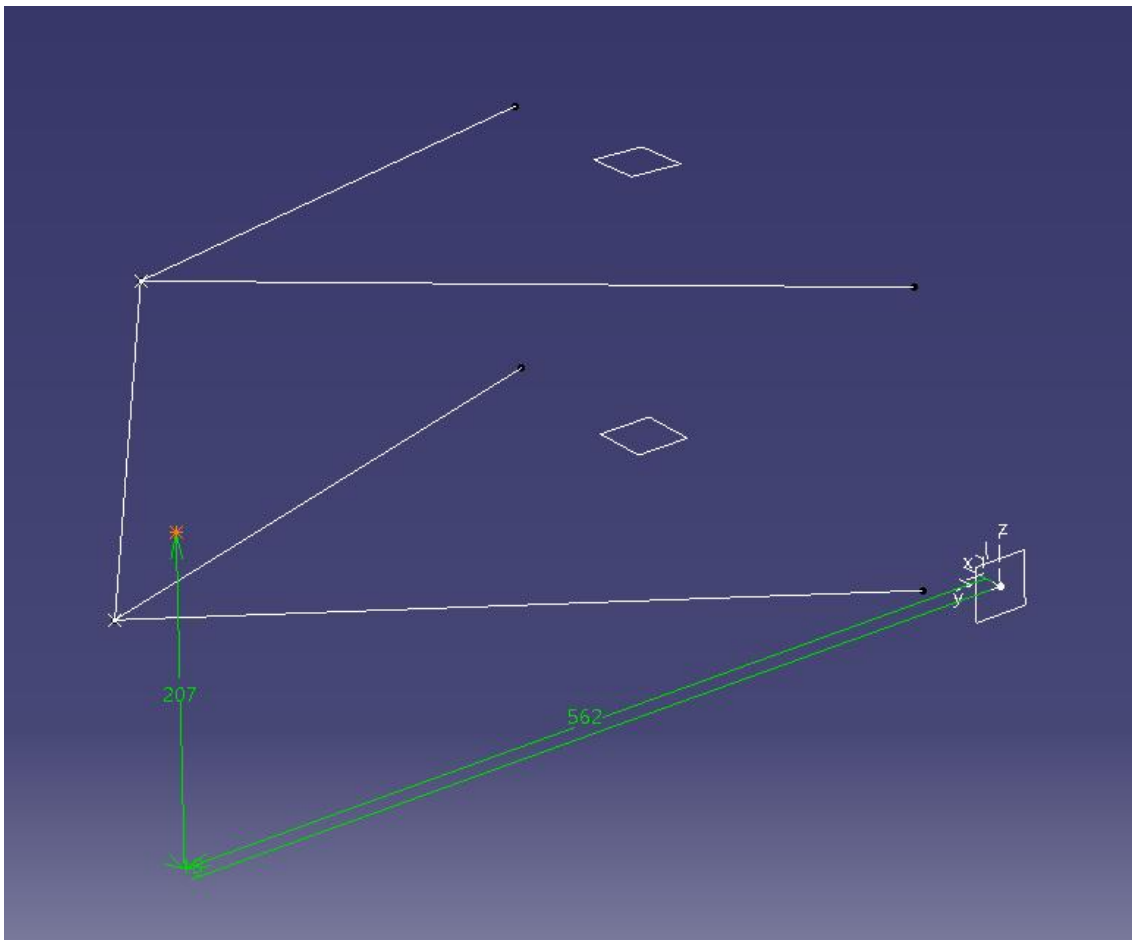


Figura 32 Creación del punto de anclaje inferior para la pushbar

En un principio se pensó que el punto de anclaje de la pushbar se situaría en la propia mangueta. Más adelante, en el apartado de diseño en detalle, se explica cómo se deshecha esta idea por cuestiones de espacio. Finalmente se sitúa el apoyo de la pusbar en la unión de las barras del triángulo inferior.

Este punto se establece dando coordenadas y desplazándolo en función de que los cálculos sean buenos y el diseño sea posible.

- Creación de un punto en el espacio correspondiente a la bieleta (intersección del eje de giro de la bieleta con el plano medio de ésta).

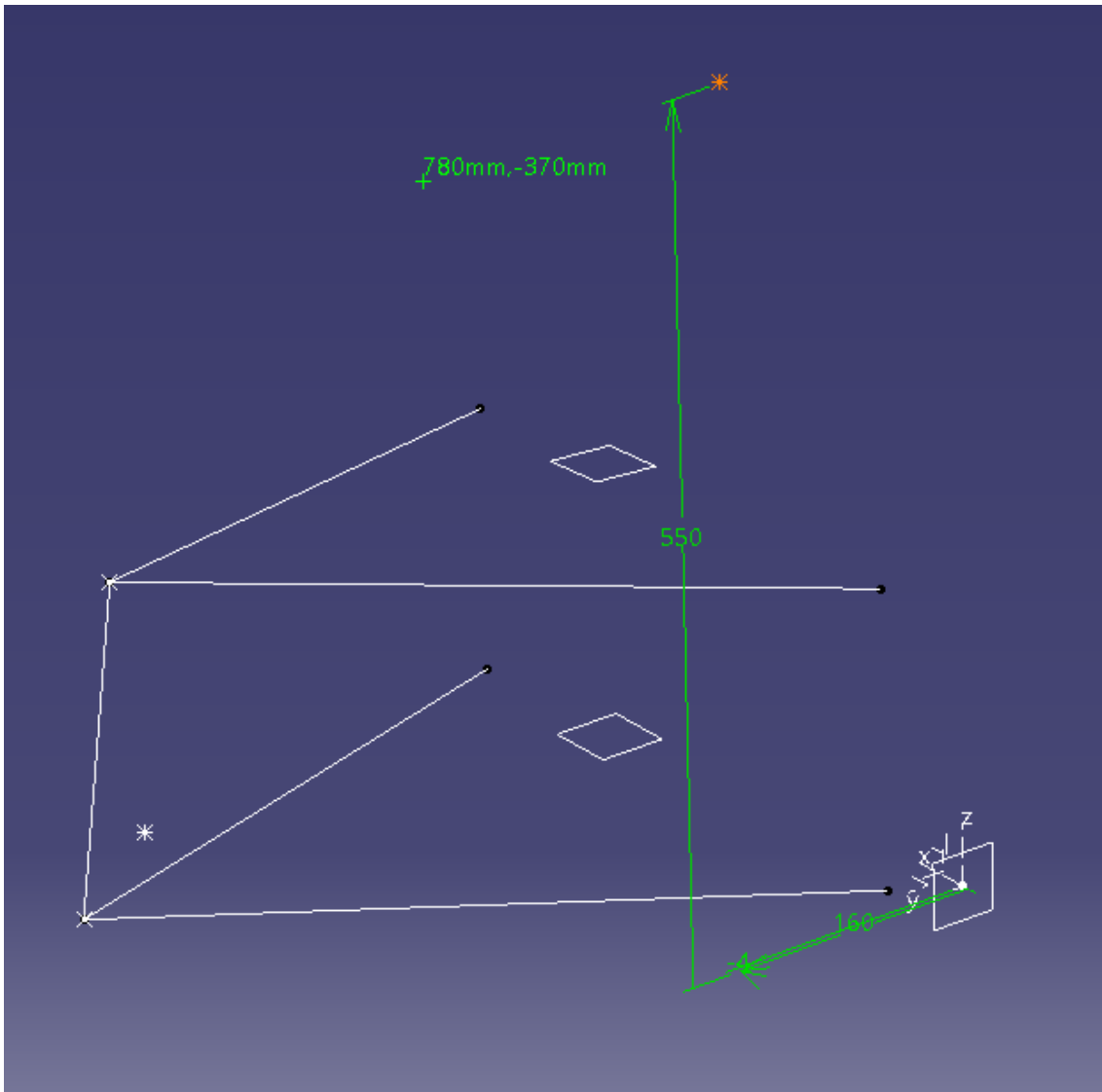


Figura 33 Creación de un punto correspondiente al centro de la bieleta

Este es uno de los puntos fundamentales a la hora de hacer los cálculos mediante modelado. Nos interesa que sea un punto fácil de cambiar sin guardar relación con ningún otro elemento por la cantidad de cambios que sufre su posición a lo largo del desarrollo de la suspensión. Para dar una primera aproximación de ese punto se sitúa cerca de una de las barras del chasis donde se va a soldar. A medida que el diseño en detalle toma forma y los cálculos se optimizan, este punto se va acercando más a su posición final.

- Creación de un punto que simboliza el punto de unión entre el amortiguador y el chasis.

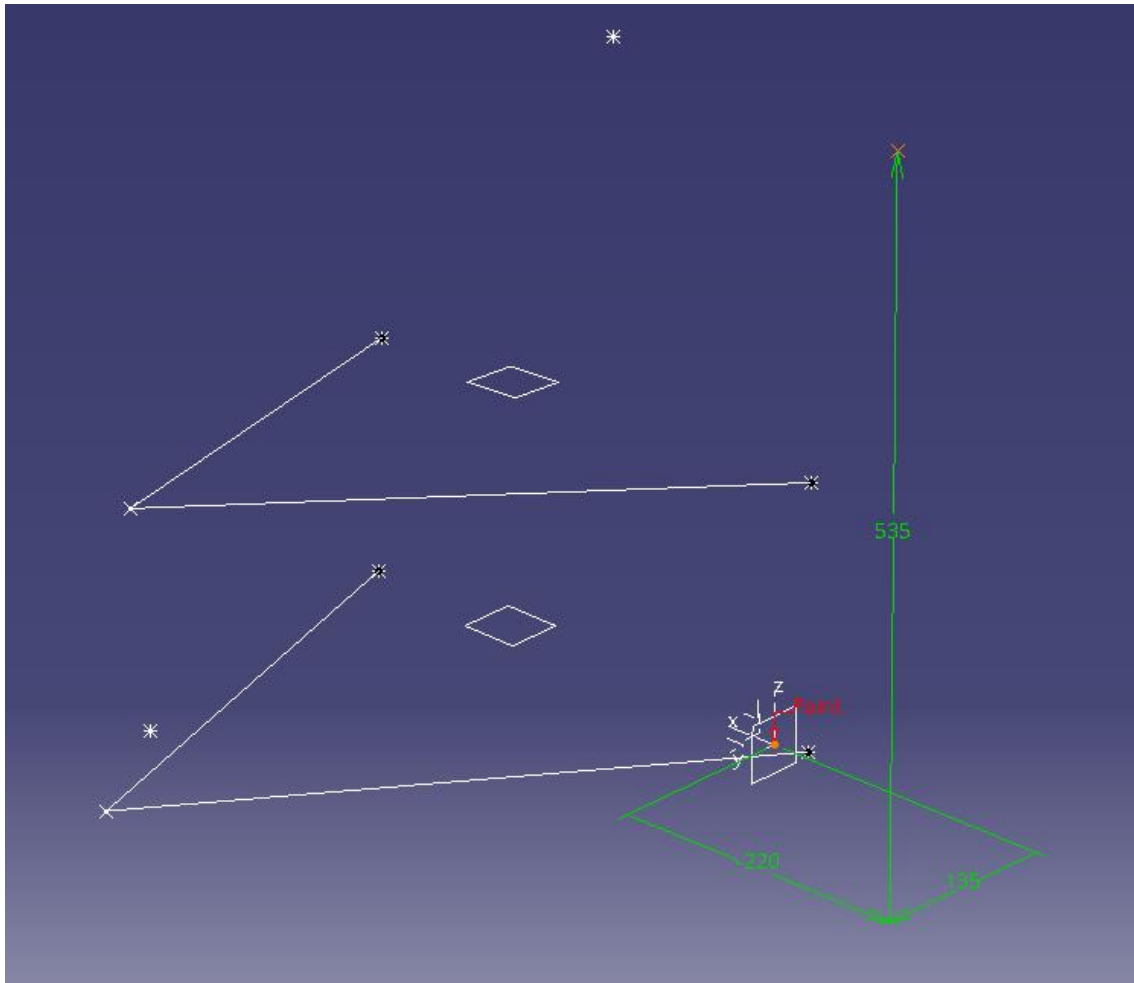
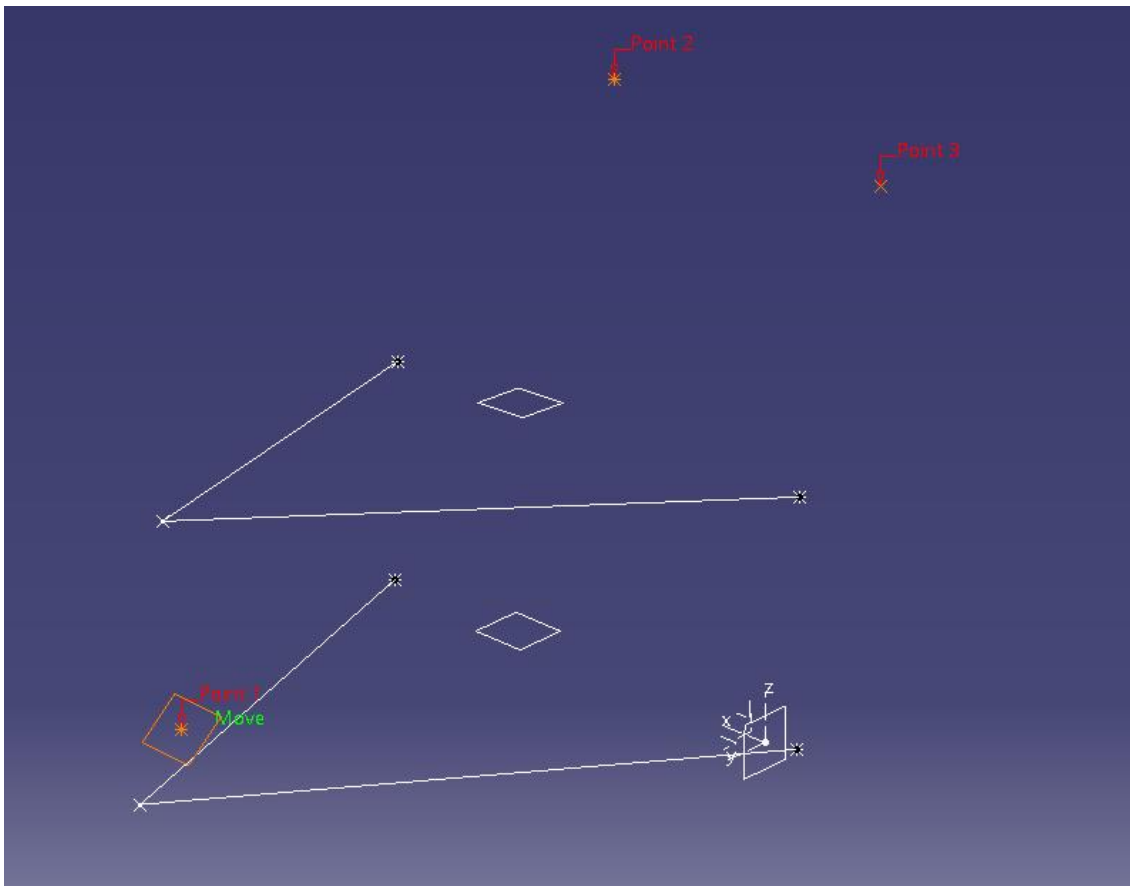


Figura 34 Creación del punto de anclaje al chasis

De la misma forma que el punto representativo de la bieleta, este punto se establece cerca de la barra del chasis a la que va a anclarse pero no se establece de forma definitiva. En función del diseño en detalle, de la longitud de los amortiguadores comerciales, de la posición definitiva de la bieleta...etc, este punto se situará en un punto de la barra del chasis o en otro. La cota que variará será la cota "y" puesto que el anclaje del amortiguador se sitúa en una de las barras transversales del chasis.

- **Creación del plano en el que va rotar la bieleta.**

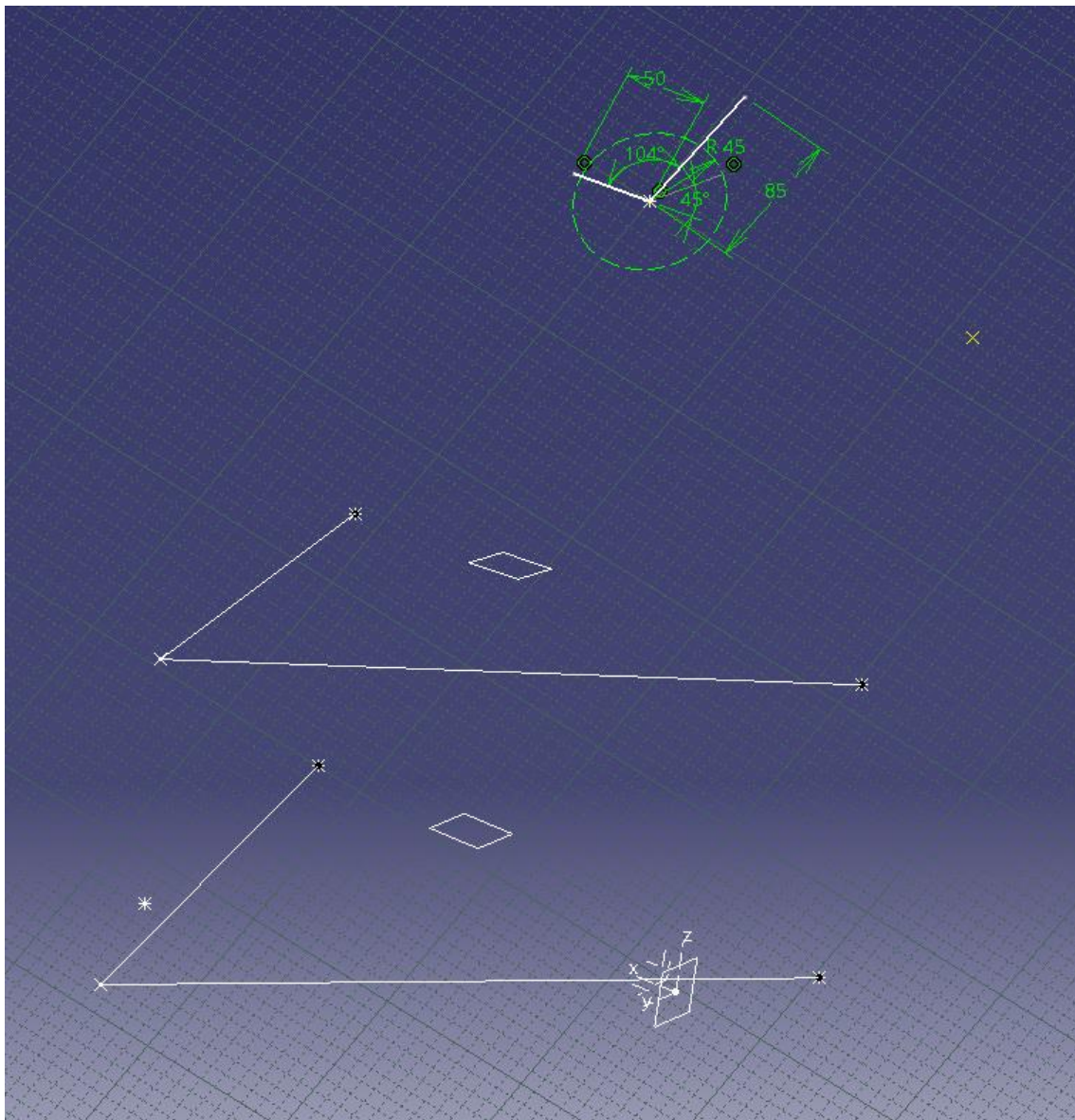


**Figura 35 Creación del plano de la bieleta**

La bieleta tiene tres sistemas anclados: la pushbar, el sistema antiroll y el amortiguador. La pushbar y el amortiguador van directamente anclados a la bieleta, sin embargo, la barra antiroll se ancla a la bieleta a través de una barra intermedia llamada "link". Por esta razón, los extremos de la pushbar y del amortiguador que van anclados a la bieleta se ven obligados a girar en un mismo plano. Este plano puede entonces generarse con 3 puntos:

- Point 1: Extremo de la pushbar.
- Point 2: Centro de rotación de la bieleta.
- Point 3: Extremo del amortiguador.

- **Representación simbólica de los bieletes de la bieleta a través de dos simples brazos.**



**Figura 36 Representación esquemática de la bieleta**

Una vez establecido el plano de la bieleta, se pueden dibujar unos bieletes de forma simbólica que luego nos ayuden con el diseño en detalle y que además genere puntos para que el equipo de cálculo pueda ir trabajando. Las longitudes de los bieletes y los ángulos entre ellos son variables muy importantes para determinar el Motion Ratio de la suspensión. Se estableció como objetivo obtener un motion ratio de 1. Se entiende por Motion Ratio la relación que existe entre el desplazamiento vertical de la rueda y el desplazamiento de compresión o extensión generado en el amortiguador. La pushbar va a tener mucha inclinación luego cuando la rueda suba o baje, se va a generar una desmultiplicación de movimientos y la pushbar no va a desplazarse en el giro de la bieleta tanto como se ha desplazado la rueda en el recorrido vertical. Por lo tanto, si queremos acercarnos a un Motion Ratio de 1, el bielete del amortiguador tiene que ser considerablemente mas largo que el bielete de la pushbar. Se genera de esta forma una amplificación del movimiento de la pushbar en el amortiguador.

- Representación de la mangueta a través de la línea que une sus dos puntos de anclaje.

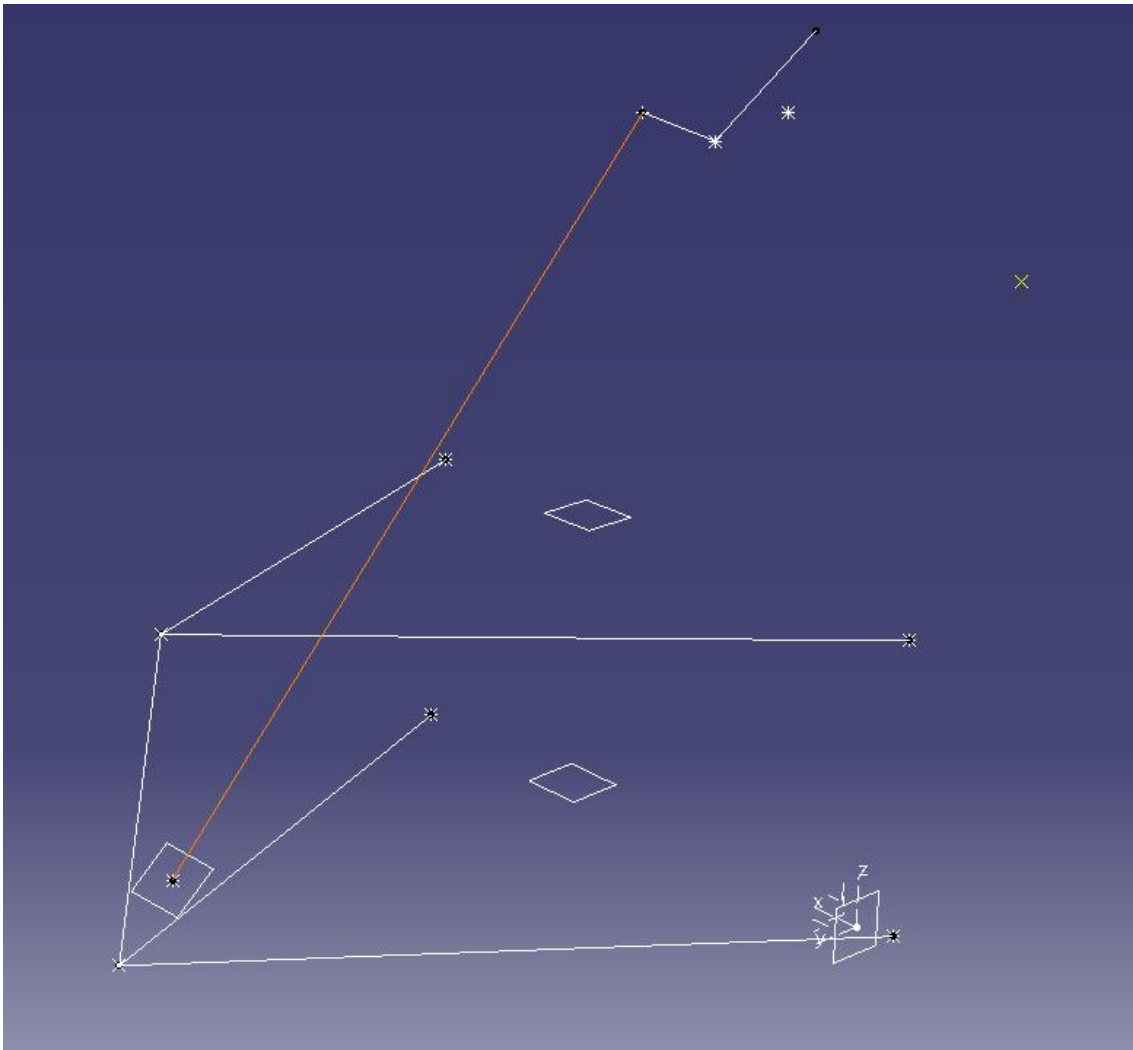


Figura 37 Representación de la pushbar

Una vez que se tiene el punto de anclaje inferior y superior de la pushbar, podemos generar ya una geometría que nos servirá de apoyo para luego generar el diseño en detalle.



- Representación del amortiguador a través de la línea que une sus dos puntos de anclaje.

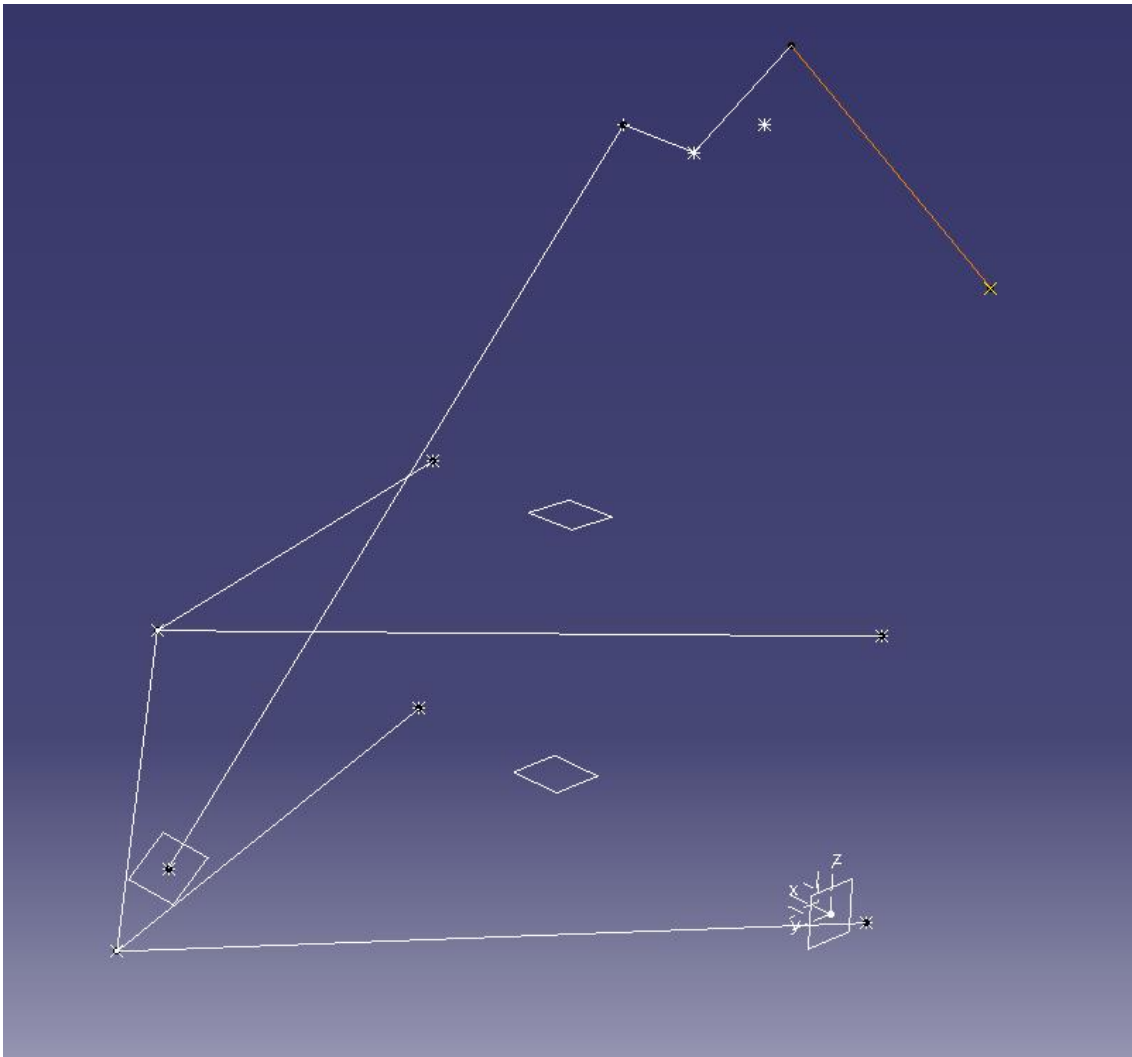


Figura 38 Representación del amortiguador

Al igual que ocurre con la pushbar, al haber dibujado esquemáticamente el funcionamiento de la bieleta tenemos ya los dos puntos de anclaje del amortiguador.

- Creación del punto real de anclaje del amortiguador marcado por las 8 pulgadas de longitud.

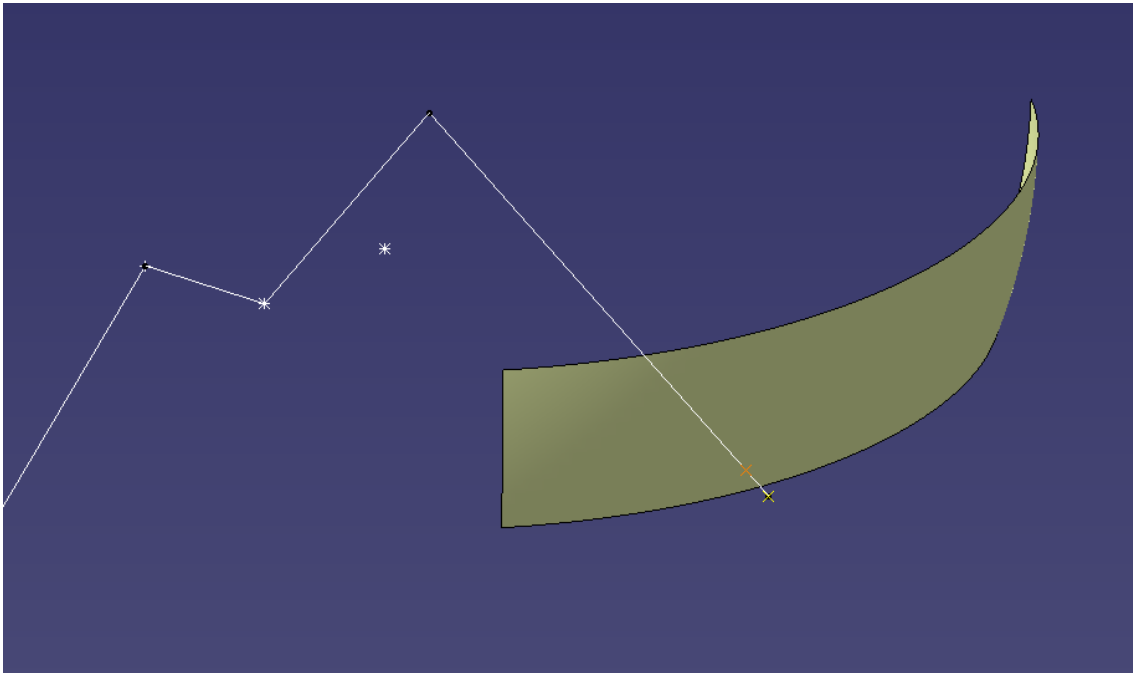


Figura 39 Longitud del amortiguador

Una vez que avanzamos con la compra de comerciales, se supo que el amortiguador tenía una longitud total entre anclaje y anclaje de 8 pulgadas.

En la imagen se observa una superficie que es el lugar geométrico de todos los puntos que se encuentran a 8 pulgadas del anclaje de amortiguador a la bieleta.

El punto naranja simboliza el punto de anclaje del amortiguador y el punto amarillo el corte entre la prolongación del amortiguador y el chasis. Por lo tanto, la distancia entre el punto amarillo y el naranja marcan cómo tiene que ser punto de anclaje soldado al chasis.

- Creación del plano en el que establecer la posición de reposo del link del antiroll.

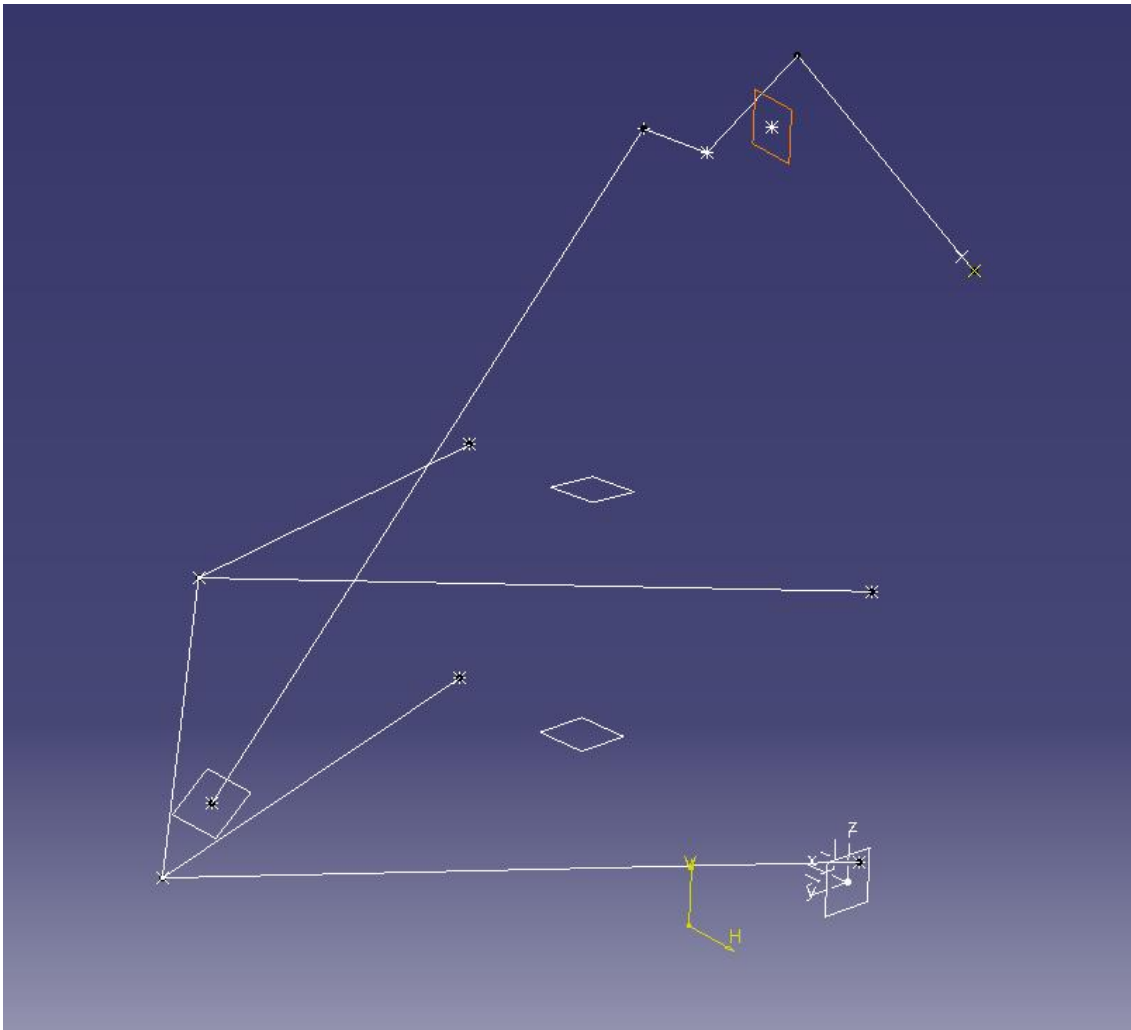
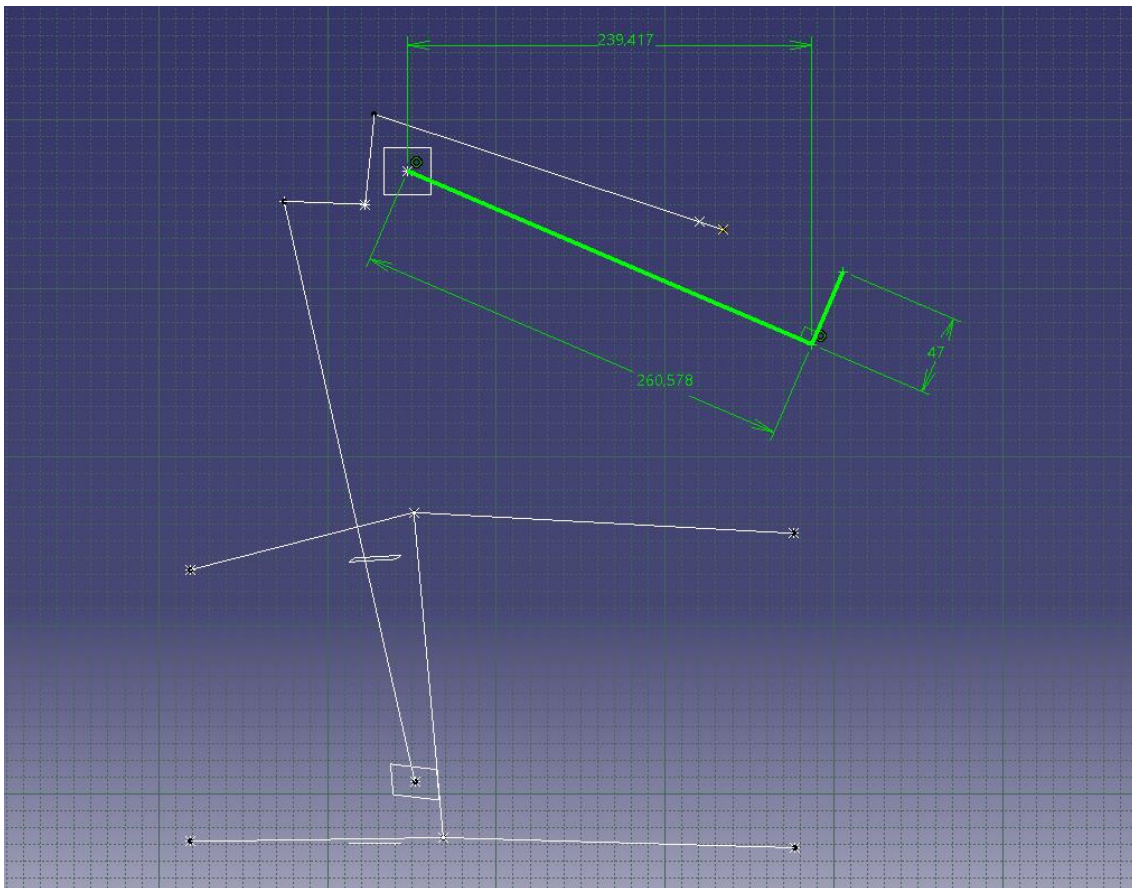


Figura 40 Creación de un plano para el link del antiroll

En un principio se dio por hecho que el brazo del antiroll estaría en un plano paralelo al y-z del vehículo, pero una vez creado el diseño en detalle de los elementos se vio que no era posible por interferencias dimensionales con el amortiguador y por cuestiones de espacio para las piernas del piloto. Además, de esta forma podemos emplear todo el ancho del chasis para montar la barra antiroll.

- **Simbolizar las dimensiones y posición del link y el brazo del antiroll en el anterior plano.**



**Figura 41 Representación esquemática del link y el brazo del antiroll**

Se dibuja el link y el brazo del antiroll. Estas dimensiones y posiciones están en continuo cambio por las informaciones que emite el equipo de modelado.

Con esto se consigue representar las dimensiones, posiciones y orientaciones de los principales elementos de la suspensión. A través de este esquema será muy sencillo variar los parámetros para conseguir una suspensión que sea cinemática y dinámicamente competitiva. Las variaciones de estos parámetros dependen constantemente del feedback obtenido por el equipo de modelado.

### 5.3 Definición esquemática en profundidad

Para entrar más profundamente en el diseño de detalle, es conveniente hacer otro esquema por cada elemento representativo de la suspensión y que contenga información sobre dimensiones, posición, forma y orientación. De esta forma la el esquema de las suspensión quedará representado de la siguiente forma.

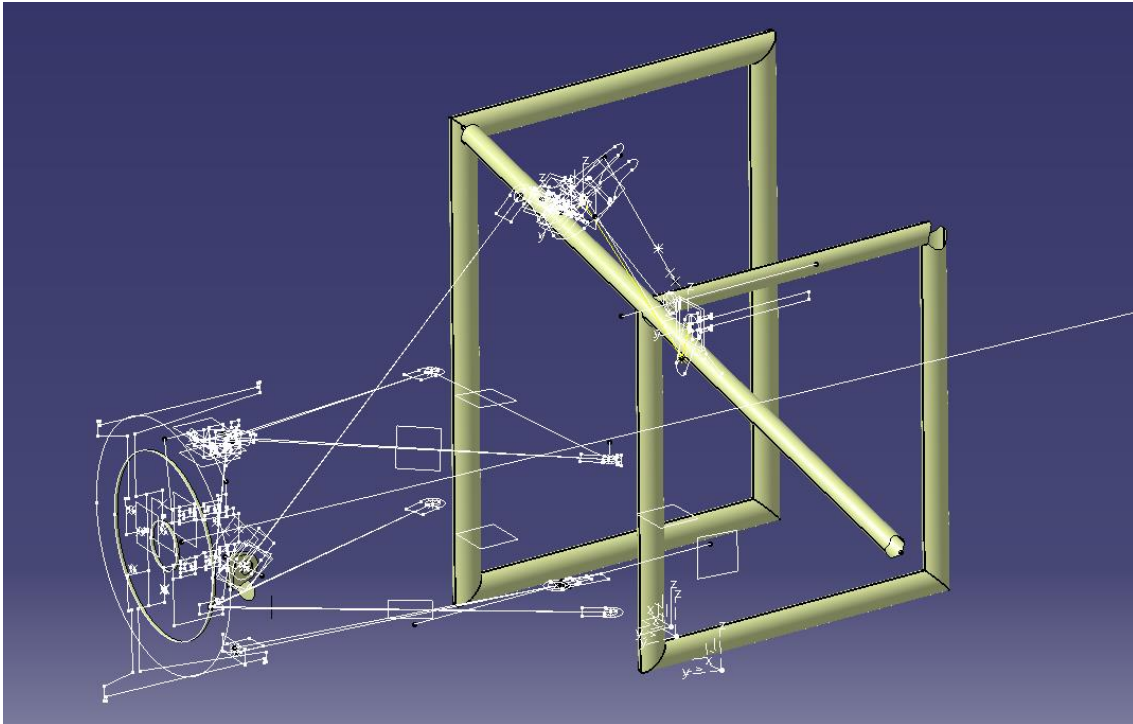


Figura 42 Representación esquemática en profundidad de la suspensión

En este esquema se representan:

- Triángulo inferior y superior.
- Empaquetamiento de rueda.
- Ballesta.
- Pushbar.
- Antiroll.
- Dirección.

Para la elaboración de estos esquemas se parte de la información generada en el esquema de la suspensión general.

- **Triángulo inferior y superior:**

A partir de los puntos de anclaje y la representación de las barras, dibujamos las reservas de espacio y la forma que en un principio van a tener los porta rótulas que permitirán el giro del triángulo respecto al chasis.

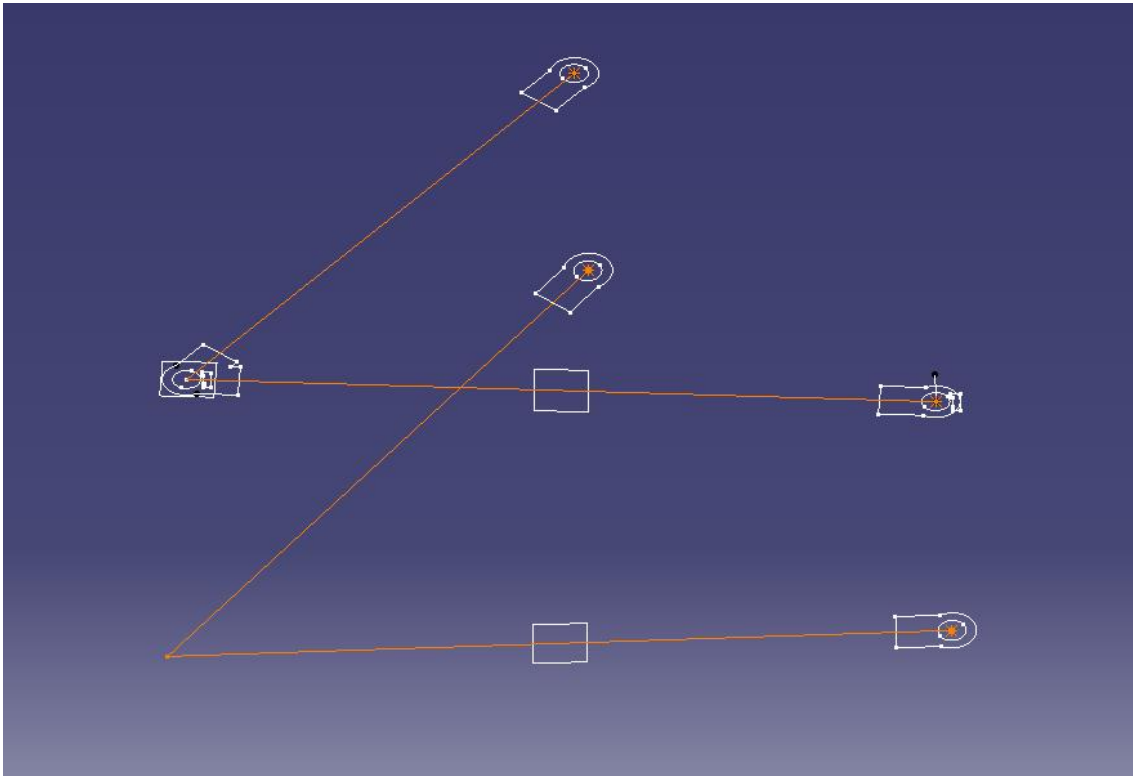
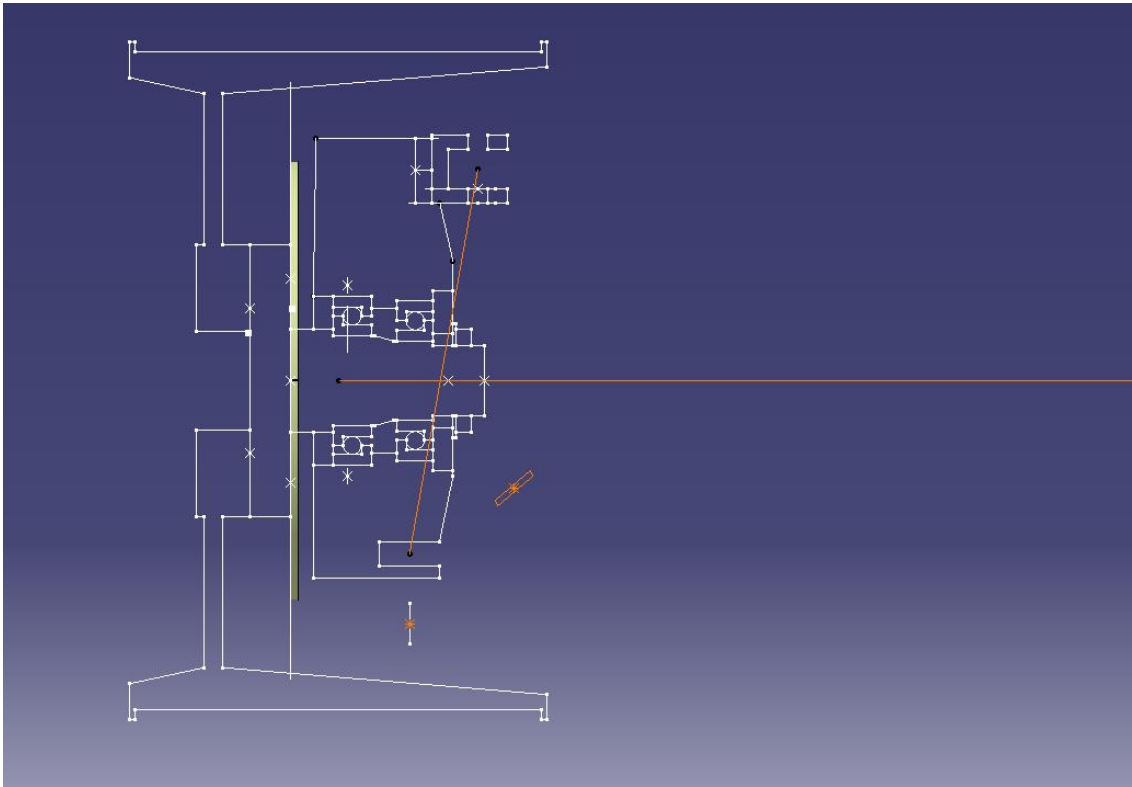


Figura 43 Representación de los anclajes de los triángulos de la suspensión

- **Empaquetamiento de rueda:**

Se toma como input los puntos de anclaje de los triángulos, el eje de rueda y los puntos de anclaje de la pushbar y la dirección.



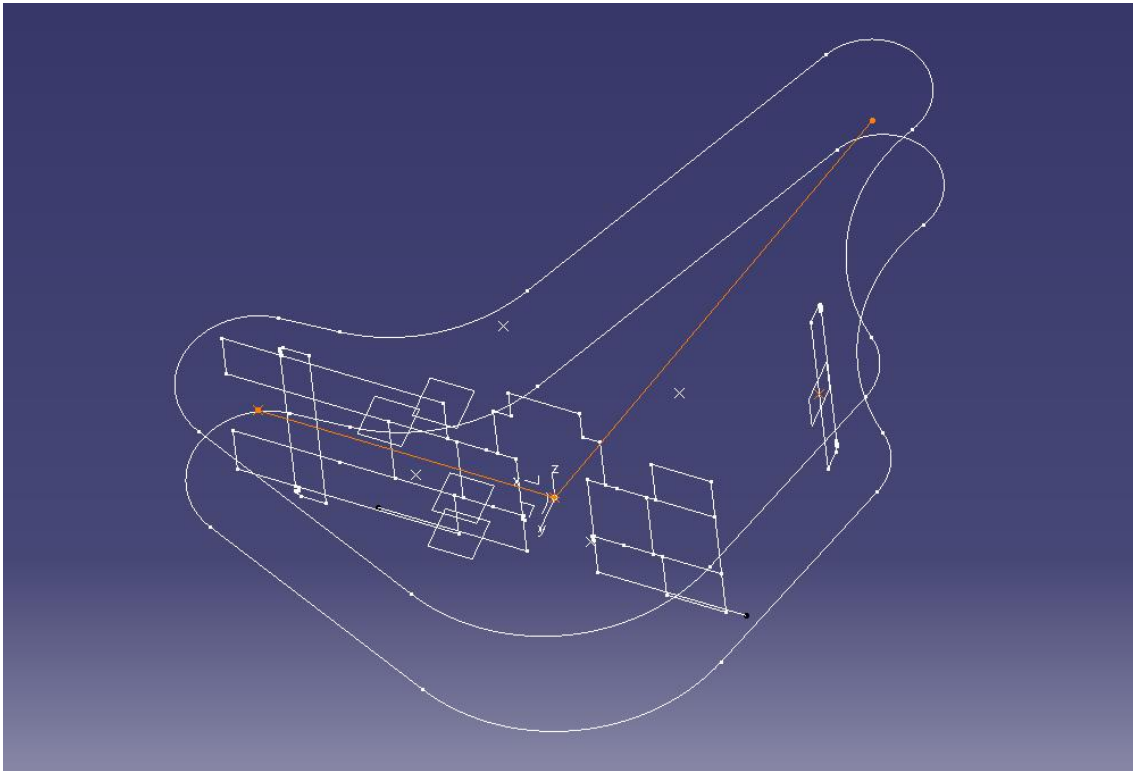
**Figura 44 Representación del empaquetamiento de rueda**

En él se dibujan:

- Llanta de la rueda.
- Mangueta.
- Buje.
- Rodamiento interno y externo.
- Retenedor interno y externo.
- Anillo separador.
- Tuerca de cierre.
- Arandela de bloqueo.
- Soporte de rótula.
- Cala.

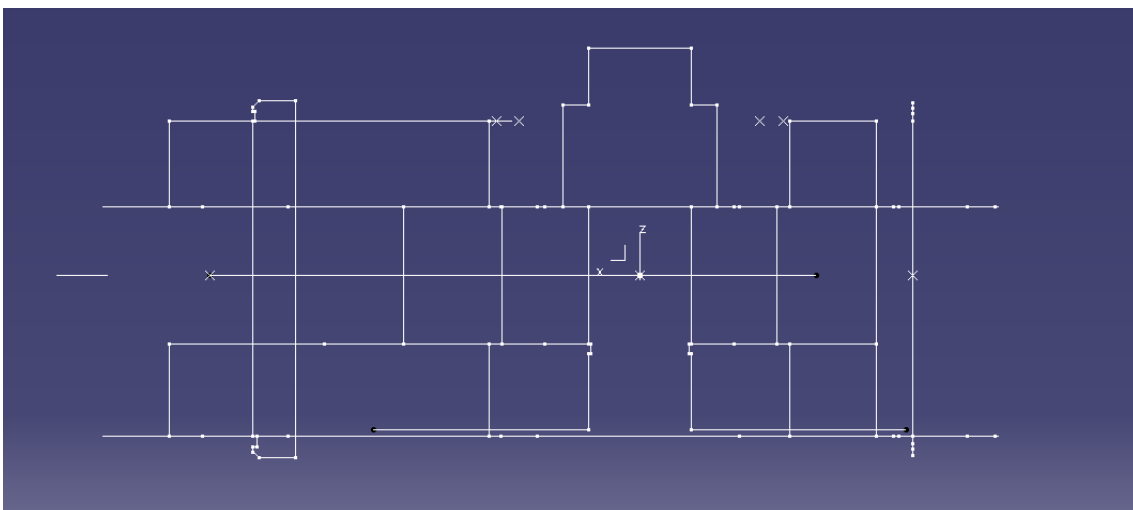
- **Bieleta:**

Se toma como input los bieletes de la pushbar y del amortiguador. En él ya se puede ver la relación en el plano de la bieleta que hay entre el movimiento de la pushbar y del amortiguador. Tanto la longitud como el ángulo entre los bieletes son fundamentales para la determinación del motion ratio.



**Figura 45** Representación de un dibujo esquemático en profundidad de la bieleta

A través de dos planos puede representarse el completo funcionamiento de la bieleta.



**Figura 46** Corte transversal del esquema de la bieleta

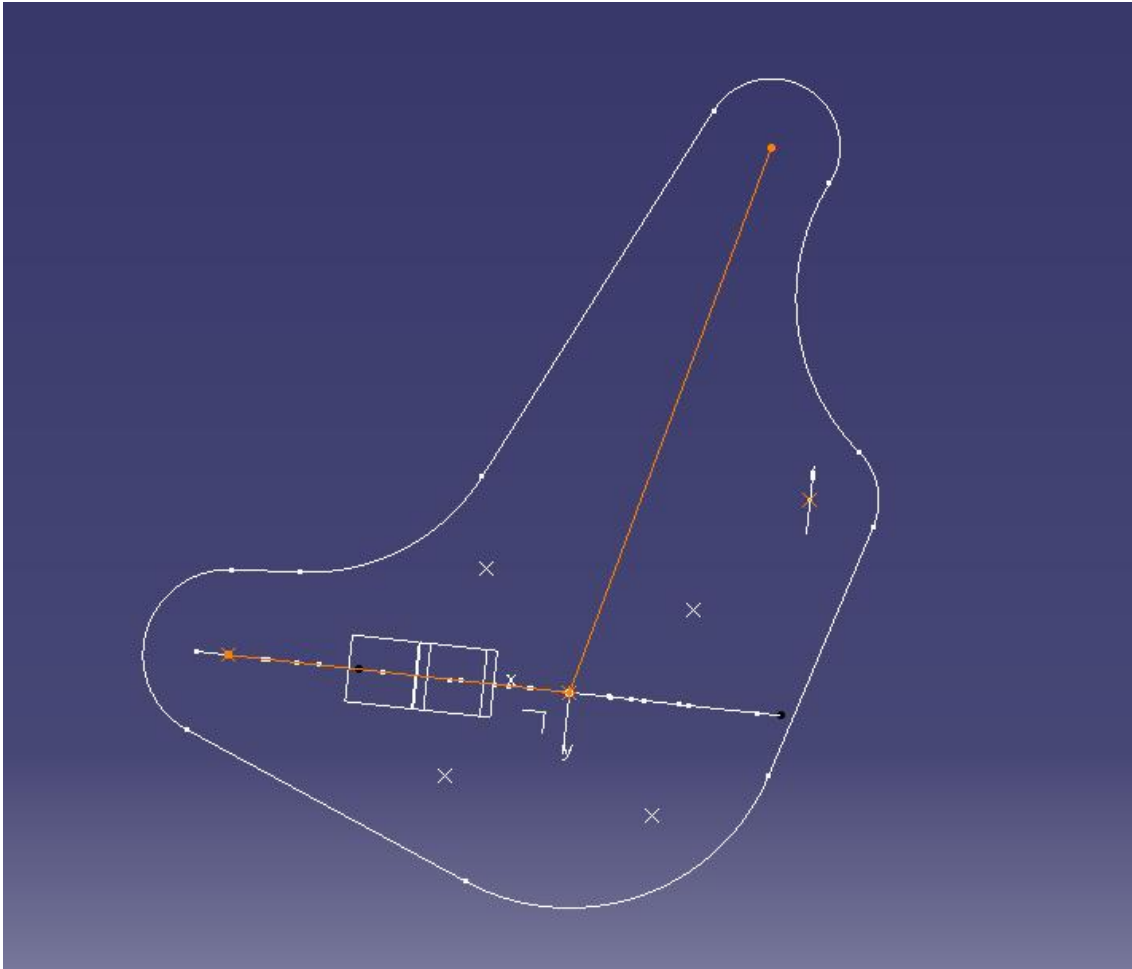
Este plano representa un corte trasversal a través del eje de giro y puede observarse:

- Rodamiento de doble hilera.
- Eje de anclaje al chasis.
- Anillo separador.



- Placa inferior y superior.
- Uno de los pasadores.
- Alojamiento para circlip.

La otra vista es la perpendicular al plano en el que gira la propia bieleta:



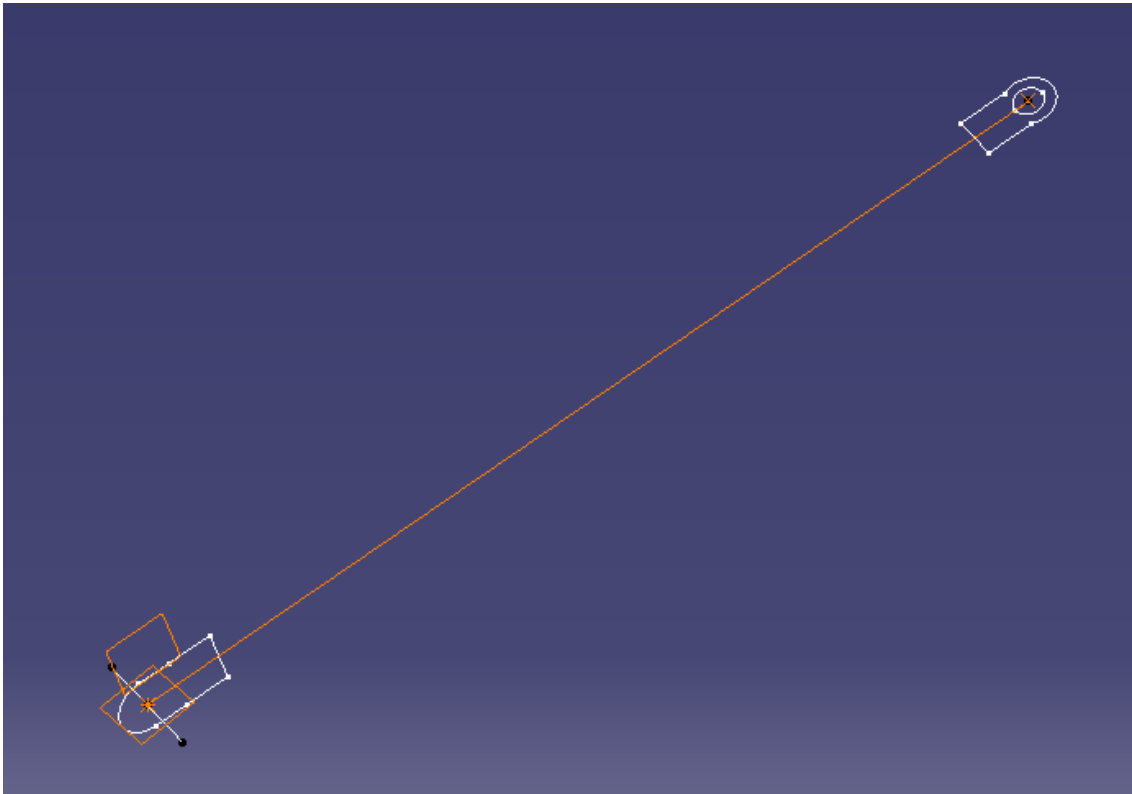
**Figura 47 Vista en planta de la geometría de la bieleta**

Aquí se ha representado:

- La forma en planta de las dos placas de la bieleta.
- Los cuatro puntos para situar los tornillos de apriete y los centradores.

- **Pushbar:**

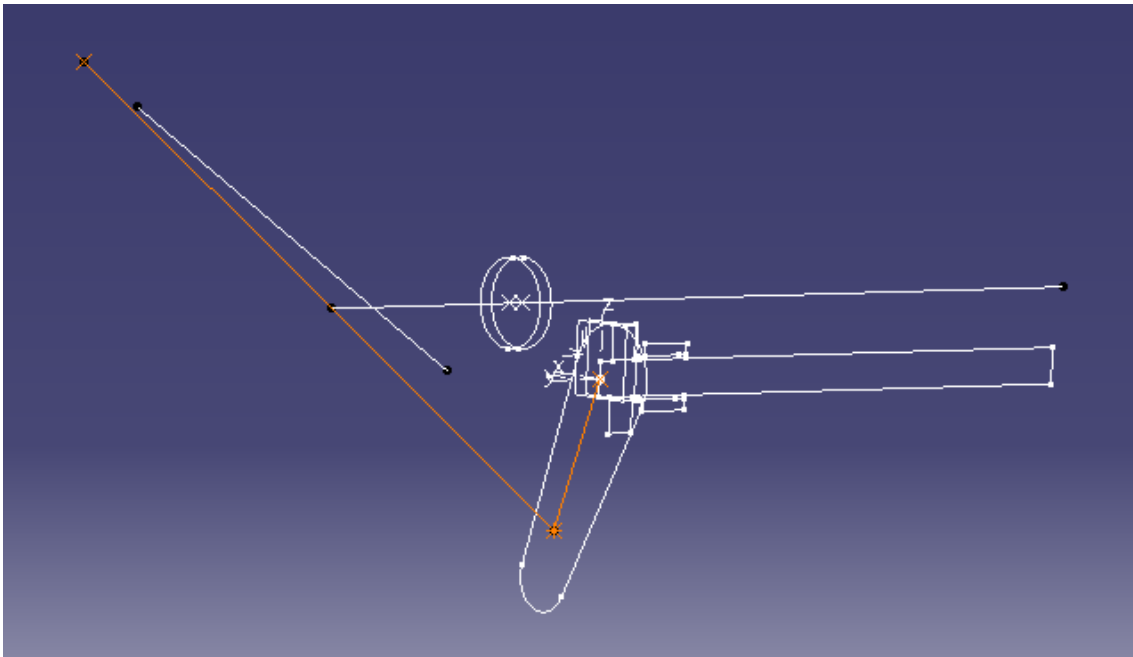
Es el siguiente subsistema que se representa se han diseñado ya los dos subsistemas en los que se va a anclar.



**Figura 48 Representación de los anclajes de la pushbar**

En el anclaje superior se va a emplear el mismo porta rótulas que se emplea en los anclajes de los triángulos al chasis. En la parte inferior se representa la reserva de espacio de un anclaje para un pasador que atravesará la rótula que en un principio se pensó que se situara en la mangueta. Tras numerosas deliberaciones se acordó que sería más conveniente situar el apoyo de la pushbar en el anclaje de triángulo inferior. Esto se estableció así por la complejidad de una fabricación de una mangueta con esta funcionalidad. Además, el espacio para que la pushbar no entrara en interferencia con nada a lo largo de todo el recorrido del movimiento era demasiado grande como para ponerlo en la mangueta.

- **Antiroll:**



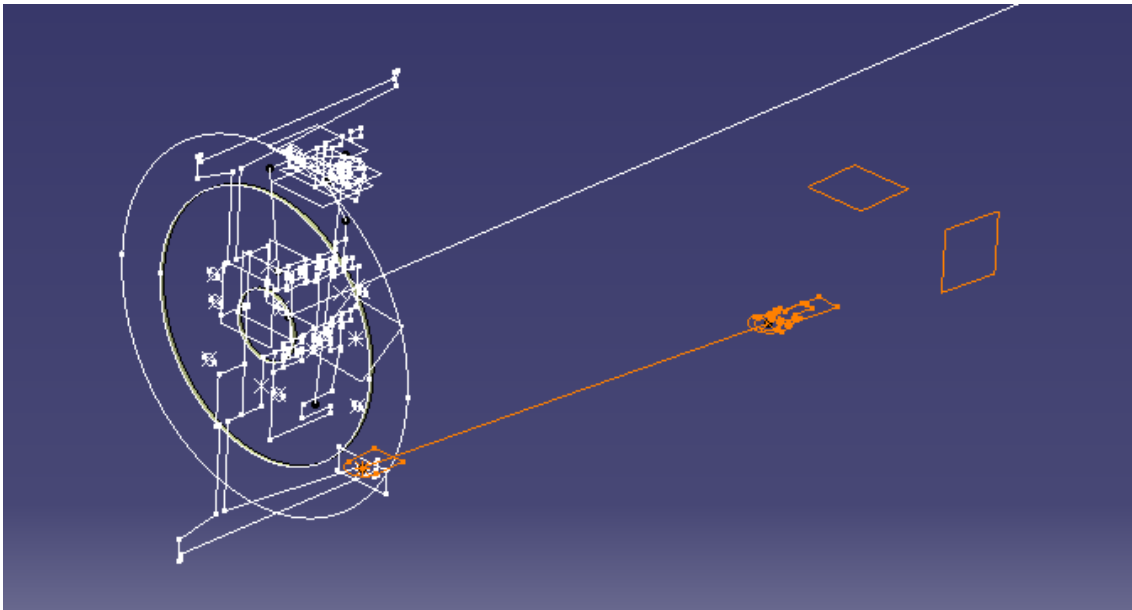
**Figura 49** Representación esquemática del sistema antiroll

A través de los inputs del esquema general se diseñan:

- Barra antiroll.
- Brazo y orejeta que conecta el antiroll con el link.
- Link.
- Casquillo.
- Soportes para el anclaje al chasis.
- Eje del chasis para toma de referencia.

Este sistema es uno de los que más actualizaciones ha sufrido por el poco espacio del que dispone y la gran variabilidad en la rigidez de la suspensión que genera el más mínimo cambio.

- **Barra de la dirección:**



**Figura 50 Representación del link de la barra de suspensión**

A pesar de que no es un elemento del sistema de suspensión, el anclaje de la mangueta con la cremallera de dirección ha sido responsabilidad del equipo de suspensión. El anclaje a la mangueta se realiza con las mismas rótulas que los triángulos y la pushbar y se ancla a la mangueta a través de otro tipo de rótula de origen comercial.

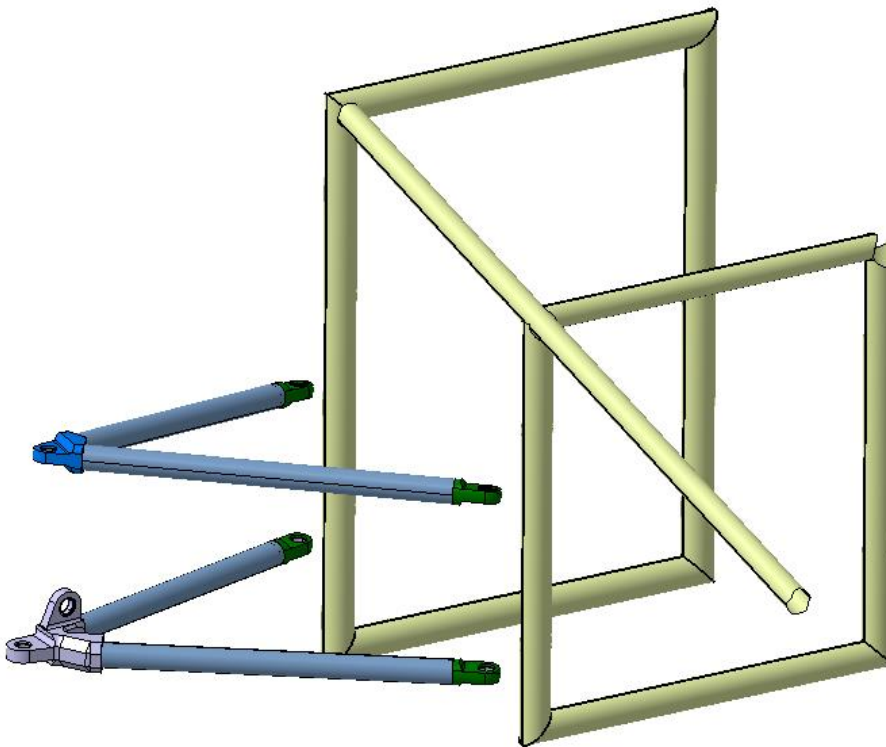
## 5.4 *Diseño en detalle:*

A partir de la geometría creada a modo de esquema, empleamos toda esta información para la elaboración de cada pieza y su posterior ensamblaje.

No hay una secuencia de creación cronológica de piezas puesto que cada una va renovándose en función de nuevas necesidades de otros sistemas e imposiciones de fabricación, peso o malos planteamientos iniciales. No es posible entender el diseño de cada pieza de manera aislada sino que hay que plantearlo como un conjunto.

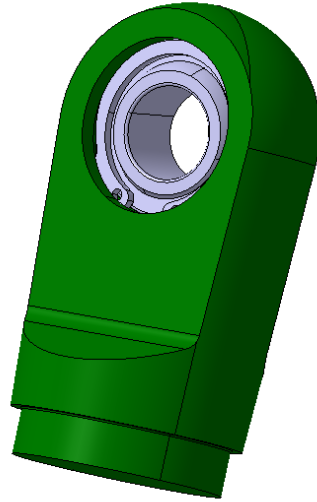
Se expondrá el diseño de cada pieza en el orden en el que se pensó el sistema, y por tanto, el esquema inicial:

### 5.4.1 Triángulo Superior e Inferior:



**Figura 51** Diseño del triángulo superior e inferior

Para su anclaje al chasis se emplean cuatro porta rótulas idénticos y de diseño y fabricación propia. La rótula que se emplea es GE\_10\_C de diámetro 10 con el desplazamiento axial limitado por un circlip JV 19 del proveedor Seeger.



**Figura 52 Diseño final de un porta rótulas simple**

La rótula y el circlip al ser componentes comerciales se conoce bien los límites de carga que son capaces de soportar. Fueron elegidos de tal forma que son capaces de asegurar una correcta funcionalidad incluso con picos de carga.

El porta rótulas fue diseñado internamente y el equipo de cálculo realizó varias simulaciones que indicaban el aspecto que tendrían que tener estos porta rótulas.

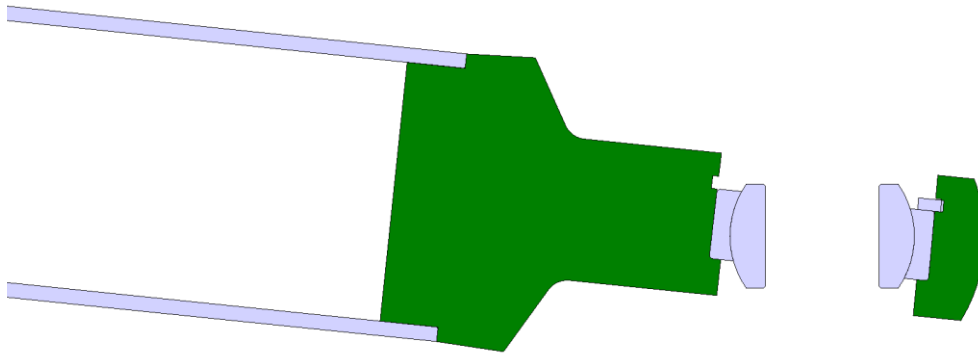


**Figura 53 Optimización topológica del porta rótulas simple**

Este diseño confirma que el porta rótulas aguantará las fuerzas generadas en ellas y no agregamos mucho más peso del necesario.

El diseño de las barras consta simplemente de tubos comerciales de 25mm de diámetro exterior y un espesor de 1.25 mm.

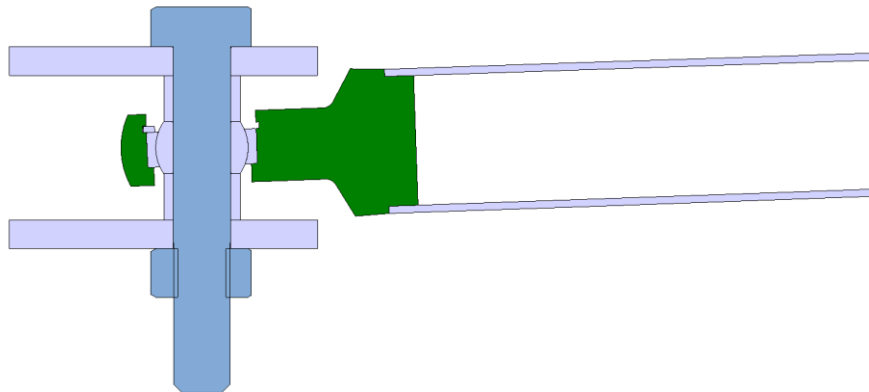
La unión entre las barras con los porta rótulas se realizará mediante soldadura.



4.55

**Figura 54 Alojamiento de la rótula y cierre por circlip**

El método de unión de elementos que se unan a través de rótulas va a llevarse a cabo siempre de la misma forma. Se inmoviliza una de las partes móviles de la rótula para dejar a la otra parte girar sobre la primera fija.



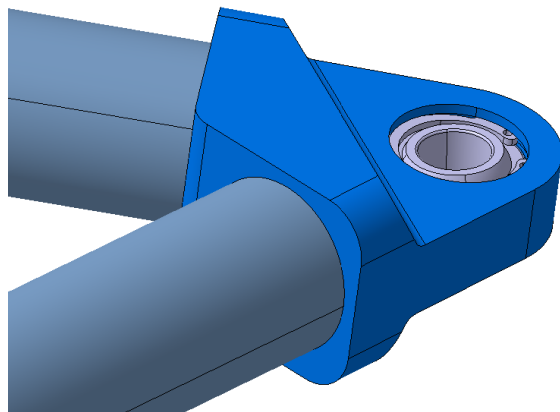
2.27

**Figura 55 Método de unión de elementos rígidos mediante rótulas**

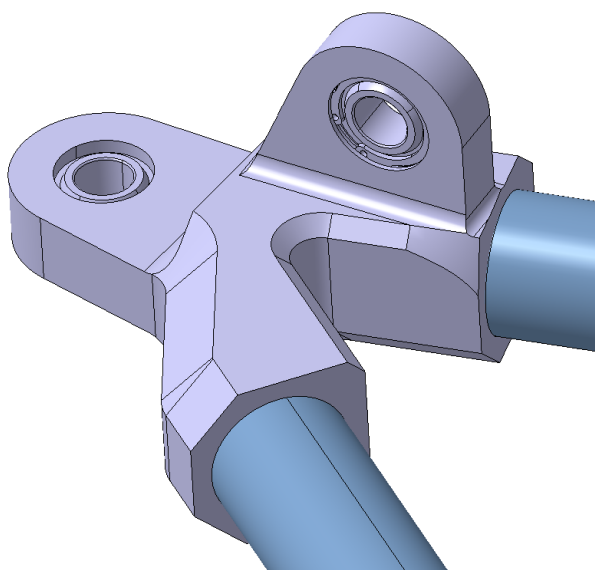
La rótula se inmoviliza a través de dos pequeños casquillos metálicos que limitan el juego en la dirección longitudinal del tornillo. A la hora de diseñar esta fijación es muy importante simular el movimiento previsto para todas las articulaciones que se unan de esta forma puesto que la rótula solo admite un giro de 12° fuera del plano perpendicular al tornillo.

Otro punto crítico ha sido la búsqueda de un circlip que no entrara en interferencia con los casquillos antes de esos 12° de margen. En el diseño del porta rótulas se han tenido en cuenta todos los abatimientos posibles para no entrar en interferencia con los soportes. Dichos soportes serán detallados más adelante.

Por otra parte, la unión en la mangueta se realiza a través de porta rótulas prácticamente iguales a los ya mostrados con la salvedad de proporcionar anclaje a ambos tubos del triángulo. En el triángulo inferior además se añade otra orejeta para albergar el porta rótulas que le da libertad de giro al extremos inferior de la pushbar.



**Figura 56** Porta rótulas del triángulo superior

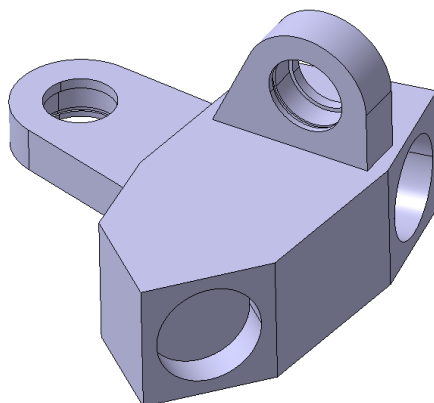


**Figura 57** Porta rótulas del triángulo inferior

Ambos serán fabricados en acero y mediante operaciones de mecanizado.

El diseño de la suspensión está muy comprometido por el diseño del porta rótulas del triángulo inferior.

En un principio su diseño inicial estaba pensado de la siguiente forma:

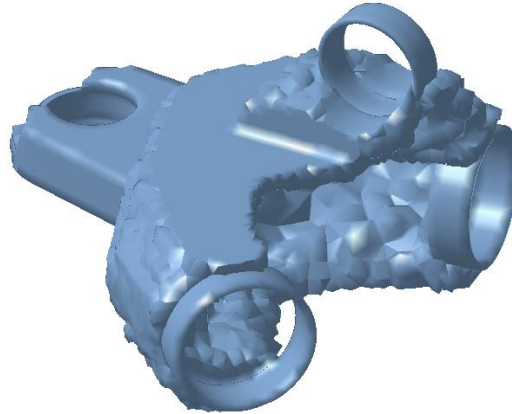


**Figura 58** Diseño preliminar del porta rótulas inferior



Era un diseño robusto pero se encargó al equipo de cálculo que realizara comprobaciones sobre su funcionamiento y si fuera posible, reducir su peso al máximo. Este diseño de partida contaba con un peso de 1.06 kg.

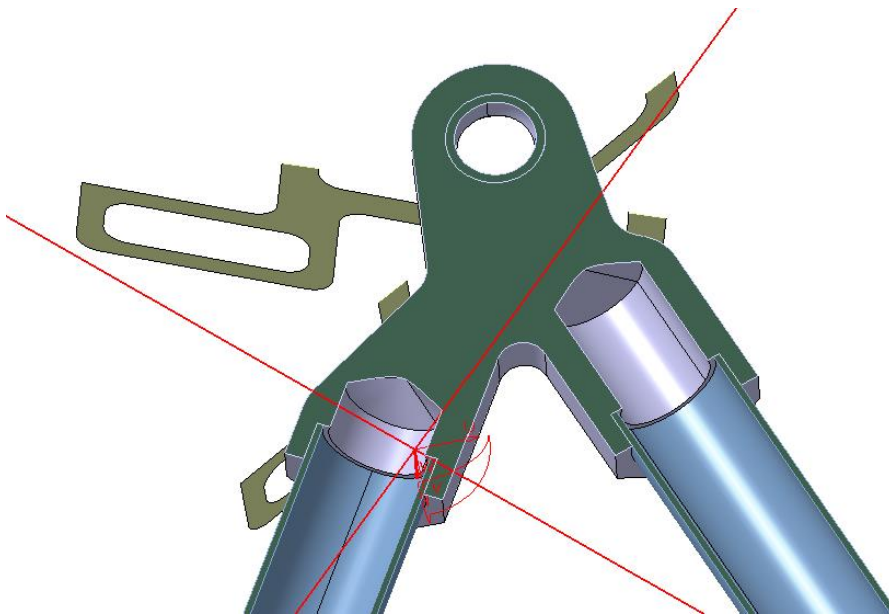
Los compañeros del departamento de cálculo nos devolvieron el siguiente 3D:



**Figura 59 Optimización topológica del porta rótulas inferior**

A raíz de esta representación, se eliminó material entre tubos, se taladró internamente en la cara de apoyo de los tubos, se adelgazó la orejeta de la pushbar y se procedió a eliminar aristas vivas que no generan trabajo.

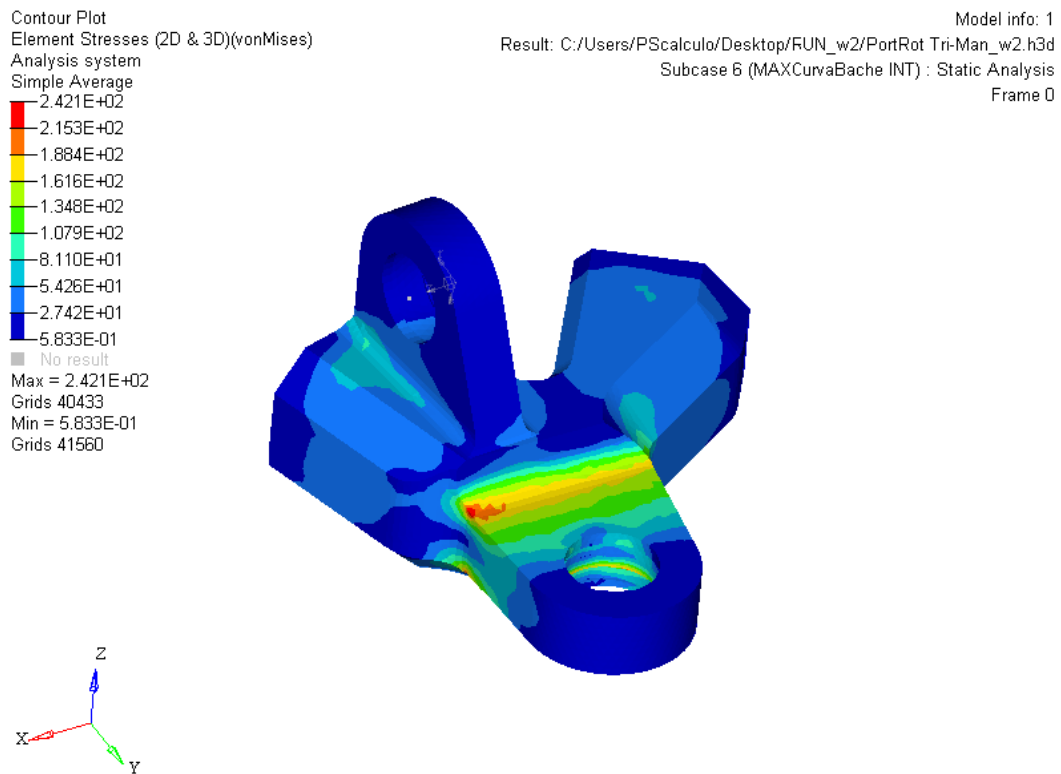
El diseño de esta pieza es la relación de compromiso que existe entre tener el material necesario para unir cuatro elementos y no excederte en sus proporciones. El principal inconveniente de hacerla más grande se encuentra en el momento en el que la dirección gire a tope y se encuentre con interferencias en la mangueta. Hubo que generar las superficies de las posiciones extremas de la mangueta para no generar contactos. Además de los contactos por girar la mangueta, también existe el riesgo de que cuando la suspensión suba o baje al máximo la orejeta que se introduce en la mangueta golpee con ésta generando otra interferencia. Para ello tuvo que ensancharse el alojamiento de la mangueta en la dirección vertical puesto que los cálculos en el porta rótulas indicaban que no sería conveniente seguir adelgazando esa zona.



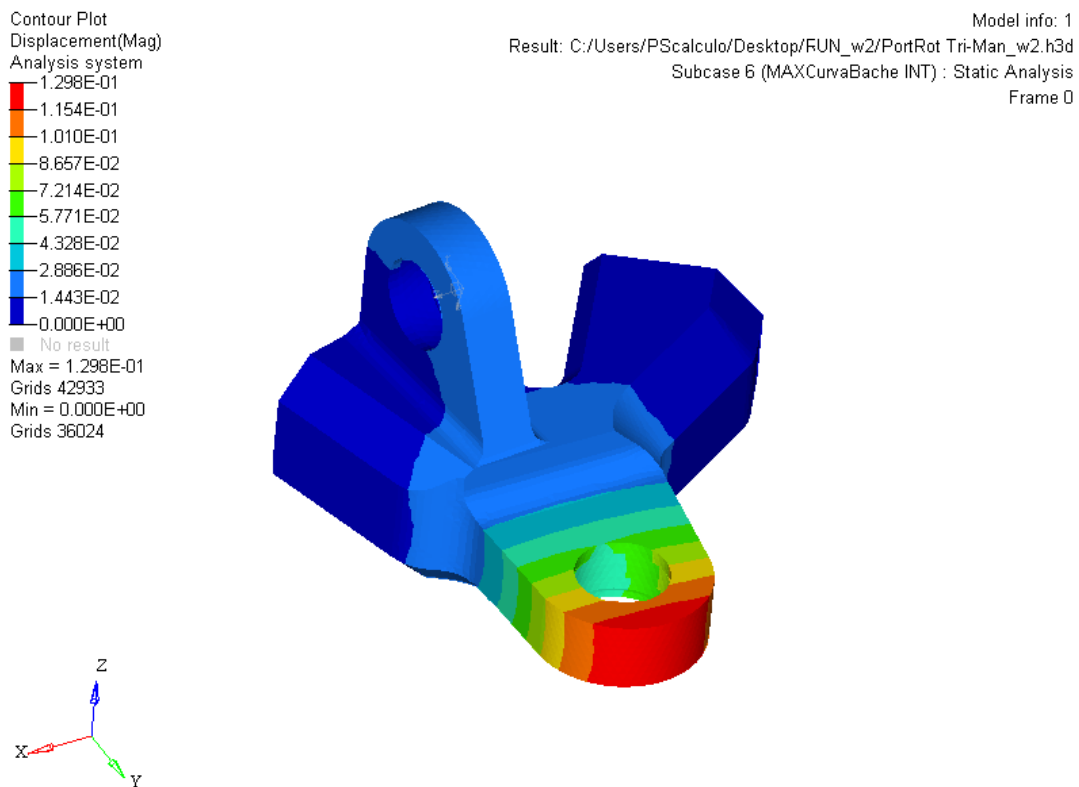
**Figura 60 Corte transversal del porta rótulas inferior**

Después de estas modificaciones el peso de la pieza es de 0.594 kg.

Una vez realizado el 3D en detalle habiendo tenido en cuenta la optimización, se realizaron los cálculos necesarios para saber si el porta rótulas aguantaría los esfuerzos.



**Figura 61 Cálculo de esfuerzos en el porta rótulas inferior**



**Figura 62 Cálculo de desplazamientos en el porta rótulas inferior**

La última imagen muestra el desplazamiento por deformación de la pieza. Se concluye que podemos admitir como favorable que la orejeta tenga un desplazamiento de deformación de una décima de milímetro.

Tanto el análisis de tensiones como el de desplazamientos concluyen un comportamiento favorable. Ambos análisis corresponden al peor caso que es el de máximo giro en curva y bache.

Se ha conseguido, por tanto, un ahorro de peso del 44% en un elemento de masa no suspendida.

### 5.4.2 Empaquetamiento de rueda:

Dentro de este subsistema se encuentran las masas no suspendidas del vehículo.

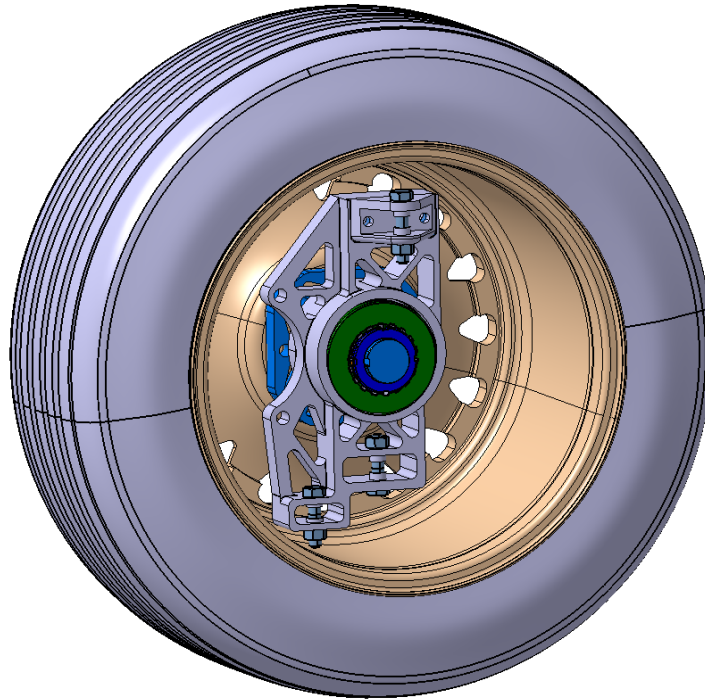


Figura 63 Diseño del empaquetamiento de rueda

Por una parte, la propia mangueta ha sido objeto de estudio como Proyecto Fin de Máster por la gran complejidad y trabajo que ella sola conlleva. Entre sus funciones se encuentra la de conectar la rueda al chasis a través de los anclajes a los triángulos, transformar el movimiento lineal de la suspensión en un giro de rueda, albergar el buje y los distintos rodamientos, actuar de soporte a las pinzas de freno y en este caso, proporcionar un ángulo de salida variable en función de los reglajes que sean más apropiados para cada prueba de la competición.

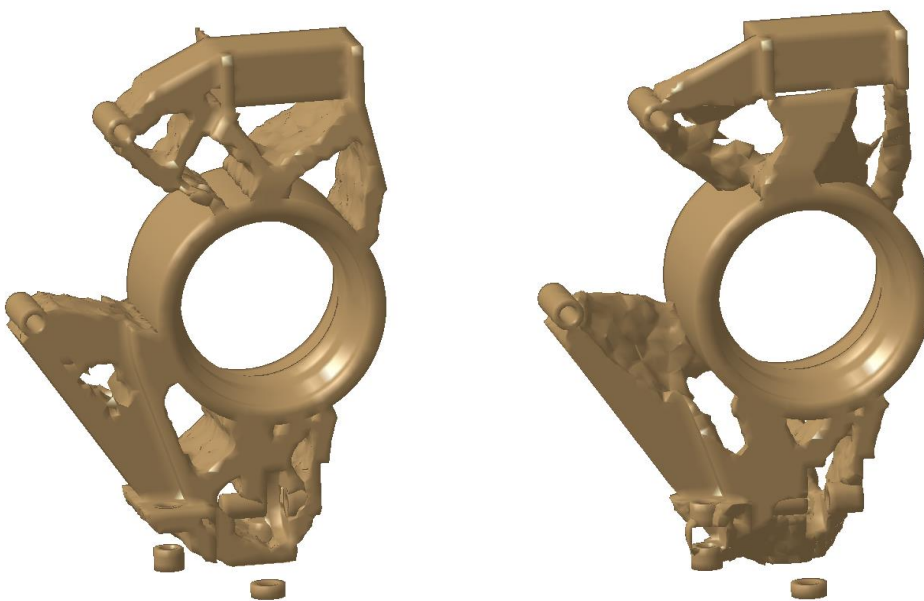
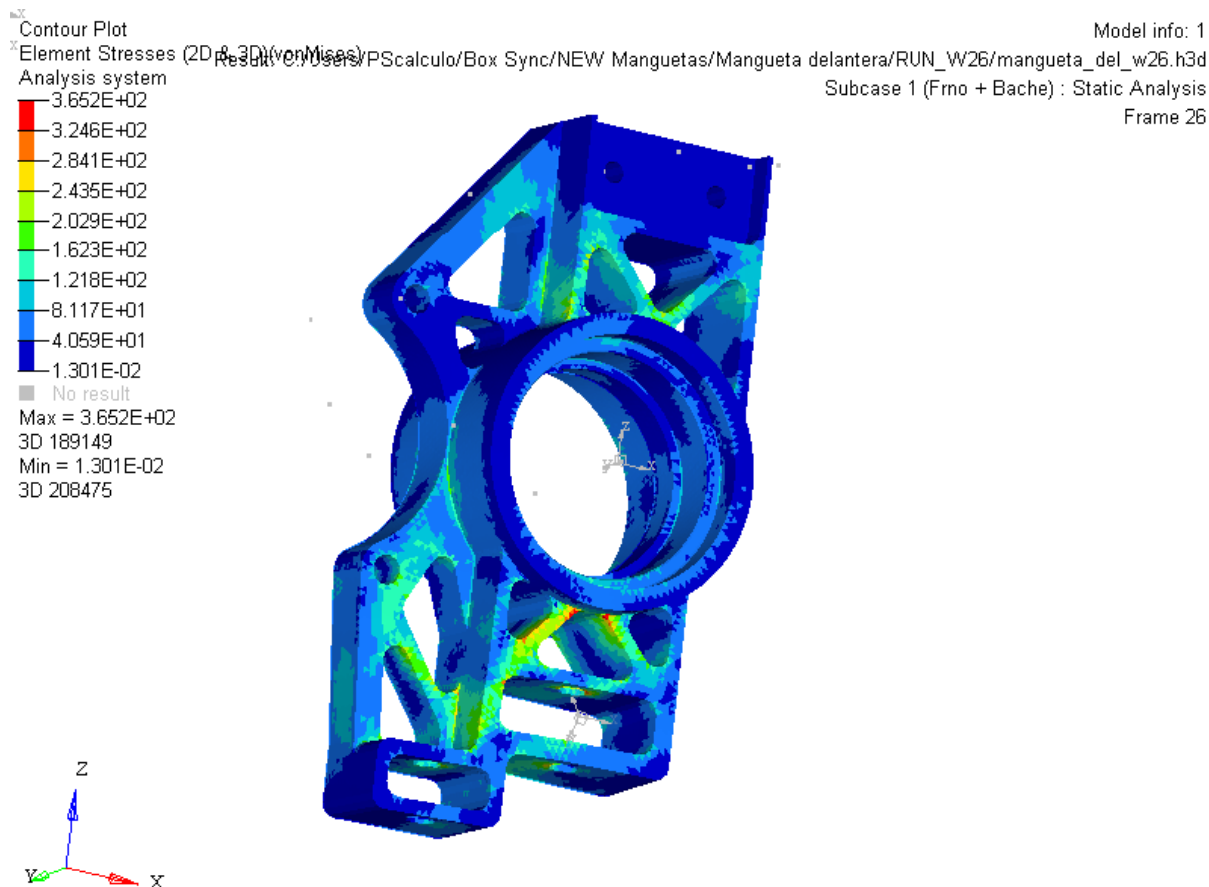


Figura 64 Optimización topológica de la mangueta

Se han realizado numerosos cálculos para la optimización en peso de la mangueta y una vez optimizada, se han vuelto a realizar los cálculos oportunos tener la certeza de que aguanta los esfuerzos de la conducción.



**Figura 65 Cálculo de esfuerzos para la mangueta**

Solo se encontró un pequeño riesgo de plastificación en el diseño final de la mangueta en las paredes que rigidizan el espacio entre el buje y el anclaje del triángulo inferior. Este problema se ha solucionado aplicando un espesor ligeramente superior a las paredes con riesgo de plastificación.

La mangueta se ha concebido para ser fabricada en Aluminio 7075 T6 cuyo límite de fluencia se sitúa en 434,4 MPa. Este límite sigue estando por encima de los picos máximos de tensión que sufre la mangueta pero por establecer un margen de seguridad se han ensanchado un milímetro las paredes con un comportamiento más crítico.

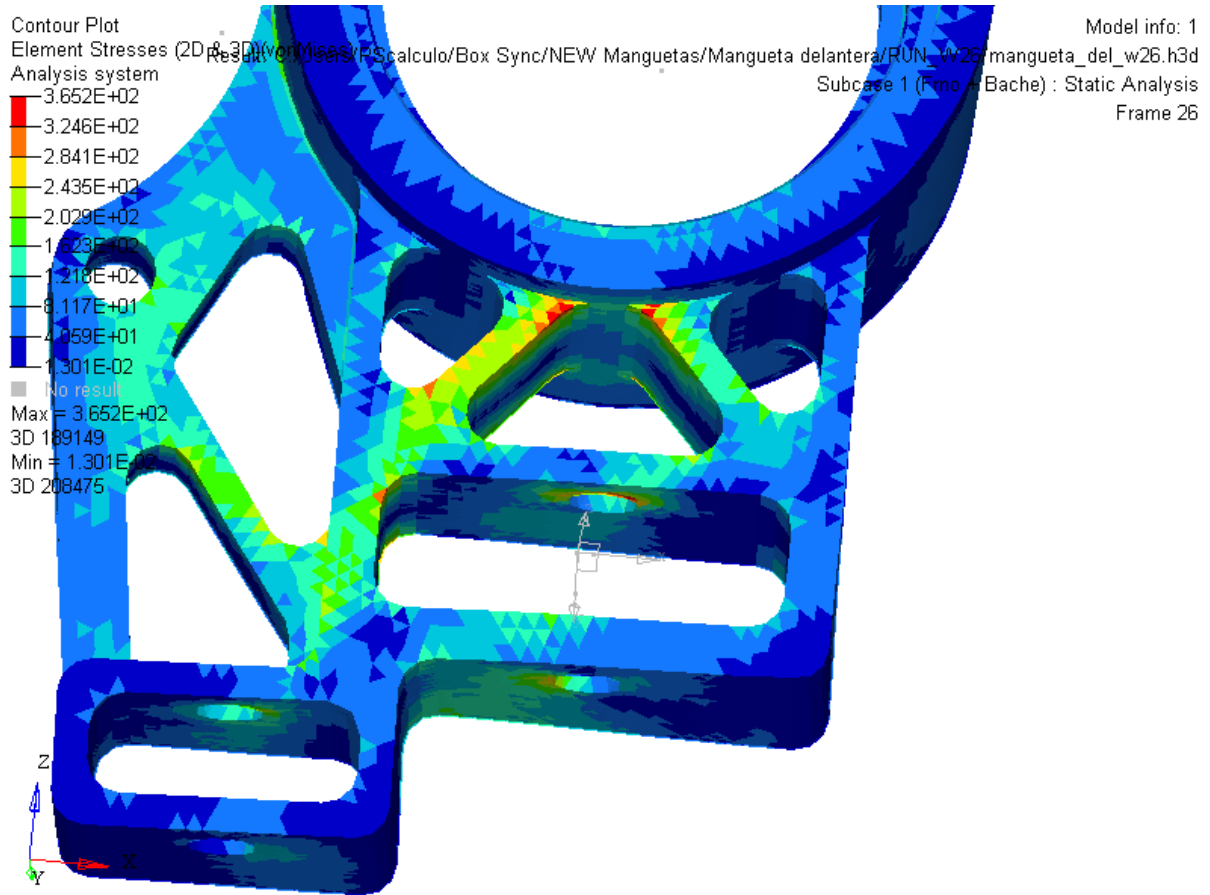
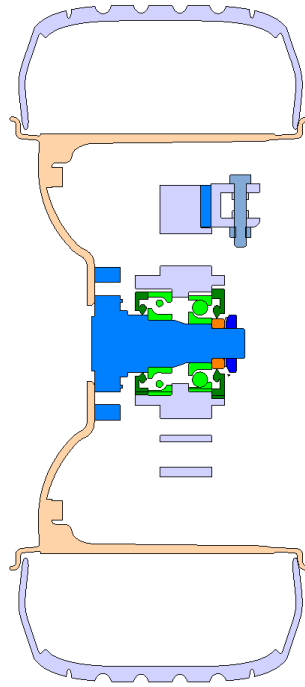


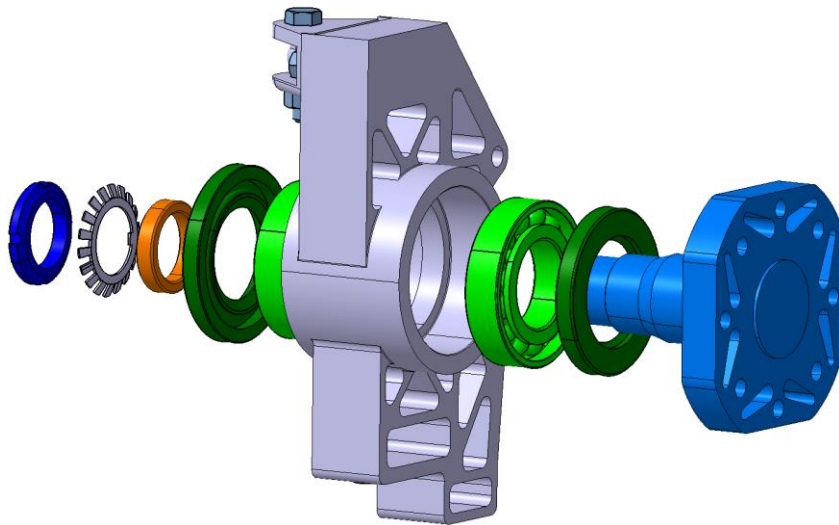
Figura 66 Cálculo de esfuerzos para la mangueta (detalle)

Este caso de carga corresponde a una situación de frenada combinada con un bache.



**Figura 67 Corte transversal del empaquetamiento de rueda**

Las llantas y las ruedas son proporcionadas por Michelin.

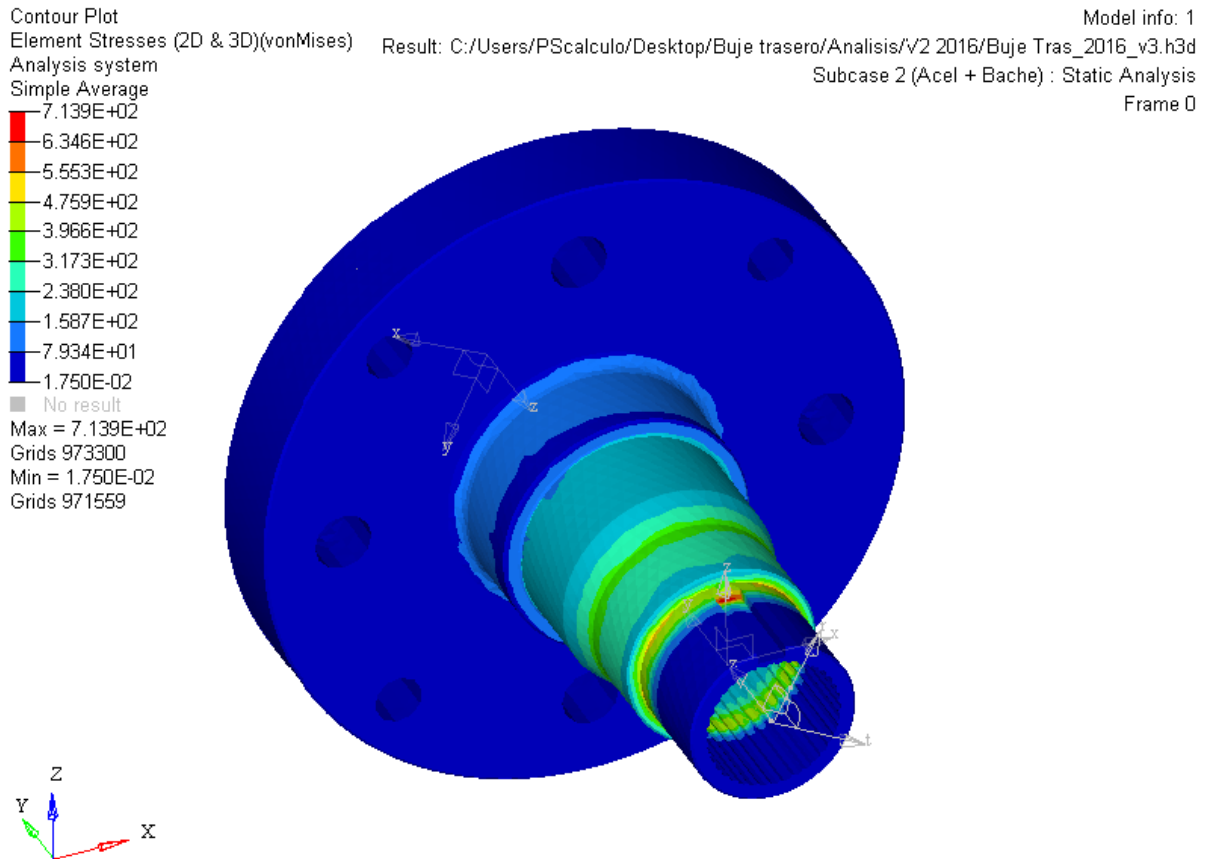


0.777

**Figura 68 Descomposición del empaquetamiento de rueda**

A través del buje se genera la rodadura de la rueda y procuramos disminuir el rozamiento lo máximo posible a través de dos rodamientos de bolas de contacto angular 7208\_BEP y 7209\_BEP. El sellado axial de los rodamientos se garantiza con dos retenedores cuyas referencias comerciales son 47x90x10\_HMS5\_V.1 y 52X85X10\_HMS5\_V.1.

El buje también ha sido objeto de numerosos cálculos para concluir que aguantaría todos los esfuerzos.

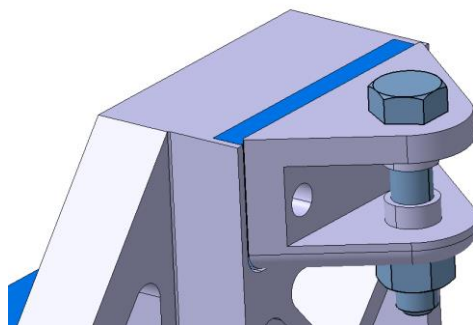


**Figura 69 Cálculo de esfuerzos del buje**

Este último cálculo realizado en el buje delantero nos indica que aguantará. Hay una pequeña zona que plastifica pero que no se tiene en cuenta al haber eliminado el chavetero del diseño. El material que se va a aplicar al buje será un acero AISI 4340 (F1272 norma española) con un límite de fluencia de 710 MPa. La imagen muestra como en ninguno de los casos se alcanzan 500Mpa.

El desplazamiento axial de los rodamientos y la mangueta se asegura con los escalones del buje en un sentido y la tuerca de cierre en otro. Los radios de acuerdo de estos escalones se han aumentado ligeramente para alejarnos de posibles riesgos de plastificación

A través de la introducción o no de una cala (con distintas anchuras) puede variarse el ángulo de salida para cada prueba dinámica.



**Figura 70 Cala de la mangueta para variar el ángulo de salida**

La unión se realiza a través de una unión atornillada M6.

El resto de uniones (triángulos y dirección) funcionan bajo el mismo principio que las uniones con rótula de anclaje del chasis.



### 5.4.3 Bieleta:

La bieleta es la encargada de redirigir los movimientos de la pushbar hacia el amortiguador y el antiroll. Las distancias que existen entre el eje de giro de la bieleta y los puntos de anclaje de la pushbar, amortiguador y antiroll se denominan bieletes. Variando el ángulo y el módulo de estos bieletes se permite variar las relaciones de movimiento pushbar-amortiguador y pushbar-antiroll para obtener la rigidez deseada.

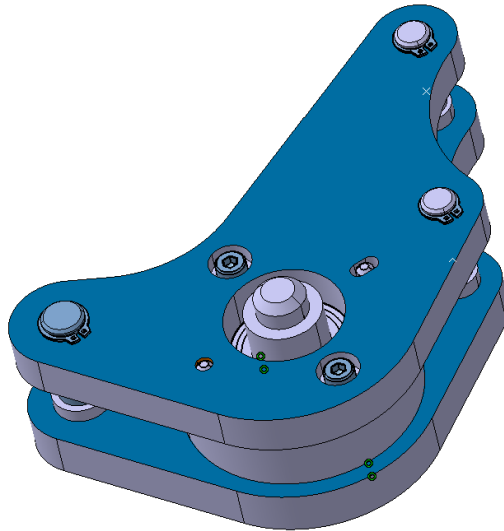


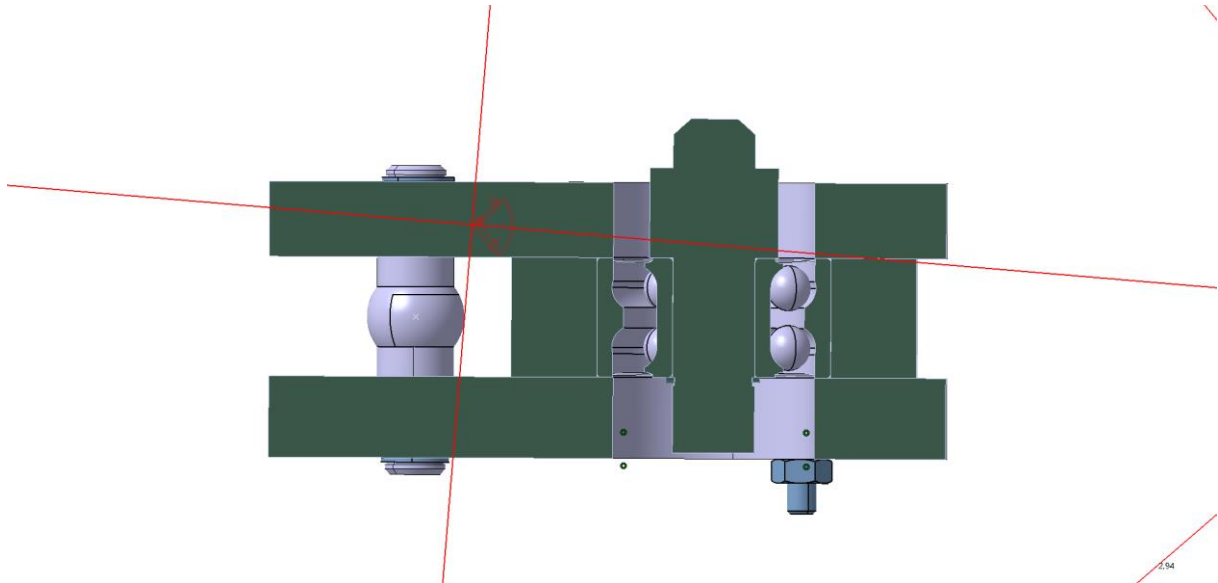
Figura 71 Diseño final de la bieleta

Desde el acuerdo de diseño inicial se marcó como objetivo el conseguir un Motion Ratio (relación de movimiento rueda-amortiguador) de 1.

El movimiento de la rueda puede describirse, sin cometerse un error apreciable, como un movimiento en vertical. El movimiento se transmite a través de la pushbar que no describe un movimiento vertical sino que su extremidad superior se desplaza en el plano de la bieleta. Se reduce en este paso la transferencia de movimiento que se compensa con una mayor longitud del bielete del amortiguador para conseguir una relación de 1.

La posición del bielete del antiroll genera una desmultiplicación del movimiento puesto que no es necesario tanto desplazamiento del brazo del antiroll para generar una gran rigidez. Más variables afectan a la rigidez dentro del propio sistema de antiroll que se tratarán más adelante.

Todo el sistema ha sido diseñado y se materializará con una fabricación propia excepto por el rodamiento de bolas de doble hilera con resistencia a cargas axiales (3201 A-2Z), circlips, tornillos y tuercas.



**Figura 72 Corte transversal de la bieleta**

El rodamiento se introduce dentro de un casquillo que va a servir de apoyo a las dos placas. El casquillo absorbe las fuerzas de compresión que le ejercen las dos placas a través de dos tornillos y tuercas que generan el apriete. También le atraviesan dos centradores que van a servir para el posicionamiento de una placa respecto a otra y dotar a la placa de una gran precisión de posicionamiento sin necesitar una tolerancia de fabricación muy exigente.

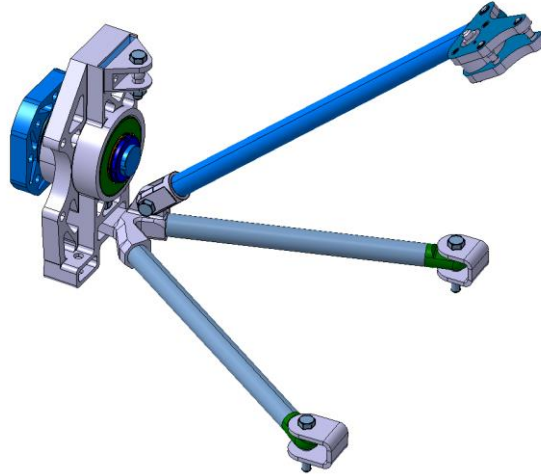
Los tornillos de apriete en un principio se pensaron como tonillos de cabeza hexagonal pero cuando se requirió del diseño del anclaje de la bieleta al chasis se observó que generaban una interferencia que sería fácil evitar si se sustituían por tornillos Allen y se enterrasen en la placa superior.

El método de anclaje de la pushbar, antiroll y amortiguamiento se hace a través de pasadores y rótulas de diferentes tamaños en función de los distintos elementos comerciales. Finalmente estos pasadores tienen una limitación de movimiento axial generada por circlips.

#### 5.4.4 Pushbar:

La pushbar está compuesta de un tubo con el mismo diámetro y espesor que el resto de tubos que componen el sistema de suspensión más dos porta rótulas.

Uno de los porta rótulas (el que fija a la bieleta) es como todos los descritos anteriormente y el que fija a la unión de los tubos del triángulo inferior tuvo que diseñarse de manera específica.



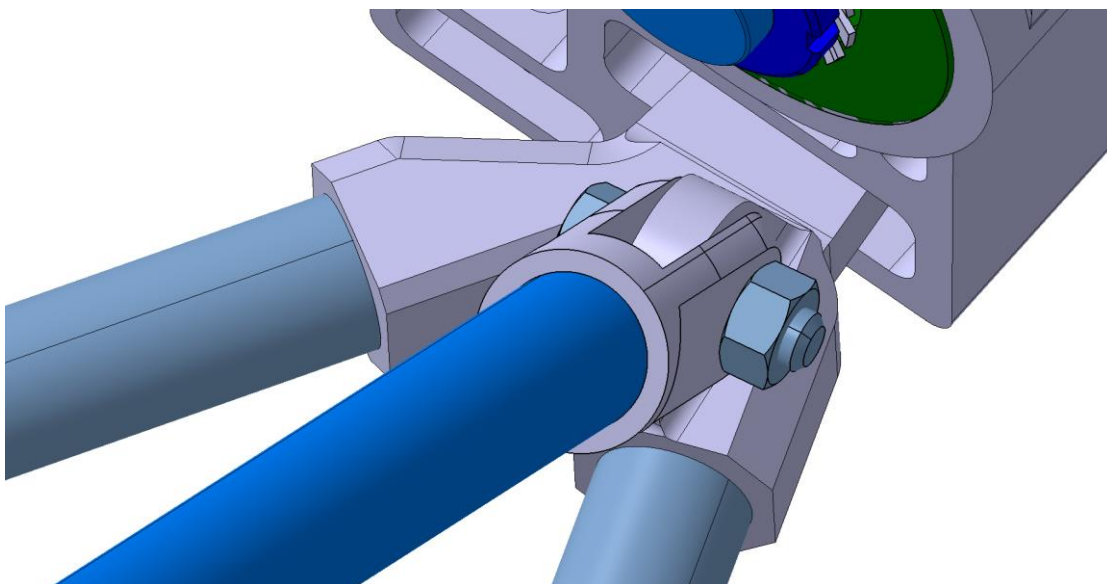
0.365

**Figura 73 Representación de la pushbar**

En un principio la suspensión se pensó de tal forma que la pushbar se anclara en la mangueta pero poco a poco se desechó la idea y se propuso ponerla en la unión del triángulo inferior. Las razones:

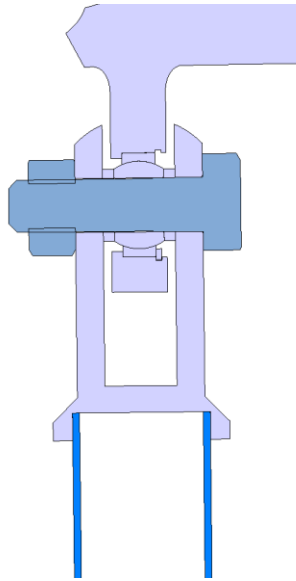
- Espacio muy limitado en la mangueta para su anclaje y reserva de espacio para movimientos.
- Habría que dotar a la mangueta de una rigidez extra con mucho aporte de material.
- Influencia nula en el par generado por la dirección.

La fijación en la unión del triángulo se ubicó encima de uno de los tubos para poder eliminar material entre medias y lo más cerca posible a la mangueta para disminuir al máximo el par que se generase en este anclaje.



2.58

**Figura 74 Anclaje inferior de la pushbar**



2.17

**Figura 75 Porta rótulas inferior de la pushbar**

En este caso, el porta rótulas se compone de dos orejetas que serán las que soporten las fuerzas del conjunto tornillo-tuerca y alberguen en la parte interior la rótula aprisionada por los casquillos.

Se eligió esta configuración porque en la unión del triángulo no había espacio posible para poner dos orejetas para un porta rótulas convencional que se posicionara entre medias de dichas orejetas. En este caso se pueden emplear casquillos más pequeños y compactar más el diseño porque la pushbar en su movimiento apenas se sale del plano perpendicular al tornillo que pasa por el centro de la rótula.

### 5.4.5 Antiroll:

El antiroll es un sistema de aporte de rigidez extra que conecta la dinámica de ambas ruedas para mejorar sustancialmente la dinámica del coche completo.

Es uno de los sistemas que probablemente más problemas ha supuesto debido a las reservas de espacio y las limitadas zonas para su anclaje.

Desde el comienzo ha sido el sistema que más ha variado su concepción. En los años previos de desarrollo del coche se llegaba a decir incluso que la barra antiroll tendría que ir por fuera del carenado, como va en muchos de los coches que participan en esta competición, porque no había sitio donde instalarla.

Muchos equipos optan por una solución en la que sitúan también tanto el conjunto muelle-amortiguador como la bieleta fuera del carenado. Esto tiene un carácter práctico evidente porque a la hora de realizar reglajes en función de cada prueba no es necesario que se desmonte el carenado para manipular la suspensión. Sin embargo, situar el máximo posible de elementos dentro del carenado favorece mucho la aerodinámica del coche y confiere una elegancia y estética superior.



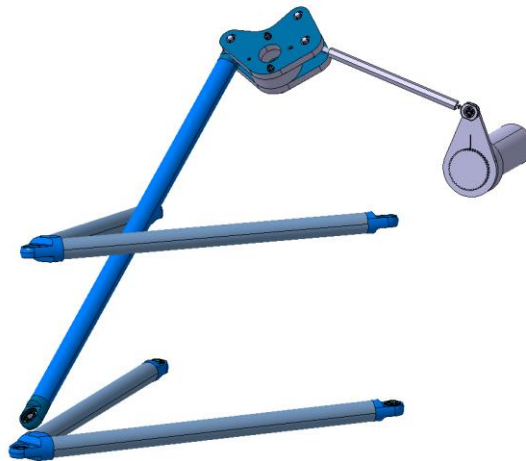
Figura 76 Vehículo de la Formula SAE con los sistemas de suspensión fuera del carenado

La primera posición que se pensó fue anclarla a la primera barra horizontal del chasis según la vista del piloto. De esta forma el piloto tiene más espacio para las rodillas dentro del habitáculo puesto que cerca de esta barra del chasis el piloto no requiere grandes espacios.



Figura 77 Localización inicial del antiroll

Con el tiempo, a la vez que avanzaba el diseño de la dirección, el antiroll se quedaba sin espacio para atravesar de un lado del chasis al otro porque en medio se situaría el anclaje de la barra de dirección. Otra vez hubo que reubicar la barra y la única solución que quedaba era anclarla a la siguiente barra horizontal del chasis. Nunca se contempló elaborar un diseño para anclar el sistema en una barra longitudinal del chasis porque se buscaba que este anclaje quedara cerca de un punto triple de soldadura. Estos puntos aguantan mejor los esfuerzos de deformación y hacen que nuestros cálculos de modelado se cumplan de una forma más parecida a la realidad.

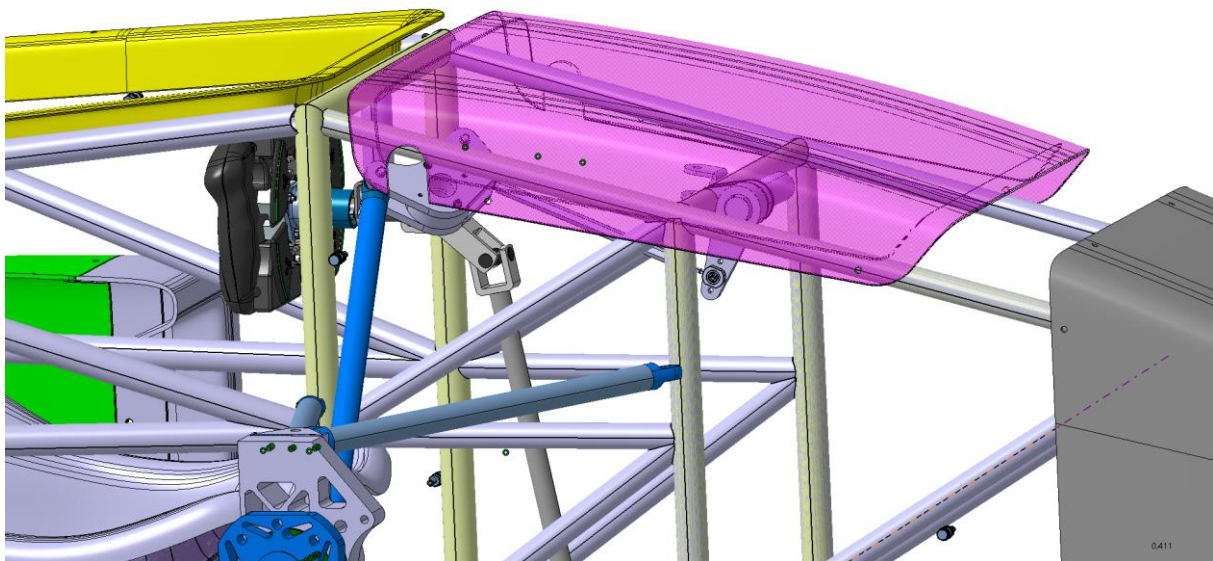


0.33

**Figura 78 Cambio de localización de la pushbar hacia una zona más adelantada**

Este diseño ya no presentaba problemas de interferencia y además ayuda a generar un mejor balance de pesos en el coche al desplazarse a una posición más cercana al eje delantero.

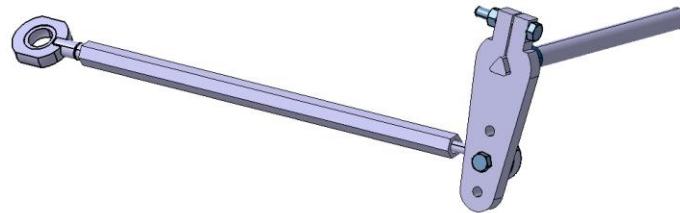
El siguiente paso en el diseño tuvo que ser el invertir la posición del brazo del antiroll y el propio antiroll. Situada el antiroll en la zona inferior el piloto no tendría sitio para el paso de las rodillas.



**Figura 79 Limitaciones de espacio para el antiroll**

Aun así, el anclaje se siguió desplazando hacia los extremos del coche aumentando la longitud de la barra para cumplir las normas de espacio para las piernas del piloto y acercarse más a un punto triple de soldadura.

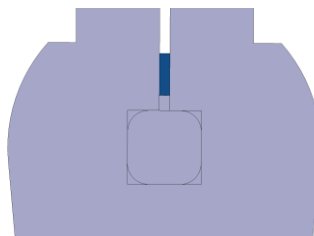
Una vez situada de una forma definitiva, se procede al diseño en detalle de todas las piezas junto con el anclaje.



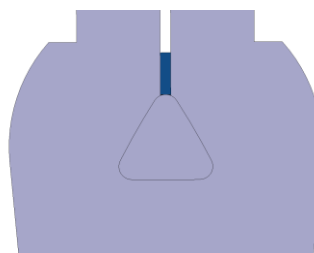
**Figura 80 Diseño definitivo del sistema antiroll**

El brazo o link del antiroll se compone de una varilla con agujeros roscados para la inserción de dos rótulas comerciales con referencia SAL 8 C y SAKB 5 F. Estas rótulas se unen tanto a la bieleta como a la orejeta y tienen unos ángulos de giro máximos de  $15^\circ$  y  $13^\circ$  respectivamente. A la hora de posicionar el antiroll ha sido complicado tener menos de  $15^\circ$  de ángulo entre el plano de la bieleta y el link, además de cumplir con unas longitudes especificadas por el equipo de modelado para la longitud de la orejeta.

La orejeta es la encargada de transformar el movimiento lineal del brazo en un movimiento rotacional puro en la barra. La unión barra-orejeta se pensó en un comienzo como un estriado. Finalmente desechamos la idea por lo complicado que era la fabricación de estriados estándar. Se pensó, por simplicidad de fabricación, hacer un agujero cuadrado en la orejeta y cuatro caras planas en la barra. Una vez asumido que habría que emplear una fresadora para hacer el agujero cuadrado, se investigaron mejores geometrías para la transmisión eficiente del par. Se diseñó finalmente una especie de triángulo sin caras planas y bordes redondeados que transmiten mejor la carga hacia la barra.

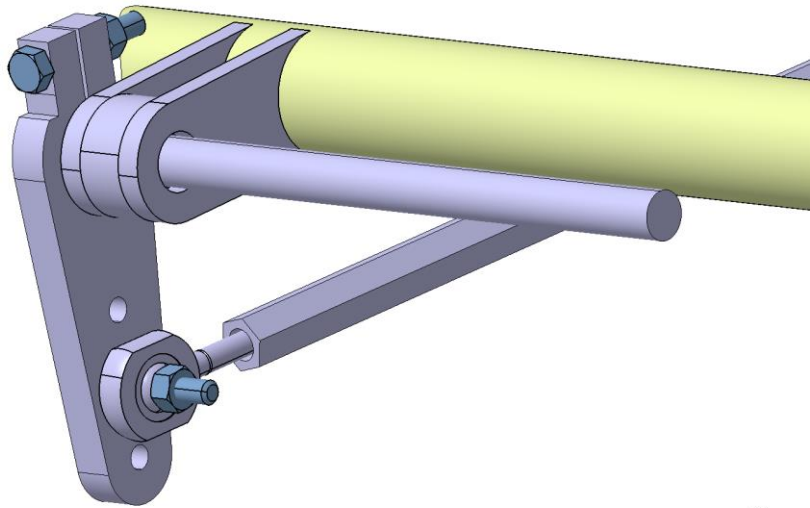


**Figura 81 Unión cuadrada de la barra antiroll con la orejeta**



**Figura 82 Unión de triángulo redondeado de la barra antiroll con la orejeta**

La unión final entre barra y orejeta se hace con una fuerza de compresión ejercida por la tuerca y el tornillo.



2.02

**Figura 83 Localización y anclaje del sistema antiroll**

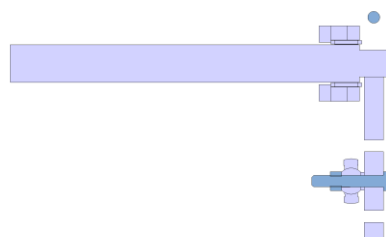
La orejeta tiene dos agujeros más para poder realizar reglajes que consistan en cambiar la rigidez que la barra aporte a la suspensión. En principio todos los cálculos dinámicos se hacen con la posición intermedia, pero puede hacerse más rígida anclando en el agujero superior o más suave si se ancla al agujero inferior.

El anclaje de antiroll al chasis se realiza a través de tres elementos soldados entre sí y a su vez, soldado al chasis. Dos de estos elementos serán dos placas con un espesor de mínimo 5mm por exigencias de la normativa, que se soldarán a su vez a la barra transversal del chasis.

En los primeros desarrollos se concebía este sistema con un rodamiento de agujas en el interior del anclaje para disminuir el rozamiento finalmente se desestimó por la poca influencia que tiene el rozamiento de la barra en los cálculos generales. Finalmente se decidió que un casquillo de plástico cumpliría con la funcionalidad de un rodamiento. De esta forma el anclaje es mucho más compacto, ligero y barato.



**Figura 84 Antiroll con casquillo**



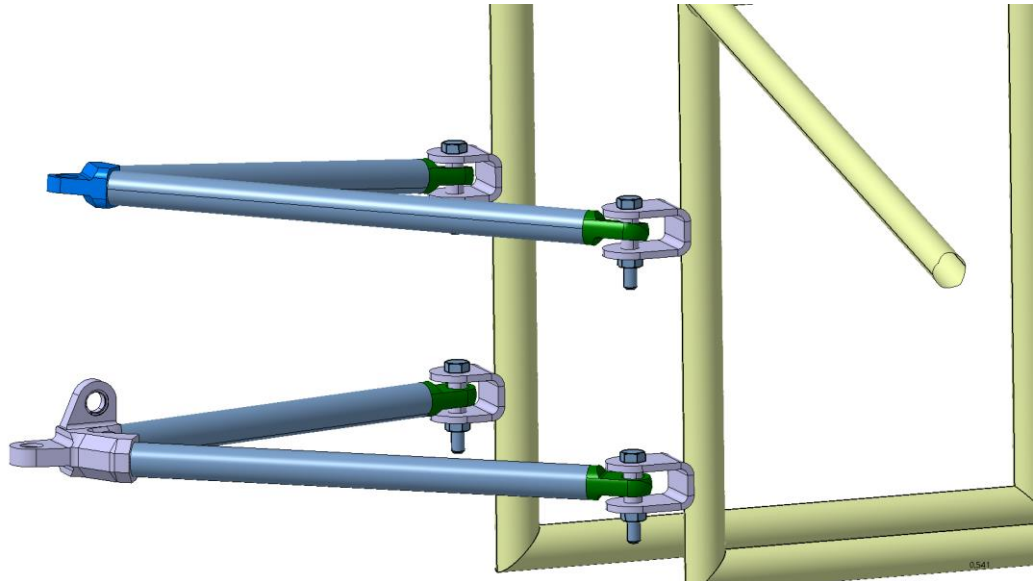
**Figura 85 Antiroll con rodamiento de agujas**



El diámetro de la barra ha estado en constante cambio. Finalmente se decidió que sería una barra de 10 mm (tamaño comercial) y en caso de necesitar aumentar o disminuir la rigidez se haría en función de otros parámetros como las posiciones o las longitudes de los distintos elementos involucrados.

## Anclajes:

A parte del anclaje del antiroll también ha sido necesario diseñar cuatro puntos de fijación para los dos triángulos, otro para la bieleta y otro para el conjunto muelle-amortiguador.

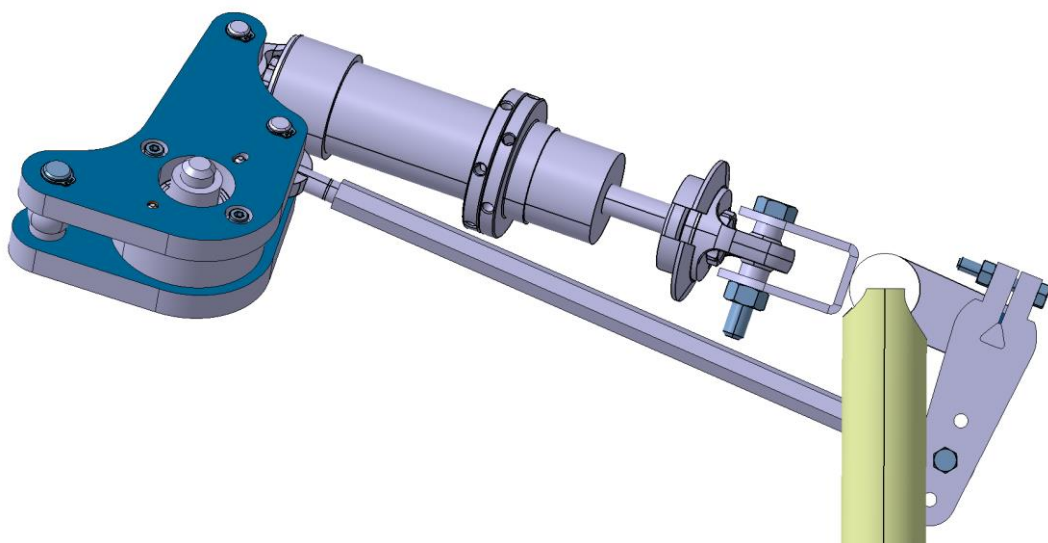


**Figura 86 Anclajes de los triángulos**

Para los puntos de anclaje de los triángulos al chasis había que tomar como elementos de partida los extremos de las barras de los triángulos y la posición de los tubos del chasis. Por simplicidad en la fabricación se ha diseñado un anclaje hecho a partir de chapa doblada con un agujero para el paso de un tornillo M10. La unión se realizará mediante un cordón de soldadura.

A primera vista puede parecer que la soldadura entre una cara plana y una curva no dota de una resistencia suficiente al sistema pues el contacto que se genera entre ambos es sólo una línea. Gracias a los cálculos y el consejo de profesionales expertos en soldadura se determinó que era un sistema óptimo tanto en prestaciones como en simplicidad y coste.

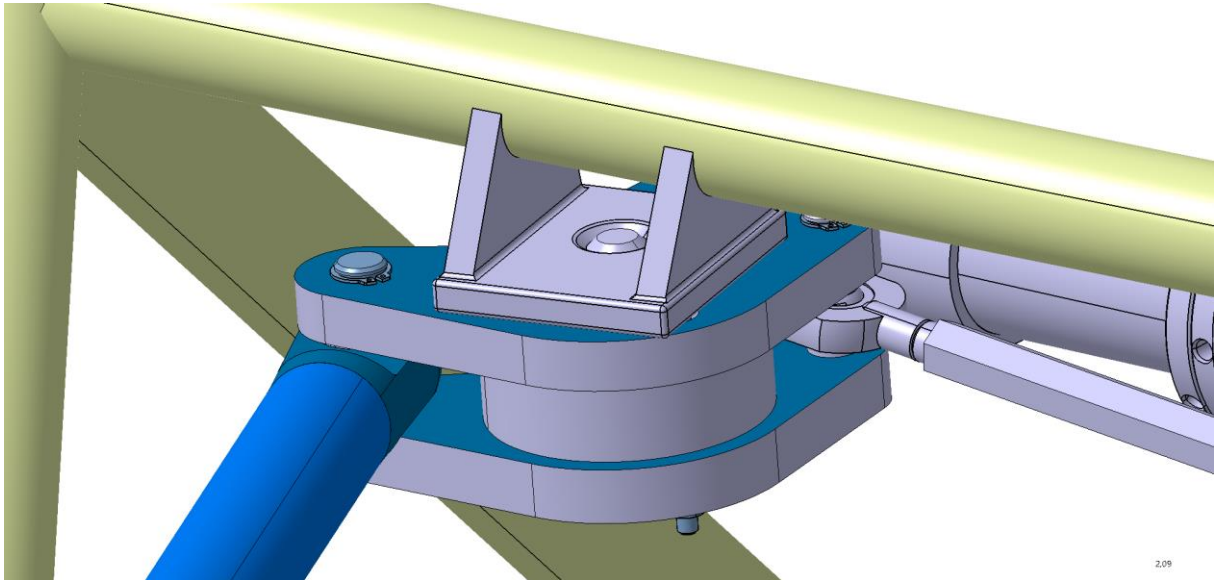
El siguiente punto de anclaje, por semejanza, es el del conjunto muelle-amortiguador.



**Figura 87 Anclaje del conjunto muelle-amortiguador**

Consiste en otra chapa doblada con un taladro pasante para un tornillo M8. Se diseña el recorrido del amortiguador y la orientación de la chapa en dirección al centro del tubo del chasis para tener un momento nulo en el soporte.

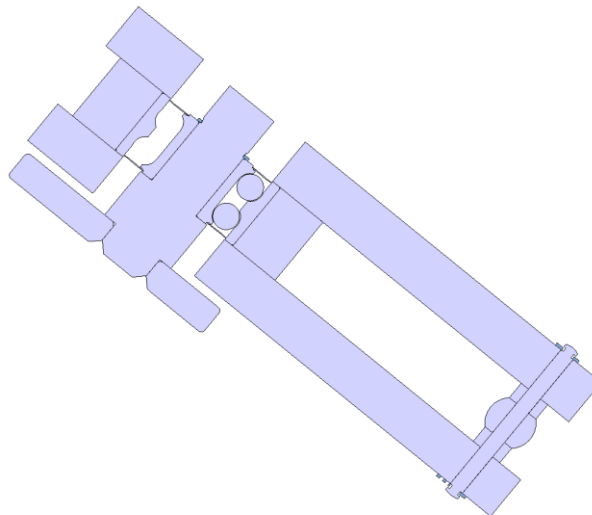
El último soporte es el encargado de anclar la bieleta al chasis y asegurar la posición de su eje. La precisión en la colocación de este soporte tiene una importancia vital porque determina el plano en el que van a desarrollarse los movimientos de la bieleta, amortiguador y extremo superior del brazo del antiroll.



**Figura 88 Anclaje de la bieleta**

En un principio se concibió como una pieza mecosoldada pero más tarde se decidió que sería una pieza de mecanizado por el grado de precisión que puede alcanzarse por ambos métodos. El eje de la bieleta sí que se soldará a la placa del soporte porque existe una gran precisión en el posicionamiento de agujeros-ejes.

El funcionamiento de la bieleta puede comprenderse en su totalidad en el siguiente corte:



**Figura 89 Funcionamiento de la bieleta junto con su anclaje**

El eje de la bieleta se introduce dentro de la placa del soporte hasta apoyar en ella y se aplica material de soldadura en los chaflanes reservados para tal propósito.

En el eje se introduce la bieleta hasta que la pista interior del rodamiento toque el resalte del eje. A continuación se le impide el desplazamiento axial por medio de un circlip para que no se salga. La cara exterior del rodamiento está aprisionada por la placa superior, inferior y el casquillo.

Cuando más corto sea el eje de la bieleta mejor resistirá los esfuerzos a flexión. Por ello se ha dejado una distancia de 2 mm entre la placa superior y el soporte. Para poder conseguir esta distancia tuvieron que enterrarse los tornillos en la placa, como ya se explicó en el desarrollo del diseño de la bieleta.

## 6 Conclusiones

### 6.1 Resumen de resultados

El resultado que se ha obtenido de este trabajo es el diseño de una suspensión delantera para un vehículo de competición Formula SAE. Este diseño cumple con todas las normativas exigidas y ha alcanzado los objetivos de diseño que nos planteamos hace ya casi un año.

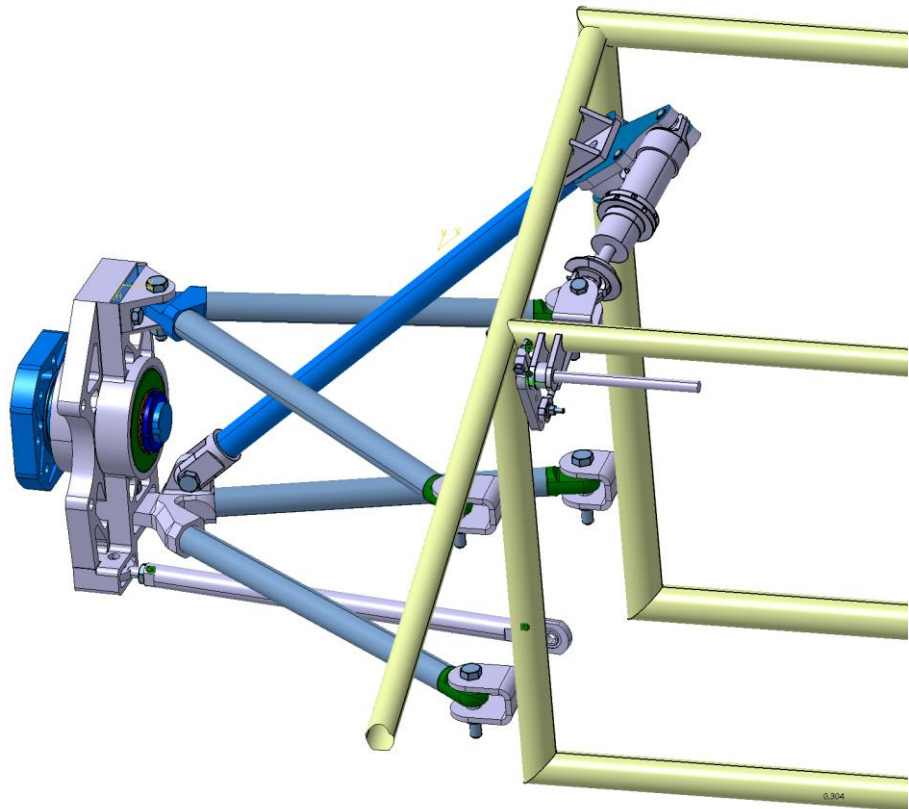
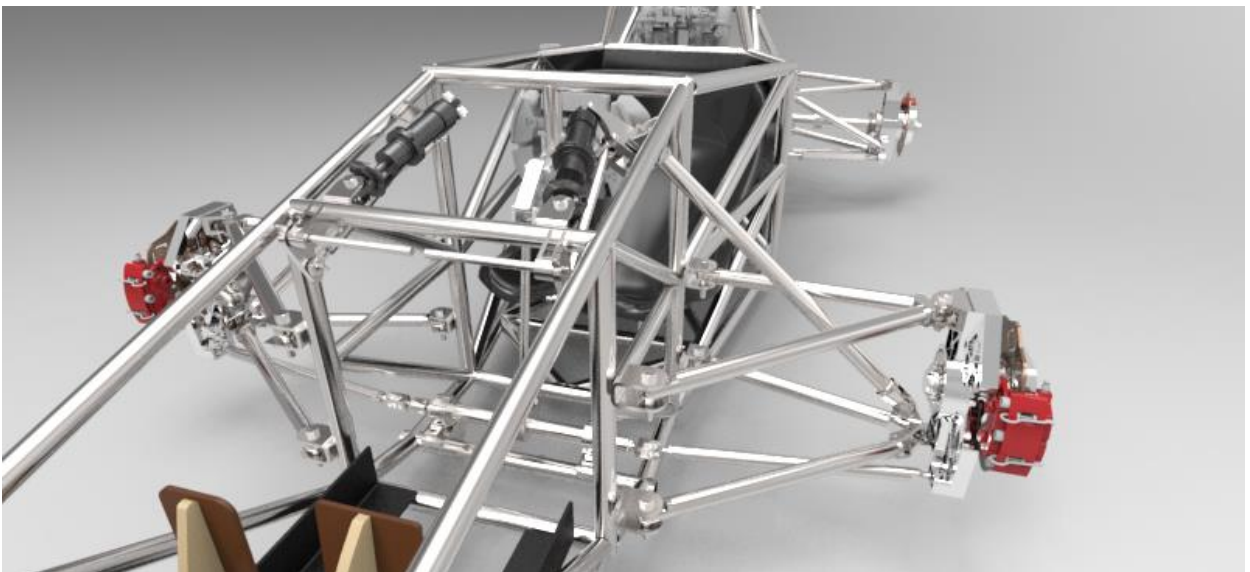
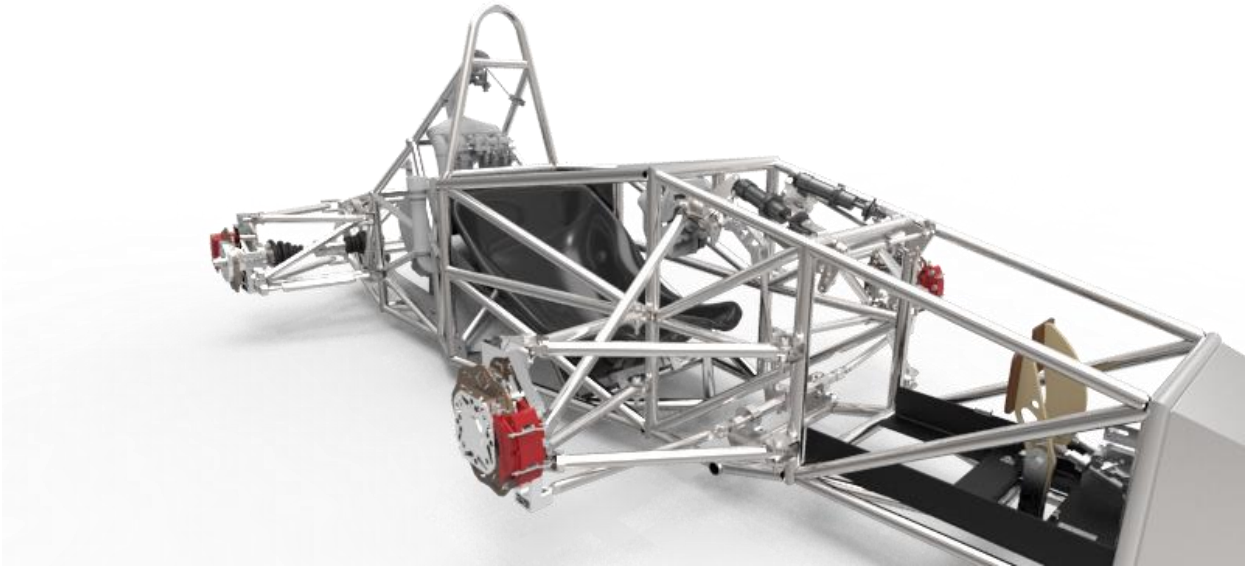
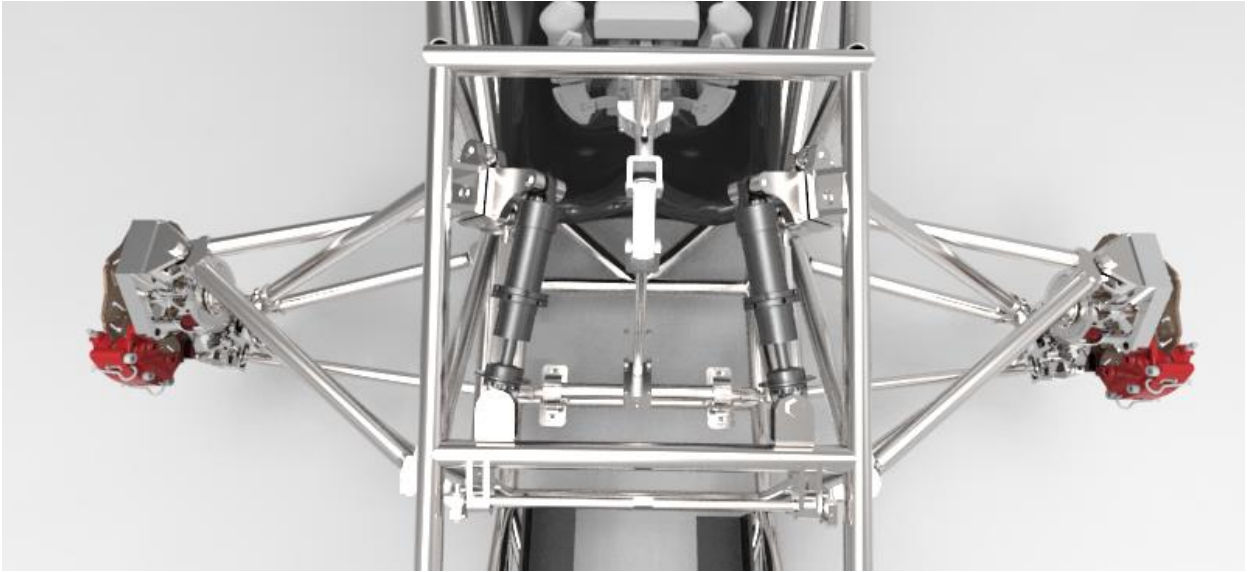


Figura 90 Diseño completo de la suspensión delantera derecha

Se ha conseguido realizar el diseño de una suspensión compacta, con todos los elementos dentro del carenado pero respetando los espacios para las piernas del piloto. Todos los elementos son fabricables en taller y se ha comprobado que no existen interferencias a lo largo de todo el recorrido del movimiento.

Se han optimizado todos los elementos para obtener un peso lo más bajo posible y posteriormente se han calculado para certificar que estamos por debajo de los límites de deformación plástica y por supuesto, de los límites de rotura.



## 6.2 Aportaciones

Este trabajo va a servir como guía a las siguientes generaciones de estudiantes para poder diseñar una suspensión desde el comienzo, o en caso de que quieran mejorar lo que ya hay, sepan por qué se optó por esta solución.

Ser la primera generación de la UVA que pretende llevar a cabo el diseño de un monoplaza de la Formula SAE conlleva un extra de motivación e ilusión. No obstante, partir de cero y ser los primeros que emprendemos este camino conlleva también dificultades extra como el no tener nada de información. El próximo vehículo contará con toda una bibliografía sobre cómo se diseñaron todos los sistemas del vehículo, qué salió bien, qué salió peor y qué podría mejorarse.

Este trabajo también podría ser un ejemplo de cómo llevar a cabo el diseño de cualquier sistema bajo una metodología específica de Catia V5. Existe una diferencia entre saber para qué sirven los botones de este programa y realmente saber usar el propio programa. En los cursos tanto de iniciación como de profundización de este programa se enseña a usar los comandos, pero nadie enseña a diseñar con metodologías esquemáticas y ordenadas. Este trabajo podría servir también para aquellos que quieran entender las pautas de diseño a través de este Catia V5

## 6.3 Sugerencias para trabajos futuros

El trabajo de diseño de esta suspensión ha concluido pero todavía queda mucho trabajo por hacer. Hay que hacer la fabricación y el montaje de la forma más precisa posible para que los resultados tanto del trabajo de modelado como de diseño se reflejen finalmente en la dinámica del vehículo.

Para realizar un montaje de la suspensión preciso y lo más parecido al 3D posible sería conveniente el diseño de un útil de posicionamiento para los cuatro puntos de anclaje al chasis. Se trata de una plataforma con brazos y barras móviles sobre los que sería muy fácil y preciso realizar mediciones para instalar las soldaduras de los anclajes en la posición correcta.

Para trabajos incluso posteriores a la fabricación de esta suspensión, personalmente me gustaría algún día poder diseñar una suspensión pull-road y poder comparar los resultados de ambas suspensiones en las dos competiciones.

## 7 Bibliografía

1. Gillespie TD. Fundamentals of Vehicle Dynamics SAE; 1992.
2. Isasi L. Neumáticos: Real Federación Española de Automovilismo; 2012.
3. Crolla DA. Automotive Engineering. Powertrain, Chassis System and Vehicle Body. 2009.
4. Stockel CJaMT. Auto Suspension And Steering: The Goodheart-Willcox Company, Inc.; 2004.
5. Milliken WFMaDL. Race Car Vehicle Dynamics: SAE International Inc.; 1995.
6. Ball RSaJK. Automotive Engineering Fundamentals2004.
7. Steering And Suspension Systems Study Guide: Melior, Inc.; 2004.
8. Wikipedia Cd. Steering. Wikipedia, La Enciclopedia Libre; [13 Nov 2013]; Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Steering>.
9. Arias-Paz. Manual de Automóviles. 56º ed: CIE Dossat; 2008.
10. Jazar RN. Vehicle Dynamics. Theory and Applications: Springer; 2008.
11. Duysinx P. Introduction to Vehicle Dynamics. University of Liege; 2011.
12. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control. Springer; 2011.
13. Neumáticos Universidad de Navarra.
14. Neumáticos: Universidad de Navarra.
15. Maxwell TT. Steady State Cornering: Texas Tech University; 2006.
16. Pacejka HB. Tyre and Vehicle Dynamics.